



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica

**SIMULACIÓN DE PROPAGACIÓN DE UN
INCENDIO FORESTAL MEDIANTE
MODELACIÓN NUMÉRICA (WRF-FIRE) CON
DATOS DE COMBUSTIBLES CREADOS CON
TELEDETECCIÓN (LANDSAT 8 Y MODIS).
APLICACIÓN AL INCENDIO EN LA REGIÓN
DEL MAULE (CHILE) ENTRE EL 21 Y 26 DE
ENERO DEL 2017.**

POR

FERNANDA ROCÍO LÓPEZ POZO.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Geofísico.

Profesor Guía: Ivo Fustos Toribio.

Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de la Frontera.

Profesor Co-Guía: Rodrigo Abarca Del Rio.

Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

Marzo, 2019

CONCEPCIÓN, CHILE

©2019 FERNANDA ROCÍO LÓPEZ POZO.

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



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica

**SIMULACIÓN DE PROPAGACIÓN DE UN
INCENDIO FORESTAL MEDIANTE
MODELACIÓN NUMÉRICA (WRF-FIRE) CON
DATOS DE COMBUSTIBLES CREADOS CON
TELEDETECCIÓN (LANDSAT 8 Y MODIS).
APLICACIÓN AL INCENDIO EN LA REGIÓN
DEL MAULE (CHILE) ENTRE EL 21 Y 26 DE
ENERO DEL 2017.**

POR

FERNANDA ROCÍO LÓPEZ POZO.

Profesor Guía: Ivo Fustos Toribio (O.C., UFRO).
Profesor Co-Guía: Rodrigo Abarca Del Rio (DGEO, UdeC).
Comisión Evaluadora: Juan Inzunza Bustos (DGEO, UdeC).
Martín Jacques Coper (DGEO, UdeC).

**Marzo, 2019
CONCEPCIÓN, CHILE**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Danae y Claudio; a mis hermanos, Joaquín y Sebastián; y a Jeriberth que han sido parte fundamental de proceso universitario en Concepción, pues siempre fueron mi gran apoyo y motivación, y cada vez que los necesite estuvieron conmigo.

Quisiera agradecer al profesor Dr. Ivo Fustos por haberme recibido en el departamento de Ingeniería en Obras Civiles (Universidad de la Frontera), y haberme guiado durante gran parte de esta tesis. Quisiera también agradecer al profesor Dr. Rodrigo Abarca, co-guía de este trabajo, que me ha apoyado y me ha entregado grandes oportunidades para continuar perfeccionándome. Quisiera luego agradecer a los docentes del Departamento de Geofísica por darme las herramientas y conocimientos que me han permitido el desarrollo de este trabajo de tesis, entre otras cosas.

Por último, a mis amigos y compañeros con los que he compartido esta gran experiencia.

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Definición de incendio forestal	1
1.2. Herramientas de pronóstico de propagación de incendios forestales	4
1.3. Eventos de incendios a nivel internacional.	5
1.3.1. Harmanli, Bulgaria (14.08.2009)	5
1.3.2. Meadow Creek del estado de Colorado, EEUU (26.06.2010)	6
1.4. Eventos de incendios en Chile	7
1.4.1. La Rufina (02.01.1999)	8
1.4.2. Incendios de Pichiqueime (29.12.2011)	10
1.4.3. Región del Maule (21.01.2017)	13
1.5. Problema de incendios forestales y desafíos desde la geofísica	14
1.6. Necesidad de un pronóstico de propagación de incendios forestales en Chile	16
1.7. Propagación de incendios mediante modelación numérica	20
1.7.1. Simulación de un incendio en Harmanli, Bulgaria (14.08.2009).	20
1.7.2. Simulación de un incendio en Meadow Creek del estado de Colorado, EEUU (26.06.2010)	23
1.8. Modelación numérica de incendios forestales en Chile	25
2. Hipótesis y Objetivos	27
2.1. Hipótesis	27
2.2. Objetivos	27
3. Marco Teórico	28
3.1. WRF-Fire	28
3.2. Datos Necesarios para usar WRF-Fire	30
3.3. 13 Modelos de combustibles de Anderson	30
3.4. Opciones físicas para WRF	33
3.5. Evaluación de representatividad de la simulación	35
4. Metodología	38
4.1. Creación y obtención de archivos	38
4.1.1. Archivos para la simulación	38
4.1.2. Archivos de comparación	40
4.2. Pre-procesamiento	42
4.2.1. Archivos para la simulación.	42
4.2.2. Archivos de comparación	46
4.3. Simulación en WRF-Fire	50
4.4. Post-procesamiento	51
5. Resultados	53
5.1. Área Quemada.	53
5.2. Estaciones Meteorológicas	57
6. Análisis y Discusión	63

7. Conclusiones	66
8. Anexos	68
8.1. Anexo A: namelist.wps	68
8.2. Anexo B: namelist.input	70
8.3. Anexo C: namelist.fire	73
8.4. Anexo D: Valor_Unico14.m	75
8.5. Anexo E: anagde_fire_wrfinput.m	75
8.6. Anexo F: comparacion_area.m	84
8.7. Anexo G: metodo_por_dicotomia.m	88
8.8. Anexo H: AnalisisEstacionesMeteorologicas.m	92
8.9. Anexo I: CampoDeViento.m	99
9. Referencias	105

Índice de tablas

1.	Registro de cantidad y área afectada por los incendios forestales en Bulgaria. [Fuente: JRC-IES, 2010].	6
2.	Estados de Estados Unidos (EEUU) con mayores cantidades y porcentajes de hogares con riesgo alto o extremo a ser afectados por incendios forestales. [Fuente: NOAA, 2017-1].	7
3.	Mayores incendios forestales en Chile al año 2018. [Fuentes: Haltenhoff, 2010; Consultora Biobio Sur Ltda, 2017; CONAF, 2017, 2018; ELEVA CONSULTORES LIMITADA 2015].	8
4.	Porcentajes de severidad producto del incendio La Rufina referente a la figura 5. [Fuente: Vidal et al., 2017].	10
5.	Descripción de los datos satelitales utilizadas para realizar el análisis de la severidad de los daños provocados por los incendios forestales en Chile en enero y febrero año 2017 [CONAF, 2017-3].	13
6.	Áreas por grados de severidad Baja, Media baja, Media alta y Alta provocados por los incendios en el verano del 2017 para la región del Maule. [CONAF, 2017-3].	14
7.	Beneficios que provee un ecosistema sano. [Fuente: MINAM, 2017].	16
8.	Cantidades y porcentajes de incendios forestales productos de las distintas causas de estos en el periodo 2003-2017, especificando las cantidades en los años 2007, 2012 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].	17
9.	Variables resultantes de la ejecución con WRF-FIRE.	28
10.	Descripción de los 13 modelos de combustibles para comportamiento de un incendio de Anderson [1982].	31
11.	Características de la carga de combustible de los 13 modelos de combustibles de Anderson [1982].	32
12.	Características de la propagación de un incendio en cada uno de los 13 modelos de combustibles de Anderson [1982].	33
13.	Tabla resumen de los resultados del método por dicotomía. [Fuente: CAWCR, 2017].	36
14.	Descripción de variables que se pueden calcular por el modelo por dicotomía, donde se especifica que respuesta responde, su cálculo, el rango de valores que puede tener cada variable y su valor óptimo. [Fuente: CAWCR, 2017].	37
15.	Características de los datos FNL descargados para realizar la simulación en WRF-Fire. [UCAR, 2017]	39
16.	Características de los datos SRTM1. [Fuente: USGS, 2017-1].	39
17.	Datos SRTM Correspondientes a la zona de estudios. [USGS, 2017-3]	40
18.	Descripción de las bandas del Landsat 8 en longitud de onda y resolución espacial. (*) Las bandas TIRS se capta con resolución de 100 m pero se remuestrea a 30m. [Fuente: Franco, 2017].	40
19.	Estaciones y sus correspondientes datos meteorológicos disponibles y descargados (marcados con X) desde la página del Agromet (http://agromet.inia.cl/estaciones.php#).	42

20.	Composición de Bandas para el Landsat 8. [Franco, 2017 & Landsat viewer, 2017].	44
21.	Valores de la grilla del archivo de datos de Combustibles para comportamientos de incendios de Anderson. [Fuente: Landfire, 2017].	45
22.	Porcentajes de los tipos de combustibles obtenido en el archivo de combustibles creado (figura 28).	46
23.	Descripción de valores que posee el producto MOD14A1.06 y que valores toma en el archivo de comparación (0 sin incendio y 1 con incendio). [Fuente: USGS, 2017-1].	47
24.	Características de la simulación del incendio del 21 de enero del 2017 en la región del Maule.	51
25.	Características de las pruebas 08, 09, 10, 11 y 12 y sus resultados en área afectada simulada comparadas con el área real quemado.	53
26.	Resultados de la correlación entre los resultados de las estaciones virtuales y los datos reales para las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento.	58
27.	Promedio y variación estandar de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento de los resultados de las estaciones virtuales y los datos reales.	59

Índice de figuras

1.	Material particulado del tipo MP10 en la estación Curicó en Curicó, VII región. [Fuente: SINCA, 2017].	3
2.	Material particulado del tipo MP2.5 en la estación Curicó en Curicó, VII región. [Fuente:SINCA, 2017].	3
3.	Registro de cantidad de incendios (línea roja) y área quemada (línea azul) anual en Estados Unidos en el periodo 2000-2016. Se muestran los promedios de cantidad de incendio (recta roja clara) y de área quemada (recta azul clara). [Fuente: III, 2017].	6
4.	Localización de la comuna de San Fernando en la región de O'Higgins, donde se produjo el incendio La Rufina. [Fuente: Rulamahue, 2017].	8
5.	Mapa de la severidad producto del incendio La Rufina, que posee 4 niveles de severidad, baja (amarillo), media (baja), media alta (rojo) y alta (morado). Los porcentajes estimados se encuentran en la tabla 4. [Fuente: Vidal et al., 2017].	9
6.	Ubicación de las comunas Ranquil, Florida y Quillón, las cuales fueron afectadas por el incendio Pichiqueime. [Fuente: Rulamahue, 2017].	11
7.	Daño producto del incendio de Pichiqueime, donde se muestra el área no afectada (Verde oscuro), con daño leve (verde claro), daño medio (amarillo), daño grave (rojo), plantaciones forestales (café) y el área deforestado con anterioridad al incendio (celeste). [Fuente: Perfetti-Bolaño et al., 2013].	12
8.	Área afectada por incendios forestales según el uso del suelo por cada región desde Coquimbo hasta la Araucanía, entre el 18 enero y el 5 febrero del 2017. [CONAF, 2017-3].	13
9.	Triángulo para la propagación del incendio, donde se considera que los elementos que determinan cómo se propaga un incendio son las condiciones atmosféricas. [Fuente: SEMADET, 2017].	15
10.	Media de la ocurrencia de incendios forestales mensual entre 1984 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].	19
11.	Media del daño provocado por incendios forestales por mes entre 1984 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].	19
12.	Ocurrencia de incendios forestales histórica entre 1984 y 2018. [Fuente: CONAF, 2018].	19
13.	Daño histórico provocado por incendios forestales entre 1984 y 2018. [Fuente: CONAF, 2018].	19
14.	Gráfico de Cantidad de incendios forestales anuales respecto a sus áreas quemadas [Fuente: CONAF, 2018].	20
15.	Dominio 1 (rectángulo azul) y dominio 2 (rectángulo verde) de la simulación en el mapa del lugar. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].	21
16.	Punto de ignición (recta roja). [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].	21
17.	Visualización de los datos de topografía a usar. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].	21
18.	Temperatura a 2m [C°] y campo de viento. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].	22

19.	Flujo de Calor desde el encendido [W/m^2] y vectores de viento. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].	23
20.	Visualización del dominio 1, 2 y 3 en el mapa. [Fuente: Breezley et al, 2010].	24
21.	En esta figura se encuentran en “a” los datos de Topografía del dominio 6 (más pequeño) y “b” representa los datos del tipo de combustible. [Fuente: Breezley et al, 2010].	24
22.	Comparación entre los datos de vientos medidos (puntos rojos) y los simulados (línea azul). [Fuente: Breezley et al, 2010].	25
23.	Resultados del área quemada con WRF-Fire simulación a 6 (línea negra), 12 (línea azul), 18 (línea verde) y 24 horas (línea gris), el punto de ignición (cruz roja) y datos reales del área afectada a las 24 horas (línea segmentada). [Fuente: Breezley et al, 2010].	25
24.	Esquema de la metodología que se lleva a cabo en este trabajo.	38
25.	Ubicación de las estaciones meteorológicas reales.	41
26.	Visualización del archivo de topografía en el área de simulación.	43
27.	Archivo de combustible con todas sus clases diferenciadas como se indica en la tabla 21.	46
28.	Archivo de combustible con solo los valores de combustibles y el valor 14.	46
29.	Área quemada real estimada por medio de datos MODIS, donde el color azul representa el área sin quemar y el amarillo es el área quemada.	47
30.	A, B, y C son aquellos archivos GeoTIFF de área quemada donde el color verde es área no quemada (valor 0) y el área roja corresponde al área quemada (valor 1). Tales archivos se posicionan como es indicado en D y es necesario modificarlos ya que hay áreas que “no quemadas” que debieran estar “quemadas” según se indica en E con aquella puntos violeta, que es el shape de focos de ignición detectados por VIIRS.	49
31.	Archivo GeoTIFF de área quemada real donde el color azul es área no quemada (valor 0) y el área amarilla corresponde al área quemada (valor 1).	50
32.	Gráficas de área afectada en los datos reales y las prueba 08, 09, 10, 11 y 12, donde lo amarillo corresponde a área quemada (1) y azul a área no quemada (0).	55
33.	Resultados del método por dicotomía, incluyendo una representación gráfica de los valores de A, B, C y D, aplicado a la comparación entre la prueba 08 y los datos reales al día 24 de enero del 2017 a las 00:00 horas.	56
34.	Resultados del método por dicotomía, incluyendo una representación gráfica de los valores de A, B, C y D, aplicado a la comparación entre la prueba 08 al día 24 de enero del 2017 (00:00 horas) y los datos reales al día 27 de enero del 2017 (00:00 horas).	57
35.	Gráficas de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento, para los datos reales (rojo), la prueba 08 (azul) y la prueba 10 (magenta) en la estación Chanco, Chanco.	60

36. Gráficas de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento para los resultados de la prueba 08 (azul), prueba 09 (verde), prueba 10 (magenta), prueba 11 (amarillo), prueba 12 (cyan) y reales (rojo) en la estación Sauzal, Cauquenes. 61
37. Comparación de distintos tiempos simulados, que corresponden al 21 (I: 06:00 hrs), 23 (II: 00:00 y III: 06:00 hrs) y 24 (IV: 06:00hrs) de enero del 2017. Aquí se relaciona el campo de vientos con la rapidez del viento (I-IV.a), área quemada (I-IV.b), flujo de calor (I-IV.c) y topografía (I-IV.d). . 62

RESUMEN

El combate contra incendios forestales en Chile es un tema habitual, debido a que entre la V y la IX región desde 1984 se han desarrollado más de 160 incendios con áreas afectadas mayores a 200 ha por región, y entre 7.959 y 76.367 incendios que afectaron a menos de 200 ha [CONAF, 2019]. Es por esta razón que es absolutamente necesario encontrar herramientas capaces de mejorar los planes de mitigación de incendios. Una opción es saber cómo se desarrollará la propagación de los incendios y así enfocar los trabajos en puntos estratégicos. Con este fin, es posible hacer uso de WRF-Fire, un módulo del modelo numérico de pronóstico del tiempo de mesoescala que simula un incendio y tiene la característica de considerar la retroalimentación incendio-atmósfera. Para hacer uso de este modelo son necesarios los datos atmosféricos, topográficos y de combustibles, dentro de los cuales los primeros dos son accesibles para Chile, mientras que el último no aun está implementado en Chile.

El trabajo consta de crear el archivo de combustible para la región del Maule para simular un incendio ocurrido en el año 2017. El archivo se realizó en base a los 13 combustibles de Anderson [1982] con una clasificación supervisada con datos satelitales Landsat 8. Luego se realizó una simulación indicando los puntos iniciales del incendio, y comparando los resultados con datos reales obtenidos desde de datos satelitales (MODIS y Landsat 8), así como de estaciones meteorológicas.

Los resultados indican que el archivo de combustible creado es un buen primer acercamiento para las simulaciones, aunque se requiere de mejoras al proceso propuesto, tales como visitas a terrenos, aumentar la resolución de los datos y mejorar el conjunto de opciones físicas propuestas.

1. Introducción

1.1. Definición de incendio forestal

Según la Corporación Nacional Forestal [CONAF, 2017-1] se define un incendio forestal como: “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 el fuego que quema árboles, matorrales y pastos. 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”.

Múltiples acciones pueden ser causantes de incendios forestales, las cuales se pueden dividir en dos grandes grupos, aquellas producto de la acción humana y las de acción natural. Por un lado, en las primeras causas se tienen casos como una mala ejecución de quema de vegetación, fogatas mal apagadas, arrojar colillas de cigarros, mala mantención de líneas eléctricas de alta tensión que provocan “chispas” que llegan a la vegetación seca y también se encuentran aquellos que son directamente intencionales. Por ejemplo, en México se estima que más del 90 % de los incendios forestales son a causa de la acción humana, ya sea intencional o accidental [Gobierno de México, 2017], lo cual nos hace responsable en gran parte del inicio de estos fenómenos. También el incendio de Huelva y Sevilla (Minas de Riotinto) en España, cual ignición el día 27 de julio del 2004 fue intencional, pudiendo ser controlado el día 03 de agosto de 2004 hasta ser apagado un día más tarde, afectando así a 29.876 hectáreas forestales y 79 hectáreas no forestales [Cubo et al., 2012]. Por último, también en España tuvo lugar un incendio forestal producto del descuido de fumadores, es decir, el incendio se inició debido a un cigarro encendido, iniciado el día 10 de agosto de 2004 que duró solo un día y afectó a 8 hectáreas forestales [Cubo et al., 2012].

Por otro lado, las segundas causas se pueden presentar por caída de rayos sobre árboles y al entrar en contacto los productos de una erupción volcánica con la vegetación, tales como lava y piroclastos. Un caso de incendios de este tipo, es el incendio en Meadow Creek (Colorado, EEUU) el día 26 de junio del 2010, iniciado por la caída de un rayo sobre un árbol (sección 1.3.2).

Al observar los distintos tipos de acciones que provocan la ignición, se puede decir que gran responsabilidad de un incendio forestal recae en los humanos, pues se encuentran más variedades causas que la misma naturaleza, además de ser acciones más frecuentes.

Además de los tipos de acciones que pueden desencadenar un incendio forestal se encuentran también las condiciones meteorológicas, pues como se ha señalado que condiciones de sequía, tales como altas temperatura y humedad meteorológicas bajas favorecen a un desarrollo de un incendio forestal [SENAMHI-Peru, 2018]. Además, como se verá en la sección 1.5, las condiciones meteorológicas más el terreno y el tipo combustible disponible determinan la rapidez con que se propaga el incendio, y en consecuencia, la dificultad para detenerlo.

Por otra parte, los incendios forestales tienen múltiples consecuencias en distintos ámbitos, tal como se señala a continuación. Primero, en la línea de pérdidas sociales se encuentran

las muertes de personas, las pérdidas de viviendas y otras construcciones, el incremento de enfermedades respiratorias, por aumento del material particulado. Por ejemplo, en el caso de los incendios del verano de Chile en el 2017, en Santa Olga (región del Maule) 860 casas se destruyeron por completo, además de colegios, liceos y otras edificaciones [Gobierno de Chile, 2017], sin dejar de mencionar que la CONAF [2019-2] desde 1970 a la fecha cuenta con 29 mártires, que han fallecido en diversos combates de incendios forestales, dentro de los cuales 4 fueron en los incendios forestales a nivel nacional del año 2017.

Segundo, en las pérdidas económicas se presenta el desempleo, que puede ser producto de la pérdida de fuentes de trabajo y escasez de recursos, ya sea de alimentos, útiles de aseo personal o materiales de trabajo, además del dinero invertido para solucionar los problemas que conlleva una catástrofe. Por ejemplo, en el mismo incendio del 2017 en Chile, la CONAF [2017-2] estimó un costo de alrededor de 242.833 millones de pesos por parte del estado de Chile. Este monto fue empleado principalmente en el mismo combate contra el incendio (39%), reconstrucción de viviendas (39%) y apoyo a sectores productivos (16%), pero así también se ocupó un pequeño porcentaje en medidas de recuperación forestal (4%). Además, la escasez se refleja en la pérdida de trabajo, que bien se puede ver reflejada en las pérdidas ocurridas en distintos sectores de la agronomía, tales como la ganadería, agricultura y apicultura. Por ejemplo, en el 2017 en la región del Maule, 2.048 agricultores fueron afectados, de los cuales 401 agricultores pertenecen a la comuna de San Javier; y por el lado apícola 19.978 colmenas fueron dañadas por los incendios, de los cuales 16.983 colmenas sobrevivieron, mientras que las 2995 colmenas restantes fueron totalmente irreuperables [INDAP, 2017]. En conclusión, los daños producto de los incendios forestales en estos sectores provocan a su vez pérdidas de fuentes de trabajo, por lo que la recuperación de todo el entorno necesita una gran inversión.

Tercero, las pérdidas de biodiversidad se presentan en la destrucción de bosques y de los suelos, lo que provoca a su vez las pérdidas de hábitats de animales y sus muertes, a pesar de que estas últimas pueden ser consecuencias de la destrucción de bosques o por el mismo incendio. Por ejemplo, en los incendios mencionados anteriormente se afectó más de 280 mil hectáreas solo en la región del Maule, siendo las comunas más afectadas Empedrado (91,50%), Constitución (51,70%), Hualañé (50,30%) y Vichuquén (31,00%). Es tan así que a nivel nacional por lo menos 185 especies de flora y fauna nativa fueron perjudicadas [Fuentes, 2017].

Por último, un incendio forestal puede provocar el aumento de contaminación, debido a la emisión de gases químicamente activos tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, óxido nítrico y material particulado. Incluso, en el periodo post-incendio la acción del fuego incrementa la actividad bacteriana, la cual provoca un incremento en la emisión de gases contaminantes [Castillo et al., 2003]. Un ejemplo de esto es el aumento en la contaminación que se puede visualizar en los gráficos de las figuras 1 y 2, donde la concentración de material particulado del tipo MP10 y MP2.5 aumenta considerablemente a fines de enero, que corresponde a los días de mayor intensidad de los incendios forestales en la región del Maule.

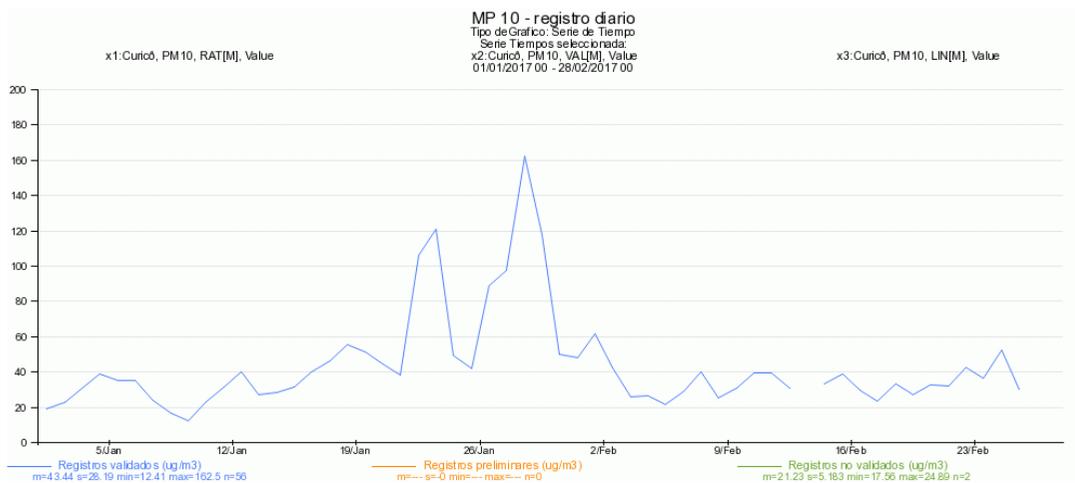


Figura 1: Material particulado del tipo MP10 en la estación Curicó en Curicó, VII región. [Fuente: SINCA, 2017].

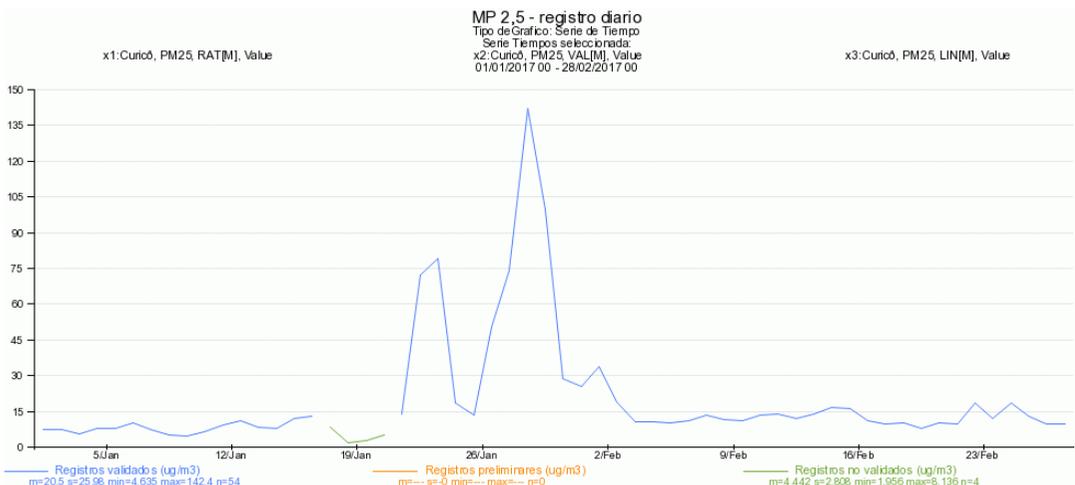


Figura 2: Material particulado del tipo MP2.5 en la estación Curicó en Curicó, VII región. [Fuente: SINCA, 2017].

Además de las consecuencias directas ya mencionadas, para llevar a cabo el control y mitigación de incendios forestales, se realiza una gran inversión de dinero, tanto por parte del gobierno, las empresas privadas y personas comunes, incluso puede ser necesario recurrir a la ayuda internacional.

Debido a las múltiples consecuencias que pueden ser generadas por los incendios forestales y con el objetivo de administrar de manera adecuada y eficiente los recursos, nace la necesidad de entender cómo se desarrollan estos fenómenos.

1.2. Herramientas de pronóstico de propagación de incendios forestales

Un método de pronóstico corresponde a un procedimiento que pretende representar de mejor manera un hecho a futuro, que en este caso se refiere a como se puede desarrollar un incendio forestal. Esta predicción se hace en base a las condiciones actuales de los factores que afectan a la propagación de un incendio.

Algunos de los métodos conocidos para estimar el desarrollo del comportamiento de incendios forestales son los siguientes:

1. Modelo logit:

Según Lee et al. [1999], el modelo Logit realiza un pronóstico diario de la existencia de un incendio en el área de estudios mediante un cálculo que depende de parámetros particulares de cada zona, los cuales dependen de la información de incendios forestales y características de las mismas zonas (β_0, \dots, β_i). Este modelo expresa el logaritmo de razón entre las probabilidades de existencia ($Y = 1$) o ausencia ($Y = 0$) de un incendio, tal como se expresa a continuación:

$$\ln \frac{P_i}{1 - P_i} = \beta_0 + \sum_{j=1}^{i-k} \beta_j x_{ij} \quad (1)$$

Donde:

P_i : Probabilidad de $Y=1$.

$1 - P_i$: Probabilidad de $Y=0$.

x_{ij} : Variables explicativas.

β_0, \dots, β_i : Parámetros a estimar.

2. Modelo “red neuronal backpropagation”:

Este modelo según Lee et al. [1999], permite imitar el procesamiento que existe en el cerebro humano, esto es realizando conexiones de una gran cantidad de elementos procesadores capaces analizar los datos entregados y así dar una respuesta respecto a la presencia de incendios forestales. Estos elementos procesadores tienen un orden jerárquico representados por niveles:

- Nivel de Entrada: Presenta los datos a la red.
- Uno o más niveles sin interacción con el exterior: Procesamiento de los datos.
- Nivel de Salida: Entrega las respuestas del modelamiento.

Este tipo de método se le denomina “procesos inteligentes”, por su capacidad de:

- Aprender en base a ejemplos.
- Extender el conocimiento ya adquirido a nuevos casos.
- Reconocer tendencias y patrones en los datos.

3. Modelo WRF-Fire:

Mandel et al. [2009] indica que WRF (Weather Research and Forecasting) es un sis-

tema de predicción numérica para realizar simulaciones de la atmósfera. WRF posee un módulo denominado WRF-Fire, el cual es capaz de realizar una simulación del comportamiento de un incendio forestal en un área determinado. Para esta simulación se requiere de datos de atmósfera, de topografía y de combustible basado en los 13 modelos de combustibles para la propagación de un incendio de Anderson (sección 3.3), además de las características iniciales del incendio, tales como la ubicación y hora de la ignición.

Este modelo, además de considerar los datos ya mencionados, realiza una retroalimentación entre incendio y la atmósfera, puesto que los dos se influyen mutuamente, pues el calor liberado por el incendio produce mayores corrientes de aire y estas corrientes intensifican el mismo incendio.

Una descripción más detallada de este modelo se realiza en la sección 3.1.

1.3. Eventos de incendios a nivel internacional.

A continuación se presentan dos casos de incendios que han ocurrido en Bulgaria como en Estados Unidos.

1.3.1. Harmanli, Bulgaria (14.08.2009)

Como muestra la tabla 1 dentro del decenio 1999-2009, la cantidad de incendios en Bulgaria ha sufrido alzas bastante grandes en dos años específicamente, en el 2000 y el 2007 con 1.710 y 1.479 incendios, que afectaron 57.406 y 42.999 hectáreas respectivamente, de las cuales se afectan principalmente suelos de uso forestal.

Así como se observa, los incendios abarcan una gran porción o totalmente del área forestal (2005-2009), y principalmente son producto de actividad humana. Pero también puede que no se detecte la causa, tal como durante el año 2000 donde las causas desconocidas fueron 1.307 de un total de 1.710 incendios. Esto se ha corregido en tiempo (en el 2009 solo se registraron 70 incendios de origen desconocidos de un total de 314), lo que implica mayor interés por estudiar estos eventos.

En el año de término del decenio tabulado en la tabla 1 se puede observar que los incendios afectaron sólo áreas forestales, quemando así un total de 2.271 hectáreas y los incendios forestales fueron principalmente iniciados por actividad humana (242 incendios). Por ejemplo, en las cercanías de Harmanli [Dobrinkova & Jordanov, 2010] el día 14 de agosto del 2009 se inició un incendio forestal de manera accidental (mala ejecución de un asado en lugar en un sector donde había presencia de pastos largos y arbustos) cerca de un bosque: La duración de este incendio fue de 3 días.

Año	Numero de incendios totales	Área quemada (ha)		Causa (número de incendios)		
		Total	Forestal	Humana	Natural	Desconocida
1999	320	8291	4198	84	9	227
2000	1710	57406	37431	385	18	1307
2001	825	20152	18463	187	19	619
2002	402	6513	5910	150	7	245
2003	452	5000	4284	281	9	162
2004	294	1137	881	172	5	117
2005	241	1456	1456	125	7	109
2006	393	3540	3540	190	9	194
2007	1479	42999	42999	1163	18	298
2008	582	5289	5289	482	8	92
2009	314	2271	2271	242	2	70
Promedio	637	14005	11520	315	10	313

Tabla 1: Registro de cantidad y área afectada por los incendios forestales en Bulgaria. [Fuente: JRC-IES, 2010].

1.3.2. Meadow Creek del estado de Colorado, EEUU (26.06.2010)

Como se muestra en la figura 3, en Estados Unidos los incendios forestales de manera anual desde el 2000 hasta el 2016 superan siempre los 30.000 incendios, con un promedio en este periodo de 77.951 incendios anuales, lo que ha provocado en promedio la quema de 6.612.363,18 hectáreas anuales.

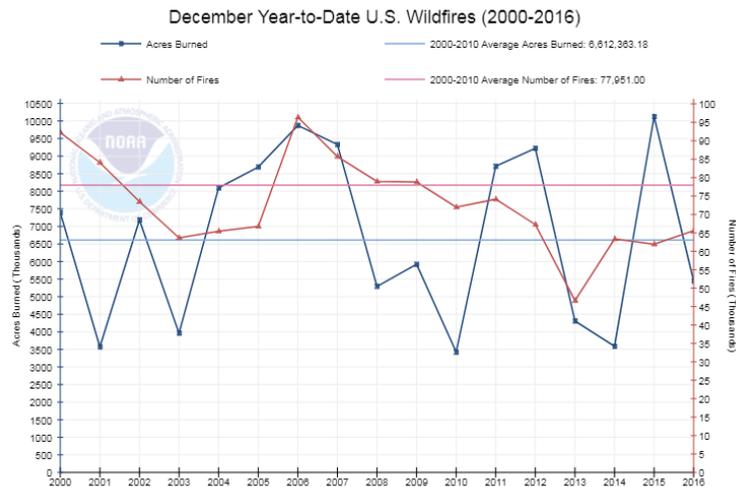


Figura 3: Registro de cantidad de incendios (línea roja) y área quemada (línea azul) anual en Estados Unidos en el periodo 2000-2016. Se muestran los promedios de cantidad de incendio (recta roja clara) y de área quemada (recta azul clara). [Fuente: III, 2017].

Al observar el cuadro 2, se tiene que el estado de Colorado se encuentra dentro de los primeros tres estados con más probabilidades de tener hogares con riesgo alto o extremo frente a incendios forestales, hablando tanto en cantidad (715.300 hogares) o porcentajes (17%).

Por Hogares		
Ranking	Estado	Hogares con un alto o extremo riesgo frente a incendios forestales
1	California	2.044.800
2	Texas	715.300
3	Colorado	366.200
4	Arizona	234.600
5	Idaho	171.200
Por Porcentaje de Hogares		
Ranking	Estado	Porcentajes de hogares con frente a incendios forestales
1	Montana	28 %
2	Idaho	26 %
3	Colorado	17 %
4	California	15 %
5	New Mexico	14 %

Tabla 2: Estados de Estados Unidos (EEUU) con mayores cantidades y porcentajes de hogares con riesgo alto o extremo a ser afectados por incendios forestales. [Fuente: NOAA, 2017-1].

Un incendio que cabe destacar del estado de Colorado es aquel producto de una caída de un rayo sobre un árbol, lo que se considera como un incendio por causa natural. Este incendio se inició el día 26 de junio del 2010 alrededor de las 15:00 hora local, quemando aproximadamente 6km^2 en un mes [beezley et al., 2010]. La mayor complicación de este incendio recae en que la topografía del área de estudio es bastante irregular, en el sentido de que es un sector montañoso, además de la gran cantidad de combustible disponible para el incendio, ya que es un sector boscoso.

1.4. Eventos de incendios en Chile

A nivel nacional han ocurrido eventos catastróficos relacionados a incendios forestales de gran importancia debido a su alto impacto y grandes áreas afectadas. Los mayores incendios forestales ocurridos en Chile se encuentran en la tabla 3, donde se señala por ejemplo que La Rufina ha sido el mayor incendio a la fecha afectando a 25.389,00 hectáreas; los incendios ocurridos en la región del Maule (2017), específicamente Las Maquinas y Las Cardillas; y el incendio de Pichiqueime (2012). Los incendios ya mencionados serán descritos a continuación.

Ranking	Incendio	Región	Años	Hectáreas quemadas [ha]
1	Las Maquinas	VII	2017	183.946
2	Nilahue Barahona	VI	2017	50.000
3	Las Cardillas	VII	2017	34.472
4	La Rufina	VI	1999	25.389
5	Pichiqueime	VIII	2011-12	24.896
6	Gran Guaitecas	XI	1998	16.760

Tabla 3: Mayores incendios forestales en Chile al año 2018. [Fuentes: Haltenhoff, 2010; Consultora Biobio Sur Ltda, 2017; CONAF, 2017, 2018; ELEVA CONSULTORES LIMITADA 2015].

1.4.1. La Rufina (02.01.1999)

El incendio forestal denominado “La Rufina”, ocurrió en la comuna de San Fernando, Región de O’Higgins (Figura 4), el cual es un sector precordillerano y tuvo una duración de 13 días, iniciando el día 02 de enero de 1999, alrededor de las 14.30 hora local, por causa de una fogata mal apagada.

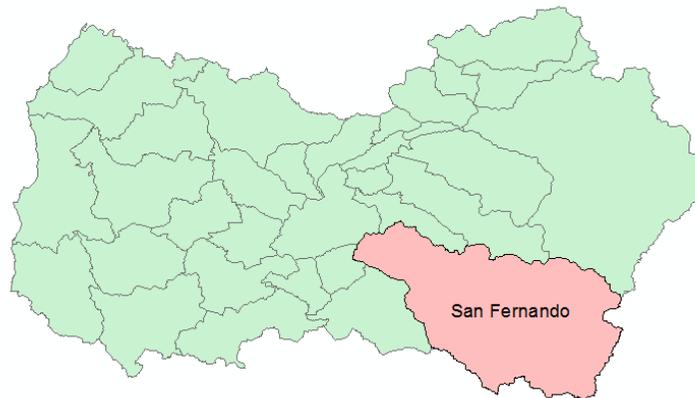


Figura 4: Localización de la comuna de San Fernando en la región de O’Higgins, donde se produjo el incendio La Rufina. [Fuente: Rulamahue, 2017].

Este incendio ha sido uno de los incendios de mayor magnitud de Chile, considerando que solo afectó superficie forestal y no urbano, con un total de 25.389,00 hectáreas, de las cuales 24.487,00 hectáreas corresponden a vegetación natural. A pesar de no afectar áreas urbanas, si tuvo pérdidas de al menos 14 viviendas, además de animales y cercos.

Vidal et al. [2017] estimó la severidad producto del incendio de La Rufina, donde la

severidad es una medida de los efectos físicos, químicos y biológicos de un incendio en un área determinado, lo cual fue estimado mediante teledetección. En la figura 5 se presentan resultados de 4 niveles de severidad; baja, media, media alta y alta. Estos resultados también se presentan de manera porcentual respecto al área dentro de la línea negra de la figura 5 en la tabla 4, donde se observa que 65.4 % del área posee algún tipo de severidad, del cual el 6.5 % del territorio posee la más alta severidad. Es decir, es la tierra que posee mayor daño y más difícil de recuperar, siendo el bosque nativo el que tarda más tiempo en recuperarse, y por lo tanto, tardará mayor tiempo en poder darle el uso que antes poseía, por ejemplo para la agricultura. Además, el 34,1 % del área posee severidad media y media alta, y un 24,8 % del área posee severidad baja.

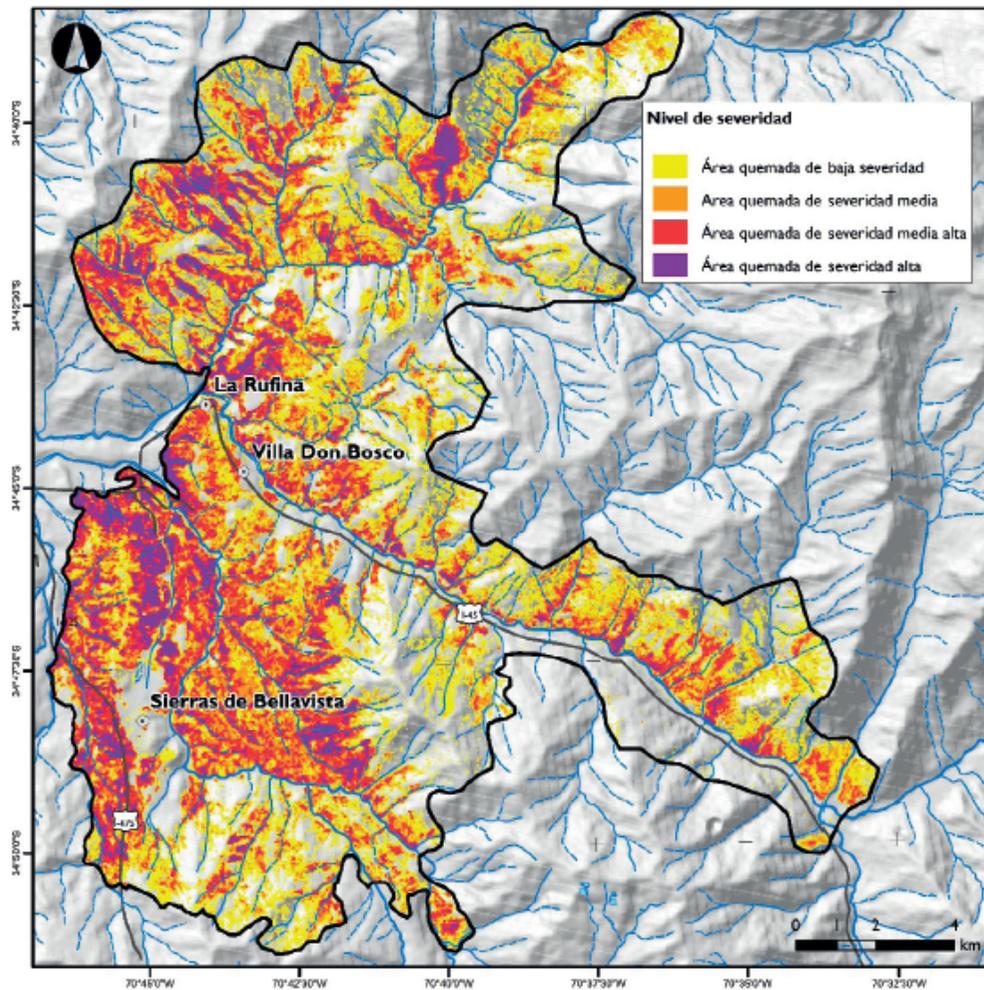


Figura 5: Mapa de la severidad producto del incendio La Rufina, que posee 4 niveles de severidad, baja (amarillo), media (naranja), media alta (rojo) y alta (morado). Los porcentajes estimados se encuentran en la tabla 4. [Fuente: Vidal et al., 2017].

Nivel de severidad	Superficie quemada (%)
No quemado	34,6
Severidad baja	24,8
Severidad media	19,3
Severidad media alta	14,8
Severidad alta	6,5
Total	100

Tabla 4: Porcentajes de severidad producto del incendio La Rufina referente a la figura 5. [Fuente: Vidal et al., 2017].

1.4.2. Incendios de Pichiqueime (29.12.2011)

Este incendio se originó en el sector de Pichiqueime, comuna de Quillón, región del Bio-bio (figura 6). Se inició el día 29 de diciembre de 2011. Durante este día en la región se combatían 27 incendios forestales por un conjunto empresas forestales y CONAF, de los cuales 7 no fueron apagados. Es la razón por la cual se declaró alerta amarilla en la región del Bio-bio. Las condiciones meteorológicas como las altas temperaturas y velocidades del viento fueron un factor importante, que dificultaron en gran medida la extinción de los focos, sumado a la dificultad de formar cortafuegos debido al difícil acceso al terreno. A esto se suma la presencia de gran cantidad de desecho y vegetación en las cárcavas que fueron un constante peligro para la reactivación de focos.

Este incendio dio como resultados pérdidas entre Florida, Ranquil y Quillón (figura 6) en varios ámbitos. Por ejemplo, se dañaron alrededor de 25.000 hectáreas de plantaciones, bosques nativos, matorrales y pastizales, y 198 viviendas con algún tipo de daño [Haltenhoff, 2014].

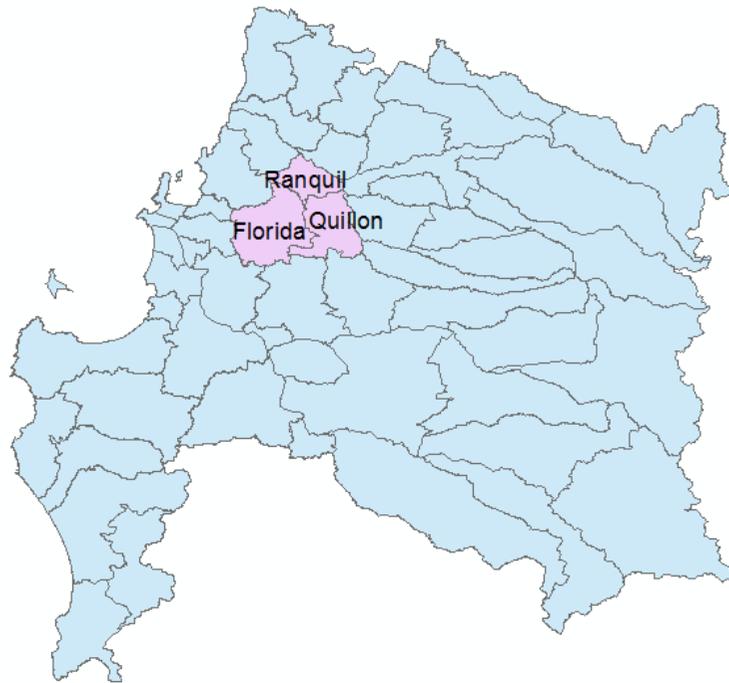


Figura 6: Ubicación de las comunas Ranquil, Florida y Quillón, las cuales fueron afectadas por el incendio Pichiqueime. [Fuente: Rulamahue, 2017].

Este incendio afectó principalmente el cerro Cayumanque (comuna de Quillón), el cual tenía gran parte del uso de suelo para la agricultura. El nivel de daño provocado por el incendio se presenta en la imagen elaborada por Perfetti-Bolaño et al. [2013] de la figura 7, donde lo que se presenta en color rojo es el área con daño del tipo grave, amarillo es el daño medio y en verde claro corresponde al daño leve. En este caso, el incendio produjo gran destrucción pues tan solo un 2,10% del cerro no fue afectado, mientras que el daño grave del suelo corresponde a un 34,17% del área total. En tanto, el daño grave corresponde a un porcentaje alto en comparación al daño medio (10,41%) y leve (27,96%). A pesar de esto, la vegetación del cerro tuvo una rápida recuperación.

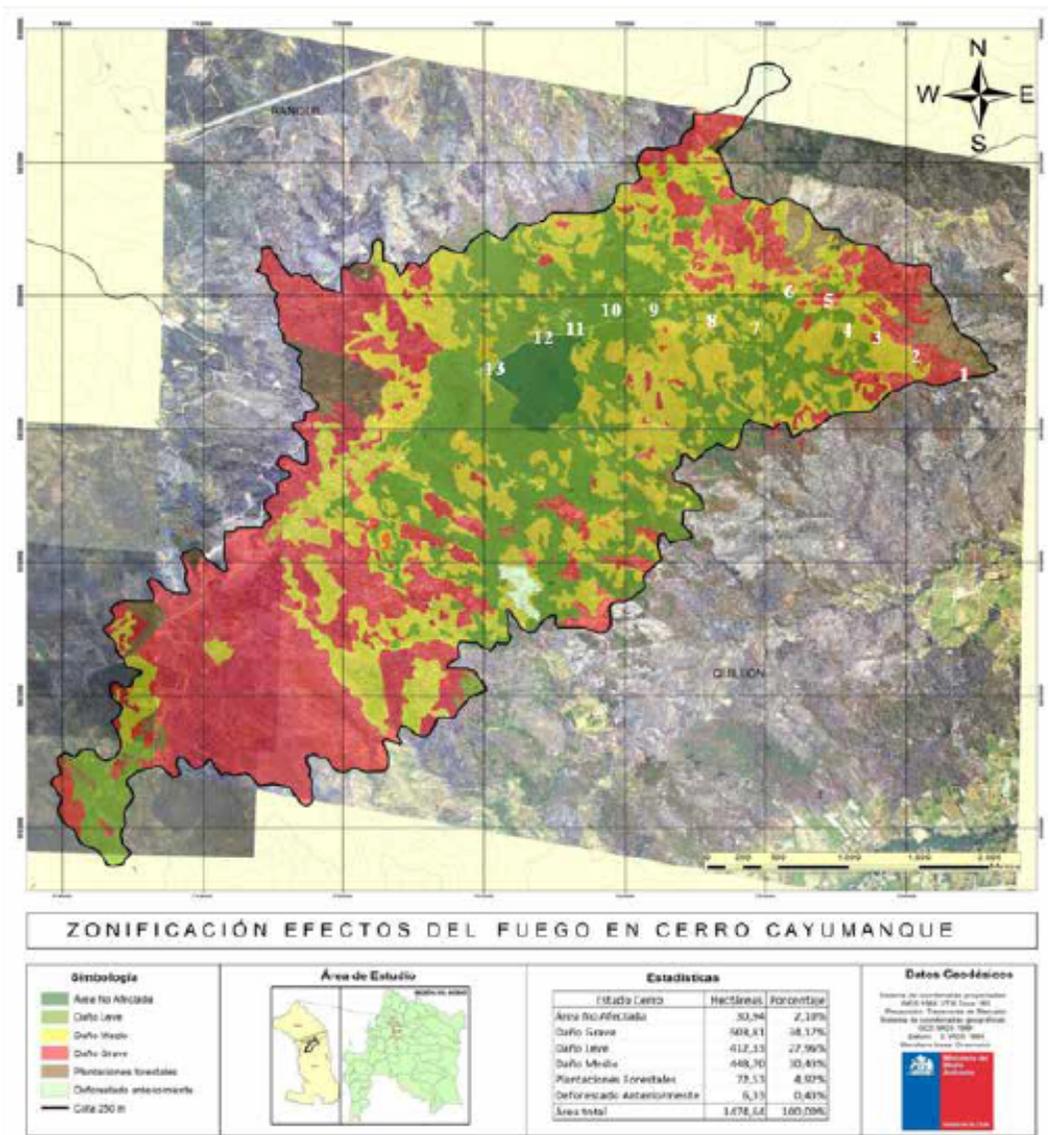


Figura 7: Daño producto del incendio de Pichiqueime, donde se muestra el área no afectada (Verde oscuro), con daño leve (verde claro), daño medio (amarillo), daño grave (rojo), plantaciones forestales (café) y el área deforestado con anterioridad al incendio (celeste). [Fuente: Perfetti-Bolaño et al., 2013].

1.4.3. Región del Maule (21.01.2017)

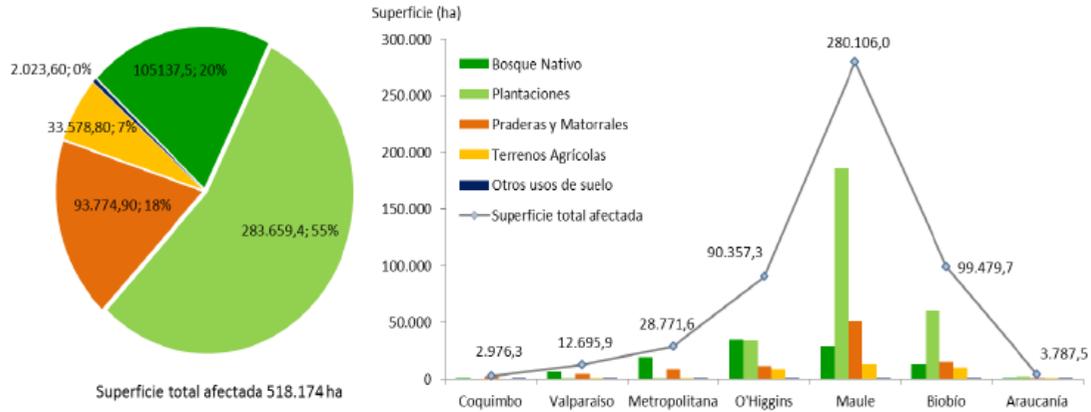


Figura 8: Área afectada por incendios forestales según el uso del suelo por cada región desde Coquimbo hasta la Araucanía, entre el 18 enero y el 5 febrero del 2017. [CONAF, 2017-3].

En este caso, la CONAF (2017-1) también realizó un análisis de severidad producto del incendio forestal, donde se escogieron datos satelitales pre- y post- incendio de los satélites SENTINEL II y LANDSAT 8, según se indica en la tabla 5.

Sensor	Tamaño píxel	Fecha	Imágenes Pre Incendio/Post Incendio
SENTINEL II	10 y 20 metros	20.12.2016	Pre-Incendio
SENTINEL II	10 y 20 metros	29.01.2017	Pre-Incendio
LANDSAT 8	30 metros	01-01-2017	Pre-Incendio
LANDSAT 8	30 metros	02-02-2017	Pre-Incendio
SENTINEL II	10 y 20 metros	18.02.2017	Post-Incendio
LANDSAT 8	30 metros	18-02-2017	Post-Incendio
LANDSAT 8	30 metros	06-03-2017	Post-Incendio

Tabla 5: Descripción de los datos satelitales utilizadas para realizar el análisis de la severidad de los daños provocados por los incendios forestales en Chile en enero y febrero año 2017 [CONAF, 2017-3].

En la tabla 6 se muestran los resultados del cálculo de severidad para la región del Maule realizado por la CONAF [2017-3], diferenciando el uso de suelo y considerando los cuatro niveles de severidad medidos en hectáreas. Aquí, se puede observar que en la región del Maule la severidad que predominó en general fue la baja, a pesar de que existe una diferencia de alrededor de 19.000 ha con la severidad alta, pues no hay grandes diferencias en cantidad entre un tipo de severidad y otro. También, el tipo de suelo que más se vio afectado fueron las plantaciones, donde la severidad alta tuvo un máximo de 37.433 ha, y la severidad que tuvo presente en una mayor área es la severidad media baja que alcanzó

45.529 ha. Por otra parte, el bosque nativo tuvo un alza en la severidad alta con 8.855 ha, con respecto a los otros niveles de severidad que están entre los 5.000 y 6.000 ha.

Severidad (ha)	Uso de Suelo					Total
	Bosque Nativo	Plantaciones Plantaciones	Pradera y Matorral	Tierras Agrícolas	Otro tipo de usos de suelo	
Baja	5.920	40.409	17.620	4.482	664	69.095
Media baja	5.394	45.529	9.135	2.109	180	62.347
Media alta	5.645	41.645	6.410	813	71	54.584
Alta	8.855	37.433	3.554	155	16	50.013

Tabla 6: Áreas por grados de severidad Baja, Media baja, Media alta y Alta provocados por los incendios en el verano del 2017 para la región del Maule. [CONAF, 2017-3].

Por lo tanto, se puede decir que en la región del Maule la severidad fue dependiente del tipo de suelo considerado, pues los tipos de severidades varían bastante al cambiar el tipo de uso de suelo. Esto se refleja principalmente en el bosque nativo y plantaciones que tienen mayores superficies, representando la severidad alta y media baja respectivamente. Por otra parte, en el resto del área se observa que mientras más baja sea la severidad mayor superficie cubre.

1.5. Problema de incendios forestales y desafíos desde la geofísica

Los incendios forestales, como se observa en la sección 1.1 tienen múltiples consecuencias negativas en variadas áreas de la vida y del ecosistemas. Es por esto que es necesario encontrar un método para evitarlos y así también evitar la pérdida de estas áreas verdes. Desde la geofísica se puede hacer posible distintos tipos de pronósticos en relación con los incendios forestales, tales como pronósticos de posibilidades de ignición, lugares más susceptibles a sufrir un incendio forestal y la propagación de un incendio forestal [Molina et al., 1998]. No obstante, en este trabajo se enfoca solo en el último tipo de pronóstico mencionado.

Para poder realizar el pronóstico del comportamiento de un incendio forestal es necesario considerar algunos factores que pueden ser importantes en cómo se comporta el incendio, dependiendo del método utilizado por cada modelo; pues hay casos en que se utilizan un tipo de modelos matemáticos, mientras que en otros se utilizan modelos que se basan en la información entregada y los casos que el modelo conoce con anterioridad para poder estimar cuál será el resultado de la propagación.

Un caso a considerar es el triángulo de comportamiento del fuego, en el cual, tal como lo muestra la figura 9 hay tres factores importante que describen cómo se comporta el incendio forestal. Estos corresponden a la topografía, el combustible y las condiciones atmosféricas. La importancia de los datos de atmósfera está dada por distintas variables. Por ejemplo, la dirección de la propagación de los incendios esta impuesta en gran parte por la dirección del mismo viento, además que si la humedad del ambiente es alta y es baja la temperatura es más difícil iniciar la ignición en un momento determinado. Por el

lado topográfico, la pendiente del terreno promueve el avance del incendio, si es positiva (por ejemplo, subida de un cerro). La explicación está asociada al aire caliente producto del incendio que sube por el cerro, de manera que al subir calienta y seca el combustible de arriba, lo que hace que sea más fácil quemarlo, y en consecuencia facilita una propagación más rápida del incendio. Por último, hay combustibles que por su densidad o composición son más fáciles y rápidos de consumir por el fuego. Es por estas razones que los incendios forestales se comportan con distinta intensidad y rapidez de propagación dependiendo del lugar y momento en que ocurren.

Estos tipos de datos se pueden adquirir mediante métodos geofísicos. Por ejemplo, los datos atmosféricos pueden ser estimados por modelos que son capaces de estimar cómo se comportan distintas variables de la atmósfera, tales como la temperatura, la humedad relativa y presión. Los datos de topografía y combustible se pueden adquirir mediante datos satelitales. Los datos de topografía se pueden encontrar mediante un DEM (Modelo de elevación digital), que son creados en base a los datos satelitales, más precisamente con datos SAR (Radar de apertura sintética); los cuales por medio de la diferencia fase de una onda capturada por dos satélites en dos distintos puntos en el mismo tiempo, estima la altura de la superficie. Y con las distintas composiciones de bandas pueden identificar distintos componentes en un área determinada y así saber qué tipo de combustible se encuentra presente.



Figura 9: Triángulo para la propagación del incendio, donde se considera que los elementos que determinan cómo se propaga un incendio son las condiciones atmosféricas. [Fuente: SEMADET, 2017].

El mayor desafío es obtener los datos con mejor resolución y estimación posible, de manera que algún método que considere estos datos pueda estimar más precisamente el avance de un incendio forestal.

1.6. Necesidad de un pronóstico de propagación de incendios forestales en Chile

Al año 2011, en Chile había 16.676.875 hectáreas de bosques, que corresponden a 22% del área total país, de las cuales 13.599.610 hectáreas (81.6%) se catalogó como bosque nativo. Entre lo que se destaca la gran presencia de bosque forestal siempreverde, Lengua y Coihue de Magallanes.

En Chile existe una extensa diversidad en flora, pues según Marticorena [1990] se cuenta con 5.739 especies, de las cuales 2.452 (42.73%) son nativas. La biodiversidad nos provee de múltiples beneficios en distintas áreas, tales como el agua dulce y materiales para cubrir nuestras distintas necesidades, así como madera para la construcción y elementos para la fabricación de medicamentos; purifica el aire y el agua; y frena la erosión y controla las inundaciones (tabla 7). Es por estas razones que se vuelve necesario el cuidado de estos recursos.

La biodiversidad nos aporta...	Los ecosistemas sanos...	Las áreas naturales nos ofrecen...
Agua dulce para beber	Purifican el agua	Paisajes hermosos
Alimentos para comer	Ayudan a regular el clima	Un ambiente sano
Aire para respirar	Absorben CO2	Tranquilidad y descanso
Fibras para vestirse	Purifican el aire	Vida silvestre
Medicamentos para curarnos y prevenir enfermedades	Mantienen fértiles los suelos	Recreo y turismo
Madera y combustible como fuentes de energía	Polinizan las cosechas	Aprendizaje y descubrimiento
Materiales de construcción	Frenan la erosión	Identidad cultural
	Controlan las inundaciones	
	Reciclan deshechos	

Tabla 7: Beneficios que provee un ecosistema sano. [Fuente: MINAM, 2017].

El organismo encargado del cuidado de las áreas forestales en Chile es la CONAF. Se encarga también del combate contra los incendios forestales. De esta manera realizan investigación, programas de prevención y métodos para identificar y mitigar los incendios forestales. Por ejemplo, en el área de investigación se realizan estudios con respecto a los incendios forestales, [CONAF, 2017-5] se destaca las mejoras de la identificación de las causas de incendios forestales como muestra la tabla 8, pues los incendios de causa desconocidas entre el 2007 y el 2017 han disminuido en un 32,89%. Además, cabe destacar que la mayoría de los siniestros son producto de la actividad humana (87,47%); ya sea intencional (32,00%) o no (55,47%), y tan solo un 0,31% de los incendios en el periodo 2003 y 2017 han sido por causas naturales. Es por estos motivos que la prevención de los incendios forestales es tan importante. Es la razón por lo cual se crean programas de protección comunal adecuados a cada zona de riesgo y; programas de educación y prevención. Los primeros incluyen métodos de prevención y para combatir los incendios dependiendo de las características que posee tal lugar [CONAF, 2017-5], mientras que los segundos se enfocan en transmitir directamente a la población la importancia del cuidado y preservación de los ecosistemas sanos. Para llevar a cabo esta tarea se entregan las

medidas necesarias para prevenir los incendios forestales [CONAF, 2017-6].

CAUSAS GENERALES	2007	2012	2017	Total 2003-2017	% 2003-2017
1. ACCIDENTALES	3.286	2.833	3.314	47.520	55,47
1.1. Faenas forestales	210	214	220	3.338	3,90
1.2. Faenas agrícolas y pecuarias	224	200	248	3.782	4,41
1.3. Confección y/o extracción productos secundarios del bosque	66	61	46	1.145	1,34
1.4. Actividades recreativas	579	386	229	6.896	8,05
1.5. Operaciones en vías férreas	23	17	13	313	0,37
1.6. Actividades extinción incendios forestales, incendios estructurales u otros	28	68	62	866	1,01
1.7. Tránsito de personas, vehículos o aeronaves	1.819	1.468	1.841	25.519	29,79
1.8. Quema de desechos	187	226	210	3.181	3,71
1.9. Accidentes eléctricos	90	128	208	1.566	1,83
1.10. Otras actividades	60	65	115	914	1,07
2. INCENDIOS INTENCIONALES	1.463	2.413	1.689	27.418	32,00
3. INCENDIOS NATURALES	14	17	16	267	0,31
4. INCENDIOS DE CAUSA DESCONOCIDA	380	246	255	10.469	12,22
TOTAL GENERAL	5.143	5.509	5.274	85.674	100,00

Tabla 8: Cantidades y porcentajes de incendios forestales productos de las distintas causas de estos en el periodo 2003-2017, especificando las cantidades en los años 2007, 2012 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].

Por otra parte, el sistema de “combate contra incendios forestales” de la CONAF se puede dividir en 3 grandes partes; análisis de probabilidad de ignición, la detección de incendios forestales y la mitigación de estos.

En el análisis de probabilidad de ignición de un incendio forestal se considera 3 índices, que darán un indicador de que áreas están más propensas a que ocurra un incendio forestal. El primer índice es el indicador del contenido de humedad de la vegetación fina (diámetro menor a 0.5cm) y muerta; según el valor existen distintas fuentes y condiciones que hace más factible el inicio de un incendio [CONAF, 2018-1]. El segundo índice corresponde al índice de probabilidad de ignición, el cual es un indicador de cuáles son las horas propensas a que se produzca un incendio, debido a la forma e intensidad con que llegan los rayos solares a la superficie [CONAF, 2018-2]. Por último, el tercer índice usado es el índice de riesgo de incendios forestales, que es un indicador de las condiciones propicias para dar inicio a un incendio forestal. Esto incluye cantidad de días consecutivos sin lluvia, temperatura máxima, humedad relativa, tipo y ciclo natural de defoliación de la vegetación y, la presencia de fuego [CONAF, 2018-3].

La detección de los incendios forestales se realiza cuando se detecta el inicio y la ubicación de un incendio en proceso. Estos según la CONAF [2017-4] corresponden a:

1. Detección terrestre móvil:
Corresponde a una detección que se realiza mediante el desplazamiento a nivel superficial de vigilantes en algún medio de transporte o caminando en un área determinado.
2. Detección terrestre fija:
Detección realizada por vigilante desde una torre de una altura de 15 a 30 metros, desde la cual pueden detectar incendios dentro de un radio cercano a los 20 kilómetros, y mediante un sistema de triangulación con lo observado por otros vigilantes se encuentra la posición del siniestro.
3. Detección aérea:
Mediante vigilantes que sobrevuelan el área en aviones, quien además es el encargado de entregar la información del incendio detectado.
4. Detección con sistemas televisivos:
Vigilancia que se realiza por medio de imágenes televisivas receptadas desde cámaras instaladas en torres o aviones con un área de visión de 360°.
5. Satélites:
Este tipo de vigilancia que se realiza mediante detección por medio de imágenes satelitales de órbita baja, tales como satélite Aqua y Terra, en los cuales se puede encontrar las áreas de con mayor flujo de calor, que se podrían denominar incendios. El método satelital es más usado en áreas de difícil acceso, pero la vigilancia se hace en periodos más largos de tiempo.

Por otro lado, el primer paso de la mitigación es detener el avance del incendio, lo cual es posible por medio de cortafuegos (naturales o artificiales). Las dimensiones y cercanía del cortafuego a los incendios dependen estrictamente de las dimensiones e intensidad del incendio; ya sea por el impedimento para el personal por el humo y el calor emitido, o las “chispas” de fuego que puedan alcanzar zonas más alejadas.

Las acciones de mitigación se realizan en base a una grilla donde se detectan los focos de más peligrosos, y así distribuir de mejor manera y ordenadamente los recursos [CONAF, 2017-9].

Entonces, si bien la CONAF tiene métodos de prevención, identificación y mitigación de incendios forestales, no posee un método dentro de la mitigación que sea capaz de pronosticar cómo será el comportamiento del incendio. Saber cómo se desarrollará podría dar a conocer los focos que provocarán mayores problemas y así enfocar los recursos a ellos de manera que el incendio no llegue a ser catastrófico. Como se mencionó antes según la CONAF al año 2011 sólo el 22 % del territorio chileno corresponde a bosques, cifra que es bastante menor a comparación de la realidad latinoamericana y del Caribe, donde el 49 % de la superficie corresponde a bosques (891 millones de hectáreas) [FAO, 2017].

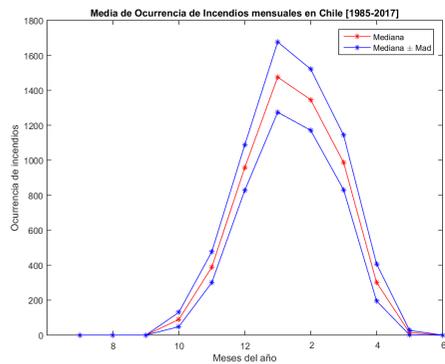


Figura 10: Media de la ocurrencia de incendios forestales mensual entre 1984 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].

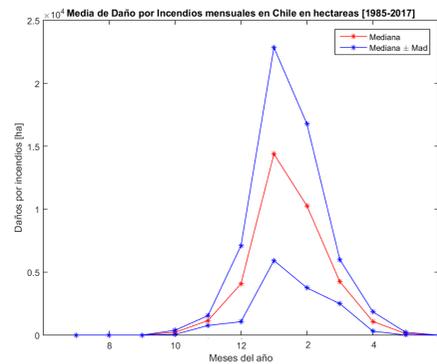


Figura 11: Media del daño provocado por incendios forestales por mes entre 1984 y 2017. [Fuente: CONAF, 2017-7].

Además, cabe destacar que en Chile la cantidad de incendios forestales aumentan notablemente en periodo estival, lo que es posible observar en las figuras 10 y 11, donde los incendios tienen un peak en la media de ocurrencia durante el mes de enero, así como también sucede con las hectáreas afectadas.

En la historia de Chile (figuras 12 y 13), la cantidad de incendios en los últimos años es relativamente constante, no así el área afectada, ya que evidentemente el año 2017 hubo un alza notable en las hectáreas quemadas (570.197 hectáreas) siendo que la cantidad de incendios se mantuvo en el promedio (5.274 incendios). Estos valores no son correlacionados entre sí, debido a que la cantidad de incendios no necesariamente sería un indicador del daño provocado, como se observa en la figura 14 donde la correlación de los datos es de 0.24, lo cual es un valor bajo. El motivo; el área afectada por el incendio depende de múltiples factores, tales como la capacidad de detección y mitigación, y las condiciones climáticas; por lo que un método de pronóstico que describa como se desarrollan estos fenómenos podría reducir considerablemente los efectos que provoca un incendio.

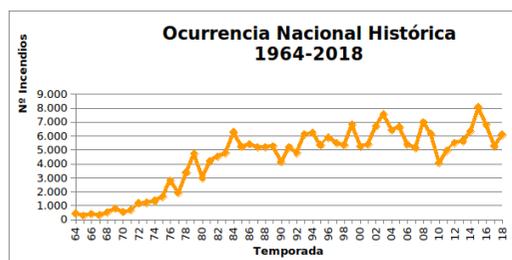


Figura 12: Ocurrencia de incendios forestales histórica entre 1984 y 2018. [Fuente: CONAF, 2018].

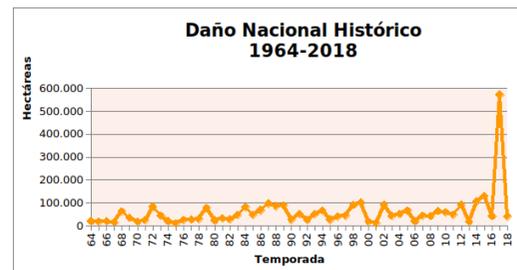


Figura 13: Daño histórico provocado por incendios forestales entre 1984 y 2018. [Fuente: CONAF, 2018].

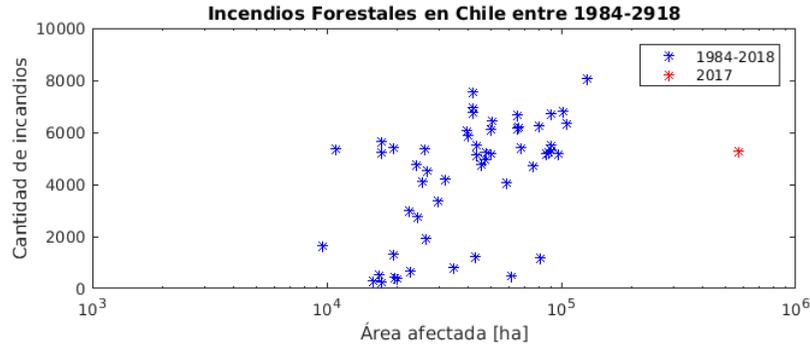


Figura 14: Gráfico de Cantidad de incendios forestales anuales respecto a sus áreas quemadas [Fuente: CONAF, 2018].

1.7. Propagación de incendios mediante modelación numérica

A continuación se presentan dos casos de incendios reales simulados con WRF-Fire, con distintas características y dificultades. Estos incendios ya fueron mencionados en la sección 1.3.

1.7.1. Simulación de un incendio en Harmanli, Bulgaria (14.08.2009).

Dobrinkova y Jordanov (2010), realizaron una simulación del incendio señalado en la sección 1.3.1, donde la mayor dificultad para esta simulación recae en la elaboración de un archivo de datos combustibles en base a los 13 modelos de combustibles de Anderson (sección 3.3; los archivos de combustibles solo son posible encontrarlos para el territorio estadounidense).

La simulación se realizó con un anidado de solo dos dominios (Figura 15) que inicia el día 14 de agosto del 2009 a las 12:00 hrs, con un foco de ignición de 200 m de ancho por 1,3 km de largo (Figura 16) que inicia un minuto más tarde del comienzo de la simulación, mientras que la simulación total termina a las 12:10 hrs.

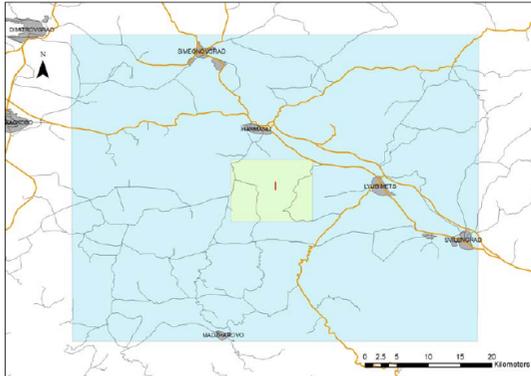


Figura 15: Dominio 1 (rectángulo azul) y dominio 2 (rectángulo verde) de la simulación en el mapa del lugar. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].

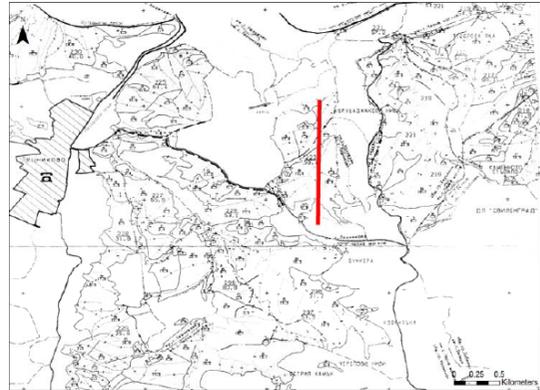


Figura 16: Punto de ignición (recta roja). [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].

Los datos que se presentan a continuación son aquellos usados en la simulación:

1. Datos de topografía: Son datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) que son datos de topografía de libre acceso de la NASA, la cual posee una cobertura global y con resolución de 100 m. Estos datos se muestran en la figura 17.

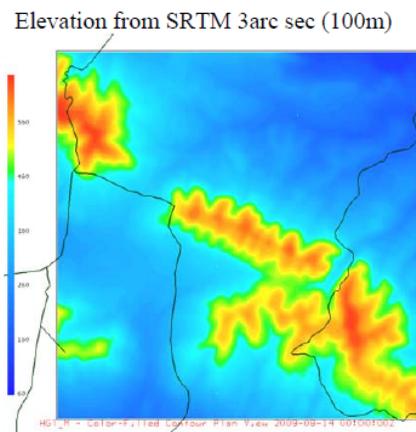


Figura 17: Visualización de los datos de topografía a usar. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].

2. Datos de combustible: Dobrinkova y Jordanov [2010] crearon en base a datos de cobertura de suelo de CORINE (Coordination of information on the environment). Estos datos corresponden al año 2006, y a pesar de no ser del mismo año de la simulación y su mala calidad, son los únicos disponibles para obtener los datos de combustible.

Los resultados de esta simulación se presentan a continuación:

1. Temperatura: En la figura 18 se observa cómo cambia rápidamente la temperatura del área luego de iniciado el incendio, lo cual muestra la interacción que existe entre el incendio y la atmósfera, que es un rasgo importante en el desarrollo del incendio. Aun así, si se mejora la resolución de los datos de topografía y combustible para mejorar la simulación realizada.

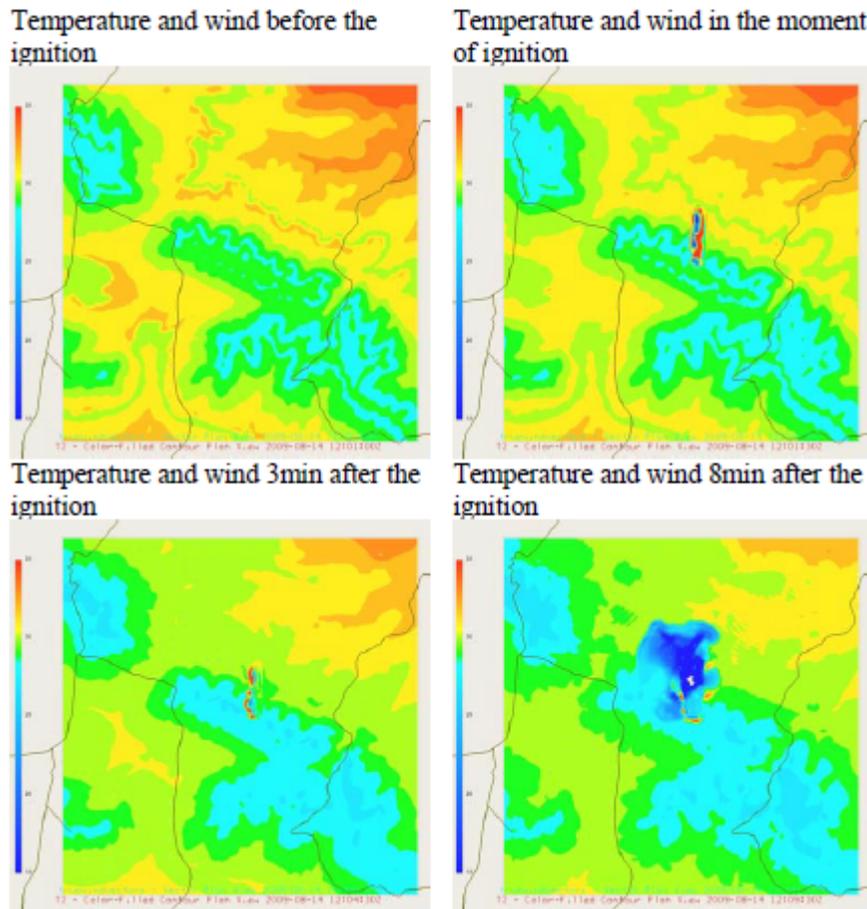


Figura 18: Temperatura a 2m [C°] y campo de viento. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].

2. Flujo de calor (figura 19): Que el mismo incendio se mueve en gran medida a la acción del viento refleja un problema de estabilidad, ya que el frente del incendio (flujo de calor más alto) se mueve hacia el oeste (12:03 UTC), luego al norte (12:05 UTC), y finalmente al oeste y al sur (12:10 UTC). Estos se pueden considerar como cambios muy rápidos en un tiempo acotado.

A modo de conclusión, una simulación puede ser efectivamente exitosa a pesar de la baja resolución de los datos usados, pero es necesario resolver el problema de inestabilidad producto de la acción del viento.

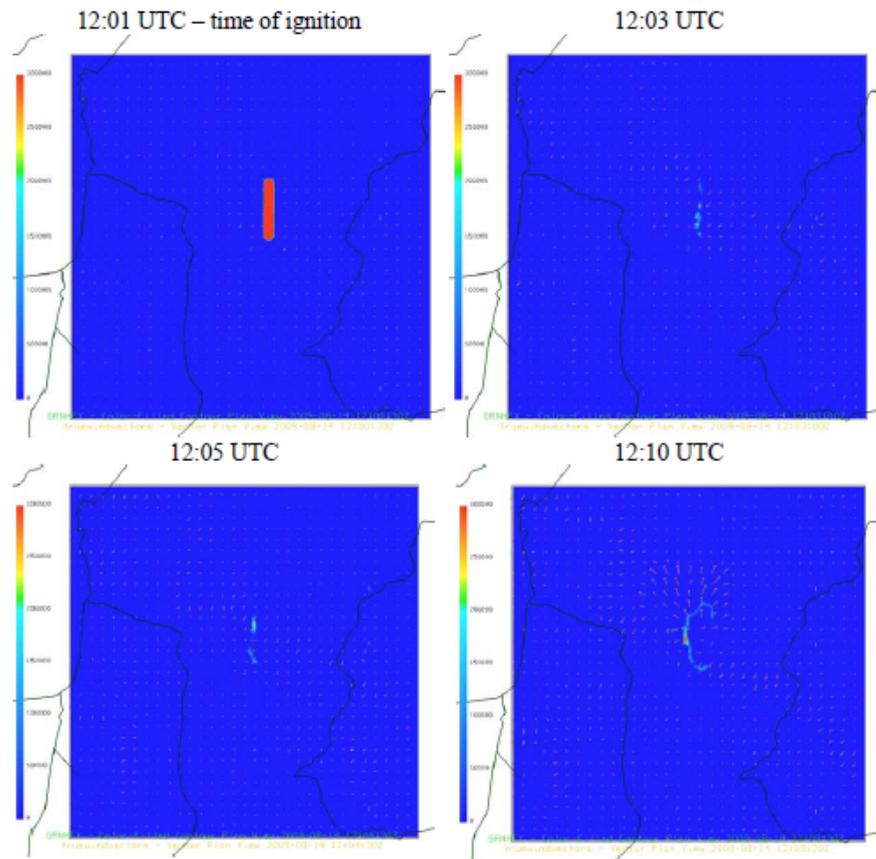


Figura 19: Flujo de Calor desde el encendido [W/m^2] y vectores de viento. [Fuente: Dobrinkova & Jordanov, 2010].

1.7.2. Simulación de un incendio en Meadow Creek del estado de Colorado, EEUU (26.06.2010)

La simulación del incendio señalado en la sección 1.3.2 por Beezley et al. [2010].

La simulación se realiza con 6 dominios anidados para aumentar la resolución de 32 km (datos atmosféricos) en el primer dominio a 10 m (datos de combustible) en el dominio 6 (los primeros 3 dominios se muestran en la figura 20). De esta manera, se evitan los problemas con la física aplicada y estabilidad numérica. Además, con esto se obtiene una resolución adecuada para la magnitud del evento en cuestión.

Por otro lado, el foco de ignición sólo es considerado como un punto, puesto que la caída del rayo solo es en un punto determinado del espacio y no un área con alguna otra forma.

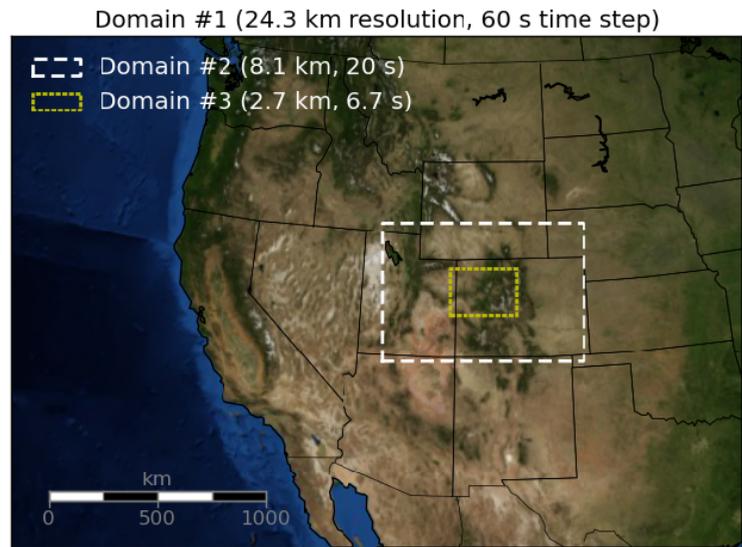


Figura 20: Visualización del dominio 1, 2 y 3 en el mapa. [Fuente: Breezley et al, 2010].

Los datos se obtuvieron como se señala a continuación:

1. Datos de topografía: Los datos de topografía (Figura 21a) se obtiene desde “National Elevation Dataset” (<https://www.usgs.gov/core-science-systems/national-geospatial-program/national-map>) donde se encuentran datos del territorio estadounidense con una resolución de 3 m.

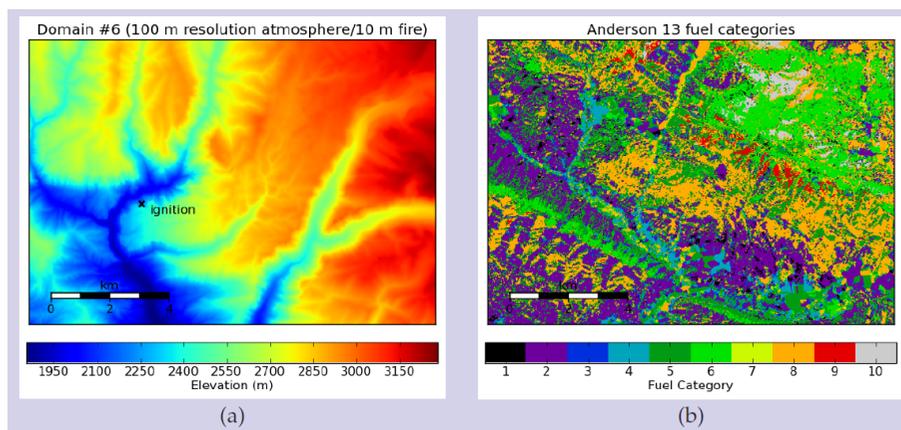


Figura 21: En esta figura se encuentran en “a” los datos de Topografía del dominio 6 (más pequeño) y “b” representa los datos del tipo de combustible. [Fuente: Breezley et al, 2010].

2. Datos de combustible: Estos datos de combustible (Figura 21b) tienen una resolución de 10 m y se adquieren desde Landfire (<https://landfire.cr.usgs.gov/>).
3. Datos de atmósfera: Los datos provienen desde NARR (North American Regional Reanalysis), que poseen una resolución de 32 km y un ciclo de análisis de 3 horas.

Las conclusiones de este trabajo recaen, por un lado, en que las simulaciones de micro-escalas del modelo tiende a tener problemas de inestabilidad, pues no existe una buena correlación en los datos obtenidos de los vientos y los reales (figura 22), lo cual puede ser consecuencia de la gran cantidad de dominios anidados, pues es posible que no se obtengan buenas condiciones para el dominio 6. Por otro lado, se dice que la simulación del incendio no fue exitosa, pues como se observa en la figura 23 la simulación sobreestima el área quemada, que quizás sea producto falta de información en los archivos de combustible, el contenido de humedad y el mismo argumento señalado anteriormente.

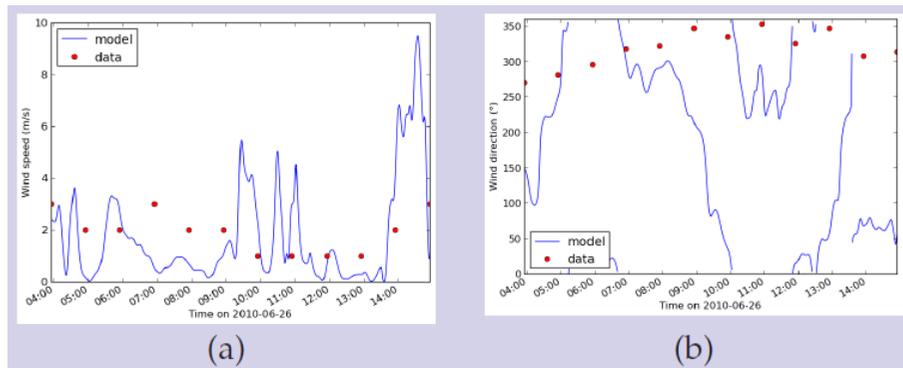


Figura 22: Comparación entre los datos de vientos medidos (puntos rojos) y los simulados (línea azul). [Fuente: Breezley et al, 2010].

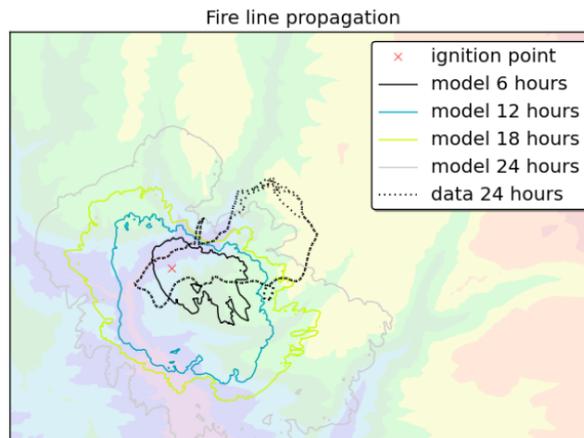


Figura 23: Resultados del área quemada con WRF-Fire simulación a 6 (línea negra), 12 (línea azul), 18 (línea verde) y 24 horas (línea gris), el punto de ignición (cruz roja) y datos reales del área afectada a las 24 horas (línea segmentada). [Fuente: Breezley et al, 2010].

1.8. Modelación numérica de incendios forestales en Chile

Cabe señalar que ni en Chile, ni en Sudamerica se han realizado simulaciones de incendios forestales con WRF-Fire aplicado a casos reales. Inclusive, a nivel mundial pocas investiga-

ciones de este tipo se han llevado a cabo, entre los que encontramos España [Garcia et al., 2014], Australia [Peace et al., 2015], Bulgaria [Dobrinkova & Jordanov, 2010] y Estados Unidos [Beezley et al., 2010 y Kochanski et al., 2013]. Por lo tanto, nuestro trabajo es un hito a nivel Nacional y Sudamericano.

Para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal en Chile es necesario primeramente obtener los datos necesarios para realizar este trabajo, es decir, datos atmosféricos, de topografía, y de combustible. Los primero dos tipos de datos son de fácil acceso por medio de las páginas web de UCAR - Research Data Archive [UCAR, 2017-1] y Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2017-1), pero el archivo de combustible no ha sido creado para nuestro país, por lo que es esta la gran dificultad para iniciar este proceso. Sin embargo, puede ser posible crearlos en primera instancia con manejo de datos satelitales.

Además, es imprescindible obtener los parámetros bajo los que se debe regir la simulación: tanto los parámetros del dominio y del periodo a simular, la física y la dinámica. La importancia de la física recae en que bajo las distintas condiciones dadas la propagación será diferente, tanto por rapidez y como dirección de la propagación. Como ya se ha mencionado WRF-Fire realiza una retroalimentación, por lo que la simulación depende también de las características físicas dadas.

Por último, para poder determinar la mejor combinación de características dadas y de los tipos de datos es mejor comparar los resultados de una simulación con un incendio real. Para elegir un incendio para simular, es necesario que tenga ciertas características, como una gran área afectada, y que existan datos tanto de área afectada, como de estaciones meteorológicas para poder compararlos. Por estas razones se escoge el incendio señalado en la sección 1.4.3.

2. Hipótesis y Objetivos

2.1. Hipótesis

El modelo WRF-Fire es capaz de simular un incendio real en la región del Maule, utilizando una base de datos de combustible para la propagación de incendios que se crea por clasificación supervisada usando datos satelitales en ArcGIS.

2.2. Objetivos

Objetivo General

- Simular en WRF-Fire un incendio forestal ocurrido entre el 21 y el 26 de enero del 2017 en la región del Maule, utilizando un archivo de combustibles disponible en el área creado mediante una clasificación supervisada con datos satelitales.

Objetivos Específicos

1. Realizar una simulación de los incendios entre el 21 y 26 de enero para la región del Maule con WRF-Fire.
2. Determinar que tan buena fue la simulación de los incendios con WRF-Fire para la región del Maule entre el 21 y 26 de enero.
3. Identificar si es posible crear los archivos de combustibles actualizados para el pronóstico de incendios forestales en Chile, para posibles nuevos eventos.

3. Marco Teórico

3.1. WRF-Fire

Detrás de WRF-Fire existe un modelo matemático que es capaz de realizar una simulación de un incendio forestal, ya sea de un caso real o uno idealizado, que entrega resultados de cómo se propaga el incendio, los flujos de calor y humedad y las componentes horizontales que presenta el viento en el área de estudio. Estas variables se presentan con el resto de los resultados en los archivos “wrfout” con los nombres señalados en la tabla 9.

Variable	Descripción
LFN	función de conjunto de niveles. La celda de la grilla se está incendiando si $LFN(i,j) \leq 0$
FXLONG, FXLAT	Longitud y latitud de cada celda de la grilla
FGRNHFX	flujo de calor desde la superficie que está siendo quemada (W/m^2), promediada sobre él celda
FGRNQFX	flujo de humedad desde la superficie que está siendo quemada (W/m^2), promediada sobre él celda
ZSF	Elevación del terreno sobre el nivel del mar (m)
UF,VF	Componentes horizontales del viento superficial
FIRE_AREA	Porción aproximada del área que se está incendiando en la celda, entre 0 (no quemada) y 1 (totalmente quemada)

Tabla 9: Variables resultantes de la ejecución con WRF-FIRE.

La matemática del modelo señalada por Mandel et al. [2011], está enfocada en los diferentes procesos que se presentan en un incendio, tales como la rapidez de propagación, la fracción de combustible disponible y el flujo de calor y humedad. Los modelos para la estimación de estas variables se encuentran a continuación.

Tal como presentan Mandel et al. [2011-2], el vector que indica la propagación del incendio es perpendicular a la línea de fuego ($\Gamma = \Gamma(t)$), que corresponde a la división entre el incendio del área sin quemar. La razón de rapidez con la cual se mueve la línea de fuego está dada por la función creada por Rothermel [1972], que depende de la pendiente del terreno ∇z y del viento ν , como se muestra a continuación.

$$S = \max \left\{ S_0, R_0 + c \min \{ e, \max \{ 0, U \} \}^b + d \max \{ 0, \tan \phi \}^2 \right\} \quad (2)$$

Donde:

S_0, R_0, b, c, d, e : coeficientes que dependen del tipo de combustible.

U : componente normal del vector del viento ($U = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}$).

$\tan \phi$: componente normal del gradiente de la pendiente ($\tan \phi = \nabla z \cdot \mathbf{n}$).

La fracción de combustible F disminuye por cada celda, desde el momento que inicia la ignición en dicha celda, como se indica a continuación:

$$F(t) = \exp\left(-\frac{t - t_i}{T_f}\right), \quad t > t_i, \quad (3)$$

Donde:

t : Tiempo de quemado.

t_i : Tiempo de ignición.

T_f : Tiempo de quemado del combustible.

Por otra parte, los promedios de flujo de humedad (ϕ_h) y de calor latente (ϕ_q) liberado por el mismo incendio, dependen de la fracción de combustible ya consumido de la siguiente manera:

$$\phi_h = \frac{F(t) - F(t + \Delta t)}{\Delta t} \frac{1}{1 + M_f} \omega_l h, \quad (Jm^{-2}s^{-1}) \quad (4)$$

$$\phi_q = \frac{F(t) - F(t + \Delta t)}{\Delta t} \frac{M_f + 0,56}{1 + M_f} L\omega_l, \quad (Jm^{-2}s^{-1}) \quad (5)$$

Donde:

M_f : Contenido de humedad de partículas de combustible.

h : Calor del combustible contenido en el combustible seco.

$L = 2,5 \times 10^6 Jkg^{-1}$: Calor latente específico cuando el agua se congela ($0^\circ C$).

Dado que los puntos de ignición son mucho más pequeños que el tamaño de la grilla usada, se calcula la distancia menor (Γ_0) entre el incendio (ejemplo para una recta: $\overline{\mathbf{a}, \mathbf{b}}$) y el borde de la celda colindante. Con este valor se estima el tiempo en que se demora en iniciarse la ignición en la celda colindante.

Para este proceso se usa la función de “nivel de ajuste de fuego inicial” (Ψ_0).

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = dist(\mathbf{x}, \overline{\mathbf{a}, \mathbf{b}}) - S_g(t - t_g); \quad t_g \leq t \leq t_g + \frac{r_g}{S_g} \quad (6)$$

Donde:

S_g : Razón de rapidez inicial.

t_g : Tiempo de inicio de ignición.

se reemplaza en lo siguiente:

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = \text{mín} \{ \Psi(\mathbf{x}, t), \Psi_g(\mathbf{x}, t) \} \quad (7)$$

Considerando el segmento $\overline{\mathbf{a}, \mathbf{a} + \mathbf{v}(\{t, t_h\} - t_g)}$ como la línea de ignición en el tiempo t_g , tomando \bar{a} como el punto inicial y \bar{v} su velocidad en el tiempo t_h , y la ecuación 6, se

obtiene que:

$$\Psi_g(\bar{x}, t) = \text{dist} \left(\bar{x}, \mathbf{a}, \mathbf{a} + \mathbf{v}(\{t, t_h\} - t_g) \right) - \min \{r_g, S_g(t - t_g)\}, \quad t_g \leq t \leq t_h + \frac{r_g}{S_g} \quad (8)$$

Por lo tanto, el tiempo de ignición de la siguiente celda depende totalmente de la tasa de rapidez de propagación del fuego S_g .

3.2. Datos Necesarios para usar WRF-Fire

Para realizar la simulación de un caso real en WRF-Fire es necesario 3 tipos de datos; atmosféricos, topográficos y de combustible. La necesidad de estos datos es explicada a continuación:

1. Datos de atmósfera:

La importancia que poseen los datos de atmósfera recae en primera parte debido a que WRF es un modelo de pronóstico de las condiciones meteorológicas, por lo que esos datos son esenciales para el uso de cualquier módulo de WRF. En el caso específico de WRF-Fire la importancia de las variables atmosféricas, tales como el viento, la temperatura y la presión, recae en la determinación la dirección e intensidad del incendio forestal, tal como. Se presenta en la sección 1.8 donde se explica cómo funciona el triángulo del comportamiento del fuego. Además se debe tener en consideración la retroalimentación que realiza WRF-Fire entre incendio y atmósfera, como se explica en la sección 1.2.

2. Datos de Topografía:

Los datos de topografía proporcionan la pendiente que se presenta en el área de la simulación. Tal como se explica en la sección 1.8, dependiendo de la inclinación del terreno el incendio puede avanzar más o menos rápidamente dependiendo del resecamiento que pueda tener el combustible.

3. Datos de Combustible:

Por último, los datos de combustible entregan a la simulación la presencia y tipo de combustible en el área de estudio en base a la vegetación. La presencia de ciertos tipos de combustibles determina en gran medida la rapidez con que se propaga el incendio, pues hay vegetación que se consume más rápido, ya sea por la densidad o por el contenido de humedad que presenta. Por lo tanto, es necesario clasificar los distintos tipos de combustibles.

En este caso, este tipo de datos se hacen en base a los 13 modelos de combustibles para la propagación de un incendio creado por Anderson [1982], que se presentan en la sección 3.3.

3.3. 13 Modelos de combustibles de Anderson

El primero que formuló un modelo matemático en base a 13 modelos de combustibles para el comportamiento de incendios forestales que se adecua a la mayor cantidad de situaciones en USA fue Rothermel [1972]. Más tarde Anderson (1982) estructuró la caracterización

gráfica de la vegetación para un mejor entendimiento de esta división en 13 tipos de combustibles.

Dentro de esta categorización, existen 4 grandes divisiones, que son denominadas como: pastizales, matorrales y hojarasca, bosques y desechos de podas y cortas. Las características de cada uno de los modelos se presenta en la tabla 10.

Categoría	Descripción
A. Pastizales	
1	Pasto fino, seco y bajo en toda la superficie pero hasta un tercio del área. Pueden hacer matorrales y arbustos hasta un tercio de la superficie
2	Pastizal con una presencia de matorral y/o arbolado claro entre 1/3 y 2/3 del área. Además, está compuesto por pasto seco, hojas secas, corteza y ramillas.
3	Pasto grueso y alto (>1m.), con poco matorral y arbolado.
B. Matorrales y Hojarasca	
4	Matorrales altos (> 2m). Densidad constante de combustible tanto horizontal como vertical. Fuerte presencia de combustible ramas y corteza sobre vegetación viva.
5	Matorral bajo (<0.6m) y denso, con ligeras cargas de corteza del mismo matorral.
6	Matorral con estatura media baja (entre 0.6 y 1.2m), con limitada concentración combustibles vivos.
7	Matorral de estatura media alta (entre 0.6 y 2.0m)
C. Bosques	
8	Compacta capa de corteza, ramillas y hojas en un denso bosque de coníferas o frondosas.
9	Capa esponjosa y poco compacta de hojas en un bosque denso de coníferas o frondosas.
10	Restos leñosos de cualquier tamaño, que presenta crecimiento de vegetación herbácea y matorral.
D. Desechos de Podas y Cortas	
11	Capa poco compacta de restos ligeros (entre 0 y 7.5 cm) de pequeña altura (~30 cm.).
12	capa de hasta 60cm de altura de restos más pesados que en el modelo 11. Aun con por lo menos la mitad de las ramas sin secarse completamente.
13	Grandes aglomeraciones de restos pesados y gruesos (entre 0 y 7.5 cm) por toda la superficie.

Tabla 10: Descripción de los 13 modelos de combustibles para comportamiento de un incendio de Anderson [1982].

Cada uno de los modelos presentados en esta categorización tiene distintas combinaciones

de carga de combustible y diferentes espesores de capa (tabla 11), los cuales son los factores que determinan el comportamiento del incendio. Esto está relacionado con la velocidad en que el fuego consumirá el tipo de combustible, lo que a su vez indicará la rapidez de propagación y la altura de la flama. Lo cual es señalado en la tabla 12.

Categoría	Carga total de combustible vivo y muerto (<3pulg), [tons/ha]	Carga total de combustible muerto (<1/4pulg), [tons/ha]	Carga total de combustible vivo (<3pulg), [tons/ha]	Espesor de la capa de combustible [pies]
A. Pastizales				
1	0,74	0,74	0	1,0
2	4,0	2,0	0,5	1,0
3	3,0	3,0	0	2,5
B. Matorrales y Hojarasca				
4	13,0	5,0	5,0	6,0
5	3,5	1,0	2,0	2,0
6	6,0	1,5	0	2,5
7	4,9	1,1	0,4	2,5
C. Bosques				
8	5,0	1,5	0	0,2
9	3,5	2,9	0	0,2
10	12,0	3,0	2,0	1,0
D. Desechos de Podas y Cortas				
11	11,5	1,5	0	1,0
12	34,6	4,0	0	2,3
13	58,1	7,0	0	3,0

Tabla 11: Características de la carga de combustible de los 13 modelos de combustibles de Anderson [1982].

Categoría	Rapidez de Propagación [metros ² /horas]	Altura de la flama [metros]	Humedad de extinción del combustible muerto [%]
A. Pastizales			
1	3,1566	1,2192	12
2	1,4164	1,8288	15
3	4,2087	3,6576	25
B. Matorrales y Hojarasca			
4	3,0351	5,7912	20
5	0,7284	1,2192	20
6	1,2950	1,8288	25
7	0,8094	1,5240	40
C. Bosques			
8	0,6475	0,3048	30
9	3,0351	0,7925	25
10	3,1970	1,4630	25
D. Desechos de Podas y Cortas			
11	2,4281	1,0668	15
12	5,2609	2,4384	20
13	5,4633	3,2004	25

Tabla 12: Características de la propagación de un incendio en cada uno de los 13 modelos de combustibles de Anderson [1982].

3.4. Opciones físicas para WRF

El modelo WRF tiene distintas opciones para recrear la física que se desarrolla en el área de simulación. Estas opciones se pueden combinar de distintas maneras.

A continuación se presentan algunas opciones que serán utilizadas en la simulación:

1. Opción de capa límite planetaria (bl_pbl_physics):
 La capa límite planetaria hace referencia a la región de la atmósfera que tiene contacto directo con la superficie terrestre, ya sea agua o tierra, de manera que la atmósfera se ve afectada por la acción de esta superficie.
 - a) YSU scheme (YSU): Según Hong et al. [2006], este es un esquema de difusión vertical no lógico que hace uso de un coeficiente de mezcla turbulenta no local en la capa límite planetaria, que incluye un tratamiento de los procesos de arrastre en la parte superior de la capa límite planetaria. Este esquema trabaja de dos maneras la mezcla de capa límite planetaria: en la primera aumenta en el régimen de convección libre inducida térmicamente, mientras que en la segunda lo disminuye bajo el régimen de convección forzada inducida mecánicamente. Este esquema ha representado de manera exitosa en casos realistas de pronósti-

cos, tanto por la estructura y el desarrollo de la capa límite planetaria, y así también la variación diaria de flujos de calor y humedad en la superficie en el caso idealizado.

- b) Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme (MYJ): Janjic [1994], menciona que este esquema hace uso de coordenadas ETA. Además, posee una capa turbulenta de varios metros en la parte inferior y una difusión lateral de cuarto orden con el coeficiente de difusión en función de la deformación.

2. Opción de microfísica (mp_physics):

La microfísica hace relación a los procesos que están detrás de la formación de distintos fenómenos dentro de las nubes, tales como gotas de lluvia, granizos y nieve.

- a) Ferrier scheme: Según la NOAA [2017-2], el esquema de Ferrier incluye procesos pronosticados de fase mixta. Este esquema fue cambiado recientemente de modo que se asume la saturación de hielo a temperaturas más frías que -30°C en lugar de -10°C como en la implementación original. Este esquema está bien probado para WRF-NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), utilizado operacionalmente en NCEP.

- b) WRF Single-Moment (WSM) 5-class scheme: Este es un modelo que según menciona Hong et al. [2004], funciona bastante bien a una resolución espacial entre 10 y 30 km. Algunos elementos que se estiman con el modelo es granizos y sus características tales como el diámetro y la masa, donde hace uso de técnicas estándar de mediación de núcleos de hielo para el cálculo de la cantidad de núcleos de hielo.

Además, se estiman características relacionadas con la nieve, tales como la formación de esta, donde el modelo depende de manera inversa de la temperatura, lo que implica que al disminuir la temperatura aumenta la concentración de nieve.

- c) Lin et al. scheme: Lin et al. [1983] menciona que este esquema posee 5 tipos de elementos a calcular, que corresponden a agua de la nube, hielo de la nube, lluvia, nieve y granizos. Con este modelo se consiguen mecanismos de producción de granizo más realistas a través de la fase de hielo que tiene implementada. Las ecuaciones para la nieve poseen versiones bidimensionales y son dependientes del tiempo. Además, cabe destacar que la velocidad terminal de las gotas de la lluvia posee dependencia de la altura, pero los parámetros para medir la velocidad terminal de la lluvia y del agua difieren al igual que la densidad de la nieve posee parámetros particulares.

3. Opción de superficie del terreno (sf_surface_physics):

Esquemas que representan características de las primeras capas de la superficie terrestre, tales como la temperatura y humedad.

- a) Noah Land-Surface Model (op=2): Tewari et al. [2004] señala que este es un esquema unificado de datos de NCEP, NCAR y AFWA, en el cual se presentan

características del suelo como: física del suelo congelado, cobertura de nieve irregular, conductividad del suelo modificada, albedo máximo de la nieve, temperatura y humedad del suelo de cuatro capas, etc.

- b) Thermal Diffusion scheme: Dudhia [1996] señala que este es un modelo eficiente de estimación de la temperatura del suelo bajo la consideración del uso de 5 capas superficiales a 1, 2, 4, 8 y 16 cm. Además, en este modelo la convergencia de flujo es proporcional al calentamiento que sufre la superficie.

Es reconocido que este modelo bastante simple, posee resultados muy similares con otros que poseen 100 capas de espesor de 1 cm. Por lo que es conveniente usarlo.

4. Opción de convección (cu_physics):

Esquemas que realizan una representación de los movimientos de las masas de aire en la atmósfera terrestre.

- a) Kain-Fritsch (new Eta) scheme: (KF): Kain [2004] señala que este esquema es una parametrización de flujo masivo con corrientes descendente y ascendentes. La corriente ascendente posee una tasa de arrastre mínima específica y otras formulaciones de manera que se pueda producir variabilidad en el radio de la nube y determinar el nivel de la nube en que se produce una convección profunda. Las corrientes descendientes compensan el flujo de masa ascendente en la troposfera inferior, con lo cual se transporta el aire húmedo a la capa baja de las nubes, logrando así estabilizar la estructura vertical local.

Se utiliza un método de parcela lagrangiana, dinámica de impulso vertical, para estimar si existe inestabilidad que pueda provocar crecimientos de nubes.

- b) Betts-Miller-Janjic scheme (BMJ): Janjic [1994] dice que la precipitación es producto de la convección profunda, que se produce por el transporte de calor y humedad hacia arriba. A esto se le denomina “mezcla convectiva” (o “mezcla”) con lo que se elimina o reduce la inestabilidad. La razón de la mezcla se calcula en base a la entalpía; mientras mayor entalpía se transporte a la parte superior se produce una menor precipitación, y la capacidad con que la nube es capaz de llevar a cabo este proceso se le denomina eficiencia. Cabe destacar que no se considera un solo estado de equilibrio convectivo, sino que un rango.

3.5. Evaluación de representatividad de la simulación

Una alternativa para poder realizar un análisis numérico de los resultados de la grilla de una simulación es el uso del método por dicotomía, el cual realiza una categorización de entre eventos pronosticados y observados, tal como se muestra en la tabla 13.

	Observado	No observado
Pronosticado	A	B
No pronosticado	C	D

Tabla 13: Tabla resumen de los resultados del método por dicotomía. [Fuente: CAWCR, 2017].

Donde:

A: Aciertos

B: Falsas alarmas

C: Perdidas

D: Correctas negativas

Los análisis que se pueden realizar son mediante los valores que se calculan a partir de los valores de A, B, C y D según se indica en los siguientes casos:

- Proporción correcta (PC)
- Frequency bias (BIAS)
- Probabilidad de detección(POD)
- Razón de falsa alarma (FAR)
- Probabilidad de una falsa detección (POFD)
- Índice de éxito crítico (CSI)
- Puntaje de habilidad de Gibert (ETS)
- Discriminante de Hanssen y Kuipers(HK)
- Puntaje de habilidad de Heidke (HSS)
- Odds ratio (OR)
- Odds ratio skill score (ORSS)

En la tabla 14 se realiza un resumen de estas variables que se calculan a partir de los valores A, B, C y D, los valores que se pueden obtener y cuál sería el valor óptimo para cada caso. Además, se expone una pregunta para cada caso, de manera que se pueda entender la utilidad de cada uno.

Variable	Pregunta	Calculo	Rango	Optimo
PC	¿Qué fracción está bien pronosticada?	$\frac{A+D}{N}$	[0, 1]	1
BIAS	¿Cuál es la razón entre si pronosticados y si observados?	$\frac{A+B}{A+C}$	[0, +∞]	1
POD	¿Cuál es la razón entre lo aciertos sobre si observado?	$\frac{A}{A+C}$	[0, 1]	1
FAR	¿Cuál es la razón entre los si pronosticados respecto a los no observados?	$\frac{B}{A+B}$	[0, 1]	0
POFD	¿Cuál es la fracción de eventos no observados incorrectamente como si pronosticados?	$\frac{B}{B+D}$	[0, 1]	0
CSI	¿Cuántos eventos si pronosticados corresponden a los si observados?	$\frac{A}{A+B+C}$	[0, 1]	1
ETS	¿Qué tan bien coinciden los eventos si pronosticados con los si observados?	$\frac{A - A_{random}}{A+B+C - A_{random}}$ $A_{random} = \frac{(A+C)(A+B)}{N}$	[-1/3, 1]	1
HK	¿Qué tan bien el pronóstico separa los si observados de los no observados?	$\frac{A}{A+C} - \frac{B}{B+D}$	[-1, 1]	1
HSS	¿Cuál fue la precisión del pronóstico en relación con la probabilidad aleatoria?	$\frac{A+D - EC_{random}}{N - EC_{random}}$ $EC_{random} = \frac{(A+C)(A+B) + (D+C)(D+B)}{N}$	[-∞, 1]	1
OR	¿Cuál es la razón de las probabilidades de que un pronóstico sea correcto con las probabilidades de que un pronóstico sea incorrecto?	$\frac{A+D}{B+C}$	[0, +∞]	+∞
ORSS	¿Cuál fue la mejora del pronóstico sobre la probabilidad aleatoria?	$\frac{AD - BC}{AD + BC}$	[-1, 1]	1

Tabla 14: Descripción de variables que se pueden calcular por el modelo por dicotomía, donde se especifica que respuesta responde, su cálculo, el rango de valores que puede tener cada variable y su valor óptimo. [Fuente: CAWCR, 2017].

4. Metodología

El esquema de trabajo se observa en la figura 24, donde es necesario la obtención de los datos para realizar la simulación, con lo que se realiza la implementación y ejecución de la simulación con WRF-Fire, para posteriormente compararlo con datos reales, ya sea datos de área afectada como los datos de estaciones meteorológicas. Este proceso es explicado a continuación.

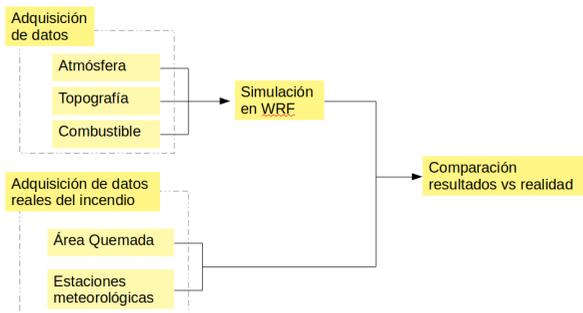


Figura 24: Esquema de la metodología que se lleva a cabo en este trabajo.

4.1. Creación y obtención de archivos

En general, los datos se dividen en dos grupos, los datos para la simulación y aquellos que son usados para la comparación de los resultados, entre los cuales hay datos satelitales, datos de atmósfera y de variables climáticas. Los cuales se explican a continuación cómo se consiguen.

4.1.1. Archivos para la simulación

Aquí, se menciona como se adquieren los datos mencionados en la sección 1.8

1. Archivos de Atmósfera:

Los datos FNL son datos de atmósfera que están disponibles a nivel mundial, que se pueden descargar de la página <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!access>, y tienen una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$.

En este caso para realizar la simulación se descargaron las variables mencionadas en la tabla 15.

Periodo de descarga	Desde el 2017-01-21 00:00 hasta el 2017-01-27 00:00
Parametros	Temperatura Temperatura potencial Humedad especifica Humedad relativa Agua equivalente a la profundidad de nieve acumulada Agua precipitada Componente U del viento Componente V del viento Presión Altura geopotencial Cobertura de suelo (0=mar, 1=tierra) Contenido de humedad del suelo volumétrica Temperatura del suelo
Espacio de muestreo	Latitudes: -25 / -45 Longitudes: -85 / -60

Tabla 15: Características de los datos FNL descargados para realizar la simulación en WRF-Fire. [UCAR, 2017]

2. Archivos de Topografía:

Para los datos de topografía se utilizarán DEM (Modelos de Elevación Digital) del tipo Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global (SRTM1).

SRTM1 fue una misión desarrollada entre el 11 y el 22 de febrero del 2000 a bordo del transbordador espacial Endeavor, en el cual se realizó 176 órbitas, recopilando así datos del 80 % de la superficie terrestre entre los 60°N y 56°S.

Los datos SRTM1 poseen una resolución de ~30m entre otras características (tabla 16). Estos se descargan por partes (en tabla 17 se señalan los datos descargados) y se les hace un pequeño procesamiento para poderlos utilizar (sección 4.2.1).

Especificaciones del producto	
Proyección	Geográfico
Datum horizontal	WGS84
Datum vertical	EGM96 (Modelo de Gravitación de la Tierra 1996)
Unidades Verticales	Metros
Resolucion espacial	1 segundo de arco para cobertura global (30 metros)
Longitud de onda de la banda C	5.6 cm

Tabla 16: Características de los datos SRTM1. [Fuente: USGS, 2017-1].

s35_w071_1arc_v3.tif	s35_w072_1arc_v3.tif	s35_w073_1arc_v3.tif	
s36_w071_1arc_v3.tif	s36_w072_1arc_v3.tif	s36_w073_1arc_v3.tif	
s37_w071_1arc_v3.tif	s37_w072_1arc_v3.tif	s37_w073_1arc_v3.tif	s37_w074_1arc_v3.tif

Tabla 17: Datos SRTM Correspondientes a la zona de estudios. [USGS, 2017-3]

3. Archivos de Combustible:

Para obtener los datos de combustible es necesario primero descargar datos Landsat 8, de alguna fecha anterior al inicio del incendio y que estos datos no tengan cobertura nubosa. Es por esta razón que se descargan los datos de los días 24 diciembre del 2016 y 17 de enero del 2017. Estos datos tienen una cobertura global y resolución espacial de 30 metros y pueden ser descargados desde <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Para el procesamiento se usan solo 6 de 11 bandas (tabla 18), pues como muestra la tabla 20 con estas se pueden realizar composiciones de bandas para poder visualizar distintos objetos.

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
Band 2 - Blue	0.452 - 0.512	30
Band 3 - Green	0.533 - 0.590	30
Band 4 - Red	0.636 - 0.673	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Band 8 - Panchromatic	0.503 - 0.676	15
Band 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 *
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 *

Tabla 18: Descripción de las bandas del Landsat 8 en longitud de onda y resolución espacial. (*) Las bandas TIRS se capta con resolución de 100 m pero se remuestrea a 30m. [Fuente: Franco, 2017].

Luego de obtener un solo archivo de datos se realiza un procesamiento (sección 4.2.1) para obtener los combustibles presentes en el área de estudio por medio de una clasificación supervisada.

4.1.2. Archivos de comparación

1. Área quemada hasta el 24-01-2017:

Modis posee un producto de focos de incendios denominado MOD14A1.06, donde se observa en la imagen los lugares donde se está presente el fuego en el momento de la

captura de la imagen. Es por esta razón que conocer y especificar correctamente el área quemada hasta el día 24 de enero, se descargan diariamente este tipo de archivo de manera que luego se unan en un solo archivo todos los focos de incendio durante los días que se desarrolla el incendio.

2. Área quemada hasta el 26-01-2017:

La área que se afectó durante todo el incendio será prácticamente la misma quemada hasta el día 26 de enero. Por lo que mediante el cálculo del índice de calcinación normalizada (NDR- Normalized Burn Ratio) con datos landsat 8 antes y después del incendio se puede obtener una estimación del área afectada.

Los datos que son usados son aquellos de los días 06 y 13 de marzo del 2017 para los datos post-incendio, mientras que para los datos pre-incendios se hacen uso de los mismos datos usados para la creación del archivo de combustible (24 diciembre del 2016 y 17 de enero del 2017).

3. Estaciones meteorológicas:

Como las condiciones meteorológicas también son un indicador de que tan bien funcionó el modelo, se hace uso de datos de estaciones reales en el área de estudio para la comparación con estaciones virtuales creadas en la simulación.

Los datos son de las estaciones Chanco (Chanco), Sauzal (Cauquenes), Santa Amada (Linares) y San Clemente (San Clemente) que se muestran en la figura 25, los cuales tienen una resolución temporal de 1 hora y disponibilidad de los datos señalados en la tabla 19. Estos datos son obtenidos desde <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>.

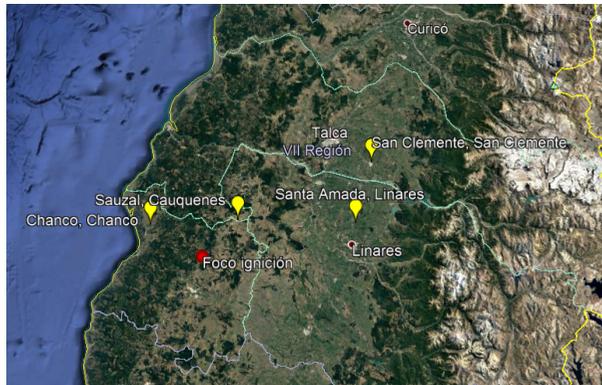


Figura 25: Ubicación de las estaciones meteorológicas reales.

	Chanco, Chanco	Sauzal, Cauquenes	Santa Amada, Linares	San Clemente, San Clemente
Temperatura del Aire (°C)	X	X	X	X
Humedad Relativa (%)	X	X	X	X
Dirección del Viento (moda)	X	X	X	X
Temperatura Suelo 10cm (°C)	X	X	-	X
Presión (mbar)	X	X	-	-
Velocidad del Viento (Km/h)	X	X	X	X
Ráfaga (Km/h)	X	X	X	X
Radiación Solar (W/m2)	X	X	X	X

Tabla 19: Estaciones y sus correspondientes datos meteorológicos disponibles y descargados (marcados con X) desde la página del Agromet (<http://agromet.inia.cl/estaciones.php#>).

4.2. Pre-procesamiento

El preprocesamiento se divide en dos: lo primero es crear y/o modificar los archivos y formatos para la simulación, mientras que lo segundo es ajustar los datos reales para la comparación con los resultados.

4.2.1. Archivos para la simulación.

Los archivos para la simulación que necesitan un procesamiento previo:

1. Archivos de Topografía:

Debido a que los archivos de topografía están disponibles en varios archivos y con valores vacíos, es necesario corregir estos archivos y unirlos en uno solo.

a) Corrección de NaN's:

Para poder corregir los valores de los NaN's en los archivos de topografía, es necesario pasar los raster de cada uno de los DEM a un shape de puntos con la función "Raster to Points". Después con la función "IDW" se realiza una interpolación de los puntos del shape dejándolos en un nuevo raster.

b) Unión de los distintos DEM:

Con la función "Mosaic to new raster" de ArcGIS se unen todos los raster de DEM interpolados y uno creado con solo valores 0. De esta manera, se obtiene un solo archivo del tamaño del dominio más grande a trabajar.

El archivo final queda como se muestra en la figura 26.

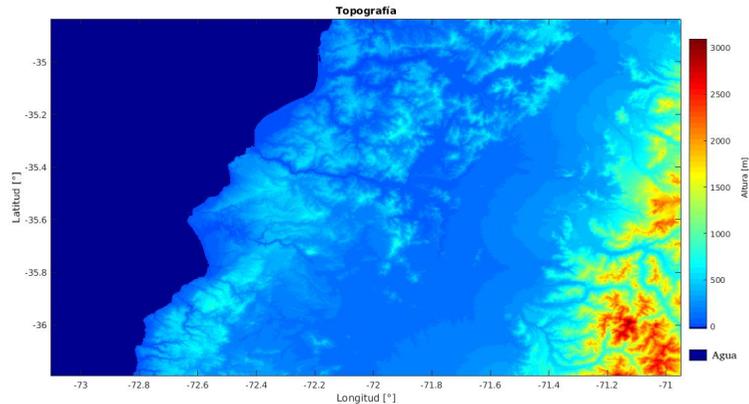


Figura 26: Visualización del archivo de topografía en el área de simulación.

2. Archivos de Combustible: El procedimiento para la creación de los archivos de combustibles son los siguientes:

a) Corrección radiométrica y topográfica:

Los errores originados en el proceso de captación de las imágenes y aquellos que generan una diferencia en los pixeles por la iluminación que se genera por efecto de la luz solar y relieve topográfico de la zona.

Para resolver esta corrección, para el primer caso se hace uso de la misma información del satélite expresada en el archivo metadata, y la correspondiente corrección según el tipo de satélite. Mientras que para la corrección topográfica se hace uso del metadata para conocer la orientación del sol, y por supuesto la información topográfica provista por el DEM (Digital elevation model).

b) Clasificación supervisada:

Inicialmente se crea una composición de banda (tabla 20) por cada conjunto de datos, pues según como se muestra cada banda se destacan distintos elementos de las imágenes. De esta manera es más fácil realizar una clasificación señalada en la segunda columna de la tabla 21.

Nombre de la Composición	Bandas
Color natural	4 3 2
Falso color (urbano)	7 6 4
Color infrarrojo (vegetación)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Vegetación saludable	5 6 2
Tierra/agua	5 6 4
Análisis de vegetación	6 5 4
Nieve y nubes	2 6 7

Tabla 20: Composición de Bandas para el Landsat 8. [Franco, 2017 & Landsat viewer, 2017].

Para hacer la clasificación supervisada es necesario hacer un shape que tome distintos píxeles y asignarles un valor Id determinado, tal como indica el cuadro 21. Luego se crea el archivo de signature espectral (“Create Signatures”), el cual contiene la firma espectral de cada grupo creado, y posteriormente se realiza la clasificación (“Maximum likelihood classification”). Y por último, se unen todos los raster en uno solo con la función “mosaic to new raster”. De esta manera se obtiene un archivo tal como representado en la figura 27.

Valores Id Clasificación supervisada	Valores archivo GeoTIFF final	Descripción
1	1	Modelo de Combustible 1
2	2	Modelo de Combustible 2
3	3	Modelo de Combustible 3
4	4	Modelo de Combustible 4
5	5	Modelo de Combustible 5
6	6	Modelo de Combustible 6
7	7	Modelo de Combustible 7
8	8	Modelo de Combustible 8
9	9	Modelo de Combustible 9
10	10	Modelo de Combustible 10
11	11	Modelo de Combustible 11
12	12	Modelo de Combustible 12
13	13	Modelo de Combustible 13
91	14	Áreas Urbanas
92		Nieve/Hielo
93		Agricultura
98		Agua
99		Tierra Estéril

Tabla 21: Valores de la grilla del archivo de datos de Combustibles para comportamientos de incendios de Anderson. [Fuente: Landfire, 2017].

c) Ajuste del archivo de combustible:

Para poder trabajar con este archivo en WRF-Fire es necesario agrupar todos los píxeles que no son combustibles en uno solo. Con esto me refiero a convertir los valores 91, 92, 93, 98, y 99 a un valor único 14 (segunda columna de la tabla 21). Para este proceso se hace necesario el uso del software Matlab, en donde se ocupa el script Valor_Unico14.m del anexo 8.4. De esta manera se obtiene el archivo de la figura 28, del cual sus porcentajes de combustibles se presentan en la tabla 22.

d) Extensión del archivo de combustible:

WRF-Fire necesita que estos archivos sean por lo menos del tamaño del dominio más grande que se usará, por lo que es necesario crear un archivo GeoTIFF lleno solo del valor 14. Luego este nuevo archivo se une con el anterior con la función “Mosaic to new raster”, para finalmente un único archivo.

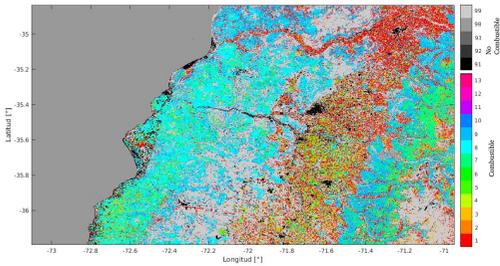


Figura 27: Archivo de combustible con todas sus clases diferenciadas como se indica en la tabla 21.

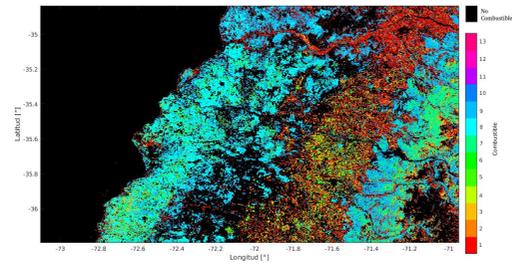


Figura 28: Archivo de combustible con solo los valores de combustibles y el valor 14.

Clase de combustible	Porcentaje de la grilla
Combustible 1	0.1363
Combustible 2	0
Combustible 3	0.0540
Combustible 4	0
Combustible 5	0.0412
Combustible 6	0.0022
Combustible 7	0.0615
Combustible 8	0.0939
Combustible 9	0.2029
Combustible 10	0
Combustible 11	0
Combustible 12	0
Combustible 13	0
No Combustible	0.4080

Tabla 22: Porcentajes de los tipos de combustibles obtenido en el archivo de combustibles creado (figura 28).

4.2.2. Archivos de comparación

Los archivos de comparación también necesitan modificaciones debido a que se necesitan en un formato que se puedan comparar con los resultados que entreguen las simulaciones. Estos arreglos se explican a continuación:

1. Área quemada hasta el 24-01-2017:
Los productos MOD14A1.06 de Modis, entregan una máscara con los valores señalados en la primera columna de la tabla 23, de manera que se identifican los sectores donde se presentan los incendios. Para este proceso a cada archivo diario se le utiliza el condicionante del “Raster Calculator” de ArcGIS, como se señala en la tercera columna de la tabla 23.

Valor	Descripción	Valor nuevo archivo
0	No procesado (datos de entrada faltantes)	0
1	No utilizado (obsoleto, no utilizado desde la Colección 1)	0
2	No procesado (otra razón)	0
3	Pixel de agua sin fuego	0
4	Nube (tierra o agua)	0
5	Pixel de tierra sin fuego	0
6	Desconocido (tierra o agua)	0
7	Fuego (baja confianza, tierra o agua)	1
8	Fuego (confianza nominal, tierra o agua)	1
9	Fuego (alta confianza, tierra o agua)	1

Tabla 23: Descripción de valores que posee el producto MOD14A1.06 y que valores toma en el archivo de comparación (0 sin incendio y 1 con incendio). [Fuente: USGS, 2017-1].

Luego, ya teniendo todos los archivos diarios nuevos, se suman todos los valores de las celdas en la misma posición con el “Raster Calculator”. Por lo que finalmente se tiene un único archivo en el cual los valores mayores a 0 son zonas con incendio, por lo que con condicionante nuevamente se crea un archivo nuevo en que los valores mayores a 0 sean 1.

Finalmente el archivo de comparación es como el mostrado en la figura 30.

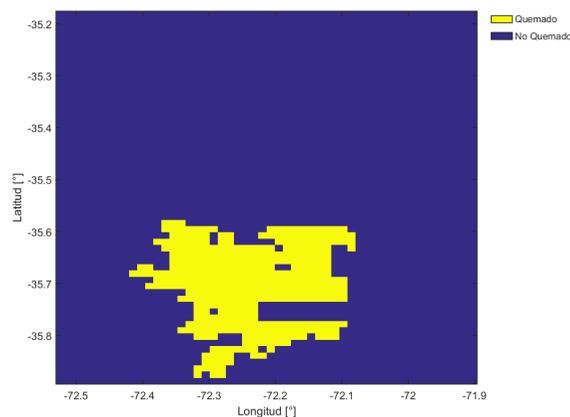


Figura 29: Área quemada real estimada por medio de datos MODIS, donde el color azul representa el área sin quemar y el amarillo es el área quemada.

2. Área quemada hasta el 26-01-2017:

Este proceso se hace uso del NDR, más específicamente solo hace uso de las Bandas 6 y 7 del landsat 8, que corresponden a las bandas SWIR 1 y SWIR 2. Entonces, usando el “Raster Calculator” se realiza el cálculo señalado en la ecuación 9 para

ambos conjuntos de datos (pre- y post- incendio).

$$NDR = \frac{Banda6 - Banda7}{Banda6 + Banda7} \quad (9)$$

Al tener los NDR's de los datos pre- y post- incendio, se realiza una resta entre ambos índices, como se señala en la ecuación 10.

$$\Delta NDR = NDR_{pre-incendio} - NDR_{post-incendio} \quad (10)$$

En este nuevo archivo es visible el área afectada, denotado por aquellos valores mayores a 0. Sin embargo, este archivo es bastante ruidoso, pues al descargar un shape de focos de incendios detectados por el satélite VIIRS durante esos días (21 al 26 de enero del 2017) y sobreponerlo como se muestra en la figura 28 (D) se sobreestima.

Entonces, para poder “limpiar” el archivo, este se modifica haciendo uso del condicionante en el “raster calculator”, donde los valores mayores a 0 se convierten en 1 (Áreas quemadas) y los demás en 0 (Áreas no quemadas). Luego el raster se convierte a un shape (“Raster to Point”), para luego manualmente modificar aquellos 1's que realmente no fueron parte del incendio hasta el día 26 de enero. Este proceso se realiza guiándose por el shape de focos de incendios (figura 30e). De esta manera luego los shape se traspasan a raster nuevamente, para luego unirlos en uno solo (Figura 31).

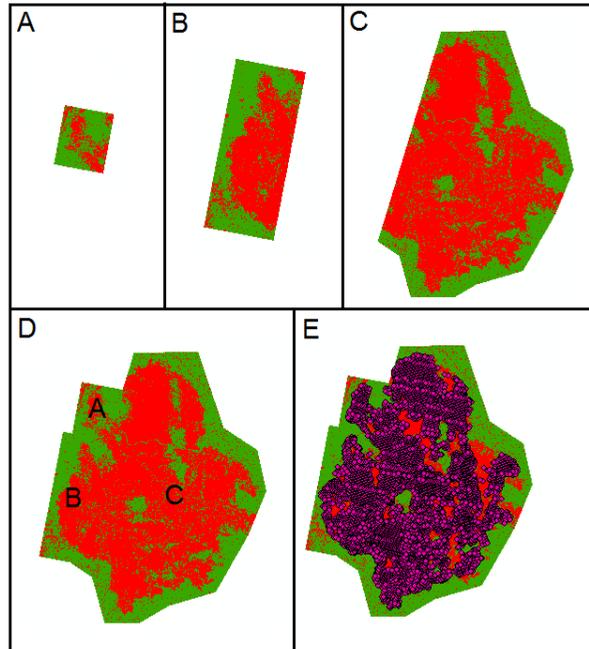


Figura 30: A, B, y C son aquellos archivos GeoTIFF de área quemada donde el color verde es área no quemada (valor 0) y el área roja corresponde al área quemada (valor 1). Tales archivos se posicionan como es indicado en D y es necesario modificarlos ya que hay áreas que “no quemadas” que debieran estar “quemadas” según se indica en E **con aquella** puntos violeta, que es el shape de focos de ignición detectados por VIIRS.

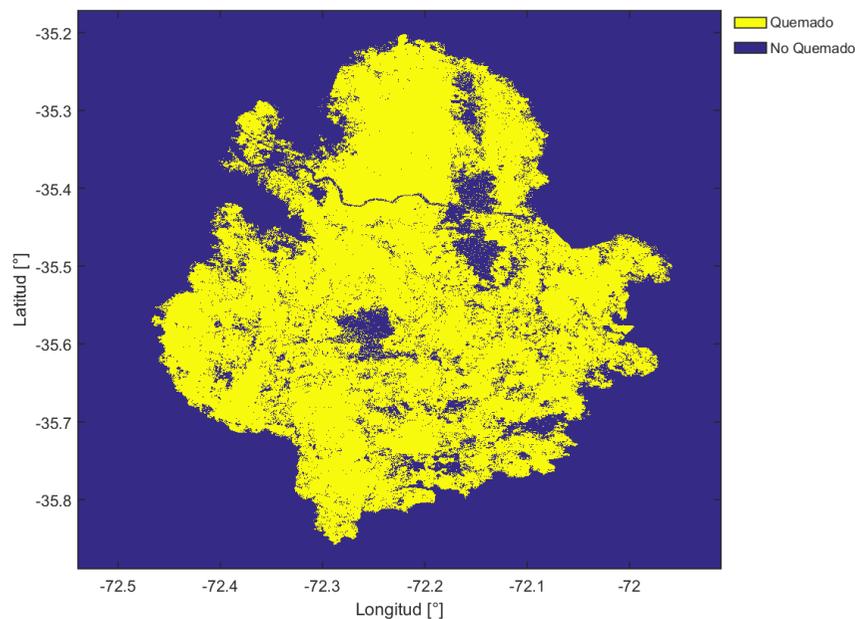


Figura 31: Archivo GeoTIFF de área quemada real donde el color azul es área no quemada (valor 0) y el área amarilla corresponde al área quemada (valor 1).

4.3. Simulación en WRF-Fire

Cabe señalar que el proceso de simulación en WRF-Fire se realiza para varias simulaciones diferentes, que difieren en las dimensiones, características físicas y tiempo de simulación.

Luego de obtener los datos para poder utilizar WRF-Fire, es necesario la creación del archivo `namelist.wps` (sección 8.1), donde se especifica las características de la simulación, tales como tiempo de simulación, área de estudio, dimensiones de grilla, entre otros.

El archivo `namelist.wps` y `namelist.input` (sección 8.2) se crea mediante “WRF Domains Wizard”, la cual es una interfaz gráfica con la cual se puede seleccionar con facilidad el área de estudio. Este proceso se realiza definiendo las dimensiones de la grilla más externa, y al indicarle la proporción de anidado se entrega las dimensiones de las grillas interiores.

Posterior a crear los `namelist.wps` y `namelist.input` es posible ejecutar con normalidad “WRF Preprocessing System” (WPS), con lo que se generan los archivos del área de estudio para poder generar los archivos de entrada para el caso real en WRF-Fire.

Para poder simular con WRF-Fire es requerido ingresar el módulo de incendios denominado `&Fire`, donde se señalan las características de los focos de ignición tales como las dimensiones, la hora de ignición y localización, tal como se muestra en la tabla 24.

	Ignición 1	Ignición 2
Latitud 1 [°]:	-35,85556	-35,82963
Longitud 1 [°]:	-72,28884	-72,27379
Latitud 2 [°]:	-35,82833	-35,84903
Longitud 2 [°]:	-72,28	-72,28028
Radio de ignición [m]:	200	200
Tiempo inicio [segundos]:	127.440	127.440

Tabla 24: Características de la simulación del incendio del 21 de enero del 2017 en la región del Maule.

Para poder ejecutar WRF-Fire, hay que asegurarse que en los archivos wrfinput_d0* tengan ingresados correctamente las variables de combustible y topografía, entre otros. Para esto se ejecuta en Matlab el script anagde_fire_wrfinput.m (sección 8.5).

Además, para hacer uso correctamente de WRF-Fire es necesario tener el archivo namelist.fire (anexo) en la misma carpeta de la simulación, ya que este documento tiene la información respecto a cómo se comporta el incendio en cada uno de los modelos de combustibles. Así, es posible ejecutar con normalidad wrf.exe.

4.4. Post-procesamiento

El post-procesamiento hace referencia a la etapa en que se crearon scripts para realizar las comparaciones entre los resultados simulados y aquellos datos reales, considerando solo el dominio más anidado, que en estos casos corresponden a los dominios 2, debido a que es el dominio con mejor resolución en cada simulación. Aquí, se crearon 4 scripts; los dos primeros son referentes a la estimación del área afectada, el tercero es para el análisis de los resultados entregadas para las estaciones meteorológicas, y el último es un conjunto entre área afectada, topografía y viento. La descripción de estos scripts se encuentra a continuación.

El primer script nombrado comparacion_area.m (sección 8.6) es capaz de realizar la comparación de áreas afectadas, dependiendo del día que se quiere comparar. Solo requiere ingresar los nombres de los archivos de los resultados de la simulación (NetCDF), los datos de área afectada reales (GeoTIFF) y la resolución espacial de estos datos. Como resultado entrega el área quemada simulada y el porcentaje del incendio que fue simulado, además de una figura que compara el área real quemada y la simulada.

El segundo script metodo_por_dicotomia.m (sección 8.7) estudia el área afectada por el incendio por medio del método por dicotomía (sección 3.5). Aquí, se requiere ingresar los datos de los resultados de la simulación (NetCDF) y los reales (GeoTIFF), con sus respectivas resoluciones. Y tiene un proceso que hace un ajuste de las dimensiones para tener grillas comparables, para luego comparar celda a celda si fue o no afectado por el incendio en la realidad y en el pronóstico. Así se determina a qué grupo (A, B, C y D) pertenece cada celda según se indica la tabla 13, para posteriormente calcular las variables presentados en la tabla 14. De esta manera se entregan los valores de las variables

calculadas y un gráfico que representa la grilla con los valores A, B, C y D en distintos colores para una mejor interpretación de los resultados.

El tercer script denominado AnalisisEstacionesMeteorologicas.m (sección 8.8) realiza una comparación entre los datos de estaciones meteorológicas reales y virtuales. Aquí, desde los resultados se seleccionan los datos cada una hora para compararlo con los datos reales. Así se estima la correlación entre estos, promedios y variaciones estándar. De esta manera además de estos valores crea figuras con gráficos con las series de tiempo cada una hora.

Por último, se creó un script para observar en conjunto los resultados de área afectado y de atmósfera entregados por WRF-Fire. Este script se llama CampoDeViento.m (sección 8.9), y lo que realiza es graficar para distintos tiempos simulados las grillas de topografía, área quemada, flujo de calor y rapidez del viento, y sobre estos, el campo de vientos modelados.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizados por medio de WRF-Fire, en primera instancia para las distintas pruebas, pero luego los resultados se enfocan solo en la prueba que mejor represente el incendio real en estudio.

5.1. Área Quemada

Área Quemada Real	hasta el 25-01-2017:		hasta el 27-01-2017:		
		361000 ha		1460645,1 ha	
	Prueba08	Prueba09	Prueba10	Prueba11	Prueba12
Inicio simulación	21-01-2017	21-01-2017	21-01-2017	21-01-2017	21-01-2017
Término simulación	25-01-2017	25-01-2017	25-01-2017	25-01-2017	27-01-2017
Resolución grilla	1500m	1500m	1500m	1500m	1500m
Resolución sub-grilla	150m	50m	150m	50m	50m
Modelo de capa límite planetaria	YSU scheme	YSU scheme	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme	YSU scheme
Modelo de convección	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Kain-Fritsch (new Eta) scheme
Modelo de suelo	Thermal Diffusion scheme	Thermal Diffusion scheme	Noah Land-Surface Model	Noah Land-Surface Model	Noah Land-Surface Model
Microfísica	Lin et al. scheme	Lin et al. scheme	Ferrier scheme	Ferrier scheme	WRF Single-Moment (WSM) 5-class scheme
Área quemada	2667862 hectáreas	1773,75 hectáreas	3070,4 hectáreas	1820.01 hectáreas	1824,73 hectáreas
Porcentaje estimado	739.02 %	0.49 %	0.85 %	0.50 %	0.51 %

Tabla 25: Características de las pruebas 08, 09, 10, 11 y 12 y sus resultados en área afectada simulada comparadas con el área real quemado.

En la tabla 25, se presentan los resultados del área afectada simulada por WRF-Fire en cada prueba según sus distintas resoluciones de dominio (50m y 150m) y características de

física. Donde se visualizan 3 grupos de condiciones físicas para los modelos de capa límite, convección, de suelo y microfísica (sección 3.4):

- El primer grupo (pruebas 08 y 09) se hace uso de los esquemas YSU, Kain-Fritsch, Thermal Diffusion y Lin et al.
- El segundo grupo (pruebas 10 y 11) utiliza los esquemas MYJ, BMJ, Ferrier y Noah Land-Surface Model.
- El tercer grupo (prueba 12), donde se usa los esquemas YSU, Kain-Fritsch, WRF Single-Momento 5-class y Noah Land-Surface Model.

Estos resultados de área quemada, se compara con los valores reales al día 24 de enero del 2017 a las 00:00hrs, por medio de un porcentaje. Aquí, se observa como en casi todas las simulaciones el área es subestimada ($<1\%$), excluyendo la prueba 08 donde la sobreestimación supera el 700% del incendio real hasta el día 25 enero a las 00:00 horas.

Entonces, según estos indicadores ninguna prueba posee un área quemada equivalente al incendio real, ya sea se subestima ($<1\%$) o se sobreestima ($>700\%$). Pero debido a que la prueba 08 que es la única que sobreestima el área afectada por el incendio, es que se escoge para realizar el método por dicotomía.

En la figura 32 hay gráficas de la comparación visual entre los resultados de las simulaciones y los datos reales al día 25 de enero del 2017 a las 00:00 horas. Aquí, se refleja la notoria diferencia señalada por la tabla 25 entre el área afectada por cada simulación y lo real. Lo único que se observa constante entre todas las simulaciones es que el incendio se mueve hacia el norte.

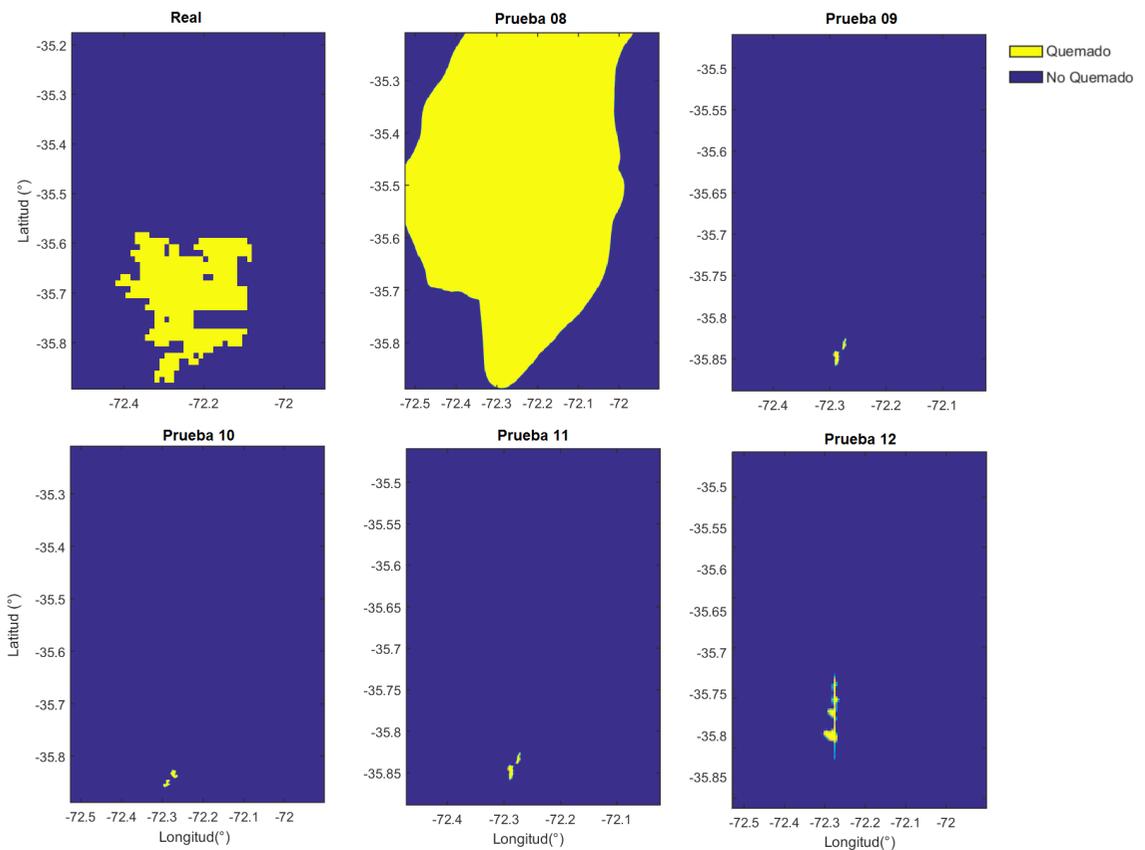


Figura 32: Gráficas de área afectada en los datos reales y las prueba 08, 09, 10, 11 y 12, donde lo amarillo corresponde a área quemada (1) y azul a área no quemada (0).

Por otro lado, los resultados mediante el análisis por el método por dicotomía (sección 3.5) solo fue realizado para la Prueba 08 (debido a que es la única que simula un área suficientemente grande como para hacer un análisis de este tipo). Este proceso se realizó dos veces: la primera vez fue comparando la simulación con los datos reales de área quemada (Datos MODIS) hasta el día 25 de enero del 2017 a las 00:00 horas, y la segunda fue los datos del incendio completo (datos Landsat) con los simulados hasta el 24 de enero del 2017 a las 00:00 horas. Estos resultados se presentan en las tablas de las figuras 33 y 34, donde en las gráficas de las mismas figuras se observan los puntos de la grilla en las que se combinan las observaciones y las simulaciones, tanto si se presencia o no el incendio representados por los valores A, B, C y D (tabla 13).

Con respecto a los resultados del método por dicotomía para la prueba 08 de la figura 33, se puede decir que esta simulación en general su acierto fue muy bajo, pues el valor PC alcanzo solo un 0.12, es decir que los aciertos totales de la grilla el pronóstico fueron muy pocos. Esta observación se refuerza al observar cada uno de los otros estimadores calculados, pues sus valores se alejan bastante de los valores óptimos. Por ejemplo, el CSI es de 0.11, que es un valor muy bajo, por lo que el pronóstico fue certero en muy pocos

puntos, en comparación a lo pronosticado y lo afectado realmente. También, el valor OR de valor 1.10 que en este caso indica que la probabilidad que el pronóstico sea correcto es baja respecto a que sea errado. Por último, el valor HK que fue de 0.42, lo que indica que los aciertos pronosticado son más que los pronosticados errados. Aunque, por otro lado, algunos valores que se obtuvieron bastante bien son: POD, que tuvo un valor 0.96, lo que indica que dentro que se pronosticó en casi todas las celdas donde si se observó incendios fue certero; o el FAR que siendo 0.81, señala que hubo un gran porcentaje de celdas si pronosticadas con incendio respecto a aquellas que no se han observado incendio.

Por lo tanto, en los diferentes estimadores se puede observar el mal pronóstico del incendio forestal simulado y que fue claramente sobreestimado. Esto se refleja al observar la comparación gráfica de la figura 33 y los resultados cuantificados del área afectada señalado en la tabla 25, donde en la prueba 08 se quemó 2.667.862 ha, cuando lo real fue 361.000 ha al día 24 de enero.

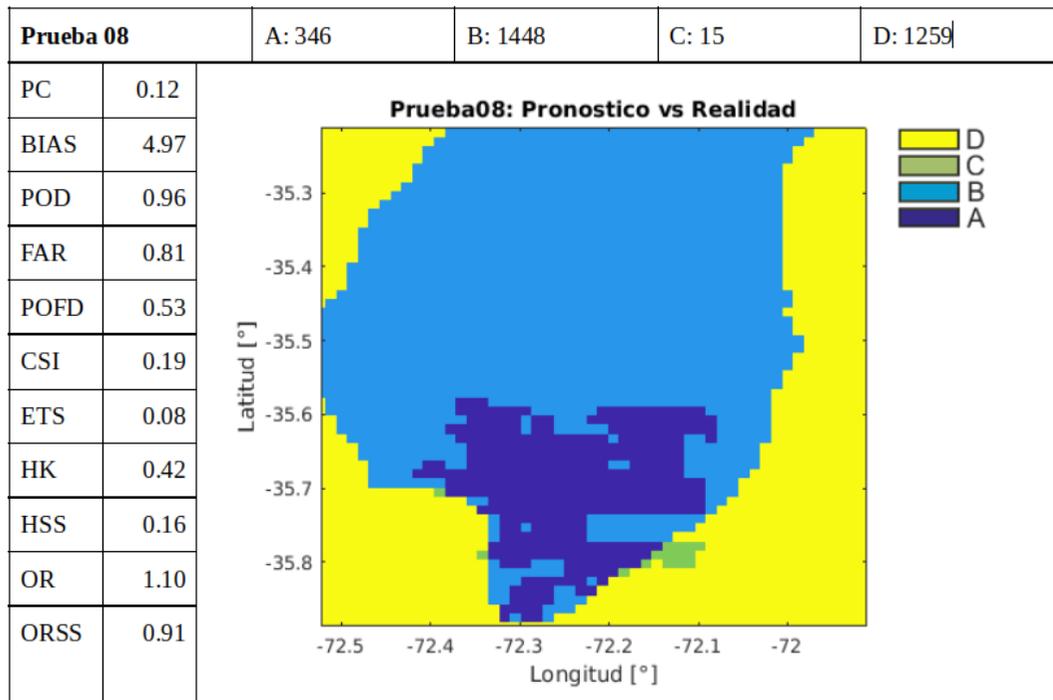


Figura 33: Resultados del método por dicotomía, incluyendo una representación gráfica de los valores de A, B, C y D, aplicado a la comparación entre la prueba 08 y los datos reales al día 24 de enero del 2017 a las 00:00 horas.

Por otra parte en la tabla de la figura 34, donde se observan los resultados del método por dicotomía al comparar la simulación al día 24 de enero del 2017 (00:00 horas) con el área realmente quemado obtenido al día 27 de enero del 2017 (00:00 horas) mediante datos satelitales. Estos fueron comparados para estimar que tan bien se desarrolló la simulación en relación con el espacio y no al tiempo (en el caso anterior se compara en relación con el tiempo del incendio).

Aquí, los resultados indican que existe un mejor porcentaje de celdas bien pronosticados en comparación al caso anterior, ya que $PC = 0.34$. Que FAR sea igual 0.35 hace referencia a que hay una menor cantidad de celdas simuladas con presencia de fuego, pero los datos reales no muestran así (falsa alarma). Y por último, que cantidad de aciertos dentro de lo pronosticado como parte del incendio es menor que en el caso anterior, aunque $POD=0.86$ aun es un buen valor.

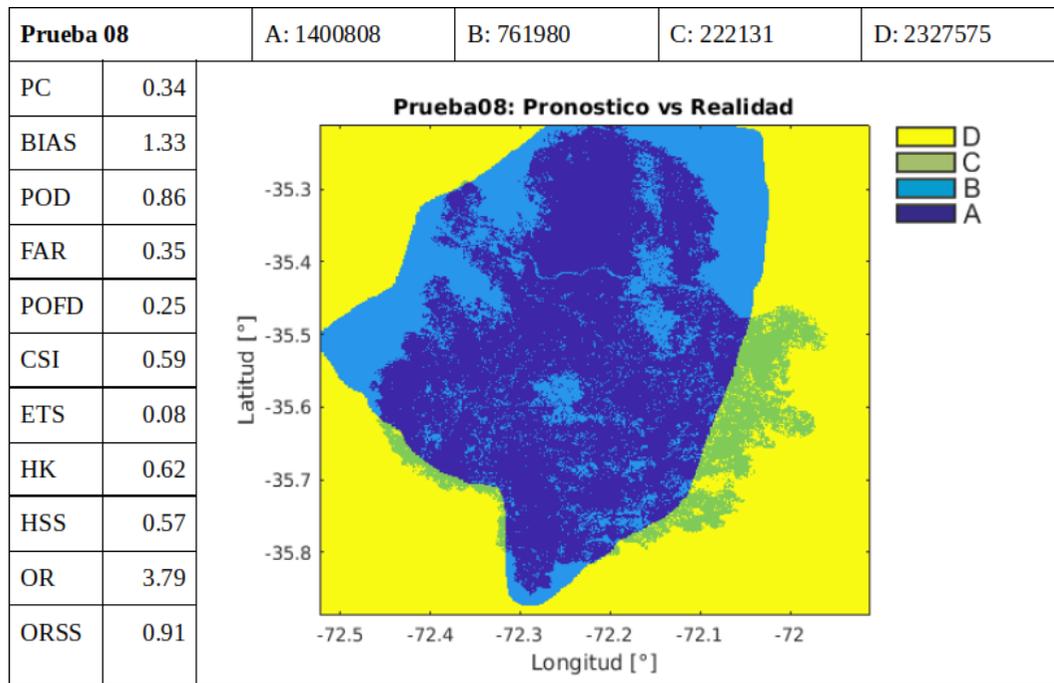


Figura 34: Resultados del método por dicotomía, incluyendo una representación gráfica de los valores de A, B, C y D, aplicado a la comparación entre la prueba 08 al día 24 de enero del 2017 (00:00 horas) y los datos reales al día 27 de enero del 2017 (00:00 horas).

5.2. Estaciones Meteorológicas

A continuación, en la tabla 26 se presentan los resultados por prueba, de la correlación existente entre los datos de las estaciones meteorológicas reales y las virtuales. Cabe mencionar que hay pruebas que no tienen resultados para la estación Chanco (Chanco), ya que las dimensiones de sus dominios no logran abarcar la posición de estas estaciones. Es lo que sucedió también con las estaciones Santa Amada (Linares) y San Clemente (San Clemente), que no se encuentra dentro de ninguno de las pruebas simuladas. Pero la estación Sauzal (Cauquenes) si se presenta en los dominios de las 5 simulaciones. Además, los valores de los promedios y variaciones estándar de las variables comparadas en las estaciones meteorológicas se encuentran en la tabla 27. Por ultimo las gráficas de las series de tiempo de la estación Chanco (Chanco), para las prueba 08 y 10 se encuentran en la figura 35, y las de la estación Sauzal (Cauquenes) de todas las pruebas se muestran en la figura 36.

Los resultados para las estaciones meteorológicas que se pueden visualizar gráficamente en las figuras 35 y 36, tuvieron una alta correlación considerando que gran parte de esto es por la variación día-noche, siendo mejor en la estación Sauzal (Cauquenes) que en la estación Chanco (Chanco).

En la estación Chanco que solo presenta resultados para las pruebas 08 y 10, donde la variable que tuvo mejor correlación fue en la presión (91 % y 92 % respectivamente), y cuyo valores de los promedio son muy similares entre los datos reales y los simulados, aunque siempre estos últimos son menores (Figura 35). Entre las temperaturas del aire y superficial se obtuvieron las correlaciones más bajas (≤ 0.82), siendo menores en la prueba 10 (< 0.69). Las temperaturas promedios son bastantes similares, principalmente la temperatura superficial que en la prueba 08 tiene con una diferencia de sólo 0.05°C . Por último, la velocidad del viento fue bastante alta en ambas simulaciones (81 % y 83 % respectivamente), a pesar de que los valores promedio de 2.46 y 3.14 km/hr eran prácticamente la mitad del registro real (6.07km/hr).

	Prueba08	Prueba09	Prueba10	Prueba11	Prueba12
Correlación Estación Chanco, Chanco					
Temperatura del aire	0,76	-	0,69	-	-
Temperatura superficial	0,82	-	0,40	-	-
Presion	0,91	-	0,92	-	-
Velocidad del viento	0,81	-	0,83	-	-
Correlación Estación Sauzal, Cauquenes					
Temperatura del aire	0,83	0,84	0,81	0,81	0,84
Temperatura superficial	0,83	0,83	0,89	0,89	0,90
Presion	0,89	0,85	0,87	0,83	0,84
Velocidad del viento	0,18	0,30	0,12	0,34	0,30

Tabla 26: Resultados de la correlación entre los resultados de las estaciones virtuales y los datos reales para las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento.

		Reales	Prueba08	Prueba09	Prueba10	Prueba11	Prueba12
Estación Chanco, Chanco							
Temperatura del aire [°C]	Prom	17,56	19,05	-	19,47	-	-
	Std	4,43	3,30	-	2,57	-	-
Temperatura superficial [°C]	Prom	19,35	19,40	-	20,83	-	-
	Std	6,43	5,58	-	4,46	-	-
Presión [Pa]	Prom	100.654,58	100.008,96	-	99.996,30	-	-
	Std	156,27	135,52	-	140,52	-	-
Velocidad del Viento [km/h]	Prom	6,07	2,47	-	3,14	-	-
	Std	5,59	1,69	-	1,94	-	-
Estación Sauzal, Cauquenes							
Temperatura del aire [°C]	Prom	24,82	23,47	22,98	24,35	23,62	23,80
	Std	5,45	5,72	5,65	6,24	6,28	5,77
Temperatura superficial [°C]	Prom	27,49	24,35	23,76	25,28	24,63	25,88
	Std	6,43	7,59	7,21	4,94	5,05	5,80
Presión [Pa]	Prom	101592,08	99547,61	99180,35	99527,43	99168,13	99168,59
	Std	171,27	141,16	147,46	149,33	150,06	148,95
Velocidad del Viento [km/h]	Prom	1,66	5,22	6,64	6,66	8,18	7,36
	Std	1,60	1,57	1,93	1,95	2,39	2,09

Tabla 27: Promedio y variación estándar de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento de los resultados de las estaciones virtuales y los datos reales.

Al observar los resultados en la estación Sauzal (Cauquenes) en las tablas 26 y 27, podemos decir que las correlaciones más altas (>80%) se obtuvieron en las temperaturas del aire y superficial, y la presión. Cabe mencionar que ambas temperaturas mantienen sus correlaciones por grupo de la sección física independiente de la resolución de los datos.

Las temperaturas promedio son siempre menores en las simulaciones, habiendo mayor diferencia en la prueba 09, donde son mayores a 2°. Mientras que las variaciones estándar de la temperatura superficial son más grandes en las Prueba 08 y 09.

Los valores promedios de la presión en la figura 36 son bajas respecto al valor real (101.592,08 Pa), pero las más bajas se observan en las pruebas 11 y 12 (99.168,13 y 99.168,59 Pa respectivamente). Por otro lado, las variaciones estándar también son menores al real (171,27 Pa), donde su valor menor es en la prueba 08 (141,16 Pa) y el mayor en la Prueba 11 (150,06 Pa).

Por último, la correlación del viento está muy por debajo de las demás variables, siendo mayores en las simulaciones con mayor resolución, rodeando el 30%, que aun así son valores muy bajos. Además, los valores promedios para el viento son bastante mayores que los originales.

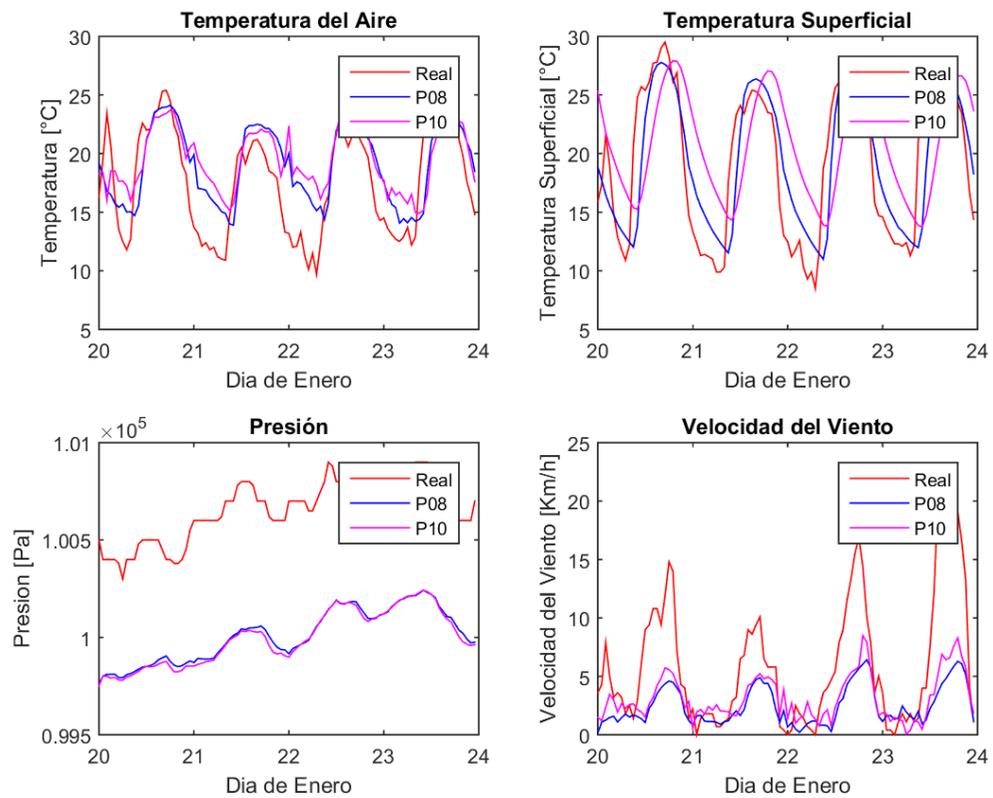


Figura 35: Gráficas de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento, para los datos reales (rojo), la prueba 08 (azul) y la prueba 10 (magenta) en la estación Chanco, Chanco.

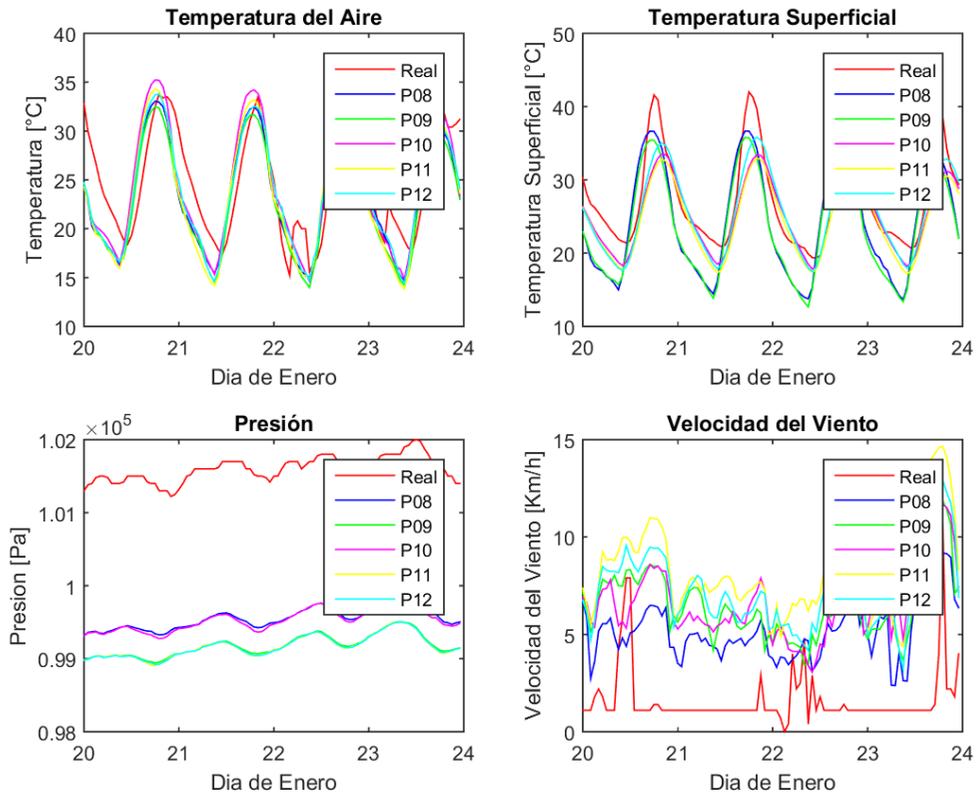


Figura 36: Gráficas de las series de tiempo de las variables de temperatura del aire, temperatura superficial, presión y la velocidad del viento para los resultados de la prueba 08 (azul), prueba 09 (verde), prueba 10 (magenta), prueba 11 (amarillo), prueba 12 (cyan) y reales (rojo) en la estación Sauzal, Cauquenes.

Como se observa en las figuras 37, el campo de viento muestra menores velocidades en los valles y es mayor cuando existe pendiente positiva (figura 37.I-IV.d). Mientras que deja de ser tan uniforme al momento de presenciarse el incendio (figura 37.II-III.). Y cuando ya paso el incendio se vuelve más uniforme nuevamente (figura 37.IV.).

Donde el flujo de calor es mayor a cero (figura 37.I-IV.c) se puede identificar como el límite del avance del incendio, denominado como “línea de fuego”. En la figura 37.II-III.c los vectores del viento se rotan según la forma de la línea de fuego.

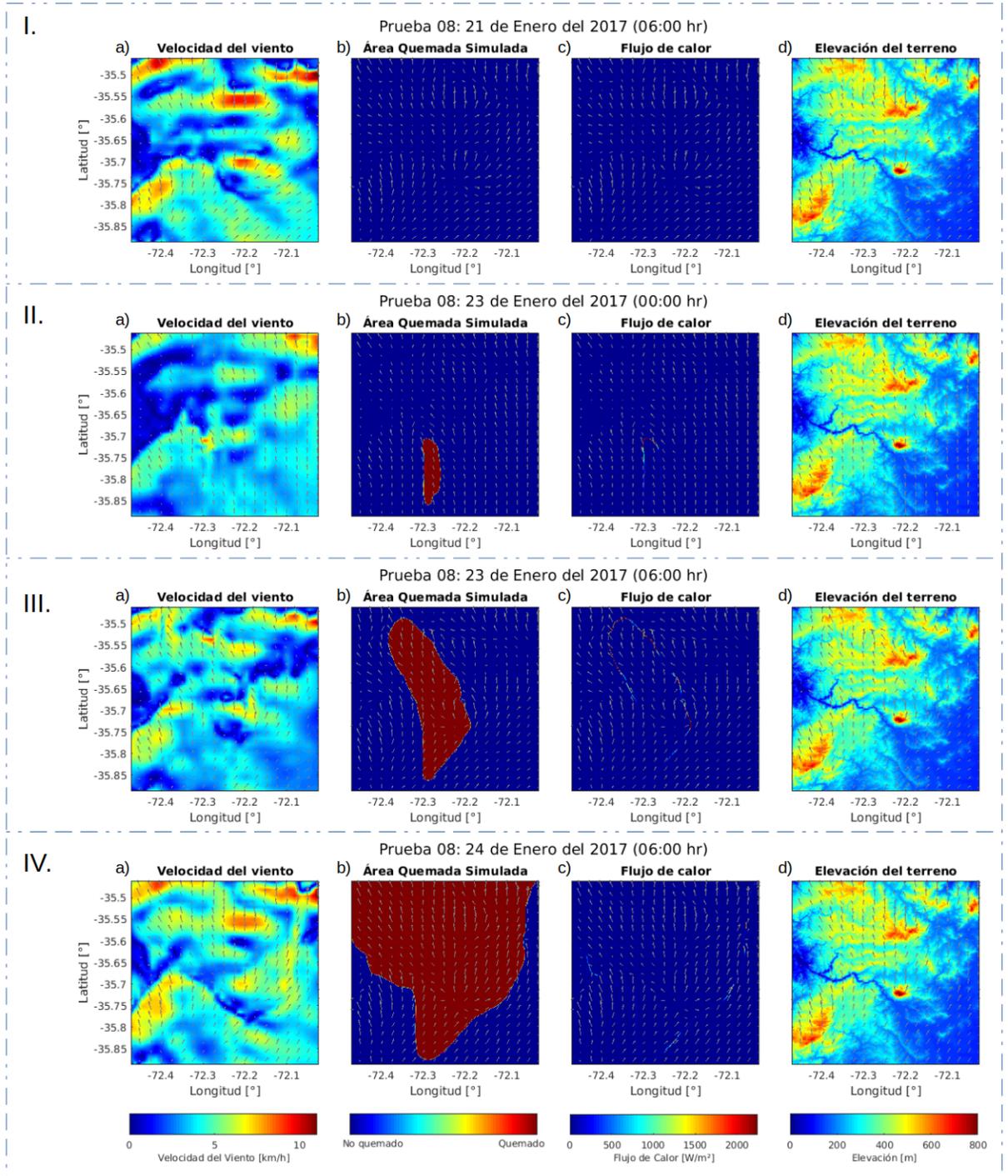


Figura 37: Comparación de distintos tiempos simulados, que corresponden al 21 (I: 06:00 hrs), 23 (II: 00:00 y III: 06:00 hrs) y 24 (IV: 06:00hrs) de enero del 2017. Aquí se relaciona el campo de vientos con la rapidez del viento (I-IV.a), área quemada (I-IV.b), flujo de calor (I-IV.c) y topografía (I-IV.d).

6. Análisis y Discusión

Según lo observado en la sección anterior, casi todas las simulaciones estuvieron notablemente subestimadas. Esto puede haber sido producto de la combinación de la resolución de los datos ingresadas, las características físicas e incluso la capacidad del computador ultimado. Pero fuera de esto, la prueba 08 fue la única que simuló de mejor manera el área afectada, en el sentido de que abarca un área quemada más grande que las demás, aunque esta fue bastante mayor al real hasta el día 24 de enero del 2017 llegando a sobreestimar en aproximadamente 7 veces el incendio.

De los resultados de la prueba 08 para el análisis del desarrollo espacial y temporal de la simulación por medio del método por dicotomía, se observan mejores valores en los estimadores en el ámbito espacial (figura 34) que en el temporal (figura 33). Lo cual indica que el complemento de los datos utilizados no fue tan errado.

Con esto se hace referencia a que los resultados de los indicadores del primer caso (figura 34) son mejores que el segundo (figura 34). Por ejemplo PC (0.34 y 0.12), FAR (0.35 y 0.81) y POFD (0.25 y 0.53), dan a entender que el desarrollo espacial es mejor que el temporal. Es decir, que abarco bastante bien el área afectado por el incendio, pero no en el tiempo que corresponde. Efectivamente podemos observar que el incendio se propagó en gran medida en la dirección correcta (gráfica de la figura 34), es decir, en las direcciones N, N-NW y N-NE.

Pero que se haya propagado más veloz en la simulación puede ser en parte producto del combate intenso contra el incendio forestal; como menciona García et al. [2014], WRF-Fire no considera los factores humanos, por lo que no se alcanza a tener un área equivalente al real. A pesar de esto,

De hecho, el valor POD (acierto sobre lo observado con incendio) en ambos casos es alto (0.96 y 0.86), disminuye en la comparación con los datos de comparación de área provenientes de Landsat 8. Esto puede ser producto del cambio de resolución usada y el tiempo de simulación de los datos reales, pues si es mayor el tamaño de la grilla (datos MODIS) se puede abarcar mayor área quemada que el real y añadiendo la sobreestimación del área afectada, es probable que aumente el valor POD.

Por otro lado, al ver los resultados de las estaciones meteorológicas se observan buenas correlaciones, y generalmente buenos resultados para las temperaturas medidas y las presiones. Caso contrario al viento, que en parte puede ser producto de un error en las mediciones, ya que en la estación Sauzal (figura 36) se observan que la velocidad del viento a momentos es constante y baja, lo que no sería una medición normal tanto en área estimada como en los datos atmosféricos.

A pesar de que los datos de las estaciones meteorológicas no estén bien representados, al observar que hay patrones en que se observa que indican una buena simulación. Este es el caso del campo de vientos (figura 37) donde en los valles se observa menores velocidades de vientos, mientras que en las pendientes positivas son mayores. Incluso el cambio en la uniformidad del campo de vientos se puede considerar como un reflejo de la retroalimentación que realiza el modelo, pues al iniciar el incendio se afectan los vientos, volviendo a

estar uniforme al momento de que ya paso el frente del incendio, aunque no en su totalidad. Aunque si nos dejamos llevar por lo que menciona Dobrinkova & Jordanov [2010] los vientos alrededor de la línea de fuego en las figuras 37.II-III.c indicaría inestabilidad del modelo, lo que podría realizar que el incendio se propague de manera más rápida que en la realidad.

Por lo cual, se hace necesario encontrar el mejor conjunto de opciones físicas para cuando se desarrolla un incendio forestal, puesto que no se puede esperar que la física sea idéntica a aquellos días que no hay incendios forestales. Efectivamente, por ejemplo, Peace et al. [2015] menciona que existe una fuerte relación entre la propagación del incendio y la capa límite planetaria, que es una de las opciones que entra en cuestión. Esto se puede hacer mientras se hacen pruebas para distintos incendios desarrollados en el área.

Aunque no se puede dejar de mencionar por un lado que la clasificación de los tipos de combustibles fue solo por medio de imágenes satelitales, por lo que puede que existan errores en la estimación de este archivo. Pues como se observa en la tabla 22, hay combustibles que no fueron incluidos en el archivo, debido a que por la resolución de los datos landsat es complejo visualizarlos, como es el caso de aquellos que corresponden al grupo de desechos de podas y cortas.

Mientras que, por otro lado, el hecho contradictorio visto en el análisis de las estaciones meteorológicas. Donde las velocidades del viento son menores que las reales y aun así el incendio forestal se propaga más rápido que en la realidad. Por lo que es necesario hacer mejoras de estos datos para ocasiones futuras, lo que involucraría mejorar la resolución de los datos y la identificación de cada combustible por medio de visitas a terrenos para clasificar de mejor manera los datos.

Cabe destacar que el no poder ocupar una mejor resolución de los datos igual juega en contra. En este caso teníamos datos con resoluciones de 30 metros (combustible y topografía), que no fueron ocupados a esta resolución debido a que la capacidad computacional no era suficiente para trabajar con el peso de los datos utilizados. La mayor resolución que pudo ocuparse fue de 50 metros, e incluso el modelo fue forzado, puesto que solo se pudo ejecutar los datos con 2 dominios. Lo que en principio debió ser de al menos 6 dominios para llegar de la resolución de los datos atmosféricos a los de combustible y topografía. Lo cual se realiza considerando que la anidación de los dominios debe ser en la razón 1:3 y/o 1:5. Es por esto que, las características locales no han podido ser bien representadas, como si es posible ver de mejor manera en otras simulaciones realizadas en España [García et al, 2014] y en Estados Unidos [Beezley et al, 2010].

Otro punto donde la capacidad computacional no fue suficiente para simular más tiempo. Estos modelos necesitan un determinado número de pasos de tiempo de simulación para estabilizarse (lo menos de 3 días), lo cual no se logró llevar a cabo. En consecuencia, que la simulación no fue completamente exitosa, en el sentido que se sobreestimo puede ser causa de la falta de estabilidad del modelo.

A pesar de las dificultades que pueda tener implementar este sistema, principalmente por el hecho de la creación de datos de combustibles para un incendio forestal. Debido a que además de la necesidad de mejorar las resoluciones de los datos y la misma clasificación,

estos son datos que deben ser actualizados anualmente. La actualización se debe llevar a cabo por lo menos desde la región de Valparaíso hasta la región de La Araucanía, ya que son las regiones con mayor cantidad de incendios forestales en las que se han quemado áreas mayores a 200 ha [CONAF, 2019]. Estos son las partes donde se han visto incendios más grandes y anualmente están afectados incendios forestales (los promedios del quinquenio 2013 al 2017 van desde los 219 hasta los 2.711 incendios [CONAF, 2019]), lo que implica cambios frecuentes en la composición y proporción de combustibles.

De esta manera se puede considerar que fue un buen primer acercamiento, principalmente para el caso chileno y sudamericano, pues como se ha mencionado anteriormente no se han realizado estudios con WRF-Fire aplicados a casos reales en esta zona geográfica.

7. Conclusiones

A modo de conclusión, se puede decir que si fue efectivo llevar a cabo simulaciones con los datos descargados de atmósfera FNL y, los datos de topografía que son descargados y modificados (DEM SRTM1) y los de combustibles creados por medio de una clasificación supervisada en base a los 13 modelos de combustibles para un incendio de Anderson con el software ArcGIS. Esto se puede considerar un buen primer paso para el estudio de estos fenómenos tanto en Chile como en Sudamérica, ya que es primera vez que se realiza en el área. A pesar de que este método necesitará mejoras para su implementación.

Aunque sí se realizó la simulación, por las dimensiones del incendio no se pudo llevar a cabo en su totalidad hasta el día 26, pero si fue posible hasta el día 24. Esto es consecuencia de que los archivos utilizados para la simulación son demasiado pesados, lo que conlleva un gran costo computacional al ejecutar WRF-Fire.

Por otro lado, los resultados no fueron los esperados, pues bajo ninguna de las condiciones físicas propuestas en las diferentes simulaciones se logró obtener magnitudes de área quemadas a los reales hasta el día 24 de enero del 2017. De hecho, se obtuvieron dos casos extremos y opuestos, que corresponde a subestimación ($\sim 1\%$) y sobreestimación ($> 700\%$). Esto no quiere decir que fue un trabajo en vano, puesto que la simulación que estuvo sobre estimada (prueba 08), da a entender que el desarrollo espacial de la propagación del incendio fue correcta, pues avance hacia el N, N-NW y N-NE.

El método utilizado para crear el archivo de combustible se puede considerar eficiente. En el sentido que si es posible llevar a cabo una simulación con este archivo y que no se necesita de mayores recursos para crearlo. Pero por otra parte no es suficiente, pues debido a la resolución de los datos landsat 8 (30m) hay tipos de combustibles que no son posibles identificar con la clasificación supervisada, como es el caso de los desechos de poda y cortas.

En general, a pesar de la mala simulación del área afectado por el incendio, los resultados de las variables meteorológicas de las estaciones Chanco y Sauzal al día 24 de enero fueron bastante acertadas, principalmente la temperatura del aire y de la superficie, tanto al considerar en magnitudes de estos, como en la correlación entre los datos reales y los simulados. Solo en la estación Sauzal el viento obtuvo muy baja correlación y, valores de promedio y variación estándar muy distintos a los reales, pero esto se atribuye a problemas en la medición real. Además, cabe mencionar que los valores de las presiones simuladas en siempre fueron menor a aquellas in-situ en ambas estaciones, pero con correlaciones bastante altas ($>80\%$).

El trabajo a futuro consistirá en encontrar la mejor resolución posible con el objetivo de poder simular correctamente estos eventos. Luego es importante indagar mejor en que características deben ser utilizadas de manera óptima en el archivo namelist.input, principalmente para la sección de la física como los modelos de convección, microfísica y capa límite planetaria. Solo así se podrá encontrar un esquema de las características que se requiere para llevar a cabo una simulación de un incendio en Chile de la mejor manera posible.

Para poder implementar este método para la mitigación de incendios, inicialmente es necesario un computador de grandes capacidades que sea capaz de simular de manera rápida y efectiva los incendios. También, es necesario crear los archivos de combustibles para las regiones que año a año se ven más afectados por los incendios forestales; desde la V región hasta la IX por sus grandes cantidades de incendios de gran tamaño. Por último, cada año actualizar estos datos, ya que frecuentemente ocurren sucesos que afectan a la vegetación presente en cada lugar, destruyendo árboles, plantas, arbustos y praderas cambiando así la composición de los combustibles vegetales, por ejemplo, inundaciones, derrumbes, erupciones volcánicas y los mismos incendios forestales.

8. Anexos

8.1. Anexo A: namelist.wps

Ejemplo de namelist.wps utilizado para ejecutar la Prueba 08

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 3,
  start_date = '2017-01-21_00:00:00', '2017-01-21_00:00:00',
'2017-01-21_00:00:00',
  end_date   = '2017-01-25_00:00:00', '2017-01-25_00:00:00',
'2017-01-25_00:00:00',
  interval_seconds = 21600,
  io_form_geogrid = 2,
  opt_output_from_geogrid_path = '/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/...
Pruebas/Prueba08/',
  debug_level = 0,,
  subgrid_ratio_x = 10,
  subgrid_ratio_y = 10,
/

&geogrid
  parent_id          = 1,1,2,
  parent_grid_ratio = 1,3,5,
  i_parent_start     = 1,20,23,
  j_parent_start     = 1,20,23,
  e_we               = 64,76,161,
  e_sn               = 63,73,141,
  geog_data_res      = '30s','30s','30s',
  dx = 4500,
  dy = 4500,
  map_proj = 'mercator',
  ref_lat  = -35.698,
  ref_lon  = -72.346,
  truelat1 = -35.698,
  truelat2 = 0,
  stand_lon = -72.346,
  geog_data_path = '/home/fernanda/Tesis/wrfdata/geog',
  opt_geogrid_tbl_path = '/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/Pruebas/...
Prueba08/',
  ref_x = 32.0,
  ref_y = 31.5,
/

&ungrib
```

```

    out_format = 'WPS',
    prefix = 'FILE',
/

&metgrid
    fg_name = 'FILE',
    io_form_metgrid = 2,
    opt_output_from_metgrid_path = '/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/...
Pruebas/Prueba08/',
    opt_metgrid_tbl_path = '/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/Pruebas/...
Prueba08/',
/

&mod_levs
    press_pa = 201300 , 200100 , 100000 ,
                95000 , 90000 ,
                85000 , 80000 ,
                75000 , 70000 ,
                65000 , 60000 ,
                55000 , 50000 ,
                45000 , 40000 ,
                35000 , 30000 ,
                25000 , 20000 ,
                15000 , 10000 ,
                5000 , 1000
/

&domain_wizard
    grib_data_path = '/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/DatosAtmosfera/FNL',
    grib_vtable = 'null',
    dwiz_name      =Prueba08
    dwiz_desc      =
    dwiz_user_rect_x1 =584
    dwiz_user_rect_y1 =693
    dwiz_user_rect_x2 =624
    dwiz_user_rect_y2 =723
    dwiz_show_political =true
    dwiz_center_over_gmt =true
    dwiz_latlon_space_in_deg =10
    dwiz_latlon_linecolor =-8355712
    dwiz_map_scale_pct =12.5
    dwiz_map_vert_scrollbar_pos =0
    dwiz_map_horiz_scrollbar_pos =0
    dwiz_gridpt_dist_km =4.5

```

```

dwiz_mpi_command =
dwiz_tcvitals =null
dwiz_bimap =Y

```

8.2. Anexo B: namelist.input

Ejemplo de namelist.input para ejecutar la Prueba 08

```

&time_control
run_days           = 6,
run_hours          = 12,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2017,      2017,      2017,
start_month        = 01,        01,        01,
start_day          = 21,        21,        21,
start_hour         = 00,        00,        00,
start_minute       = 00,        00,        00,
start_second       = 00,        00,        00,
end_year           = 2017,      2017,      2017,
end_month          = 01,        01,        01,
end_day            = 25,        25,        25,
end_hour           = 00,        00,        00,
end_minute         = 00,        00,        00,
end_second         = 00,        00,        00,
interval_seconds   = 21600,
input_from_file    = .true.,    .true.,    .true.,
history_interval   = 20,        20,        20,
frames_per_outfile = 18,      18,      18,
restart            = .false.,
restart_interval   = 720,
io_form_history    = 2,
io_form_restart    = 2,
io_form_input      = 2,
io_form_boundary   = 2,
debug_level       = 1,
/

&domains
time_step          = 27,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 2,
e_we               = 64,        76,        161,
e_sn                = 63,        73,        141,
e_vert             = 35,        35,        35,

```

```

p_top_requested      = 5000,
num_metgrid_levels  = 32,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                  = 4500,    1500,    300,
dy                  = 4500,    1500,    300,
grid_id             = 1,      2,      3,
parent_id           = 1,      1,      2,
i_parent_start      = 1,      20,    23,
j_parent_start      = 1,      20,    23,
parent_grid_ratio   = 1,      3,      5,
parent_time_step_ratio = 1,    3,      5,
feedback            = 1,
smooth_option       = 0,
  sr_x               = 10, 10, 10,
  sr_y               = 10, 10, 10,
  sfcp_to_sfcp       = .true.,
  p_top_requested     = 10000,
/

&physics
  mp_physics         = 2,    2,    2,
  ra_lw_physics      = 1,    1,    1,
  ra_sw_physics      = 1,    1,    1,
  radt               = 10,   10,   10,
  sf_sfclay_physics = 1,    1,    1,
  sf_surface_physics = 1,    1,    1,
  bl_pbl_physics     = 1,    1,    1,
  bldt               = 0,    0,    0,
  cu_physics         = 1,    1,    1,
  cudt               = 5,    5,    5,
  isfflx             = 1,
  ifsnow             = 0,
  icloud             = 0,
  surface_input_source = 1,
  num_soil_layers    = 5,
  maxiens            = 1,
  maxens             = 3,
  maxens2            = 3,
  maxens3            = 16,
  ensdim             = 144,
  num_land_cat       = 21,
/

&fdda
/

```

```

&dynamics
rk_ord           = 3,
w_damping       = 0,
diff_opt        = 2,
km_opt          = 2,
damp_opt        = 0,
base_temp       = 290.
zdamp           = 5000.,
dampcoef        = 0.2,
khdif           = 0.05,
kvdif           = 0.05,
smdiv           = 0.1,
emdiv           = 0.01,
epssm           = 0.1,
time_step_sound = 20,
h_mom_adv_order = 5,
v_mom_adv_order = 3,
h_sca_adv_order = 5,
v_sca_adv_order = 3,
non_hydrostatic = .true.,
/

```

```

&bdy_control
spec_bdy_width  = 5,
spec_zone       = 1,
relax_zone      = 4,
specified       = .true.,.false.,.false.,
periodic_x      = .false.,.false.,.false.,
symmetric_xs    = .false.,.false.,.false.,
symmetric_xe    = .false.,.false.,.false.,
open_xs         = .false.,.false.,.false.,
open_xe         = .false.,.false.,.false.,
periodic_y      = .false.,.false.,.false.,
symmetric_ys    = .false.,.false.,.false.,
symmetric_ye    = .false.,.false.,.false.,
open_ys         = .false.,.false.,.false.,
open_ye         = .false.,.false.,.false.,
nested         = .false., .true., .true.,
/

```

```

&grib2
/

```

```

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group      = 0,
nio_groups                = 1,
/

&fire
ifire                    =      2,      2,      2,
fire_fuel_cat            =      3,      3,      3,
fire_num_ignitions      =      2,      2,      2,
fire_ignition_start_lon1 = -71.28884, -72.28884, -72.28884,
fire_ignition_start_lat1 = -35.85556, -35.85556, -35.85556,
fire_ignition_end_lon1  =    -72.28,   -72.28,   -72.28,
fire_ignition_end_lat1  = -35.82833, -35.82833, -35.82833,
fire_ignition_radius1   =     200,     200,     200,
fire_ignition_start_time1 = 127440, 127440, 127440,
fire_ignition_end_time1  =  927440,  927440,  927440,
fire_ignition_start_lon2 = -72.27379, -72.27379, -72.27379,
fire_ignition_start_lat2 = -35.82963, -35.82963, -35.82963,
fire_ignition_end_lon2  = -72.28028, -72.28028, -72.28028,
fire_ignition_end_lat2  = -35.28028, -35.84903, -35.84903,
fire_ignition_radius2   =     200,     200,     200,
fire_ignition_start_time2 = 127440, 127440, 127440,
fire_ignition_end_time2  =  927440,  927440,  927440,
fire_print_msg          =      1,      1,      1,
fire_print_file         =      0,      0,      0,
fire_boundary_guard     =     -1,     -1,     -1,
fire_fuel_left_method   =      1,      1,      1,
fire_fuel_left_irl      =      2,      2,      2,
fire_fuel_left_jrl      =      2,      2,      2,
fire_atm_feedback       =      1.,     1.,     1.,
fire_grows_only         =      1,      1,      1,
fire_viscosity          =     0.4,     0.4,     0.4,
fire_upwinding          =      3,      3,      3,
fire_lfn_ext_up         =     1.0,     1.0,     1.0,
fire_test_steps         =      0,      0,      0,
fire_topo_from_atm     =      1,      1,      1,

```

8.3. Anexo C: namelist.fire

Archivo necesario para la ejecución del modulo Fire de WRF.

```

&fuel_scalars          ! scalar fuel constants
cmbcnst = 17.433e+06,   ! J/kg combustion heat dry fuel
hfgl      = 17.e4 ,     ! W/m^2 heat flux to ignite canopy
fuelmc_g = 0.08,       ! ground fuel moisture, set = 0 for dry
!jc fuelmc_g = 0.09,   ! ground fuel moisture, set = 0 for dry

```

```

fuelmc_c = 1.00,           ! canopy fuel moisture, set = 0 for dry
nfuelcats = 13,          ! number of fuel categories used
no_fuel_cat = 14         ! extra category for no fuel
/

&fuel_categories
  fuel_name =
'1: Short grass (1 ft)',
'2: Timber (grass and understory)',
'3: Tall grass (2.5 ft)',
'4: Chaparral (6 ft)',
'5: Brush (2 ft) ',
'6: Dormant brush, hardwood slash',
'7: Southern rough',
'8: Closed timber litter',
'9: Hardwood litter',
'10: Timber (litter + understory)',
'11: Light logging slash',
'12: Medium logging slash',
'13: Heavy logging slash',
'14: no fuel'
  windrf= 0.36, 0.36, 0.44, 0.55, 0.42, 0.44, 0.44,
          0.36, 0.36, 0.36, 0.36, 0.43, 0.46, 1e-7
  fgi = 0.166, 0.897, 0.675, 2.468, 0.785, 1.345, 1.092,
!jc fgi= 0.166, 0.897, 1.076, 2.468, 0.785, 1.345, 1.092
          1.121, 0.780, 2.694, 2.582, 7.749, 13.024, 1.e-7,
  fueldepthm=0.305, 0.305, 0.762, 1.829, 0.61, 0.762, 0.762,
          0.061, 0.061, 0.305, 0.305, 0.701, 0.914, 0.305,
  savr = 3500., 2784., 1500., 1739., 1683., 1564., 1562.,
          1889., 2484., 1764., 1182., 1145., 1159., 3500.,
  fuelmce = 0.12, 0.15, 0.25, 0.20, 0.20, 0.25, 0.40,
          0.30, 0.25, 0.25, 0.15, 0.20, 0.25, 0.12,
  fueldens = 32.,32.,32.,32.,32.,32.,32., ,
          32.,32.,32.,32.,32.,32.,32., ! 32 if solid, 19 if rotten
  st = 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555,
          0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555, 0.0555,
  se = 0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010,
          0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010, 0.010,
  ! ----- Notes on weight: (4) - best fit of Latham data;
  !           (5)-(7) could be 60-120; (8)-(10) could be 300-1600;
  !           (11)-(13) could be 300-1600
  weight = 7., 7., 7., 180., 100., 100., 100.,
          900., 900., 900., 900., 900., 900., 7. ,
  ! !----- 1.12083 is 5 tons/acre. 5-50 tons/acre orig., 100-300 after blowdown
! fci_d = 0., 0., 0., 1.123, 0., 0., 0.,

```

```

!      1.121, 1.121, 1.121, 1.121, 1.121, 1.121, 0.,
! fct = 60., 60., 60., 60., 60., 60., 60.,
!      60., 120., 180., 180., 180., 180., 60.,
! ichap = 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
/

```

8.4. Anexo D: Valor_Unico14.m

Script que modifica el archivo de combustibles, llevando todos los valores de “No Combustible” a un valor unico 14.

```

clc; close all; clear all;

filetif='CombustibeNew.tif';
[A,R,GEO]=geotiffread(filetif);
B=A;

[row91,col91]=find(A==91);
for i=1:length(row91)
    B(row91(i),col91(i))=14;
end

[row92,col92]=find(A==92);
for i=1:length(row92)
    B(row92(i),col92(i))=14;
end

[row98,col98]=find(A==98);
for i=1:length(row98)
    B(row98(i),col98(i))=14;
end

[row99,col99]=find(A==99);
for i=1:length(row99)
    B(row99(i),col99(i))=14;
end

geotiffwrite('CombustibeNew14chico.tif',B,R,'CoordRefSysCode', 32719)

```

8.5. Anexo E: anagde_fire_wrfinput.m

Script creado por el profesor Ivo Fustos (Universidad de la Frontera, IX región, Chile), para incorporar los datos de combustibles y topografía a los archivos wrfinput*, para poder simular con WRF-Fire.

```
function anagde_fire
```

```

path_tif='/home/fernanda/Tesis/Simulaciones/GeoTIFF/'; % cambiar
%path_tif='./'; % cambiar
vv=2; % la version actual es 2, previos colocar cualquier numero
struc_in.demname=[path_tif 'CorrUnionFill_19sexten_cut2WGS84_cutDom2.tif'];
struc_in.combname=[path_tif 'CombustibleNew14Extendido_cut_WGS84_cutDom2.tif'];

struc_in.corr_geo=4;
% lee los ficheros de entrada de DEM y combustible
fprintf('Abriendo TIF\n');
struc_in=lee_tif(struc_in);

r=dir('wrfinput*');
for i=1:length(r)
    geonc=r(i).name;
    junk=dir(geonc);
    fprintf('Corrigiendo %s\n',geonc);

    generate_fire_wrfinput(struc_in,geonc);

end

end

function generate_fire_v2(struc_in, geonc)
% programa que solamente rellena los campos NFUEL y ZSF, en caso que exista lo
% renombra.
% Programado por Ivo Fustos, 2017

junk=regexp(geonc,'d0','split');junk=junk{end};junk=strrep(junk,'.nc','');
domi=str2num(junk);

% extrae las coordenadas

LAT=ncread(geonc,'XLAT_M');
LON=ncread(geonc,'XLONG_M');
DEM_nc = ncread(geonc,'HGT_M');

structu.LAT=LAT;

```

```

structu.LON=LON;
structu.DEM=DEM_nc;

% -----
%
%           Genera resampling para NFUEL_CAT y ZSF
%
% -----

struc_out=resampling_2geonc(structu, struc_in);

% -----
%
%           Genera las variables ZSF y NFUEL_CAT
%float ZSF(Time, south_north, west_east) ;
% -----
% revisa si ZSF existe, sino lo crea

    %netcdf.inqDimID(ncid,varname)

% version 2
% -----
%
%           Corrgige HGT_M por ZSF
% esto pasa cuando la resolucion es menor a 1K (30s)
% Le agrega un bias de n metros
% -----

if struc_in.corr_geo<=domi

    varname_hgt='HGT_M';

    %varid_zsf = netcdf.inqDimID(ncid,varname_zsf);
    %netcdf.inqDimID(ncid,varname)
    ncwrite(geonc,varname_hgt,flip1r(struc_out.DEM)+2)
end

% -----
%
%           Genera ZSF
%float ZSF(Time, south_north, west_east) ;
% -----

```

```

fprintf('\t Genera ZSF\n');

%netcdf.putVar(ncid,varid_zsf,fliplr(struc_out.DEM));

varname_zsf='ZSF';

    %varid_zsf = netcdf.inqDimID(ncid,varname_zsf);
    %netcdf.inqDimID(ncid,varname)
ncwrite(geonc,varname_zsf,fliplr(struc_out.DEM))

fprintf('\t\t->Ok\n');

% -----
%
%           Genera NFUEL_CAT
%float NFUEL_CAT(Time, south_north_subgrid, west_east_subgrid) ;
% -----
%NFUEL_CAT

fprintf('\t Genera NFUEL_CAT\n');

%netcdf.putVar(ncid,varid_com,fliplr(struc_out.COM));
varname_com='NFUEL_CAT';

ncwrite(geonc,varname_com,fliplr(struc_out.COM))
fprintf('\t\t->Ok\n');

end

function generate_fire_aux(struc_in,geonc);
% programa que crea un netcdf auxiliar y despues lo concatena con el
% original. Programado por Ivo Fustos, 2017

% Open a netCDF file.
ncid2 = netcdf.create([geonc '_2'],'64BIT_OFFSET');
ncid = netcdf.open(geonc,'NC_WRITE');

netcdf.reDef(ncid); % lo deja en modalidad para definir

% obtiene parametros, "subgrid" tiene los mismos parametros que los
% west_east y north_south

```

```

fprintf('Generado nuevas dimensiones\n');
% debe ser Time, south_north, west_east
west_east_id = netcdf.inqDimID(ncid,'west_east');
[dimname, dimlen] = netcdf.inqDim(ncid,west_east_id);

west_east_subgrid_dim = netcdf.defDim(ncid2,...
    'west_east_subgrid',dimlen);
west_east_dim = netcdf.defDim(ncid2,'west_east',dimlen);

% genera las dimensiones N/S
south_north_id = netcdf.inqDimID(ncid,'south_north');
[dimname, dimlen] = netcdf.inqDim(ncid,south_north_id);

south_north_subgrid_dim = netcdf.defDim(ncid2,...
    'south_north_subgrid',dimlen);
south_north_dim = netcdf.defDim(ncid2,'south_north',dimlen);

fprintf('\t\t ->done\n');
% genera la dimension tiempo

%time_id = netcdf.inqDimID(ncid,'Time');
time_id = netcdf.defDim(ncid2,'Time',netcdf.getConstant('NC_UNLIMITED'));

% extrae las coordenadas, solo validas para el wrfinput, para otras debe
% terminar en _M
LAT=ncread(geonc,'XLAT');
LON=ncread(geonc,'XLONG');
DEM_nc = ncread(geonc,'HGT');

structu.LAT=LAT;
structu.LON=LON;
structu.DEM=DEM_nc;

netcdf.close(ncid);
% -----
%
%           Genera resampling para NFUEL_CAT y ZSF
%
% -----

struc_out=resampling_2geonc(structu, struc_in);
% -----

```

```

%
%                               Genera ZSF
%float ZSF(Time, south_north, west_east) ;
% -----

% revisa si ZSF existe, sino lo crea
fprintf('\t Genera ZSF\n');
varname='ZSF';

try
    varid = netcdf.defVar(ncid2,varname,'NC_FLOAT',[west_east_id...
        south_north_id  time_id]);
catch
    varid = netcdf.inqDimID(ncid2,varname);
    %netcdf.inqDimID(ncid,varname)
end
netcdf.endDef(ncid2);
netcdf.putVar(ncid2,varid,struc_out.DEM);

fprintf('\t\t->Ok\n');
% -----
%
%                               Genera NFUEL_CAT
%float NFUEL_CAT(Time, south_north_subgrid, west_east_subgrid) ;
% -----

fprintf('\t Genera NFUEL_CAT\n');
%NFUEL_CAT
netcdf.reDef(ncid2);
fprintf('\t Genera NFUEL_CAT\n');
varname='NFUEL_CAT';

try
    varid = netcdf.defVar(ncid2,varname,'NC_FLOAT',...
        [west_east_subgrid_dim south_north_subgrid_dim  time_id]);
catch
    varid = netcdf.inqDimID(ncid2,varname);
    %netcdf.inqDimID(ncid,varname)
end
netcdf.endDef(ncid2);
netcdf.putVar(ncid2,varid,struc_out.COM);

fprintf('\t\t->Ok\n');

netcdf.close(ncid2);

```

```

end

function generate_fire_wrfinput(struc_in, geonc)
% programa que genera los campos NFUEL y ZSF, en caso que exista lo
% renombra.
% Programado por Ivo Fustos, 2017

% Open a netCDF file.
ncid = netcdf.open(geonc,'WRITE');
netcdf.reDef(ncid); % lo deja en modalidad para definir

% obtiene parametros, "subgrid" tiene los mismos parametros que los
% west_east y north_south
fprintf('Generado nuevas dimensiones\n');
% debe ser Time, south_north, west_east

try
west_east_subgrid_id = netcdf.inqDimID(ncid,'west_east_subgrid');
south_north_subgrid_id = netcdf.inqDimID(ncid,'south_north_subgrid');

catch
warning('Paso 1 fallado')
west_east_id = netcdf.inqDimID(ncid,'west_east');
south_north_id = netcdf.inqDimID(ncid,'south_north');
[dimname, dimlen_we] = netcdf.inqDim(ncid,west_east_id);
[dimname, dimlen_ns] = netcdf.inqDim(ncid,south_north_id);
west_east_subgrid_id = netcdf.defDim(ncid,'west_east_subgrid',...
dimlen_we);
south_north_subgrid_id = netcdf.defDim(ncid,'south_north_subgrid',...
dimlen_we);
end

fprintf('\t\t ->done\n');
% obtiene dimension tiempo
time_id = netcdf.inqDimID(ncid,'Time');

% extrae las coordenadas
LAT=ncread(geonc,'XLAT');
LON=ncread(geonc,'XLONG');
DEM_nc = ncread(geonc,'HGT');

structu.LAT=LAT;
structu.LON=LON;
structu.DEM=DEM_nc;

```

```

% -----
%
%           Genera resampling para NFUEL_CAT y ZSF
%
% -----

struc_out=resampling_2geonc(structu, struc_in);

% -----
%
%           Genera las variables ZSF y NFUEL_CAT
%float ZSF(Time, south_north, west_east) ;
% -----
% revisa si ZSF existe, sino lo crea

varname_zsf='ZSF';

try
    varid_zsf = netcdf.defVar(ncid,varname_zsf,'NC_FLOAT',...
        [west_east_subgrid_id south_north_subgrid_id time_id]);
catch
    varid_zsf = netcdf.inqDimID(ncid,varname_zsf);
%   netcdf.inqDimID(ncid,varname)
end

varname_com='NFUEL_CAT';

try
    varid_com = netcdf.defVar(ncid,varname_com,'NC_FLOAT',[west_east_subgrid_id...
south_north_subgrid_id time_id]);
catch
    varid_com = netcdf.inqDimID(ncid,varname_com);
%   netcdf.inqDimID(ncid,varname)
end
netcdf.endDef(ncid);

netcdf.close(ncid);

% -----
%
%           Genera ZSF
%float ZSF(Time, south_north, west_east) ;
% -----

fprintf('\t Genera ZSF\n');

```

```

%netcdf.putVar(ncid,varid_zsf,fliplr(struc_out.DEM));
ncwrite(geonc,varname_zsf,fliplr(struc_out.DEM));

fprintf('\t\t->Ok\n');
% -----
%
%               Genera NFUEL_CAT
%float NFUEL_CAT(Time, south_north_subgrid, west_east_subgrid) ;
% -----
%NFUEL_CAT

fprintf('\t Genera NFUEL_CAT\n');

%netcdf.putVar(ncid,varid_com,fliplr(struc_out.COM));
ncwrite(geonc,varname_com,fliplr(struc_out.COM));

fprintf('\t\t->Ok\n');

end

function struc_out=resampling_2geonc(structu, struc_in)
% programa que toma las dimensiones de structu sacados de geo_em*nc para
% tomarlos como referencia y bajar los datos de struc_in a dicha resolucion
% espacial.
% Programado por Ivo Fustos, 2017
struc_out=[];

[xq,yq] = meshgrid(struc_in.lon_dem,struc_in.lat_dem);

DEM_down = interp2(xq,yq,struc_in.DEM_mat,structu.LON,structu.LAT,'linear');

% downsample landuse

[xq,yq] = meshgrid(struc_in.lon_com,struc_in.lat_com);

COM_down = interp2(xq,yq,struc_in.COM_mat,structu.LON,structu.LAT,'nearest');

struc_out.DEM=DEM_down;
struc_out.COM=COM_down;
end

function struc_in=lee_tif(struc_in)
% lee los ficheros de entrada de DEM y combustible

```

```

% lee el DEM

fprintf('Abriendo %s\n',struc_in.demname);
[A,bb,R]=geotiffread(struc_in.demname);
% corrige datos
A(find(A<-100))=NaN;
% pasa a flotante
A=single(A);
% genera el georef
lon_dem=linspace(R(1,1),R(2,1),size(A,2));
lat_dem=linspace(R(1,2),R(2,2),size(A,1));
struc_in.DEM_mat=A;
struc_in.lon_dem=lon_dem;
struc_in.lat_dem=lat_dem;

% lee los combustibles
[A,bb,R]=geotiffread(struc_in.combname);
% corrige datos
A(find(A<-100))=NaN;
% pasa a flotante
A=single(A);
% genera el georef
lon_com=linspace(R(1,1),R(2,1),size(A,2));
lat_com=linspace(R(1,2),R(2,2),size(A,1));
struc_in.COM_mat=A;
struc_in.lon_com=lon_com;
struc_in.lat_com=lat_com;

end

```

8.6. Anexo F: comparacion_area.m

Script que compara los resultados de áreas afectadas simuladas por WRF-Fire con los datos de área quemada realmente (MODIS y Landsat 8).

```

close all; clear all;

area_real_n = 'AreaQuemadaRealModis.tif';
resolucion_r = 1000^2/1000; %[m] en Modis
satelite= 'MODIS';

% area_real_n = 'AreaQuemadaUnion_0-1_2_WGS84.tif';
% resolucion_r = 30^2/1000; %[m] en Landsat
% satelite= 'Landsat';

tiempo='24-00';

```

```

wrfout_n = 'Prueba08/P00-wrfout_d02/wrfout_d02_2017-01-24_00_00_00'
resolucion_s = 150^2/1000;

prueba='Prueba08'

%% Abrir datos
% Simulados
wrfout=netcdf.open(wrfout_n,'NC_NOWRITE');
area_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FIRE_AREA');
area_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,area_simID);
%t=length(area_sim_tiempos(1,1,:));
t=1
area_sim =area_sim_tiempos(:,:,t);
area_Sim = rot90(area_sim);
[row_sim,col_sim] = size(area_sim);
lat_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLAT');
lat_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,lat_simID);
lat_sim =lat_sim_tiempos(:,:,t);
lat_Sim = rot90(lat_sim);
long_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLONG');
long_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,long_simID);
long_sim =long_sim_tiempos(:,:,t);
long_Sim = rot90(long_sim);

clear area_sim_tiempos lat_sim_tiempos long_sim_tiempos long_sim lat_sim
netcdf.close(wrfout)

% Reales
[area_real, cmap, R] = geotiffread(area_real_n);
[row,col]=size(area_real);
difR=-(R(2,2)-R(1,2))/(row-1);
lat_R=R(2,2):difR:R(1,2);
difR=-(R(2,1)-R(1,1))/(col-1);
long_R=R(2,1):difR:R(1,1);

for i=1:col;
lat_real(:,i) = lat_R;
end

for i=1:row;
long_real(i,:) = sort(long_R,'ascend');
end

for i=1:row;
for j=1:col;

```

```

if area_real(i,j)==-2147483648;
area_real(i,j)=0;
end
end
end

clear long_R lat_R difR R cmap

%% Cortar los datos de la simulacion
latmax = lat_real(length(lat_real(:,1)),1);
latmin = lat_real(1,1);
longmax = long_real(1,length(long_real(1,:)));
longmin = long_real(1,1);

ind_latmin = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)));
ind_latmax = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)));
ind_longmin = find(abs(long_Sim(10,:)-longmin)==min(abs(long_Sim(10,:)...
    -longmin)));
ind_longmax = find(abs(long_Sim(10,:)-longmax)==min(abs(long_Sim(10,:)...
    -longmax)));

lat_Simu = lat_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
long_Simu = long_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
area_Simu= area_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);

clear lat_Sim long_Sim area_Sim ind_latmin ind_longmax ind_longmin...
ind_latmax latmin latmax longmin longmax

%% Categorizar puntos

for i=1:length(lat_real(:,1));
    ind_lat(i)=find(abs(lat_Simu(:,1)-lat_real(i,1))==...
min(abs(lat_Simu(:,1)-lat_real(i,1))));
    lat_comp(i,length(lat_real(1,:)))=lat_Simu(ind_lat(i),1);
end
for i=1:length(long_real(1,:));
    ind_long(i)=find(abs(long_Simu(1,:)-long_real(1,i))==...
min(abs(long_Simu(1,:)-long_real(1,i))));
    long_comp(length(lat_real(1,:)),i)=long_Simu(1,ind_long(i));
end
for i=1:length(area_real(:,1));
    for j=1:length(area_real(1,:));
        area_Simu_comp(i,j)=area_Simu(ind_lat(i),ind_long(j));
    end
end
end

```

```

%% comparación

for i=1:length(area_real(:,1));
    for j=1:length(area_real(1,:));
        if area_Simu_comp(i,j)>0;
            if area_real(i,j)>0;
                area_comp(i,j)=0;
            else
                area_comp(i,j)=1;
            end
        else
            if area_real(i,j)==0;
                area_comp(i,j)=2;
            else
                area_comp(i,j)=3;
            end
        end
    end
end

%% Resultados

A=length(find(area_comp==0));%hits
B=length(find(area_comp==1));%false alarms
C=length(find(area_comp==2));%misses
D=length(find(area_comp==3));%correct negatives

PC=(A+C)/(A+B+C+D);
BIAS=(A+B)/(A+C);
POD=A/(A+C);
FAR=B/(A+B);
POFD=B/(D+B);
CSI=A/(A+C+B);
A_random=((A+C)*(A+B))/(A+B+C+D);
ETS=(A-A_random)/(A+B+C-A_random);
HK=(A)/(A+C)-B/(B+D);
ec=1/(A+B+C+D)*((A+C)*(A+B)+(D+C)*(D+B));
HSS=((A+D)-ec)/(A+B+C+D-ec);
OR=(A+D)/(C+B);
ORSS=(A*D-C*B)/(A*D+C*B);

fprintf('La cantidad de A es %.0f \n',A)
fprintf('La cantidad de B es %.0f \n',B)
fprintf('La cantidad de C es %.0f \n',C)

```

```

fprintf('La cantidad de D es %.0f \n',D)
fprintf('PC es %.2f \n',PC)
fprintf('BIAS es %.2f \n',BIAS)
fprintf('POD es %.2f \n',POD)
fprintf('FAR es %.2f \n',FAR)
fprintf('POFD es %.2f \n',POFD)
fprintf('CSI es %.2f \n',CSI)
fprintf('ETS es %.2f \n',ETS)
fprintf('HK es %.2f \n',HK)
fprintf('HSS es %.2f \n',HSS)
fprintf('OR es %.2f \n',OR)
fprintf('ORSS es %.2f \n',ORSS)

%% Graficas

figure(1)
imagesc([long_real(1,1),long_real(1,length(long_real(1,:)))],...
[lat_real(1,1),lat_real(length(lat_real(:,1)))],area_comp)
str = sprintf('%s: Pronostico vs Realidad',prueba);
set(gca,'YDir','normal')
title(str)
xlabel 'Longitud ()'
ylabel 'Latitud ()'
colorbar('Ticks',[0,1,2,3],'TickLabels',{'A','B','C','D'})
str2 = sprintf('Prueba08/Pronostico-Realidad_%s-%s_%s_%i',prueba,...
satelite,tiempo,t);

print(str2,'-dpng')

```

8.7. Anexo G: metodo_por_dicotomia.m

Script que obtiene estimadores dados por el método por dicotomia para las áreas afectadas por el incendio.

```

close all; clear all;

area_real_n = 'AreaQuemadaRealModis.tif';
resolucion_r = 1000^2/1000; %[m] en Modis
satelite= 'MODIS';
%
% area_real_n = 'AreaQuemadaUnion_0-1_2_WGS84.tif';
% resolucion_r = 30^2/1000; %[m] en Landsat
% satelite= 'Landsat';

tiempo='24-00';

```

```

wrfout_n = 'Prueba08/P00-wrfout_d02/wrfout_d02_2017-01-25_00_00_00'
t=1;
resolucion_s = 150^2/1000;

prueba='Prueba08'

%% Abrir datos
% Simulados
wrfout=netcdf.open(wrfout_n,'NC_NOWRITE');
area_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FIRE_AREA');
area_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,area_simID);
area_sim =area_sim_tiempos(:,:,t);
area_Sim = rot90(area_sim);
[row_sim,col_sim] = size(area_sim);
lat_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLAT');
lat_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,lat_simID);
lat_sim =lat_sim_tiempos(:,:,t);
lat_Sim = rot90(lat_sim);
long_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLONG');
long_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,long_simID);
long_sim =long_sim_tiempos(:,:,t);
long_Sim = rot90(long_sim);

clear area_sim_tiempos lat_sim_tiempos long_sim_tiempos long_sim lat_sim
netcdf.close(wrfout)

% Reales
[area_real, cmap, R] = geotiffread(area_real_n);
[row,col]=size(area_real);
difR=-(R(2,2)-R(1,2))/(row-1);
lat_R=R(2,2):difR:R(1,2);
difR=-(R(2,1)-R(1,1))/(col-1);
long_R=R(2,1):difR:R(1,1);

for i=1:col;
lat_real(:,i) = lat_R;
end

for i=1:row;
long_real(i,:) = sort(long_R,'ascend');
end

for i=1:row;
for j=1:col;
if area_real(i,j)==-2147483648;

```

```

area_real(i,j)=0;
end
end
end

clear long_R lat_R difR R cmap

%% Cortar los datos de la simulacion
latmax = lat_real(length(lat_real(:,1)),1);
latmin = lat_real(1,1);
longmax = long_real(1,length(long_real(1,:)));
longmin = long_real(1,1);

ind_latmin = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)));
ind_latmax = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)));
ind_longmin = find(abs(long_Sim(10,:)-longmin)==min(abs(long_Sim(10,:)-...
    longmin)));
ind_longmax = find(abs(long_Sim(10,:)-longmax)==min(abs(long_Sim(10,:)-...
    longmax)));

lat_Simu = lat_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
long_Simu = long_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
area_Simu= area_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);

clear lat_Sim long_Sim area_Sim ind_latmin ind_longmax ind_longmin ...
ind_latmax latmin latmax longmin longmax

%% Categorizar puntos

for i=1:length(lat_real(:,1));
    ind_lat(i)=find(abs(lat_Simu(:,1)-lat_real(i,1))==...
        min(abs(lat_Simu(:,1)-lat_real(i,1))));
    lat_comp(i,length(lat_real(1,:)))=lat_Simu(ind_lat(i),1);
end
for i=1:length(long_real(1,:));
    ind_long(i)=find(abs(long_Simu(1,:)-long_real(1,i))==...
        min(abs(long_Simu(1,:)-long_real(1,i))));
    long_comp(length(lat_real(1,:)),i)=long_Simu(1,ind_long(i));
end
for i=1:length(area_real(:,1));
    for j=1:length(area_real(1,:));
        area_Simu_comp(i,j)=area_Simu(ind_lat(i),ind_long(j));
    end
end
end

```

```

%% comparación

for i=1:length(area_real(:,1));
    for j=1:length(area_real(1,:));
        if area_Simu_comp(i,j)>0; % Pronostico SI
            if area_real(i,j)>0; % Incendio SI
                area_comp(i,j)=0; % A
            else % Incendio NO
                area_comp(i,j)=1; % B
            end
        else % Pronostico NO
            if area_real(i,j)>0; % Incendio SI
                area_comp(i,j)=2; %C
            else
                area_comp(i,j)=3; %D
            end
        end
    end
end

%% Resultados

A=length(find(area_comp==0));%hits
B=length(find(area_comp==1));%false alarms
C=length(find(area_comp==2));%misses
D=length(find(area_comp==3));%correct negatives

PC=(A+C)/(A+B+C+D);
BIAS=(A+B)/(A+C);
POD=A/(A+C);
FAR=B/(A+B);
POFD=B/(D+B);
CSI=A/(A+C+B);
A_random=((A+C)*(A+B))/(A+B+C+D);
ETS=(A-A_random)/(A+B+C-A_random);
HK=(A)/(A+C)-B/(B+D);
ec=1/(A+B+C+D)*((A+C)*(A+B)+(D+C)*(D+B));
HSS=((A+D)-ec)/(A+B+C+D-ec);
OR=(A+D)/(C+B);
ORSS=(A*D-C*B)/(A*D+C*B);

fprintf('La cantidad de A es %.0f \n',A)
fprintf('La cantidad de B es %.0f \n',B)
fprintf('La cantidad de C es %.0f \n',C)
fprintf('La cantidad de D es %.0f \n',D)

```

```

fprintf('PC es %.2f \n',PC)
fprintf('BIAS es %.2f \n',BIAS)
fprintf('POD es %.2f \n',POD)
fprintf('FAR es %.2f \n',FAR)
fprintf('POFD es %.2f \n',POFD)
fprintf('CSI es %.2f \n',CSI)
fprintf('ETS es %.2f \n',ETS)
fprintf('HK es %.2f \n',HK)
fprintf('HSS es %.2f \n',HSS)
fprintf('OR es %.2f \n',OR)
fprintf('ORSS es %.2f \n',ORSS)
fprintf 'Porcentajes'
fprintf('1: %.2f\n',A/(A+B+C))
fprintf('2: %.2f\n',B/(A+B+C))
fprintf('3: %.2f\n',C/(A+B+C))

%% Graficas

figure(1)
imagesc([long_real(1,1),long_real(1,length(long_real(1,:)))],...
        [lat_real(1,1),lat_real(length(lat_real(:,1)))],area_comp)
str = sprintf('%s: Pronostico vs Realidad',prueba);
set(gca,'YDir','normal')
title(str)
xlabel 'Longitud []'
ylabel 'Latitud []'
xlim([-72.523,-71.911])
ylim([-35.887,-35.211])
colorbar('Ticks',[0,1,2,3],'TickLabels',{'A','B','C','D'})
str2 = sprintf('Prueba08/1-Pronostico-Realidad_%s-%s_%s_%i',prueba,...
        satellite,tiempo,t);
print(str2,'-dpng')

```

8.8. Anexo H: AnalisisEstacionesMeteorologicas.m

Script que obtiene comparación gráfica de los resultados de las estaciones meteorológicas, incluyendo los promedio y variaciones estandar.

```

clc; close all; clear all;

% Analisis de datos de estaciones meteorologicas

%% Lectura de Datos
EstacionR=load('Chanco2.txt');
Estacion='Chanco, Chanco';

```

```

dominio='d02';
fprintf('Estacion %s %s\n',Estacion,dominio)
horas=96;

leyenda=1; % 1,3
%leyenda=2; % 1:5
Tiempo=20:1/24:24-1/24;

%% Graficar Datos reales

%ajuste estacion real
EstacionReal = EstacionR(20:19+horas,:);
%1 Temperatura del Aire (C)
%2 Humedad Relativa (%)
%3 Dirección del Viento (moda)
%4 Temperatura Suelo 10cm (C)
%5 Presión (mbar)
%6 Velocidad del Viento (Km/h)
%7 Rafaga (Km/h)
%8 Radiación Solar (W/m2)

TempAireR=EstacionReal(:,4);
TempSupR=EstacionReal(:,11);
PresionR=EstacionReal(:,8)*100;
VientoR=EstacionReal(:,7);

figure(1)
plot(Tiempo,TempAireR,'r');
figure(2)
plot(Tiempo,TempSupR,'r');
figure(3)
plot(Tiempo,PresionR,'r');
figure(4)
plot(Tiempo,VientoR,'r');
figure(5)
subplot(2,2,1)
plot(Tiempo,TempAireR,'r');
subplot(2,2,2)
plot(Tiempo,TempSupR,'r');
subplot(2,2,3)
plot(Tiempo,PresionR,'r');
subplot(2,2,4)
plot(Tiempo,VientoR,'r');
figure(6)
subplot(2,1,1)

```

```

plot(Tiempo,TempAireR,'r');
subplot(2,1,2)
plot(Tiempo,VientoR,'r');

for caso=[1,3];
    switch caso
        case 1
            EstacionVirt=load('Prueba08\Chanc.d02.TS.txt');
            fprintf('Prueba08 \n');
            color='-b';
        case 2
            EstacionVirt=load('Prueba09\P09-Chanc.d02.TS.txt');
            fprintf('Prueba09 \n');
            color='-g';
        case 3
            EstacionVirt=load('Prueba10\Chanc.d02.TS.txt');
            fprintf('Prueba10 \n');
            color='-m';
        case 4
            EstacionVirt=load('Prueba11\P11-Chanc.d02.TS.txt');
            fprintf('Prueba11 \n');
            color='-y';
        case 5
            EstacionVirt=load('Prueba12\P12-Chanc.d02.TS.txt');
            fprintf('Prueba12 \n');
            color='-c';
    end

%ajuste estacion virtual
[N,M]=size(EstacionVirt);
pos=N/EstacionVirt(N,2);

for i=1:horas;
    a=find(abs(EstacionVirt(:,2)-i)==min(abs(EstacionVirt(:,2)-i)));
    EstacionVirtual(i,:) = EstacionVirt(a,:);
end
%Tiempo=EstacionVirtual(:,2);

%1 id:            grid ID
%2 ts_hour:       forecast time in hours
%3 id_tsloc:      time series ID
%4,5 ix,iy:       grid location (nearest grid to the station)
%6 t:             2 m Temperature (K)
%7 q:             2 m vapor mixing ratio (kg/kg)

```

```

%8 u:          10 m U wind (earth-relative)
%9 v:          10 m V wind (earth-relative)
%10 psfc:      surface pressure (Pa)
%11 glw:       downward longwave radiation flux at the ground (W/m^2,...
downward is positive)
%12 gsw:       net shortwave radiation flux at the ground (W/m^2, ...
downward is positive)
%13 hfx:       surface sensible heat flux (W/m^2, upward is positive)
%14 lh:        surface latent heat flux (W/m^2, upward is positive)
%15 tsk:       skin temperature (K)
%16 tslb(1):   top soil layer temperature (K)
%17 rainc:     rainfall from a cumulus scheme (mm)
%18 rainnc:    rainfall from an explicit scheme (mm)
%19 clw:       total column-integrated water vapor and cloud variables

```

```

%% Analisis Temperatura del Aire [K]

```

```

TempAireV=EstacionVirtual(:,6)-273.15;

```

```

CorrTempAire=corrcoef(TempAireR,TempAireV);
fprintf('La correlacion de la temperatura es %.2f \n',CorrTempAire(1,2))

```

```

MeanTempAireR=mean(TempAireR);
StdTempAireR=std(TempAireR);
MeanTempAireV=mean(TempAireV);
StdTempAireV=std(TempAireV);
fprintf('El promedio de la temperatura es %.2f \n',MeanTempAireV)
fprintf('El variacion estandar de la temperatura es %.2f \n',...
        StdTempAireV)

```

```

figure(1)
hold on;
plot(Tiempo,TempAireV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Temperatura [C]')
str = sprintf(' Estacion %s: Temperatura del Aire', Estacion);
title(str)

```

```

str2 = sprintf('%s-%s_TemperaturaDelAire', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')

%% Analisis Temperatura Superficial [K]

TempSupV=EstacionVirtual(:,16)-273.15;

CorrTempSup=corrcoef(TempSupR,TempSupV);
fprintf('La correlacion de la temperatura superficial es %.2f \n',...
        CorrTempSup(1,2))

MeanTempSupR=mean(TempSupR);
StdTempSupR=std(TempSupR);
MeanTempSupV=mean(TempSupV);
StdTempSupV=std(TempSupV);
fprintf('El promedio de la temperatura superficial es %.2f \n',MeanTempSupV)
fprintf('El variacion estandar de la temperatura superficial es %.2f ...
        \n',StdTempSupV)

figure(2)
hold on;
plot(Tiempo,TempSupV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Temperatura Superficial[C]')
str = sprintf(' Estacion %s: Temperatura superficial', Estacion);
title(str)
str2 = sprintf('%s-%s_TemperaturaSuperficial', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')

%% Presion [Pa]

PresionV=EstacionVirtual(:,10);
CorrPresion=corrcoef(PresionR,PresionV);
fprintf('La correlacion de la presion es %.2f \n',CorrPresion(1,2))
MeanPresionR=mean(PresionR);
StdPresionR=std(PresionR);
MeanPresionV=mean(PresionV);
StdPresionV=std(PresionV);

```

```

fprintf('El promedio de la Presion es %.2f \n',MeanPresionV)
fprintf('El variacion estandar de la Presion es %.2f \n',StdPresionV)

figure(3)
hold on;
plot(Tiempo,PresionV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Presion [Pa]')
str = sprintf(' Estacion %s: Presión', Estacion);
title(str)
str2 = sprintf('%s-%s_Presion', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')

%% Velocidad del viento [Km/h]

VientoR=EstacionReal(:,7);
VientoV=sqrt(EstacionVirtual(:,8).^2+EstacionVirtual(:,9).^2);

CorrViento=corrcoef(VientoR,VientoV);
fprintf('La correlacion del viento es %.2f \n',CorrViento(1,2))

MeanVientoR=mean(VientoR);
StdVientoR=std(VientoR);
MeanVientoV=mean(VientoV);
StdVientoV=std(VientoV);
fprintf('El promedio de la velocidad del viento es %.2f \n',MeanVientoV)
fprintf('El variacion estandar de la velocidad del viento es %.2f \n',...
    StdVientoV)

figure(4)
hold on;
plot(Tiempo,VientoV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
end
xlabel('Dia de Enero')

```

```

ylabel('Velocidad del Viento [Km/h]')
str = sprintf(' Estacion %s: Velocidad del Viento', Estacion);
title(str)
str2 = sprintf('%s-%s_VelocidadDelViento', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')

%%%%%

figure(5)
subplot(2,2,1)
hold on;
plot(Tiempo,TempAireV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Temperatura [C]')
title('Temperatura del Aire')
subplot(2,2,2)
hold on;
plot(Tiempo,TempSupV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Temperatura Superficial [C]')
title('Temperatura Superficial')
subplot(2,2,3)
hold on;
plot(Tiempo,PresionV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Presion [Pa]')
title('Presión')
subplot(2,2,4)
hold on;

```

```

plot(Tiempo,VientoV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Velocidad del Viento [Km/h]')
title('Velocidad del Viento')
str2 = sprintf('Resumen1_%s-%s', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')

%%%%%%%%

figure(6)
subplot(2,1,1)
hold on;
plot(Tiempo,TempAireV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Temperatura [C]')
title('Temperatura del Aire')
subplot(2,1,2)
hold on;
plot(Tiempo,VientoV,color)
if leyenda==1;
    legend('Real','P08','P10');
else
    leyenda=legend('Real','P08','P09','P10','P11','P12');
end
xlabel('Dia de Enero')
ylabel('Velocidad del Viento [Km/h]')
title('Velocidad del Viento')
str2 = sprintf('Resumen2_%s-%s', Estacion,dominio);
print(str2,'-dpng')
end

```

8.9. Anexo I: CampoDeViento.m

Script que compara los campos de vientos simulados con la topografía, área afectada, flujo de calor y velocidad del viento.

```

close all;
clear all;
%%

area_real_n = 'AreaQuemadaRealModis.tif';
resolucion_r = 1000^2/1000; \%[m] en Modis
%area_real_n = 'AreaQuemadaUnion_0-1_2_WGS84.tif';
%resolucion_r = 30^2/1000; \%[m] en Landsat

wrfout_n = 'Prueba08/P00-wrfout_d02/wrfout_d02_2017-01-25_00_00_00'
tituloG2 = 'Prueba 08: 25 de Enero del 2017 (00:00 hr)'
resolucion_s = 150^2/1000;

%% Abrir datos
%i Simuladost=1;
wrfout=netcdf.open(wrfout_n,'NC_NOWRITE');
t=1;
% UF
UF_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'UF');
UF_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,UF_simID);
UF_sim = UF_sim_tiempos(:,:,t);
UF_Sim = rot90(UF_sim);
% VF
VF_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'VF');
VF_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,VF_simID);
VF_sim = VF_sim_tiempos(:,:,t);
VF_Sim = rot90(VF_sim);
% Area
area_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FIRE_AREA');
area_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,area_simID);
area_sim =area_sim_tiempos(:,:,t);
area_Sim = rot90(area_sim);
[row_sim,col_sim] = size(UF_sim);
% Calor
Q_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FGRNQFX');
Q_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,Q_simID);
Q_sim = Q_sim_tiempos(:,:,t);
Q_Sim = rot90(Q_sim);
% Latitud
lat_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLAT');
lat_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,lat_simID);
lat_sim =lat_sim_tiempos(:,:,t);
lat_Sim = rot90(lat_sim);
% Longitud
long_simID = netcdf.inqVarID(wrfout,'FXLONG');

```

```

long_sim_tiempos = netcdf.getVar(wrfout,long_simID);
long_sim =long_sim_tiempos(:,:,t);
long_Sim = rot90(long_sim);

clear area_sim_tiempos lat_sim_tiempos long_sim_tiempos long_sim lat_sim t
netcdf.close(wrfout)

% Reales
[area_real, cmap, R] = geotiffread(area_real_n);
[row,col]=size(area_real);
difR=-(R(2,2)-R(1,2))/(row-1);
lat_R=R(2,2):difR:R(1,2);
difR=-(R(2,1)-R(1,1))/(col-1);
long_R=R(2,1):difR:R(1,1);

for i=1:col;
lat_real(:,i) = lat_R;
end

for i=1:row;
long_real(i,:) = sort(long_R,'ascend');
end

clear long_R lat_R difR R cmap
%% Cortar los datos de la simulacion
latmax = lat_real(length(lat_real(:,1)),1);
latmin = lat_real(1,1);
longmax = long_real(1,length(long_real(1,:)));
longmin = long_real(1,1);

ind_latmin = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmin)));
ind_latmax = find(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)==min(abs(lat_Sim(:,1)-latmax)));
ind_longmin = find(abs(long_Sim(10,:)-longmin)==min(abs(long_Sim(10,:)-longmin)));
ind_longmax = find(abs(long_Sim(10,:)-longmax)==min(abs(long_Sim(10,:)-longmax)));

lat_Simu = lat_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
long_Simu = long_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
UF_Simu= UF_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
VF_Simu= VF_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
area_Simu= area_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);
Q_Simu= Q_Sim(ind_latmin:ind_latmax,ind_longmin:ind_longmax);

clear lat_Sim long_Sim area_Sim ind_latmin ind_longmax ind_longmin ind_latmax ...
latmin latmax longmin longmax

```

```

%% DEM
DEM = '../DEM_WGS842-2.tif';

% Reales
[DEM_real, cmap, R] = geotiffread(DEM);
[row,col]=size(DEM_real);
difR=-(R(2,2)-R(1,2))/(row-1);
lat_R=R(2,2):difR:R(1,2);
difR=-(R(2,1)-R(1,1))/(col-1);
long_R=R(2,1):difR:R(1,1);

for i=1:col;
lat_real2(:,i) = lat_R;
end
for i=1:row;
long_real2(i,:) = sort(long_R,'ascend');
end

DEM2 = ones(row,col)*-750;
for i=1:row;
for j=1:col;
if DEM_real(i,j)~=0;
DEM2(i,j)=DEM_real(i,j);
end
end
end

%% FIGURA
esp = 15;
pos1 = [0.06 0.1 0.2 0.8];
pos2 = [0.295 0.1 0.2 0.8];
pos3 = [0.53 0.1 0.2 0.8];
pos4 = [0.765 0.1 0.2 0.8];

figure(1)
subplot('Position',pos1)
imagesc([long_Simu(1,1),long_Simu(1,length(long_Simu(1,:)))],[lat_Simu(1,1),...
    lat_Simu(length(lat_Simu(:,1)))],sqrt(VF_Simu.^2+ UF_Simu.^2))
hold on
quiver(long_Simu(1:esp:length(long_Simu(:,1))),...
    1:esp:length(long_Simu(1,:)),lat_Simu(1:esp:length(lat_Simu(:,1))),...
    1:esp:length(lat_Simu(1,:)),UF_Simu(1:esp:length(UF_Simu(:,1))),...
    1:esp:length(UF_Simu(1,:)),VF_Simu(1:esp:length(VF_Simu(:,1))),...
    1:esp:length(VF_Simu(1,:)),'color',[0.5 0.5 0.5])
set(gca,'YDir','normal')

```

```

xlim([-72.4724,-72.0239])
ylim([-35.8873,-35.4604])
caxis([0 1])
colormap default
title 'Velocidad del viento'
xlabel 'Longitud []'
ylabel 'Latitud []'
c = colorbar('southoutside')
c.Label.String = 'Velocidad del Viento [km/h]'
subplot('Position',pos2)
imagesc([long_Simu(1,1),long_Simu(1,length(long_Simu(1,:)))],...
        [lat_Simu(1,1),lat_Simu(length(lat_Simu(:,1)))],area_Simu)
hold on
quiver(long_Simu(1:esp:length(long_Simu(:,1))),...
        1:esp:length(long_Simu(1,:)),lat_Simu(1:esp:length(lat_Simu(:,1))),...
        1:esp:length(lat_Simu(1,:)),UF_Simu(1:esp:length(UF_Simu(:,1))),...
        1:esp:length(UF_Simu(1,:)),VF_Simu(1:esp:length(VF_Simu(:,1))),...
        1:esp:length(VF_Simu(1,:))),'color',[0.5 0.5 0.5])
yticklabels({})
set(gca,'YDir','normal')
xlim([-72.4724,-72.0239])
ylim([-35.8873,-35.4604])
colormap default
xlabel 'Longitud []'
caxis([0 1])
subplot('Position',pos3)
imagesc([long_Simu(1,1),long_Simu(1,length(long_Simu(1,:)))],[lat_Simu(1,1),...
        lat_Simu(length(lat_Simu(:,1)))],Q_Simu)
caxis([0 2250])
c = colorbar('Location','southoutside')
c.Label.String = 'Flujo de Calor [W/m2]';
hold on
quiver(long_Simu(1:esp:length(long_Simu(:,1))),1:esp:length(long_Simu(1,:))),...
        lat_Simu(1:esp:length(lat_Simu(:,1))),1:esp:length(lat_Simu(1,:))),...
        UF_Simu(1:esp:length(UF_Simu(:,1))),1:esp:length(UF_Simu(1,:))),...
        VF_Simu(1:esp:length(VF_Simu(:,1))),1:esp:length(VF_Simu(1,:))),...
        'color',[0.5 0.5 0.5])\%, 'DisplayName', 'Viento')
set(gca,'YDir','normal')
yticklabels({})
xlim([-72.4724,-72.0239])
ylim([-35.8873,-35.4604])
title 'Flujo de calor'
xlabel 'Longitud []'
subplot('Position',pos4)
imagesc([long_real2(1,1),long_real2(1,length(long_real2(1,:)))],...

```

```

    fliplr([lat_real2(length(lat_real2(:,1))),lat_real2(1,1)],DEM_real)
hold on
quiver(long_Simu(1:esp:length(long_Simu(:,1))),1:esp:length(long_Simu(1,:))),...
    lat_Simu(1:esp:length(lat_Simu(:,1))),1:esp:length(lat_Simu(1,:))),...
    UF_Simu(1:esp:length(UF_Simu(:,1))),1:esp:length(UF_Simu(1,:))),...
    VF_Simu(1:esp:length(VF_Simu(:,1))),1:esp:length(VF_Simu(1,:))),...
'color',[0.5 0.5 0.5])
set(gca,'YDir','normal')
yticklabels({})
xlim([-72.4724,-72.0239])
ylim([-35.8873,-35.4604])
colormap jet
title 'Elevación del terreno'
xlabel 'Longitud []'
caxis([0 800])
c = colorbar('Location','southoutside')
c.Label.String = 'Elevación [m]';
text(0.2,1,'Hola')
suptitle(tituloG2)

```

9. Referencias

Anderson, H (1982). Aids to determining fuel models for models for estimating fire behavior, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Report INT-122.

Beezley, J. D & Kochanski, A. & Kondratenko, V. & Mandel, J & Sousedík, B. (2010). Simulation of the Meadow Creek fire using WRF-Fire. AGU Fall Meeting Abstracts.

Castillo M, P Pedernera, E Peña. 2003. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista Ambiente y Desarrollo 19 (3): 44-53.

CAWCR (Collaboration for Australian Weather and Climate Research; 2017). Recuperado 23 de Noviembre del 2017 desde “Forecast Verification methods Across Time and Space Scales” de <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>

CONAF (2017-1). “Incendios Forestales en Chile” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>

CONAF (2017-2). “Descripción y efectos <<Tormenta de Fuego>> 18 de enero al 5 de febrero de 2017 Regiones de O’higgins, El Maule y Biobío” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/tormenta-de-fuego-en-chile/>

CONAF Corporación Nacional Forestal, 2017-3 . Análisis de la Afectación y Severidad de los Incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe Técnico. 56 p. Santiago, Chile.

CONAF (2017-4). Recuperado el 01 de Diciembre del 2017 desde “Investigación” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/prevencion/investigacion/>

CONAF (2017-5). Recuperado el 01 de Diciembre del 2017 desde “Planes de Protección Comunal” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/prevencion/planes-de-proteccion-comunal/>

CONAF (2017-6). Recuperado el 01 de Diciembre del 2017 desde “Educación y Difusión” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/prevencion/educacion-y-difusion/>

CONAF (2017-7). Recuperado 10 Diciembre del 2017 desde “Estadísticas históricas” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

CONAF (2017-8). Recuperado 10 Diciembre del 2017 desde “Detección de incendios forestales” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/deteccion-de-incendios-forestales/>

CONAF (2017-9). Recuperado 10 Diciembre del 2017 desde “Métodos de combate de incendios forestales” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/metodos-de-combate-de-incendios-forestales/>

CONAF (2018-1). Recuperado el 01 de Mayo del 2018 desde “Índice de Humedad del Combustible Fino Muerto” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-humedad-del-combustible-fino-muerto/>

CONAF (2018-2). Recuperado el 01 de Mayo del 2018 desde “Índice de Probabilidad de Ignición” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-probabilidad-de-ignicion/>

CONAF (2018-3). Recuperado el 01 de Mayo del 2018 desde “Índice de Riesgo de Incendios Forestales” de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-riesgo-de-incendios-forestales/>

CONAF (2019). Recuperado el 20 Febrero del 2019 desde “Estadísticas históricas” <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

CONAF (2019-2). Recuperado el 13 Marzo del 2019 desde “Mártires” <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/martires/>

Cubo, J., Enríquez, E., Gallar, J., Jemes, V., López, M., Mateo, M., Muñoz, A. y Parra, P. (2012). “Los Incendios Forestales en España, Decenio 2001-2010” de Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010finalmod1_tcm7-349255.pdf)

Dobrinkova, N. and Jordanov G. (2010). WRF-Fire wildfire modeling in the test area of Harmanli, Bulgaria. In D. Viegas (Ed.), *Geoscientific Model Development Discussions*.

Dudhia, J. (1996). “A Multi-Layer Soil Temperature Model for MM5” Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users’ Workshop, Boulder, pp. 49-50.

García, Roberto & Camaño, Juan & Barras, Rosa & Pecci, Julia & Palacios, Marino. (2014). A customized FMC model for wildland fire simulations using WRF-FIRE model over Spain. *Fresenius Environmental Bulletin*. 23. 2791-2796.

Gobierno de Chile (2017). “Reconstrucción Emergencia Forestal 2017” recuperado el 15 Diciembre del 2017 desde <http://www.reconstruccion.gob.cl/>

Gobierno de Mexico (2017). “Incendios forestales, 90 % provocados por el hombre” Recuperado el 25 agosto del 2018 desde <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/incendios-forestales-90-provocados-por-el-hombre>

FAO (Food and Agriculture Organization, 2017). Recuperado el 14 Diciembre 2017 desde “Manejo forestal sostenible en América Latina y el Caribe”, <http://www.fao.org/americas/prioridades/bos>

FRANCO, Rodolfo, 2017. *Composiciones Landsat en ARCGIS. Guía Básica*. Bogotá, Colombia. 45p.

Fuentes, Rodrigo (2019). “Al menos 185 especies animales y arbóreas fueron afectadas por incendios forestales” recuperado el 19 de Febrero del 2019 desde <http://radio.uchile.cl/2017/03/21/al-menos-185-especies-animales-y-arboreas-fueron-afectadas-por-incendios-forestales/>

Haltenhoff Duarte Herbert, 2014. “PREVENCION INCENDIOS FORESTALES LINEAMIENTOS Y ENFASIS ESTRATEGICOS 2014 -2019” DEPARTAMENTO PREVENCION, GERENCIA MANEJO DEL FUEGO, CORPORACION NACIONAL FORESTAL.

Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H. (2004). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, pp. 103-120.

Hong, S.Y., Noh, Y. and Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.

III (Insurance Information Institute, 2017). Recuperado el 20 noviembre del 2017 desde "Facts + Statistics: Wildfires" de <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-wildfires>

INDAP, Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile (2017). "INFORME EJECUTIVO EMERGENCIA POR INCENDIOS FORESTALES" de <https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/5-ver-informe-ejecutivo-emergencia-por-incendios-forestales-regi%C3%B3n-del-maule.pdf?sfvrsn=0>

Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.

JRC-IES (Joint Research Center) 2010. Forest Fires in Europe 2009, Report No10, JRC Scientific and Technical Reports, European Commission. Land Management and Natural Hazard Unit, Ispra, Italy.

Kain, J.S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J. Appl Meteor*, 43, 170-181.

Kochanski, A. K., Jenkins, M. A., Mandel, J., Beezley, J. D., & Krueger, S. K. (2013). Real time simulation of 2007 Santa Ana fires. *Forest Ecology and Management*, 294, 136-149. doi:10.1016/j.foreco.2012.12.014

LANDFIRE (2017). Recuperado el 02 Diciembre del 2017 desde "LANDFIRE Fire Behavior Fuel Model 13 Data Dictionary" de <https://www.landfire.gov/DataDictionary/fl3.pdf>

Lee, B., J. Titus, S., Adamowicz, Ludwik., M. Woodard, P & Vega-Garcia, Cristina. (1999). Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canadá. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, ISSN 1131-7965, Vol. 8, N° 1, 1999, pags. 5-24.

Lin, Y-L, Farley, R. D., and Orville, H. D. (1983). Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *J. Climate Appl. Met.*, 22, 1065-1092.

Mandel, J., J. D. Beezley, J. L. Coen, and M. Kim, 2009: Data assimilation for wildland fires: Ensemble Kalman filters in coupled atmosphere-surface models. *IEEE Control Systems Magazine*, 29, 47-65.

Mandel, J.D., Beezley, A.K. Kochanski, (2011). Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011, *Geoscientific Model Development* 4(2011) 591-610/P.

Mandel, J & D. Beezley, J & Kochanski, Adam. (2011-2). Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF-Fire version 3.3. *Geoscientific Model Development Discussions*. 4. 10.5194/gmdd-4-497-2011.

Marticorena, C. 1990. Contribución a la estadística de la flora vascular de Chile. *Gayana Botánica* 47 (3-4): 85-113.

MINAM (Ministerio del medio ambiente de Perú, 2017). Recuperado de 18 de Noviembre del 2017 desde "ANEXO 5: Los beneficios de la biodiversidad" de http://www.minam.gob.pe/proyecologias/Curso/curso-virtual/Modulos/modulo2/3Secundaria/Actividades-Aprendizaje/EPT_1/S2/anexo2/EPT_S2_Anexo_5.pdf

MOLINA, D.M., BARDAJÍ, M., y CASTELLNOU, M., 1998. Probabilidad de Ignición, Grandes Incendios y Dificultad de Extinción. *Ecología* 12: 333-350, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

NOAA (2017-1). Recuperado el 20 Noviembre del 2017 desde “U.S. Wildfires” de [https://www.ncdc.noaa.gov/societal-impacts/wildfires/ytd/12?params\[\]=acres¶ms\[\]=fires](https://www.ncdc.noaa.gov/societal-impacts/wildfires/ytd/12?params[]=acres¶ms[]=fires)

NOAA Earth System Research Laboratory (2017-2). Recuperado el 20 Noviembre del 2017 desde “WRF NAMELIST.INPUT FILE DESCRIPTION” de https://esrl.noaa.gov/gsd/wrportal/namelist_input_options.html

Peace M, McCaw LW, Kepert JD, Mills GA, Mattner T (2015). WRF and SFIRE simulations of the Layman fuel reduction burn. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 65, pp. 302–317

Perfetti-Bolaño, A.; D. González-Acuña; C. Barrientos; L. Moreno (2013). Efectos Del Fuego Sobre La Avifauna Del Cerro Cayumanque, Región Del Bío-Bío, Chile. *Boletín Chileno de Ornitología*, vol 19, 1-2, p, 1-11.

ROTHERMEL R.e. 1972: A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Research Paper INT-115, Ogden, UT, USA. 40p.

RUMALAHUE, 2017. Recuperado el 10 noviembre del 2017 desde <http://www.rulamahue.cl/>

SEMADET (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno de México, 2017). Recuperado el 13 de Noviembre del 2017 desde “Recomendaciones Basicas” de <http://siga.jalisco.gob.mx/incendiosforestales/basicas.htm>

SENAMHI-Peru, 2018. Estudio de condiciones atmosféricas favorables a los incendios forestales en el Perú.

SINCA (Sistema de Información Nacional de la Calidad del Aire del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile) (2017). Recuperado el 23 Noviembre del 2017 desde “Redes de monitoreo en línea” de <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>

Tewari, M.F., Chen, W., Wang, J., Dudhia, M.A., LeMone, K., Mitchell, M.E., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca, R.H. (2004) Implementation and Verification of the Unified NOAA Land Surface Model in the WRF Model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting. 16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 11-15.

UCAR (University Corporation for Atmospheric Research, 2017). Recuperado el 08 Agosto del 2017 desde “NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999” <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/?hash=!description#!access>

USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2017-1). Recuperado el 07 Agosto del 2017 desde “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global” de <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2017-2). Recuperado el 22 Noviembre del 2017 desde “MOD14A1: MODIS/Terra Thermal Anomalies & Fire Daily L3 Global 1km V006” de https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod14a1.v006

USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2017-3). Recuperado el 07 Agosto del 2017 desde <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W. y Honeyman, P. (2017). Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI)

en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del L. G. B. O'Higgins, Chile. REVISTA DE TELEDETECCIÓN, Asociación Española de Teledetección, 50, 59-69.