

## Misión en la República de Chile

En el ámbito de la respuesta a emergencias - Incendios Forestales

# INFORME TÉCNICO

## Situación de incendios forestales en Chile entre Enero-Febrero 2017





*(Página dejada en blanco intencionadamente)*



**Autores: Equipo de expertos en incendios forestales del Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea (EUCP Team):**

Marc Castellnou Ribau. *Inspector de Bomberos de Cataluña. Jefe del Área forestal. Analista estratégico GRAF (Grupo de Refuerzo de Actuaciones Forestales) (España).*

José Almodóvar Aráez. *Jefe de la Sección de Incendios Forestales en Cuenca, región de Castilla-La Mancha (España).*

Rodrigo Álvarez Palomares. *Coordinador BRIF (Brigadas de Refuerzo en Incendios Forestales) de Tragsa-MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente) (España).*

Fábio Miguel Martins Silva. *Adjunto de Operaciones de la Fuerza Especial de Bomberos. (Portugal).*

Pablo Cristóbal Mayoral. *Jefe de Servicio de Incendios Forestales. Bomberos de la Comunidad de Madrid (España).*

Laurent Alfonso. *Jefe de Servicio de Riesgos. Servicio de Incendios y Socorro de Gard (Francia).*

Giorgio Basile. *Jefe de la Oficina de Prevención de Incendios del Departamento dei Vigili del fuoco de Venezia (Italia).*

**Agradecimientos:**

A la dirección de CONAF (Corporación Nacional Forestal de Chile) por haber colaborado con el equipo aportando todos los medios y datos requeridos, especialmente a Sergio Mendoza y a Luis Valenzuela por su implicación y generosidad. Muy especialmente, este informe no hubiera sido posible sin la ayuda de la Sección de Análisis y Predicción de Incendios Forestales de CONAF en Santiago de Chile que cuenta con Jorge Saavedra y Jordi Brull.

A Manuel Carcamo y a Helios Pujol de CONAF por su colaboración en el reconocimiento y análisis del complejo de incendios de San Antonio.

A Fernando Ramírez y a Cristian Orellana de CONAF por su colaboración en el reconocimiento y análisis del complejo de incendios de Las Máquinas.

**Primera Página:**

Visión general de la situación de incendios forestales en Chile

Plantación afectada por el paso del fuego.

Créditos de las fotos: EUCP Team Chile 2017, CONAF.

**Cláusula de exención de responsabilidad:**

El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva de sus autores y en ningún caso debe considerar que refleja los puntos de vista de la Unión Europea, del Gobierno Nacional de Chile ni de sus Autoridades Locales.

La Comisión Europea no puede considerarse responsable de ningún daño o responsabilidad que resulte del uso del presente documento.



## RESUMEN EJECUTIVO

Debido a la ola de incendios forestales en Chile al final de enero de 2017 y el estado de emergencia declarado en varias regiones del país, el Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea fue activado siguiendo una petición formal de las Autoridades Nacionales de Chile. A través del **Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias Europeo (ERCC)**, en unas horas, 3 módulos operacionales de bomberos fueron movilizados desde Francia, España y Portugal, junto con un equipo de Protección Civil de la UE que incluyó expertos técnicos en el análisis del comportamiento y de las dinámicas de los incendios forestales.

El objetivo principal del Mecanismo Europeo de Protección Civil es facilitar la cooperación en la prevención, preparación y respuesta a desastres entre sus 34 Estados participantes (UE-28 y la Antigua República Yugoslava de Macedonia, Islandia, Noruega, Serbia, Montenegro y Turquía). Con el apoyo de la Comisión Europea, los Estados participantes aúnan recursos y expertos que pueden ponerse a disposición de los países afectados por catástrofes en todo el mundo, así como para posibles operaciones de prevención y preparación ante las mismas. El Mecanismo, mediante su Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias (Emergency Response Coordination Centre – ERCC) monitorea asimismo los riesgos y emergencias mundiales 24/7 y sirve como centro de información y coordinación en situaciones de emergencia.

La respuesta total desde la UE consistió en:

- 177 combatientes desplegados desde Francia, España y Portugal.
- 14 miembros del Equipo de Protección Civil de la UE: 2 Oficiales de enlace del ERCC, 1 Oficial de comunicación de DG ECHO (Dirección General de Operaciones de Protección Civil y Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea) y 11 expertos.
- Ayuda material desde Austria, España y Suecia (herramientas, complementos de extinción y equipamiento de protección de lucha contra incendios forestales).
- Servicio Copernicus de mapas vía satélite, prestando servicio para la región de Los Ríos: 4 mapas mostrando la extensión y otros datos sobre los incendios forestales.





## **Aspectos destacados**

- ✓ Durante Enero – Febrero 2017, Chile ha experimentado un episodio de incendios forestales que puede describirse como una **tormenta de fuego** extrema con **propagaciones ultra rápidas** de hasta 8.200 ha/hora y con **intensidades caloríficas excepcionales** de más de 60.000 kW/m.
- ✓ Las causas subyacentes de ese evento son la meteorología extrema y el alto estrés hídrico de la vegetación consecuencia de una prolongada sequía. Como factor coyuntural añadido, se puede considerar que la situación de bloqueo anticiclónico entre las altas presiones del Pacífico y la cordillera de los Andes durante los días precedentes habría acumulado energía para desencadenar los acontecimientos en la noche del 25 al 26 de enero de 2017.
- ✓ **El resultado fue una situación fuera de la capacidad de extinción de cualquier operativo de extinción de incendios forestales** debido a la gran magnitud de la misma. Esta situación no puede entenderse únicamente como un cúmulo de circunstancias meteorológicas simultáneas, sino también teniendo en consideración que está enmarcada en un contexto de elevado estrés hídrico y circunstancias anómalas.
- ✓ **Este excepcional episodio de incendios forestales** y la tormenta de fuego en la noche del 25 al 26 de enero de 2017 es un **evento extraordinario que requiere de posteriores estudios** que permitan entender lo sucedido desde una amplia perspectiva. Además, este conocimiento y las posibles lecciones obtenidas son de un **gran valor añadido para toda la comunidad global de incendios forestales** y deberán ser difundidas de forma acorde.



## **EXECUTIVE SUMMARY**

Due to the wave of forest fires in Chile at the end of January 2017 and the state of emergency declaration in several regions of the country, the European Union Civil Protection Mechanism was activated following a request for assistance from the National Authorities of Chile. Through European Commission's Emergency Response Coordination Centre (ERCC) managed within the Directorate General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations (ECHO), within hours, three operational ground firefighting modules were mobilized from France, Spain and Portugal, together with a EU Civil Protection team which included technical experts in the analysis of fire behaviour and forest fires dynamics.

The main objective of the European Union Civil Protection Mechanism is to facilitate cooperation in disaster prevention, preparedness and response among its 34 participating States (EU-28 and the former Yugoslav Republic of Macedonia, Iceland, Norway, Serbia, Montenegro and Turkey). With the support of the European Commission, the participating States pool resources and expertise that can be made available to countries affected by disasters throughout the world, as well as possible prevention and preparedness operations. The Mechanism, through its Emergency Response Coordination Center (ERCC), also monitors global risks and emergencies 24/7 and serves as an information and coordination center in emergency situations.

The overall EU response consisted of:

- 177 European firefighters deployed from France (voluntary pool), Spain and Portugal.
- 14 experts EU Civil Protection Team deployed: 2 ERCC Liaison Officers, 1 DG ECHO Regional Information Officer, 11 experts.
- In-kind assistance from Austria, Spain and Sweden (protective and firefighting equipment).
- EU Copernicus Satellite mapping service activated for the Los Rios region: 4 satellite maps produced showing the extent and data about the forest fires.



## **Highlights**

- ✓ During January – February 2017, Chile has experienced an episode of forest fires that can be described as an **extreme firestorm** with **rapid spreads** up to 8,200 ha/hour and **massive heat dissipation** with linear density of more than 60,000 kW/m.
- ✓ The underlying causes of the event are the extreme meteorology and high water stress of the vegetation resulting from the long drought. As an added circumstantial factor, the anticyclonic blocking situation between the high pressure of the Pacific and the Andes mountain range during the preceding days may have accumulated energy to trigger events in the evening of 25-26 January 2017.
- ✓ By weighing all the factors, this **resulted into a situation of a magnitude far beyond the capacity of any extinguishing operation**. The situation should not only be understood as an accumulation of simultaneous meteorological circumstances, but also taking into consideration that it is framed in a context of high water stress and anomalous conditions.
- ✓ This **exceptional forest fire event** and night firestorm from 25 to 26 January 2017 is an **extraordinary event that requires further studies** in order to be able to understand it in a comprehensive manner. Furthermore, such knowledge and eventual lessons are of a **great added value for the entire global forest fire community** and should be disseminated accordingly.

## **OBJECTIVES**

The first objective of this report is to make an analysis of the situation from the point of view of fire behaviour regarding multiple fires burning simultaneously in Chile.

The second objective, in respect of emergency response, is to draw some preliminary findings on the possibility that similar events (s) may occur in the future also in other parts of the world. To this end, the largest fires of this wave have been studied and analysed in more detail, which have occurred in the Maule and Biobío regions. Within the Maule region, the study has been focusing on the “Las Máquinas” fire complex and within the Biobío region, the study has been focusing on the “San Antonio” fire complex.

## **METHODOLOGY**

The following methodology was used for data collection and analysis:

- A compilation of the basic data of the fire episode with the Fire Analysis Technical Unit that owns the National Direction of CONAF in Santiago of Chile.
- A compilation of field data, and more specific fire data with the CONAF Regional Office in Maule and Biobío. For this, the team of experts was subdivided in two teams and performed field assessments in Maule and Biobío regions and had extensive consultations with regional and national authorities.



- A subsequent joint analysis of all data by the whole team together with the Fire Analysis Technical Unit of CONAF in Santiago.
- Specific technical consultations on meteorology with experts in Europe from the GRAF Bombers Units in Catalonia (Spain), the PCA Analysis Group (Pau Costa Foundation), the CFOA (Fire Chiefs Association in UK and Ireland) and de UNAP in Castilla-La Mancha (Spain).

The external sources consulted to obtain data have been the following:

- Meteorological data: GFS model.
- Satellite imagery: METEOSAT and GOES 13.
- Forest fire simulators provided by Tecnosylva S.L., based in León (Spain) and San Diego (USA).
- Expert advice from Al Beaver, Forest Fire Analyst in British Columbia (CA) and Victoria (AU).

### **EXPERT ANALYSIS AND PRELIMINARY FINDINGS**

The episode of forest fires generated gigantic proportions. The fire complex of “Las Máquinas” burned about 187,000 ha, of which 115,000 were burned in a period of 14 hours. This gives an advance of 8,142 ha/hour during the night. This created a huge convective storm of fire that spread a front, which reached the width of 42 kilometres. The length of the run was 21 kilometres long.

Considering that the meteorological conditions in the area do not show extreme anomalies, and that the nearest meteorological stations record winds between 5-20 km/h and relative humidity between 25-30%, only enormous convective conditions can explain the fire behaviour.

In the period between the afternoon of January 25, 2017 and the dawn of day 26, all active forest fires in the Maule and Biobío regions experienced an extreme behaviour, reaching intensities that could exceed 60.000 Kw/m and average propagation speeds exceeding 6 km/h.

During this summer season, Chile has suffered severe drought with a long episode of dry weather and record maximum temperatures. During those days there has not been any particularly strong winds at the synoptic level. However, field tests show that, within the forest fire environment, extreme wind speeds were reached, which can only be explained due to convective atmosphere conditions in the fire.

Therefore, it is considered that the amount of surface burning simultaneously in the same zone (coastal mountain range between the regions of Araucanía, Biobío and Maule) and the amount of energy released during the days prior to January 25, caused an extreme situation accumulating hot air and dryness in the atmosphere. This great mass of dry, warm air was enclosed between the Andes and the high pressures of the Pacific Ocean.

It is considered that due to the vorticity of the atmosphere after several days of anticyclonic blockade, a thermal low-pressure area was formed in the Pacific coast. The effect of the



simultaneous fires added more energy and intensity to this depression. Moreover, the interaction of these forest fires dragged the depression to the south, specifically towards the Maule region, causing extreme behaviour in all active forest fires in the regions from Araucanía to O'Higgins. This depression converged into the largest fire that was burning: "Las Máquinas" fire complex. The convective fire environment created by this complex was aligned with this atmospheric depression and, during the night of January 25 to 26, created a firestorm that altered the atmospheric behaviour of the entire region at mesoscale level, causing an intense flow of South-Southeastern winds in the Biobío region fires and an intense West-Northwestern flow in the fires of the O'Higgins region.

From the available data, it cannot be concluded that the simultaneity of forest fires generated the thermal low-pressure area, but in the mesoscale creation process, huge forest fires altered it and was attracted to its vortex ("Las Maquinas" fire complex), creating a firestorm to the same mesoscale level that lasted all night. This firestorm began to remit once the thermal inversion of the whole area was released. Before that, the high-pressured area was pressuring the surface air layer and it was being directed towards its escape route (the vortex that formed "Las Maquinas" fire complex), where it accumulated the peak of heat energy.

This enormous flow of hot air over the Pacific and over the central valley of Chile also created subsidence with katabatic winds over the Andes, which pushed the column of "Las Casas" fire complex northward. This phenomenon is still under study and reconstruction.

This extreme behaviour of the forest fires can be seen in the field with the observation of great runs of crown fire. Their width and the presence of numerous stands of *Pinus radiata* twisted and crushed by the effect of the fire storm, confirms the extraordinary convection of the vortex fire complex, greatly accelerating the propagation velocities of all the rest of fires affected.

According to experimental simulation data, this propagation would correspond to winds generated by the storm at around 100 to 130 km/h that are much higher than the 20-30 km/h registered by meteorological stations in the area.

**An in depth analysis of both forest fire complexes and the fire behaviour observed is presented in this technical report.**





## ÍNDICE

<b>1. Antecedentes y objetivos .....</b>	<b>11</b>
1.1. Objeto de estudio y objetivos .....	11
1.2. Situación de incendios forestales en Chile.....	11
1.3. Activación del Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea (EUCPM).....	14
1.4. Metodología.....	15
<b>2. Recopilación de datos y desarrollo de los incendios estudiados .....</b>	<b>18</b>
2.1. El complejo de incendios de Las Máquinas (Maule) .....	18
2.1.1. Datos básicos.....	18
2.1.2. Meteorología.....	18
2.1.3. Topografía.....	22
2.1.4. Combustible.....	23
2.1.5. Desarrollo del complejo de incendio.....	25
2.2. El complejo de incendios de San Antonio (Biobío).....	29
2.2.1. Datos básicos.....	29
2.2.2. Meteorología.....	31
2.2.3. Topografía.....	35
2.2.4. Combustible.....	36
2.2.5. Desarrollo del complejo de incendios.....	38
<b>3. Análisis del episodio de incendios .....</b>	<b>43</b>
3.1. El escenario precursor.....	43
3.1.1. Factores geomorfológicos.....	43
3.1.2. Combustibles-meteorología.....	44
3.2. El comportamiento del fuego.....	59
3.3. La morfología de las carreras de copas .....	66
3.4. La tormenta de fuego: el comportamiento extremo la noche del 25 al 26 de enero .....	71
<b>4. Pasos para el futuro: recomendaciones y buenas prácticas generales .....</b>	<b>85</b>
4.1. Acciones de prevención social.....	85
4.2. Acciones sobre los combustibles.....	85
4.3. Acciones sobre el operativo .....	86
<b>BIBLIOGRAFÍA:.....</b>	<b>88</b>



## **1. Antecedentes y objetivos**

### **1.1. Objeto de estudio y objetivos**

Este informe técnico está dirigido principalmente a las autoridades de la República de Chile pero también a toda la comunidad global de incendios forestales.

En relación a los múltiples incendios que ardieron de forma simultánea en Chile durante el mes de enero de 2017, el principal objetivo del informe es hacer un análisis del episodio desde el punto de vista del comportamiento del fuego.

El segundo objetivo, en relación a la respuesta a la emergencia, es identificar algunos hallazgos preliminares de cara a situaciones similares que puedan ocurrir en el futuro en otras partes del mundo. En este sentido, los incendios más grandes de esta oleada han sido objeto de estudio en más detalle, en particular los ocurridos en las regiones del Maule y del Biobío. Dentro de la región del Maule, el estudio se ha centrado en el complejo de incendios de “Las Máquinas” y dentro de la región del Biobío, el estudio se ha centrado en el complejo de incendios de “San Antonio”.

Los citados hallazgos preliminares están basados en los datos disponibles y en la información existente en el momento de los análisis, así como en el conocimiento de los propios expertos. Como consecuencia de este proceso, se realizan una serie de recomendaciones que no deben ser consideradas exhaustivas dado el limitado marco temporal de la misión.

Cualquier desarrollo posterior derivado del informe deberá estar dentro del marco legal y de planificación vigente que permita implementar las recomendaciones específicas que se determinen.

### **1.2. Situación de incendios forestales en Chile**

Los datos estadísticos sobre incendios forestales en Chile del último decenio (CONAF) arrojan una media de en torno a 6.000 incendios por año que afectan a una superficie media anual de unas 70.000 hectáreas. Se observa que en este periodo el número de incendios presenta una ligera tendencia ascendente (figura 1.1). En los datos de superficie afectada la evolución es más irregular, alternando años de más de 120.000 hectáreas afectadas con otros por debajo de la media, aunque también es apreciable un paulatino incremento en el último decenio (figura 1.2.). Si bien, la superficie afectada en la última campaña a 1 febrero de 2017 destaca claramente como la peor de la historia.

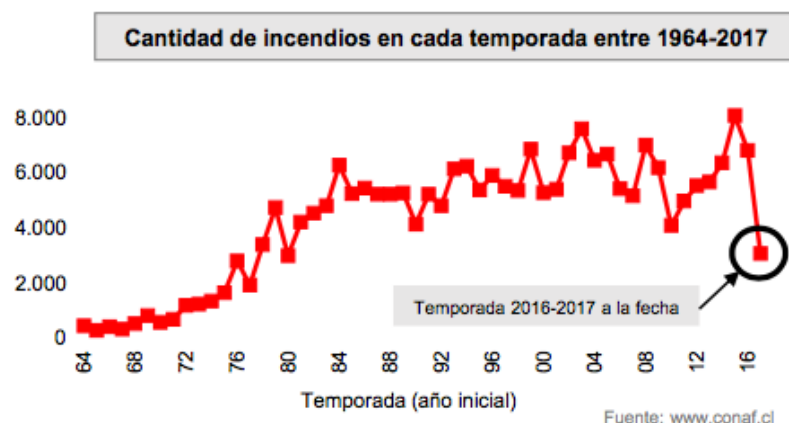


Figura 1.1. Evolución del número de incendios en Chile. Fuente: Extraído de VICENCIO, 2017.

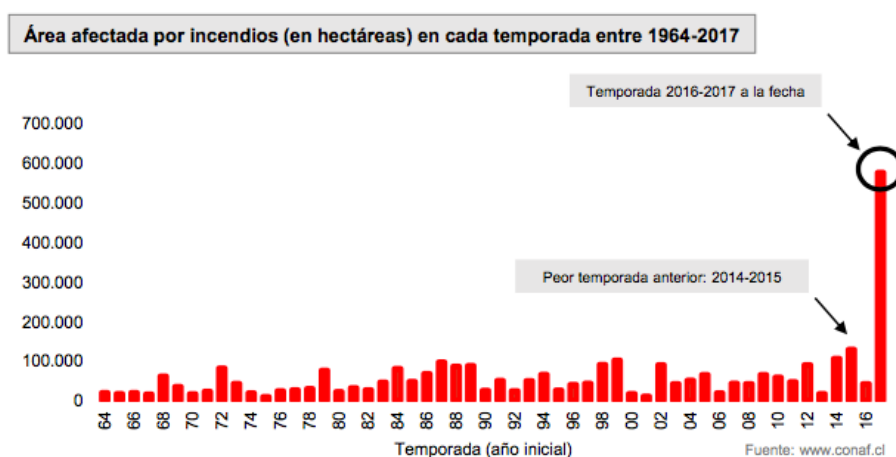


Figura 1.2. Evolución anual del área afectada por incendios en Chile. Fuente: Extraído de VICENCIO, 2017.

Para enmarcar adecuadamente este episodio de incendios es importante mencionar que el territorio de Chile viene arrastrando una sequía que ha convertido la última década en una de las más secas desde que se tienen datos, (VICENCIO, 2017), acrecentándose en los últimos cuatro años (figura 1.3), periodo en el que puede considerarse como extrema.

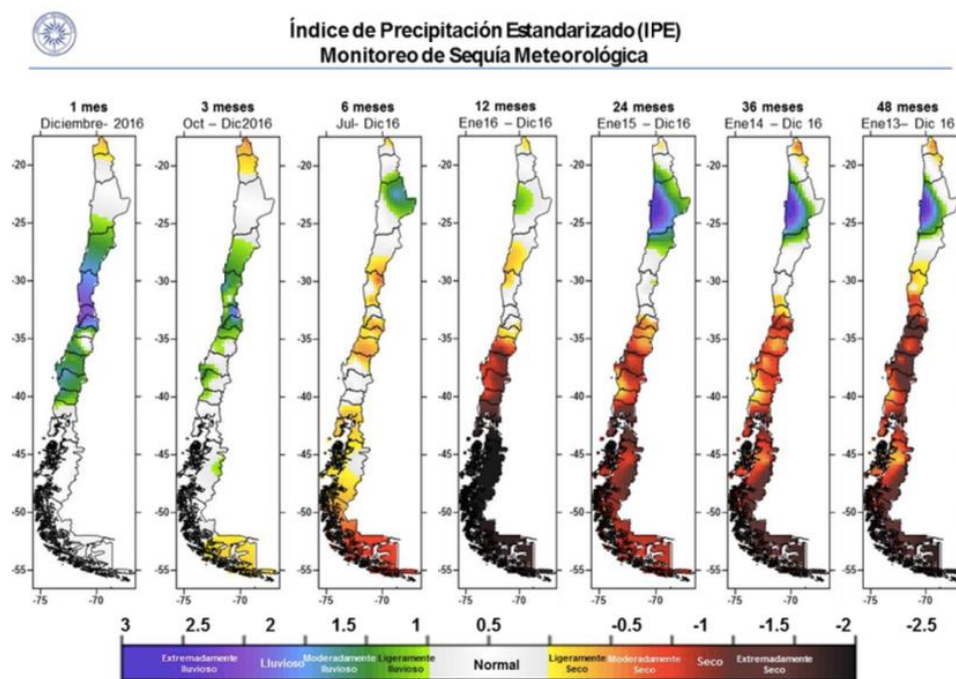


Figura 1.3. Sequía acumulada en Chile. Fuente: CONAF.

Si bien a nivel histórico se han presentado sequías más extremas como la de 1924, 1968 y 2007, la particularidad de la actual es su extensión temporal y espacial (VICENCIO, 2017). Al largo período de sequía, hay que sumar la meteorología extrema de enero (figura 1.4) que marcó record de temperatura máxima.

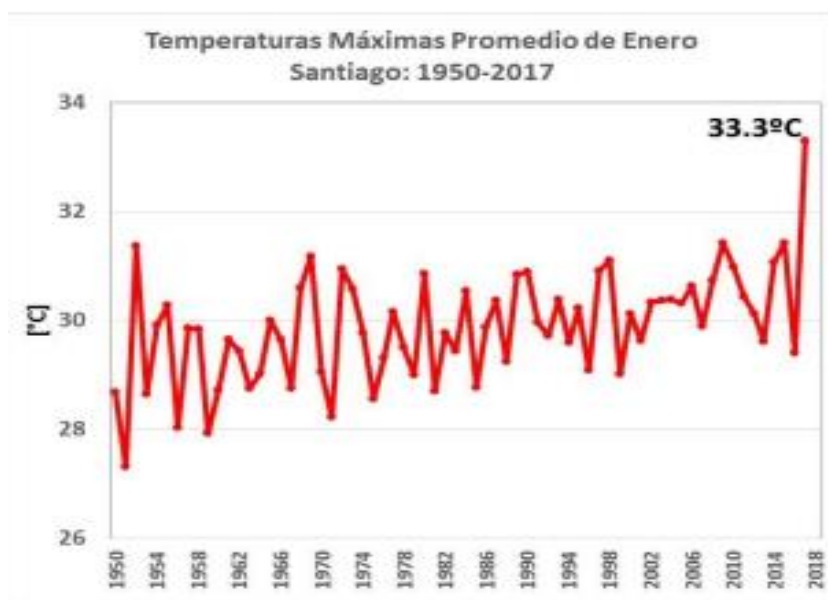
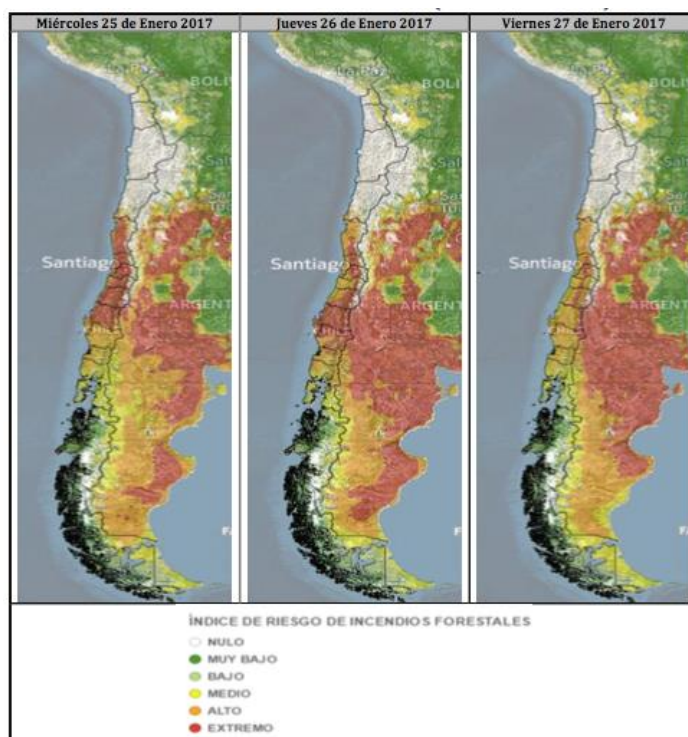


Figura 1.4. Valor del promedio de T<sup>a</sup> en Santiago desde 1950. Fuente: VICENCIO, 2017.



Como consecuencia de la sequía, las altas temperaturas y la sequedad ambiental, el índice de riesgo de incendios forestales en las regiones centrales de Chile era extremo o alto durante las dos últimas semanas del mes de enero (figura 1.5).



**Figura 1.5.** Índice de riesgo de incendios forestales para los días 25, 26 y 27 de enero de 2017. Fuente: CONAF.

En este contexto, el presente informe se centra en el estudio del virulento episodio de incendios forestales que Chile ha sufrido en la presente temporada. Durante el mes de enero numerosos incendios arrasaron 487.000 ha en todo el país, afectando principalmente a la región Metropolitana de Santiago, región V de Valparaíso, región VI de O’Higgins, región VII del Maule y región VIII del Biobío. El episodio tuvo su máxima expresión durante los días comprendidos entre el 20 y el 30 de enero, con un pico de afección entre los días 25 y 26 del mismo mes.

### **1.3. Activación del Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea (EUCPM)**

Debido a la ola de incendios forestales en Chile a finales de enero de 2017 y el estado de emergencia declarado en varias regiones del país, el Mecanismo de Protección Civil de la Unión Europea fue activado a partir de una petición formal de las Autoridades Nacionales de Chile. A través del Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias Europeo (ERCC), en unas horas, 3 módulos operacionales de bomberos fueron movilizados desde Francia, España y Portugal, junto con un equipo de Protección Civil de la UE que incluyó expertos técnicos en el análisis del comportamiento y de las dinámicas de los incendios forestales.





La respuesta total desde la UE consistió en:

- 177 combatientes desplegados desde Francia, España y Portugal.
- 14 miembros del Equipo de Protección Civil de la UE: 2 Oficiales de enlace del ERCC, 1 Oficial de comunicación de DG ECHO (Dirección General de Operaciones de Protección Civil y Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea) y 11 expertos.
- Ayuda material desde Austria, España y Suecia (herramientas, complementos de extinción y equipamiento de protección de lucha contra incendios forestales).
- Servicio Copernicus de mapas via satélite, prestando servicio para la región de Los Ríos: 4 mapas mostrando la extensión y otros datos sobre los incendios forestales.

Los expertos en incendios forestales responsables de la redacción del presente informe han estado integrados en el equipo de Protección Civil de la UE anteriormente citado, desplegado en Chile entre el 28/01/2017 y el 18/02/2017, compuesto por:

- Julián MONTERO CABALLERO, Jefe de Equipo.
- Raphaël LE GALL, Subjefe de Equipo.
- Maja KAMCEVA, Oficial de enlace del ERCC.
- María PALACIOS VALDECANTOS, Oficial de enlace del ERCC.
- Hilaire AVRIL, Oficial de comunicación de DG ECHO.
- Mats LJUNG, apoyo técnico.
- Sam Lars Christian BACK, apoyo técnico.

#### **1.4. Metodología**

Un 80% de la superficie arrasada por el episodio de incendios estudiado se concentró en las regiones del Maule y del Biobío (393.000 ha). En particular los complejos de incendios de Las Máquinas (Maule) y San Antonio (Biobío) destacaron por la extensa superficie afectada (184.000 y 64.000 ha, respectivamente), la virulencia de su comportamiento y los daños causados.

Es por esto que se han seleccionado estos dos complejos de incendios como ejes principales del estudio, considerando fundamental el análisis de ambos para tratar de comprender el episodio global. Los incendios de San Antonio, Caserío Chaimávida y Tomeco formaron el llamado complejo de San Antonio. También diferentes focos dieron lugar al complejo de Las Máquinas, si bien este último ha sido considerado estadísticamente como un único incendio. En la figura 1.6 se observa la superficie afectada por ambos complejos de incendios. En la figura 1.7 se representa una secuencia cronológica de los principales acontecimientos. Ambas figuras permiten entender la simultaneidad y magnitud de los incendios.

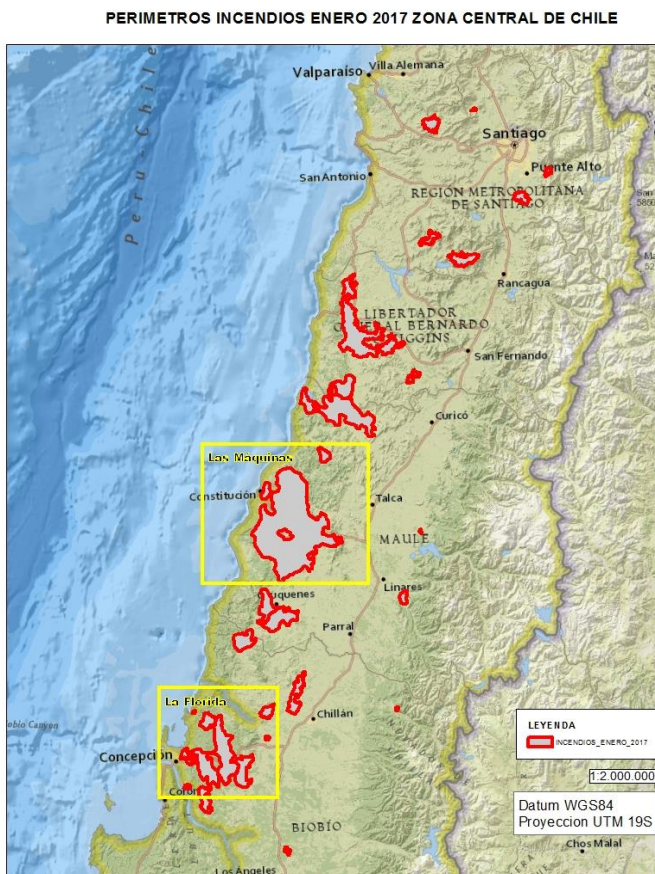


Figura 1.6. Superficie afectada por los complejos de incendios de Las Máquinas (recuadro amarillo superior) y San Antonio (recuadro amarillo inferior). Fuente: CONAF.

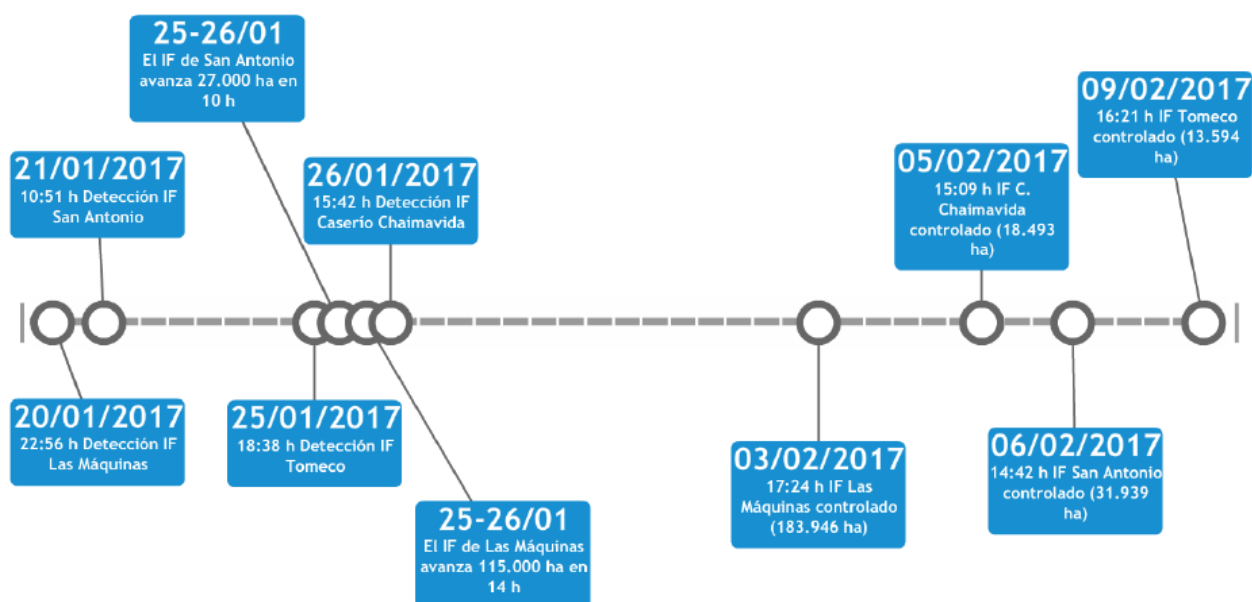


Figura 1.7. Secuencia cronológica de los complejos de incendios de Las Máquinas y San Antonio. Fuente: EUCC Team a partir de datos de CONAF.



La metodología seguida para la recopilación de datos y su posterior análisis ha sido la siguiente:

- Recopilación de los datos básicos del episodio con la unidad técnica de análisis de incendios que posee la Dirección Nacional de CONAF en Santiago de Chile (Sección de Análisis y Predicción de Incendios Forestales).
- Recopilación de los datos de campo y datos más concretos de los incendios con la Dirección Regional de CONAF en Maule y Biobío. Para ello se subdividió el equipo de expertos en dos grupos, uno de ellos trabajó en la región del Maule y el otro en la región del Biobío.
- Posterior análisis conjunto de todos los datos por parte de todo el equipo de expertos junto con la Sección de Análisis y Predicción de Incendios Forestales de CONAF en Santiago de Chile.
- Consultas técnicas específicas sobre meteorología con expertos en Europa de las Unidades GRAF (*Grupo de Refuerzo de Actuaciones Forestales*) Bomberos de Cataluña-España, del Grupo de Análisis de la PCF (*Pau Costa Foundation*), de la CFOA (*Fire Chiefs Association de Reino Unido e Irlanda*) y de la UNAP (*Unidad de Análisis y Planificación*) de Castilla-La Mancha-España.

Las fuentes externas consultadas para obtener datos para el análisis han sido las siguientes:

- Datos meteorológicos: Modelo GFS.
- Imágenes satélite: METEOSAT y GOES 13.
- Simuladores de incendios forestales cedidos por empresa Tecnosylva S.L., con sede en León (España) y San Diego (USA).
- Asesoramiento experto por parte de Al Beaver, analista de incendios forestales en British Columbia (Canadá) y Victoria (Australia).



## **2. Recopilación de datos y desarrollo de los incendios estudiados**

### **2.1. El complejo de incendios de Las Máquinas (Maule)**

#### **2.1.1. Datos básicos**

**Fecha/hora detección:** 20-Ene-2017/22:56 h

**Fecha/hora control:** 03-Feb-2017/17:24 h

**Duración:** 13 días 18 h 29 min

**Región:** Maule

**Provincias afectadas:** Cauquenes, Linares y Talca

**Área afectada:** 183.946 ha

#### **2.1.2. Meteorología**

A continuación se muestran los datos meteorológicos básicos en el momento del inicio del incendio, según refleja CONAF en su Registro de Operaciones:

**Temperatura:** 28,5 °C

**Humedad relativa:** 25%

**Velocidad del viento:** 13 km/h

**Componente del viento:** S

En cuanto a la evolución de estas variables durante el incendio, en las figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se muestran los datos registrados por tres estaciones meteorológicas cercanas al mismo (Sauzal, Cauquenes y Coronel Maule) mediante gráficos en los que se relaciona la temperatura y la velocidad del viento con la humedad relativa. También más adelante, en la figura 3.13 (dentro del punto 3 del informe, en el que se analiza globalmente el episodio), se recogen los datos de la estación Chanco INIA, que por su ubicación se considera la más representativa de las condiciones que se dieron en el momento de mayor desarrollo del incendio.

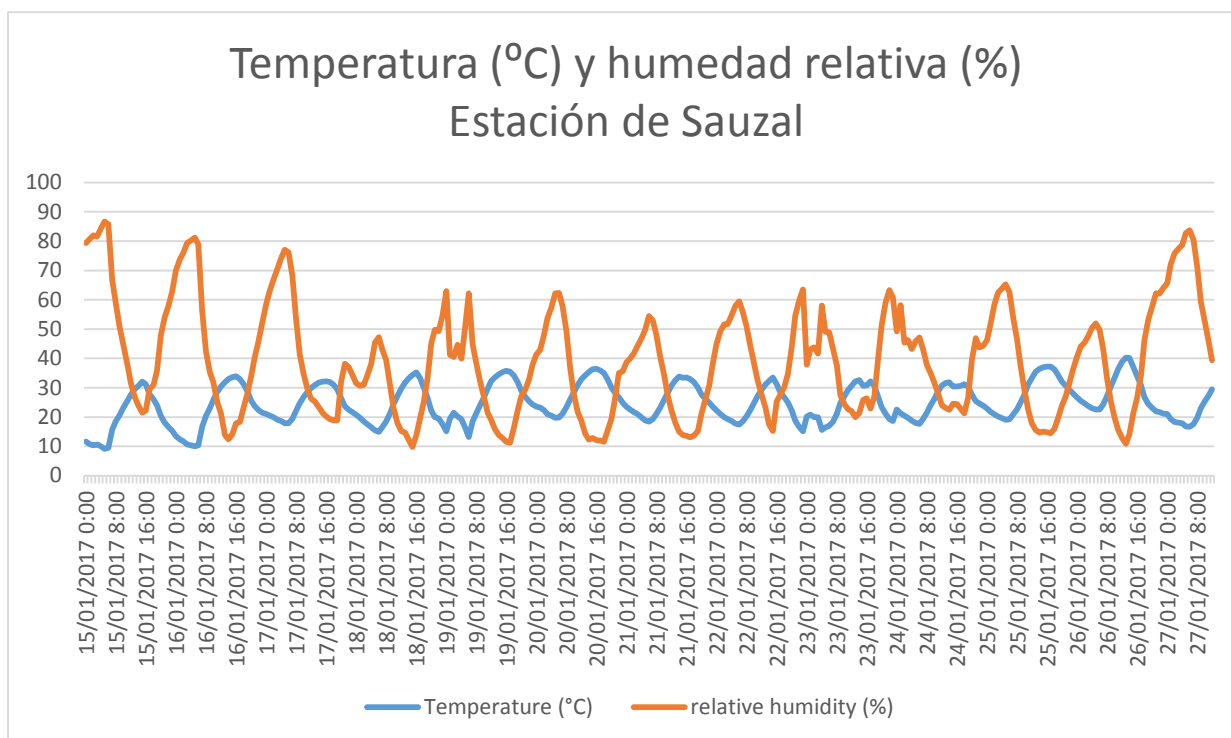


Figura 2.1. Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Sauzal (Coordenadas: latitud -35.71487926 / longitud: -72.11130833 / elevación: 162 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

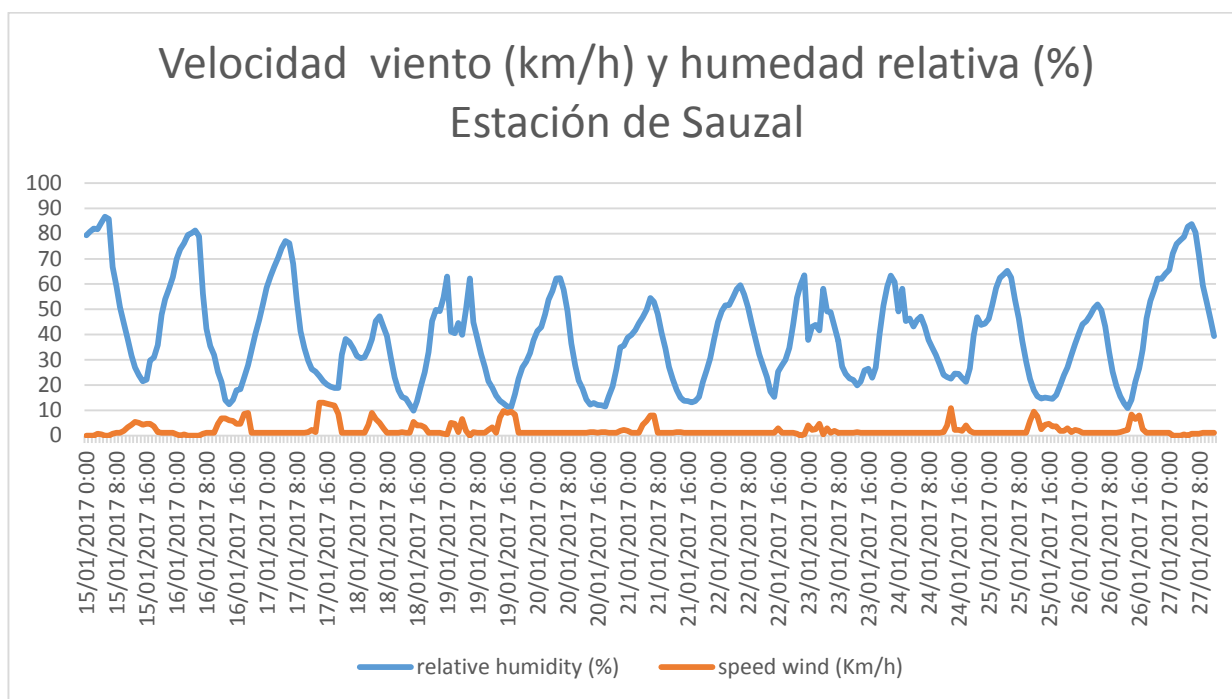


Figura 2.2. Gráfico de evolución de velocidad del viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Sauzal (Coordenadas: latitud -35.71487926 / longitud: -72.11130833 / elevación: 162 m s. n. m.). Fuente: CONAF.



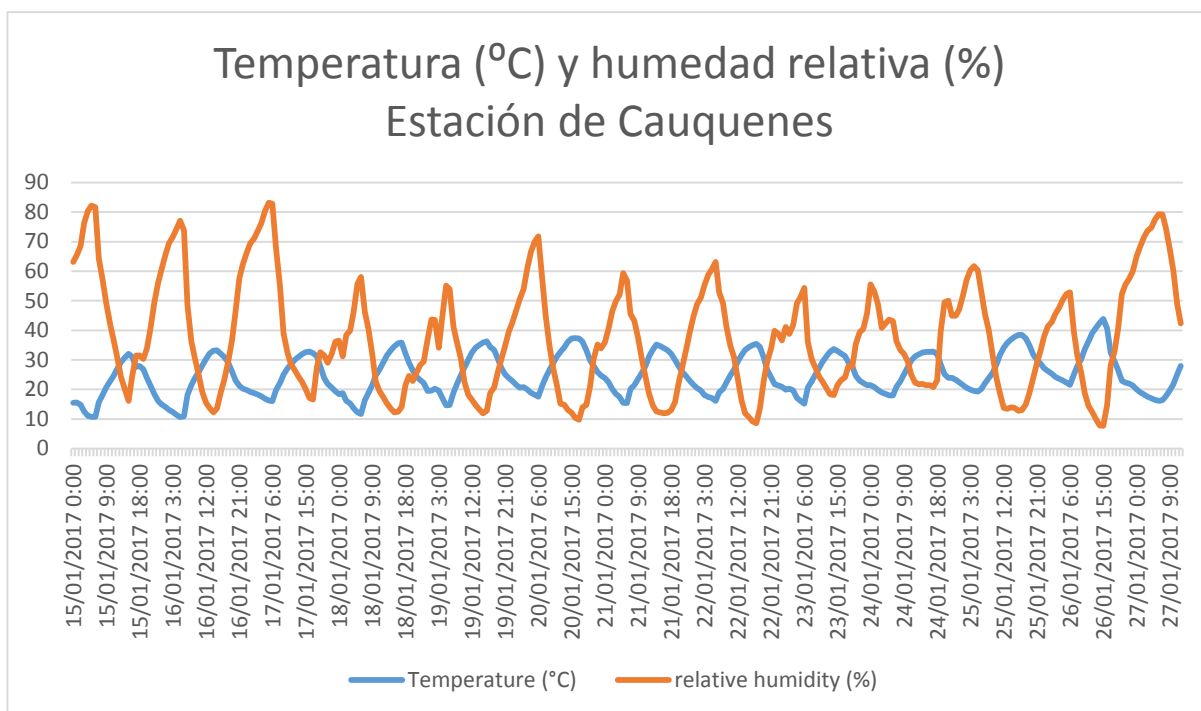


Figura 2.3. Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Cauquenes (Coordenadas: latitud -35.95597397 / longitud: -72.2899376 / elevación: 162 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

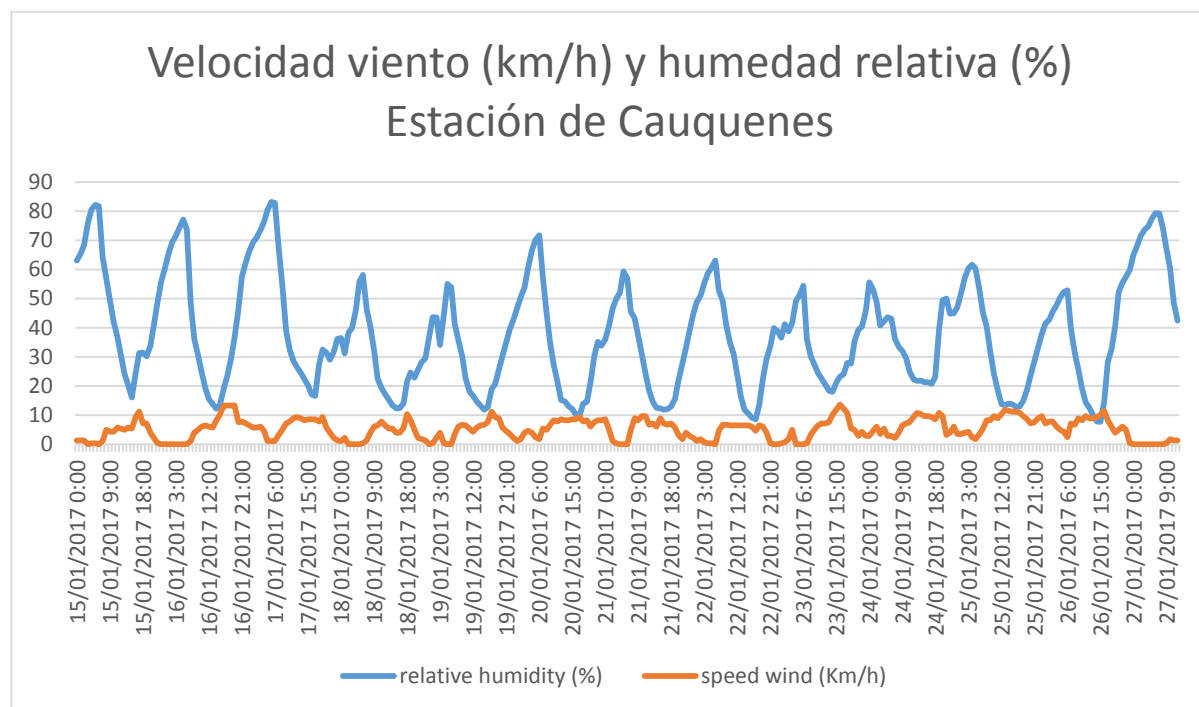


Figura 2.4. Gráfico de evolución de velocidad del viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Cauquenes (Coordenadas: latitud -35.95597397 / longitud: -72.2899376 / elevación: 162 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

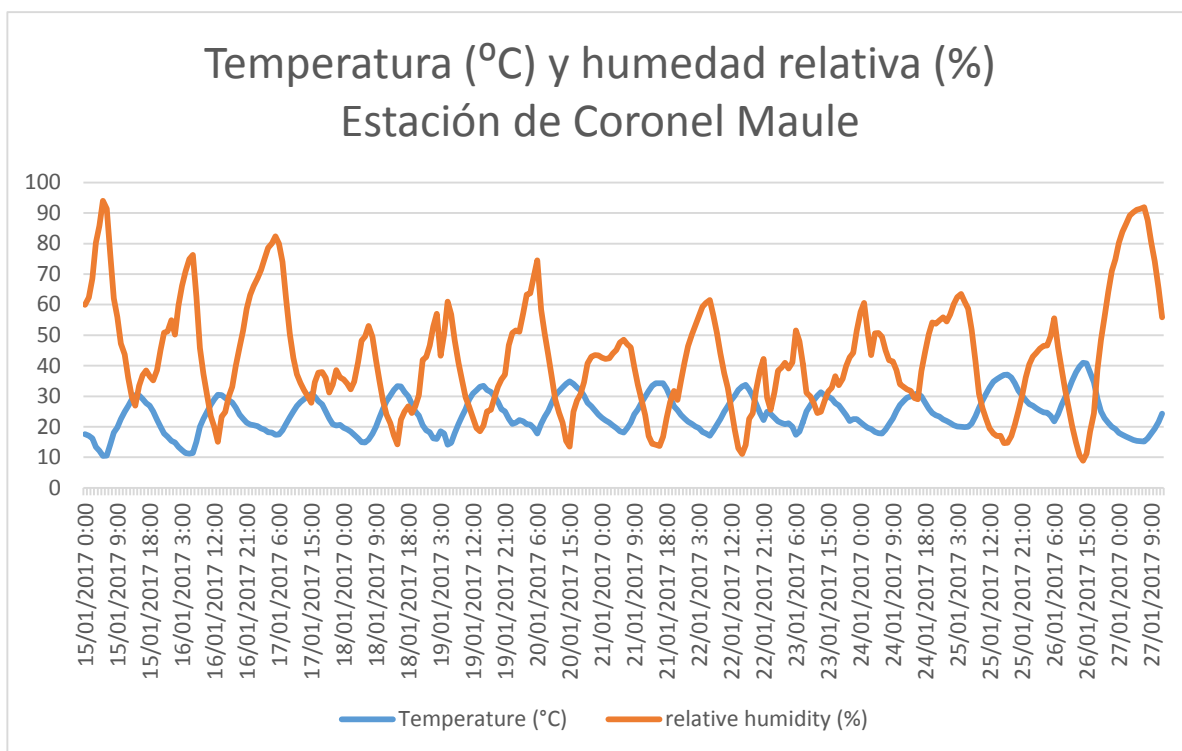


Figura 2.5. Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Coronel Maule (Coordenadas: latitud -36.05909279 / longitud: -72.47768878 / elevación: 172 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

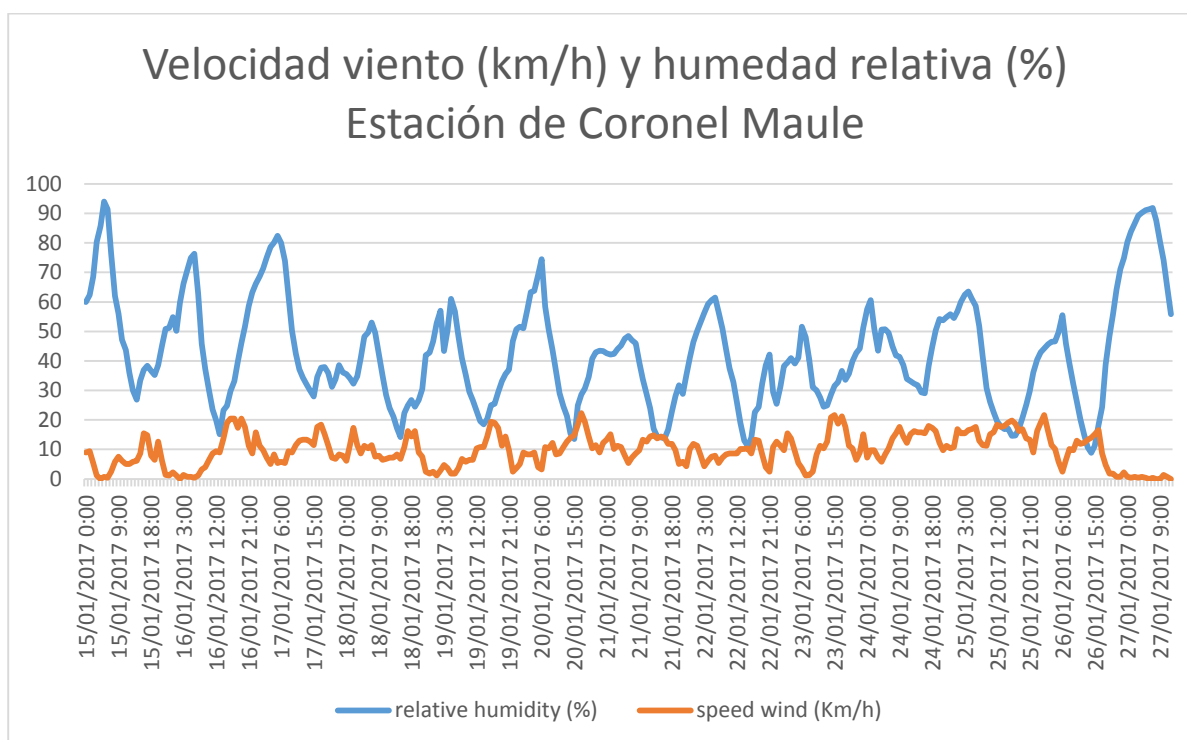


Figura 2.6. Gráfico de evolución de viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Coronel Maule (Coordenadas: latitud -36.05909279 / longitud: -72.47768878 / elevación: 172 m s. n. m.). Fuente: CONAF.



Del análisis global de los datos se desprende que durante el desarrollo del incendio, como media, las temperaturas máximas superaron los 30°C y las humedades relativas mínimas oscilaron entre el 10 y el 20 %, si bien se observa que el 26 de enero la temperatura aumenta hasta superar los 40° C y la humedad relativa baja del 10%.

En cuanto al viento, los datos registrados por las estaciones dan en general valores máximos por debajo de los 20 km/h.

### 2.1.3. Topografía

El incendio de Las Máquinas se inició en una zona de topografía suave, prácticamente llana. En las figuras 2.7 y 2.8 se observan los mapas de orientación y pendientes de la zona afectada por el incendio, así como el porcentaje de superficie afectada en relación a dichos parámetros.

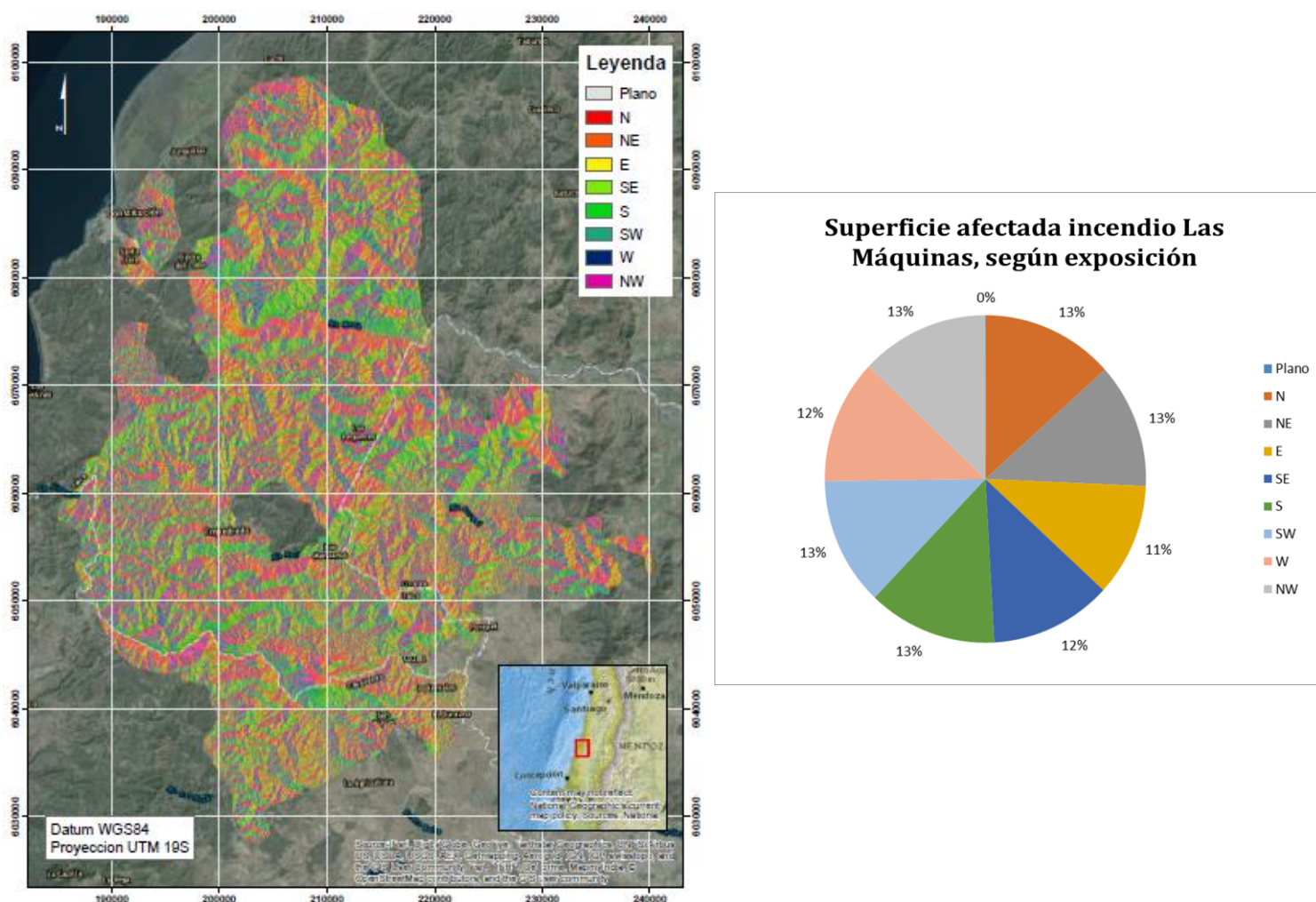


Figura 2.7. Mapa de orientaciones del complejo de incendios de Las Máquinas. Porcentaje de superficie afectada en relación a la orientación (sobre perímetro actualizado a 02/02/2017). Fuente: EUCP Team a partir de modelo digital del terreno de CONAF.

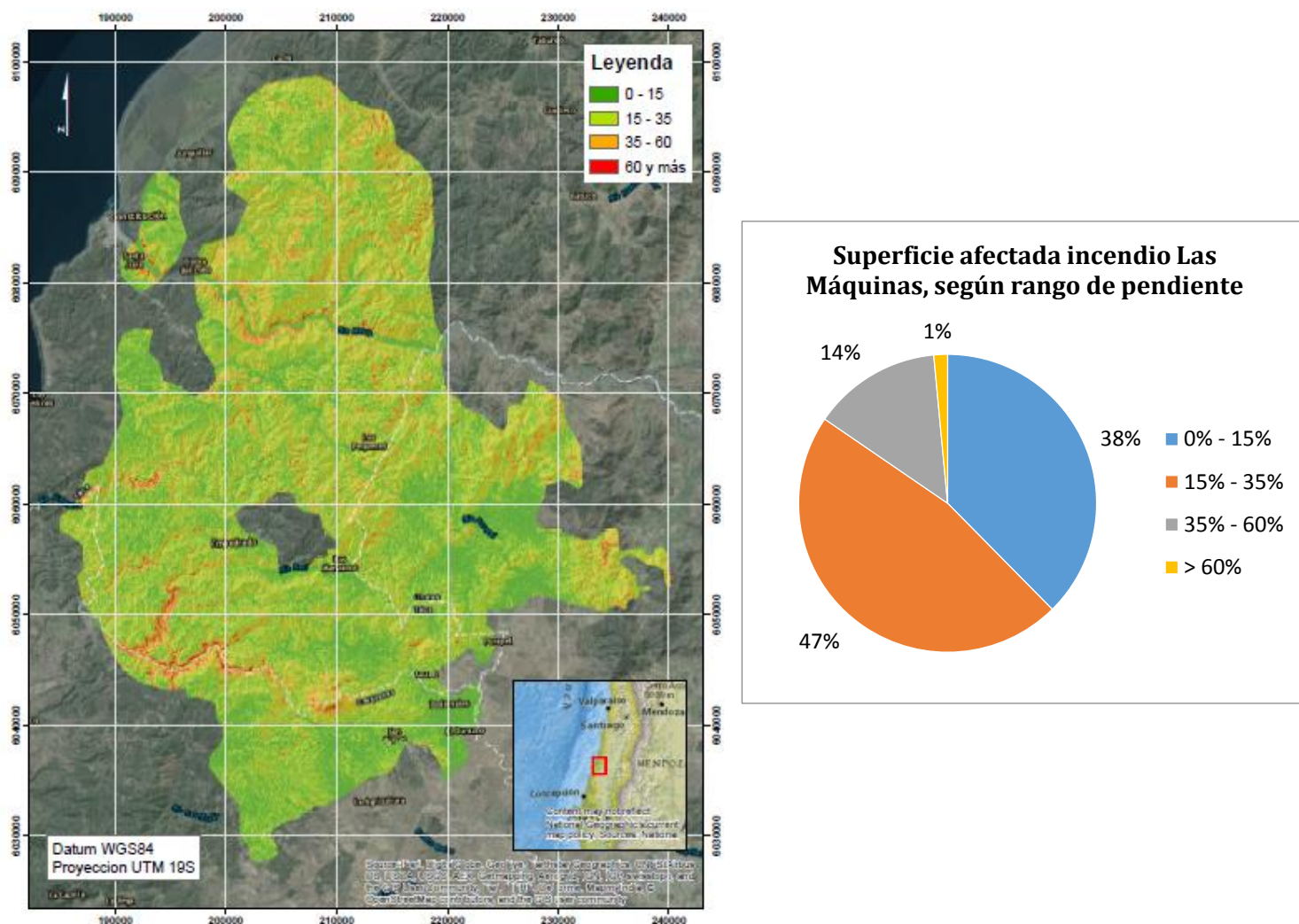


Figura 2.8. Mapa de pendientes del complejo de incendios de Las Máquinas. Porcentaje de superficie afectada en relación a la pendiente (sobre perímetro actualizado a 02/02/2017). Fuente: EUCP Team a partir de modelo digital del terreno de CONAF.

Es destacable que el 85% del incendio se desarrolla sobre pendientes inferiores al 35%.

#### 2.1.4. Combustible

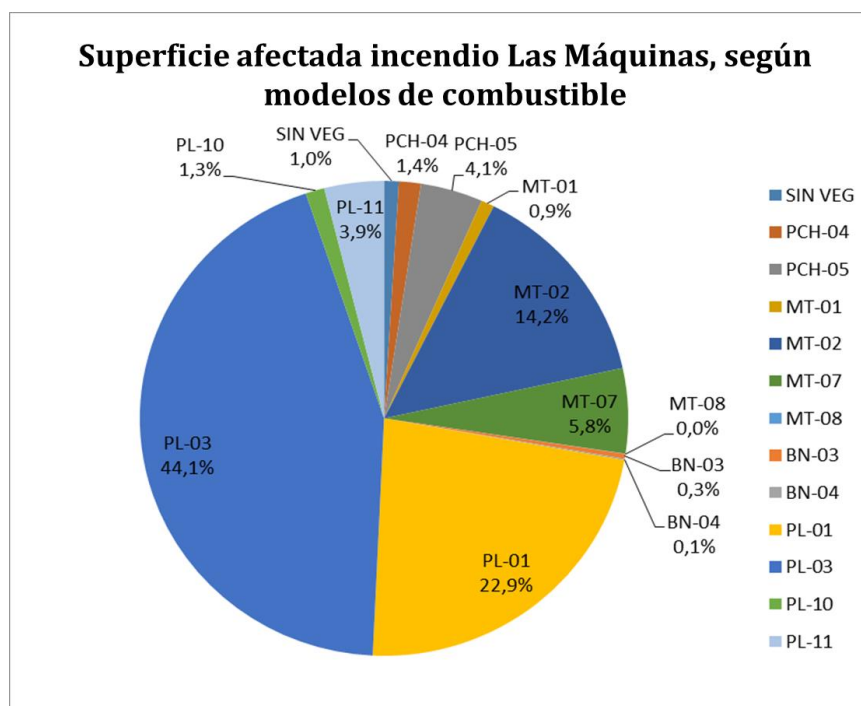
En la figura 2.9 se muestra un mapa con la distribución de los modelos de combustible del sistema KITAL (JULIO et al, 1995) sobre los que se desarrolló el incendio, mientras que en la figura 2.10 se observa el porcentaje de superficie afectada en relación a este parámetro. En la tabla 2.1 se recogen las características teóricas de los modelos afectados.

Más del 70% del incendio se desarrolló sobre plantaciones, en torno a un 20% sobre matorral y alrededor de un 5% sobre pasto. La superficie de bosque nativo afectada estuvo por debajo del 1%.









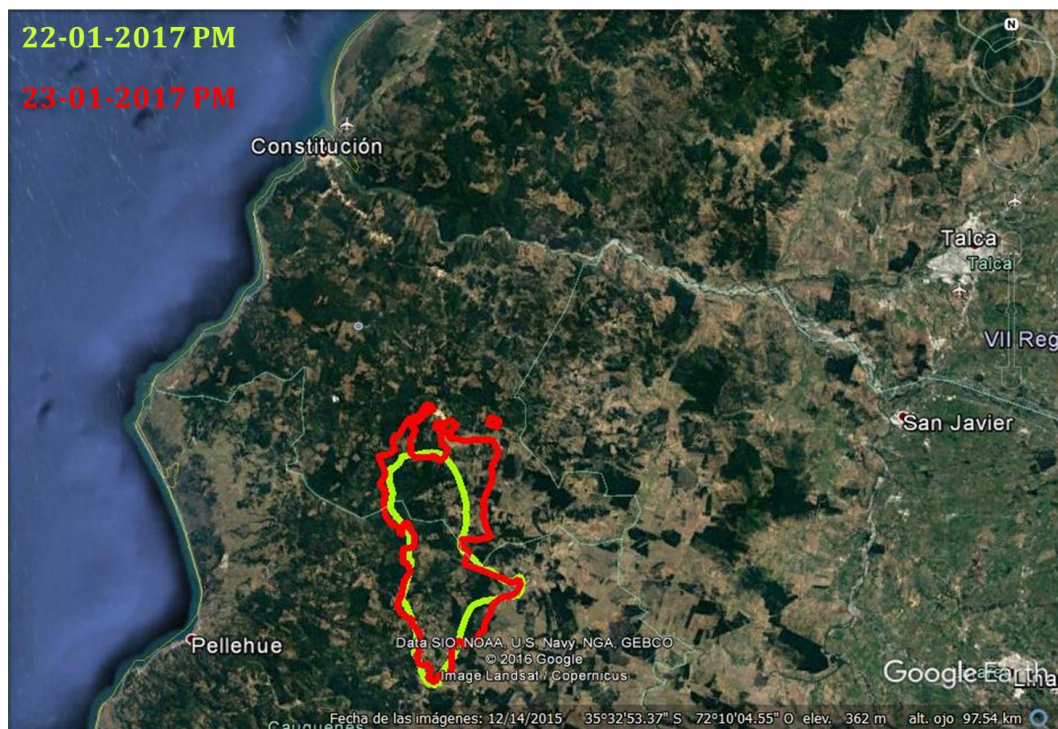
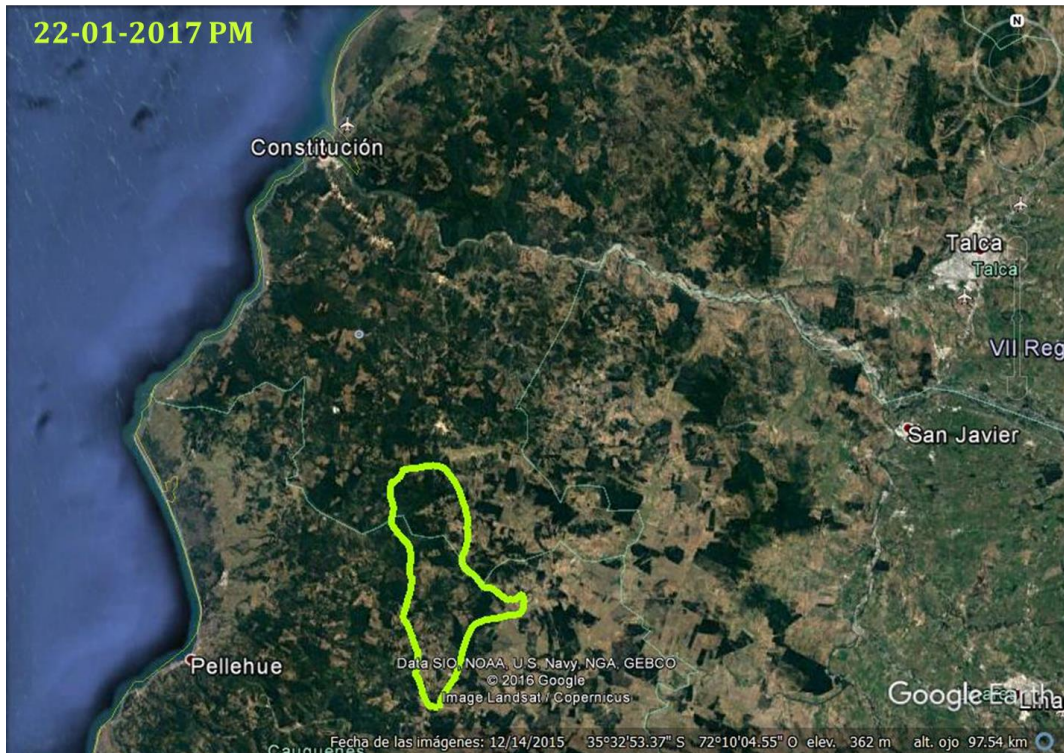
**Figura 2.10.** Porcentaje de superficie afectada en relación al modelo combustible, según la clasificación del sistema KITRAL (sobre perímetro actualizado a 02/02/2017). Fuente: EUCP Team a partir de cartografía de CONAF.

Modelo de combustible	Carga original (TON/ha)	Consumo normal (%)	Combustible disponible (Kg/m <sup>2</sup> )	Descripción modelos de combustible	Velocidad de propagación lineal (VPL) (m/s)
PCH 04	5.86	90	0.527	Pastos	0.008690
PCH 05	10.81	60	0.649		0.001009
MT 01	41.76	70	2.923	Matorrales	0.007603
MT 02	27.29	70	1.910		0.008147
MT 07	45.56	70	3.189		0.001672
MT 08	29.27	65	1.903		0.004342
BN 03	50.63	70	3.544	Bosque nativo	0.000979
BN 04	33.29	65	2.164		0.001556
PL 01	8.82	95	0.838	Plantaciones	0.013174
PL 03	47.62	70	3.333		0.002481
PL 10	39.17	70	2.742		0.003799
PL 11	37.90	65	2.464		0.001325

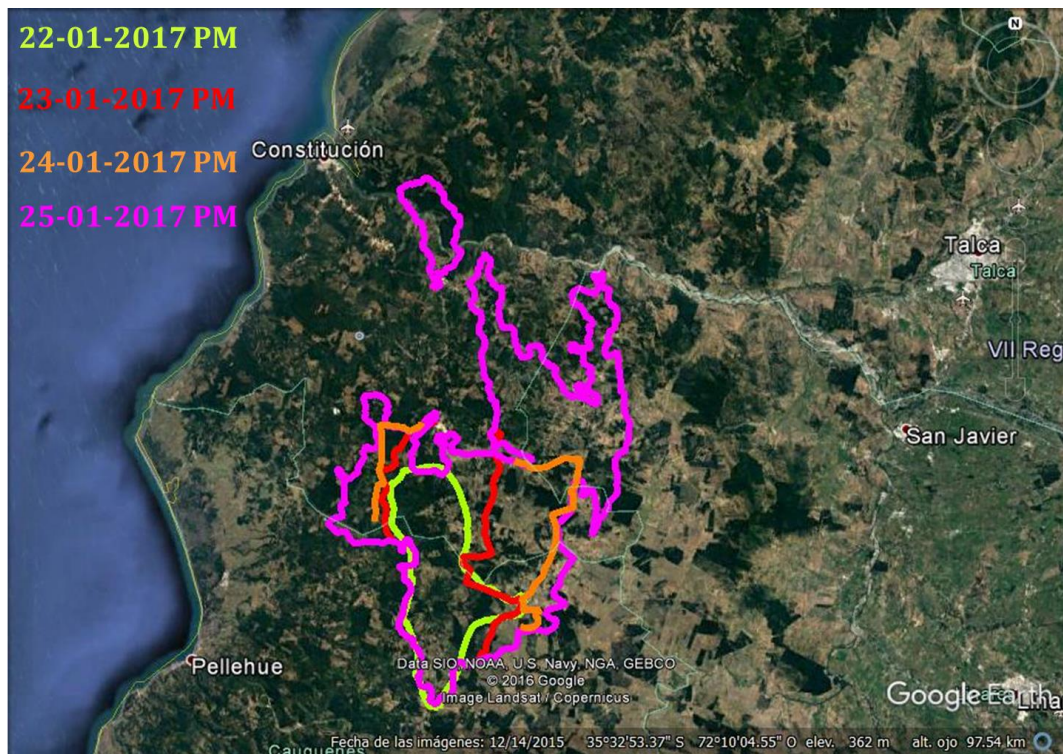
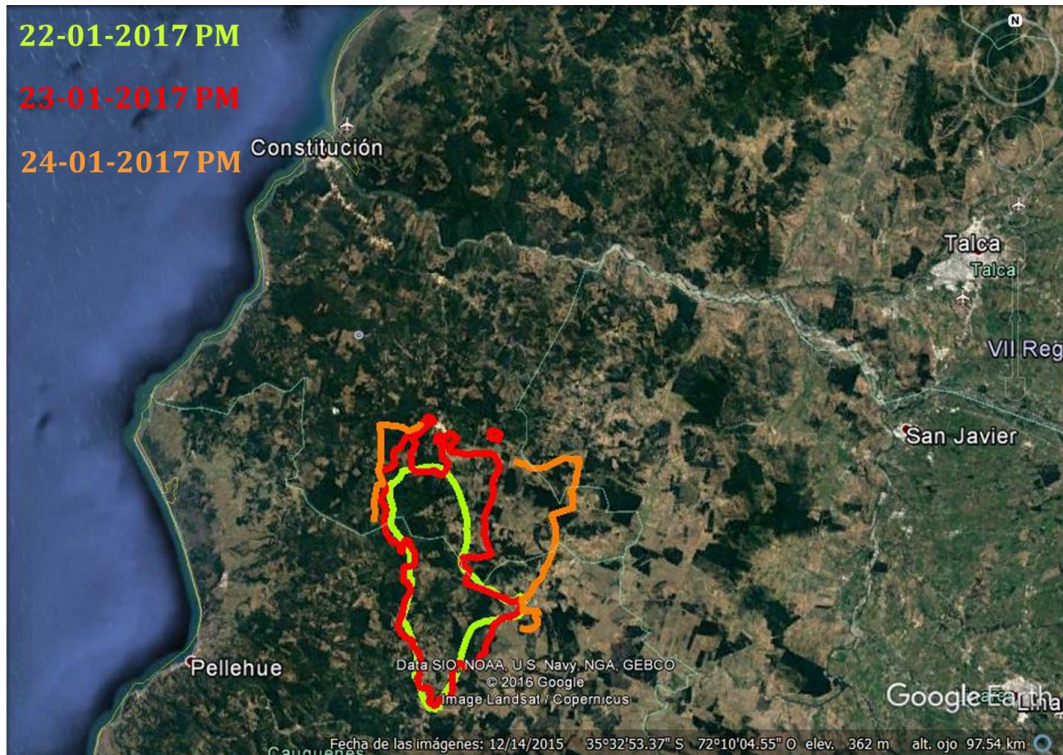
**Tabla 2.1.** Características teóricas de los modelos de combustible del sistema KITRAL sobre los que se propagó el incendio de Las Máquinas. Fuente: EUCP Team elaborado a partir de datos proporcionados por CONAF.

### 2.1.5. Desarrollo del complejo de incendio

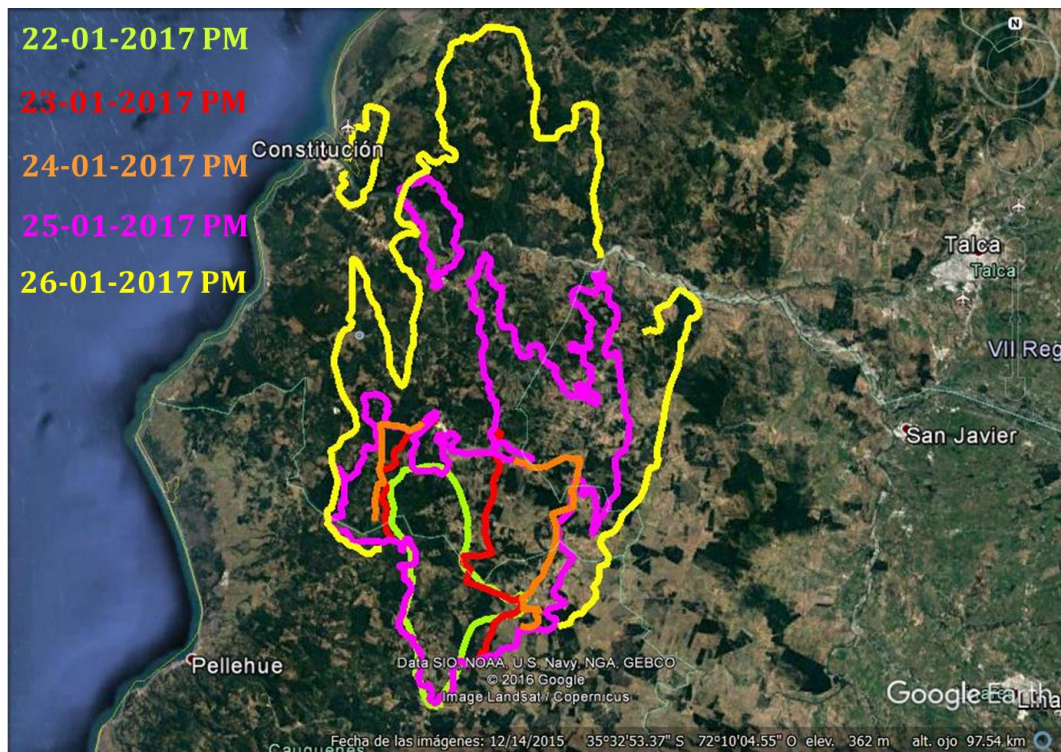
En la secuencia de imágenes recogida en la figura 2.11 se muestra la evolución del incendio de Las Máquinas desde el 22 hasta el 26 de enero; periodo de mayor desarrollo.









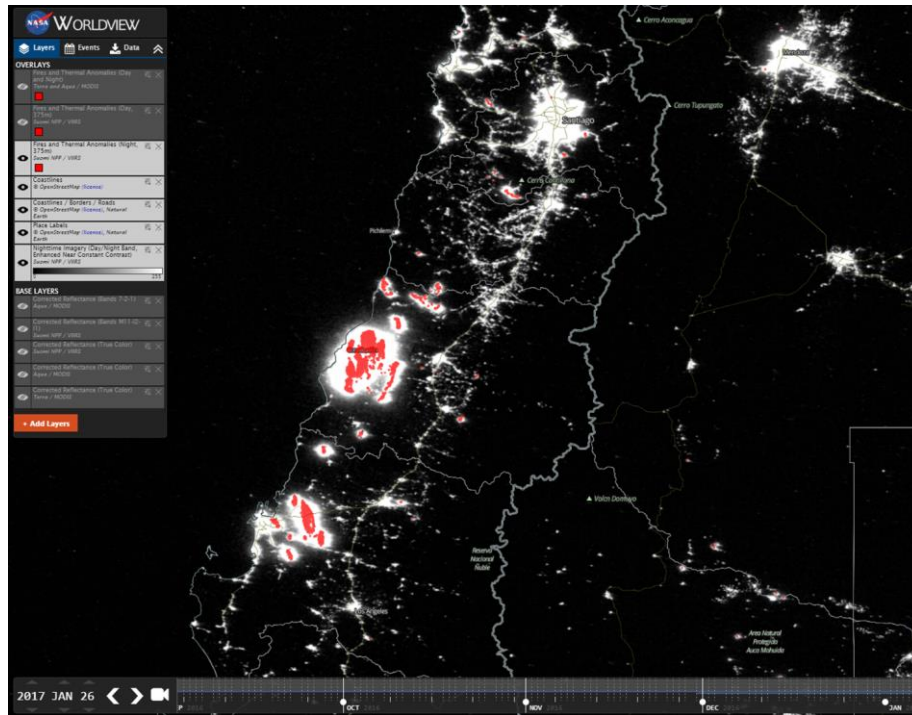


**Figura 2.11.** Evolución de perímetros del incendio de Las Máquinas desde el 22/01/2017 al 26/01/2017. Fuente: EUCP Team a partir de datos proporcionados por CONAF.

Del estudio de las imágenes satélite se desprende que, entre los días 25 y 26 de enero, el incendio de Las Máquinas arrasó 115.000 ha en 14 h, con un frente que llegó a alcanzar 40 km de perímetro activo y que avanzó de forma independiente a cualquiera de los parámetros que en condiciones normales definen el comportamiento del fuego. Sobre el terreno hay evidencias que demuestran que en el ambiente generado por el incendio se alcanzaron vientos de más de 100 km/h, cuando ni la previsión ni los datos de las estaciones meteorológicas cercanas lo registraron. La interpretación del episodio, por tanto, va más allá de un análisis convencional.

Se contempla la hipótesis de que la acumulación de varios factores adversos (estrés de la vegetación por la sequía acumulada, meteorología extrema, simultaneidad y magnitud de incendios en las regiones de Maule y Biobío), unida a la ruptura brusca de la estabilidad atmosférica entre los días 25 y 26 (tras varios días de bloqueo anticiclónico sostenido), explicaría este comportamiento. En el punto 3 del informe se muestran las citadas evidencias y se desarrolla y argumenta todo el proceso.

Lo mostrado en la figura 2.12 da una idea de la magnitud del episodio; se observa una imagen de satélite nocturna en la que se puede comparar la intensidad lumínica de los complejos de incendios de Maule (parte central) y Biobío (parte inferior) con la de la ciudad de Santiago (parte superior).

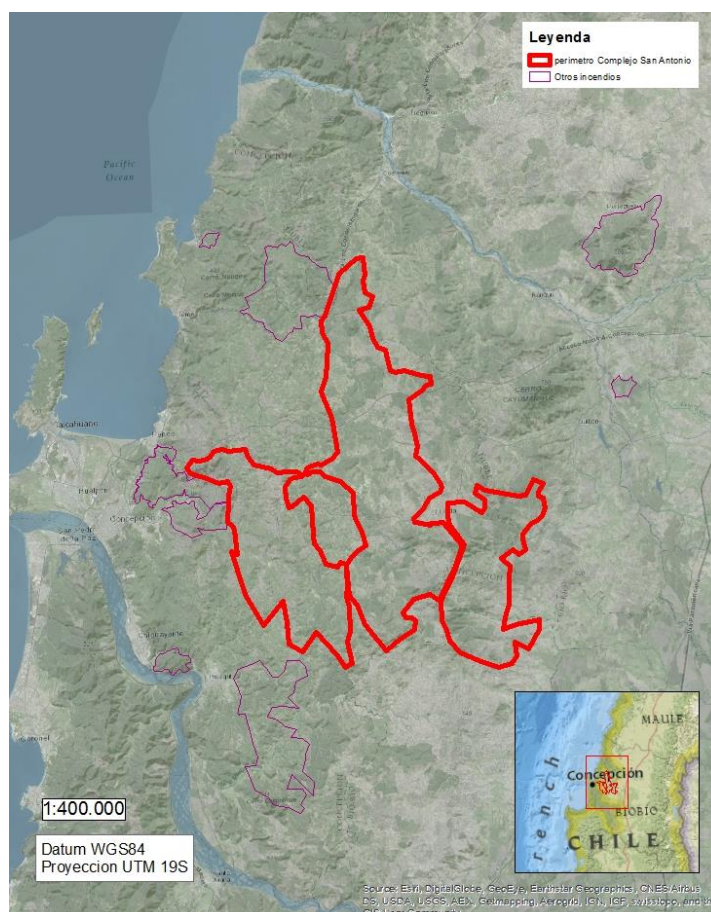


**Figura 2.12.** Imagen Nocturna de VIIRS entre el 25 y el 26 de enero de 2017, apreciándose la intensidad de los incendios y su magnitud comparados con la ciudad de Santiago de Chile. Fuente: Satélite NASA. Imagen proporcionada por CONAF.

## 2.2. El complejo de incendios de San Antonio (Biobío)

### 2.2.1. Datos básicos

Los incendios de San Antonio, Tomeco y Caserío Chaimávida dieron lugar al llamado complejo de incendios de San Antonio. En la figura 2.13 se representan los perímetros de dichos incendios, que afectaron a una superficie total de 64.017 ha.



**Figura 2.13.** En rojo, con trazo grueso, los perímetros de los incendios de Caserío Chaimávida (izquierda), San Antonio (centro) y Tomeco (derecha). En morado, con trazo fino, los perímetros de otros incendios también desarrollados en enero de 2017. Fuente: EUCP Team a partir de datos proporcionados por CONAF.

A continuación se muestran los principales datos de los tres incendios.

### **Incendio San Antonio**

**Fecha/hora detección:** 21-Ene-2017/10:51 h

**Fecha/hora control:** 06-Feb-2017/14:42 h

**Duración:** 16 días 3 h 51 min

**Región:** Biobío

**Provincias afectadas:** Concepción

**Área afectada:** 31.930 ha

### **Incendio Tomeco**

**Fecha/hora detección:** 25-Ene-2017/18:38 h

**Fecha/hora control:** 09-Feb-2017/16:21 h

**Duración:** 14 días 21 h 43 min

**Región:** Biobío

**Provincias afectadas:** Concepción

**Área afectada:** 13.594 ha





### **Incendio Caserío Chaimávida**

**Fecha/hora detección:** 26-Ene-2017/15:42 h

**Fecha/hora control:** 05-Feb-2017/15:09 h

**Duración:** 9 días 23 h 27 min

**Región:** Biobío

**Provincias afectadas:** Concepción

**Área afectada:** 18.493 ha

### **2.2.2. Meteorología**

A continuación se muestran los datos meteorológicos básicos en el momento del inicio los incendios de San Antonio y Tomeco, según refleja CONAF en sus Registros de Operaciones. No se dispone de dichos datos para el incendio de Caserío Chaimávida.

#### **Incendio San Antonio**

**Temperatura:** 30°C

**Humedad relativa:** 32%

**Velocidad del viento:** 20 km/h

**Componente del viento:** SE

#### **Incendio Tomeco**

**Temperatura:** 25,3 °C

**Humedad relativa:** 39,9 %

**Velocidad del viento:** 2,1 km/h

**Componente del viento:** S

En cuanto a la evolución de estas variables durante los días de mayor desarrollo de los incendios, en las figuras 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 se muestran los datos registrados por las tres estaciones meteorológicas más cercanas (Nueva Aldea, Punta Parra y Chiguayante) mediante gráficos en los que se relaciona la temperatura y la velocidad del viento con la humedad relativa. En la figura 2.14 se muestra la ubicación de dichas estaciones.

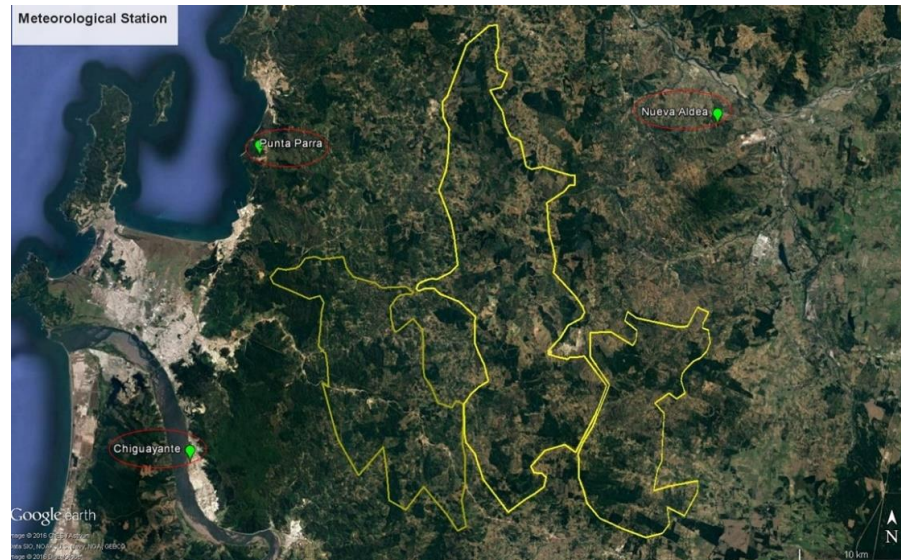


Figura 2.14. Ubicación de las estaciones meteorológicas de Nueva Aldea, Punta Parra y Chiguayante, representadas sobre ortofoto con los perímetros del complejo de incendios de San Antonio. Fuente: EUCP Team. Elaboración propia.

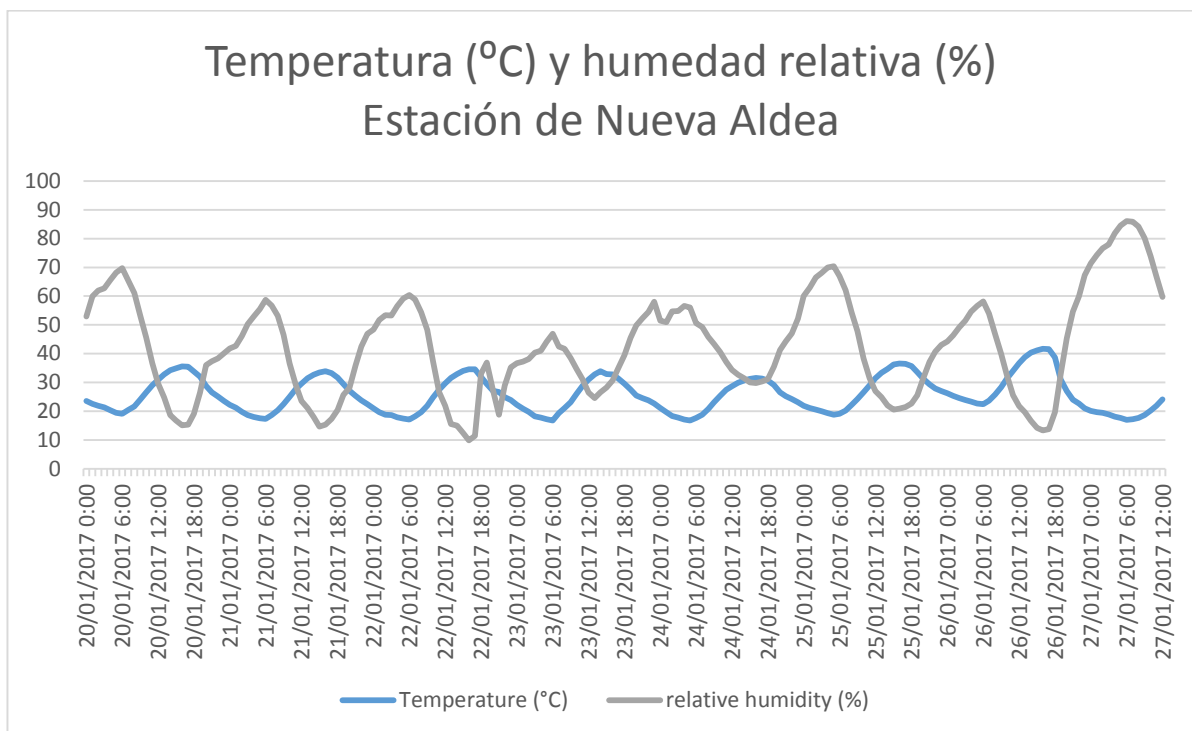
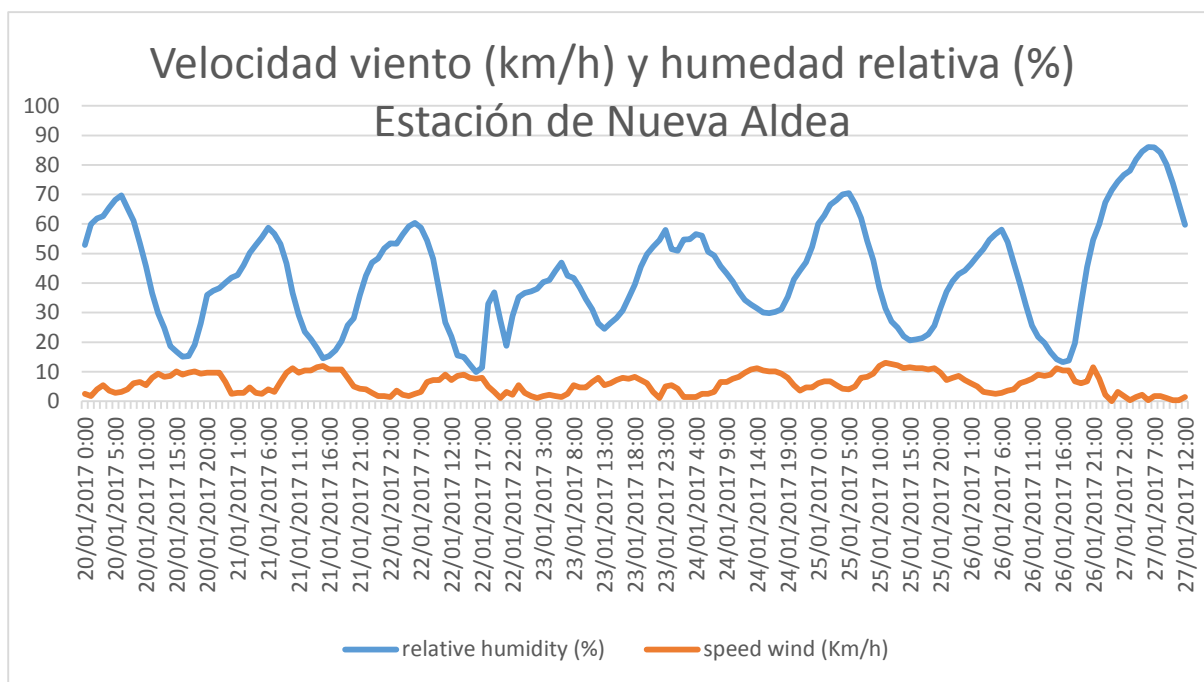
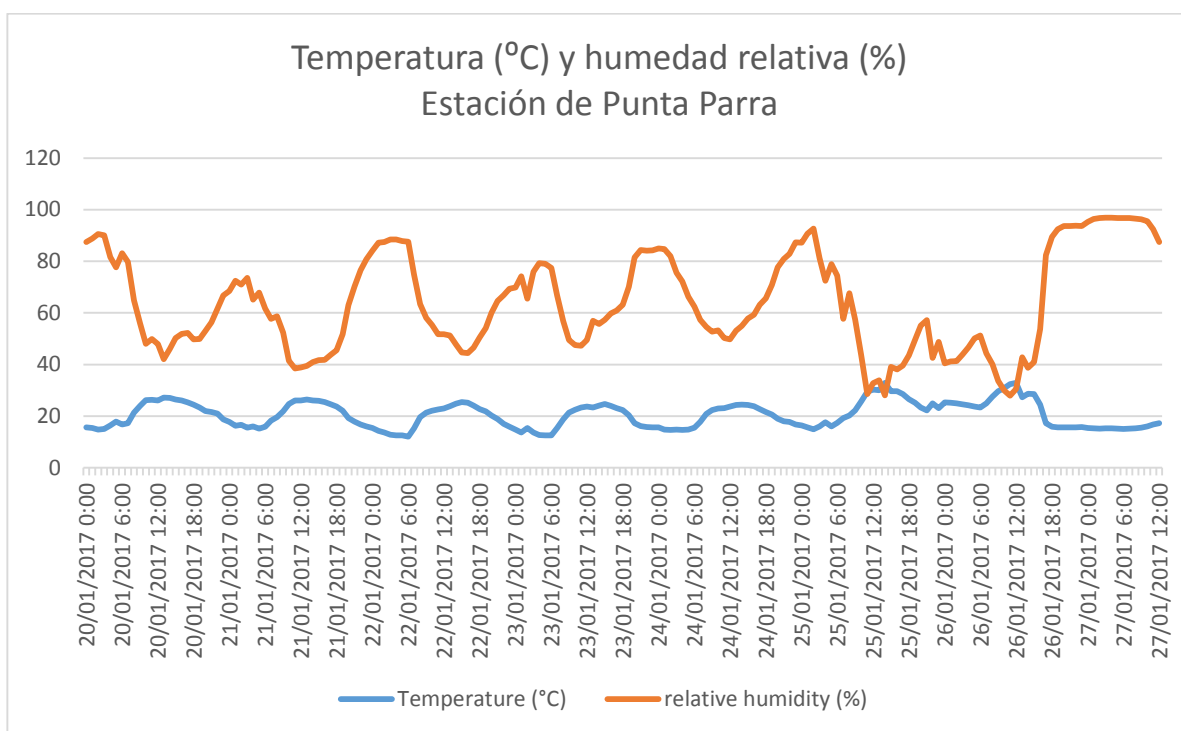


Figura 2.15. Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Nueva Aldea (Coordenadas: latitud -36.6489 / longitud: -72.51349 / elevación: 82 m s. n. m.). Fuente: CONAF.



**Figura 2.16.** Gráfico de evolución de velocidad del viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Nueva Aldea (Coordenadas: latitud -36.6489 / longitud: -72.51349 / elevación: 82 m s. n. m.). Fuente: CONAF.



**Figura 2.17.** Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Punta Parra (Coordenadas: latitud -36.67239402 / longitud: -72.96468405 / elevación: 190 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

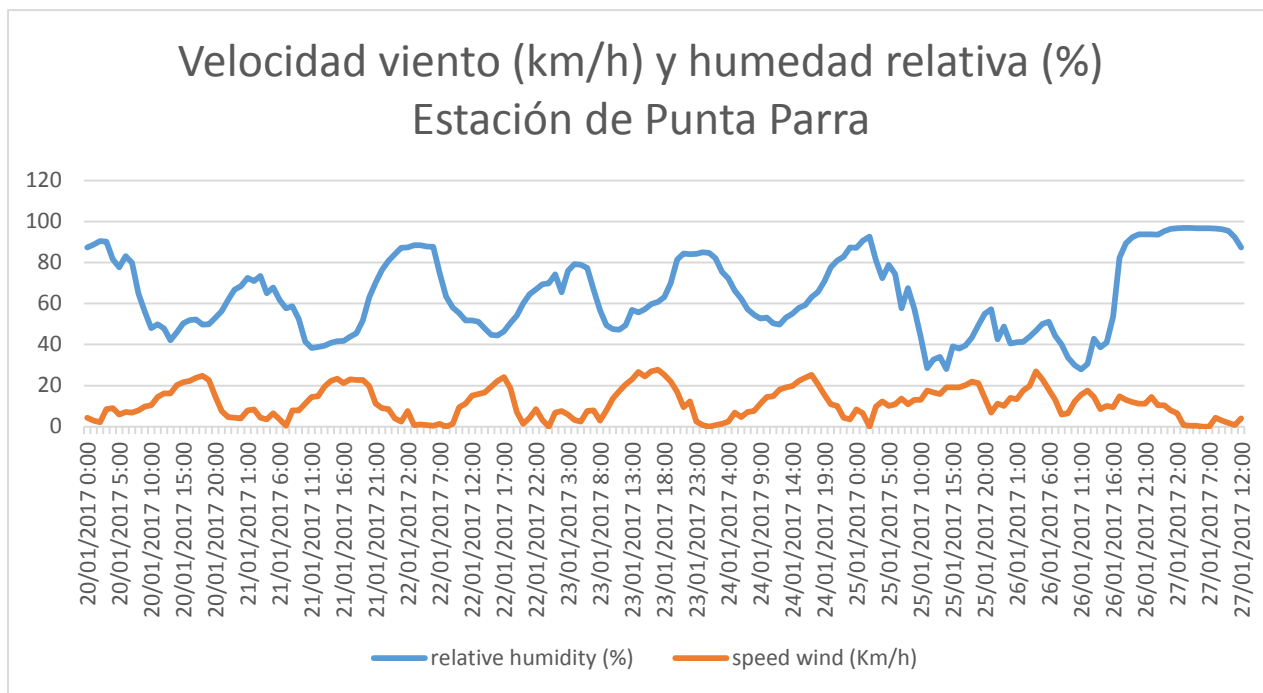


Figura 2.18. Gráfico de evolución de velocidad del viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Punta Parra (Coordenadas: latitud -36.67239402 / longitud: -72.96468405 / elevación: 190 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

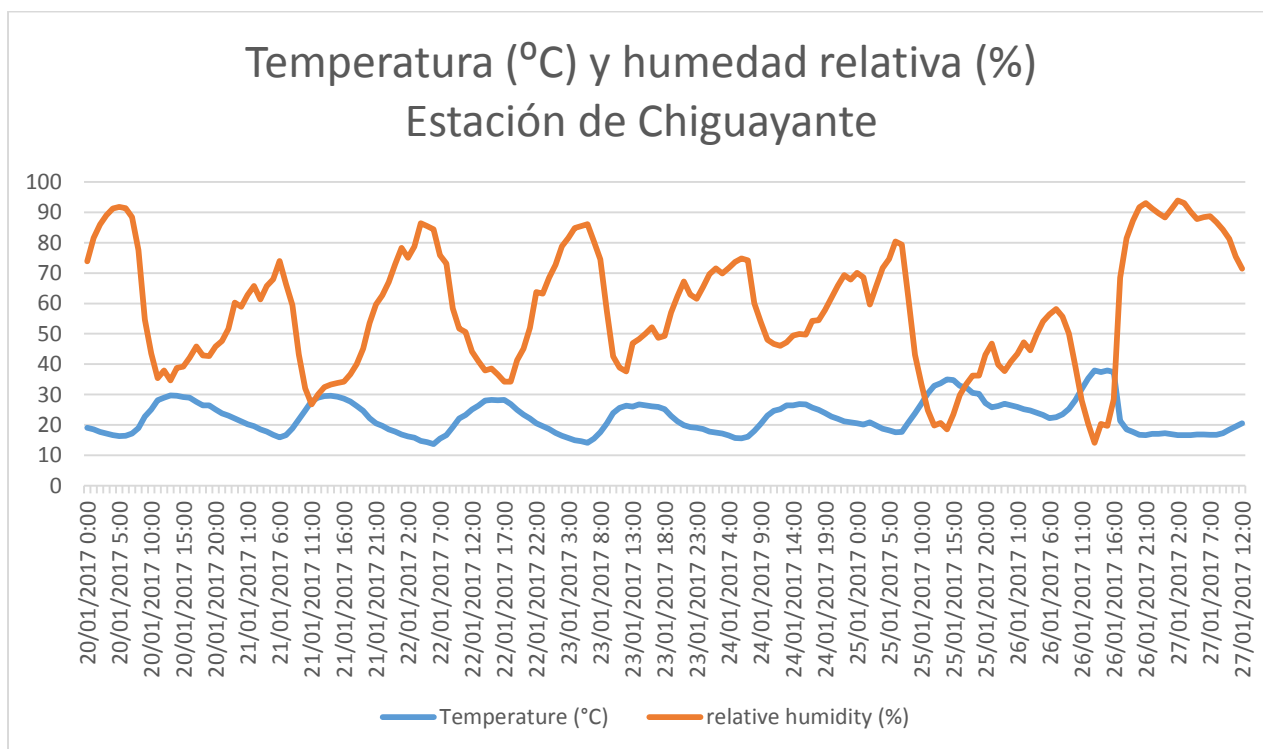
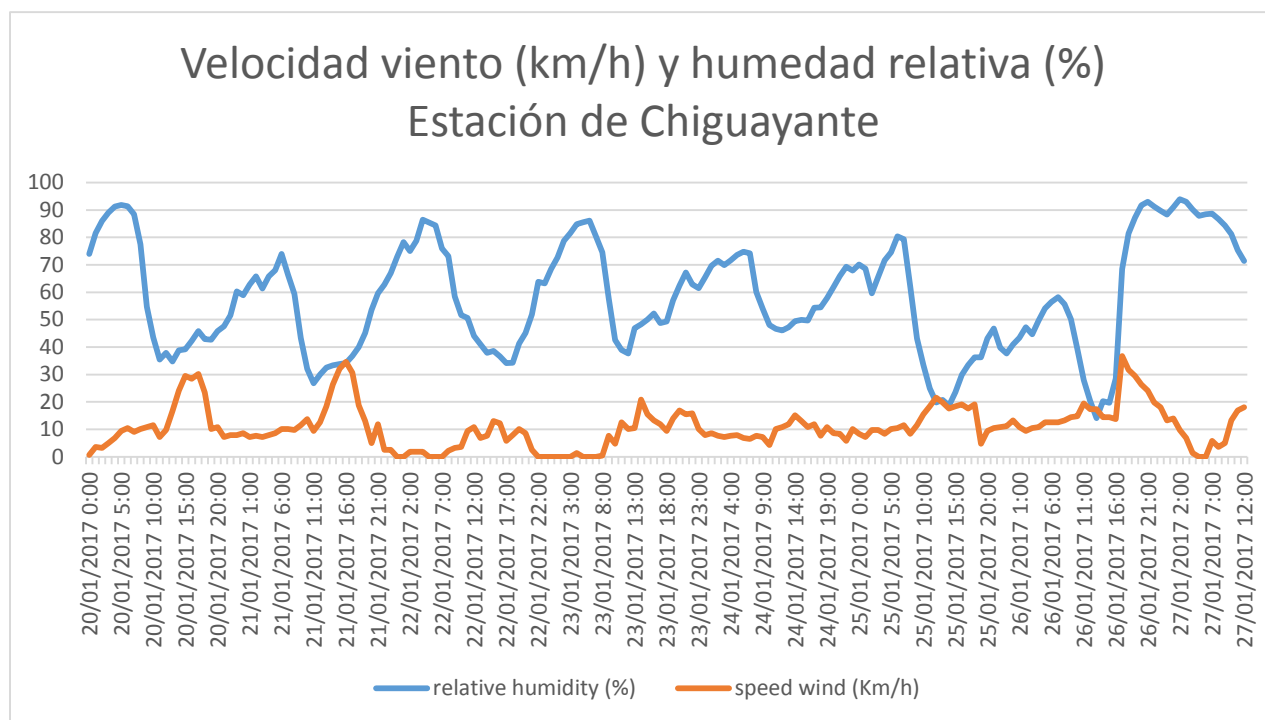


Figura 2.19. Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Chiguayante (Coordenadas: latitud -36.91349 / longitud: -73.035458 / elevación: 23 m s. n. m.). Fuente: CONAF.



**Figura 2.20.** Gráfico de evolución de viento y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Chiguayante (Coordenadas: latitud -36.91349 / longitud: -73.035458 / elevación: 23 m s. n. m.). Fuente: CONAF.

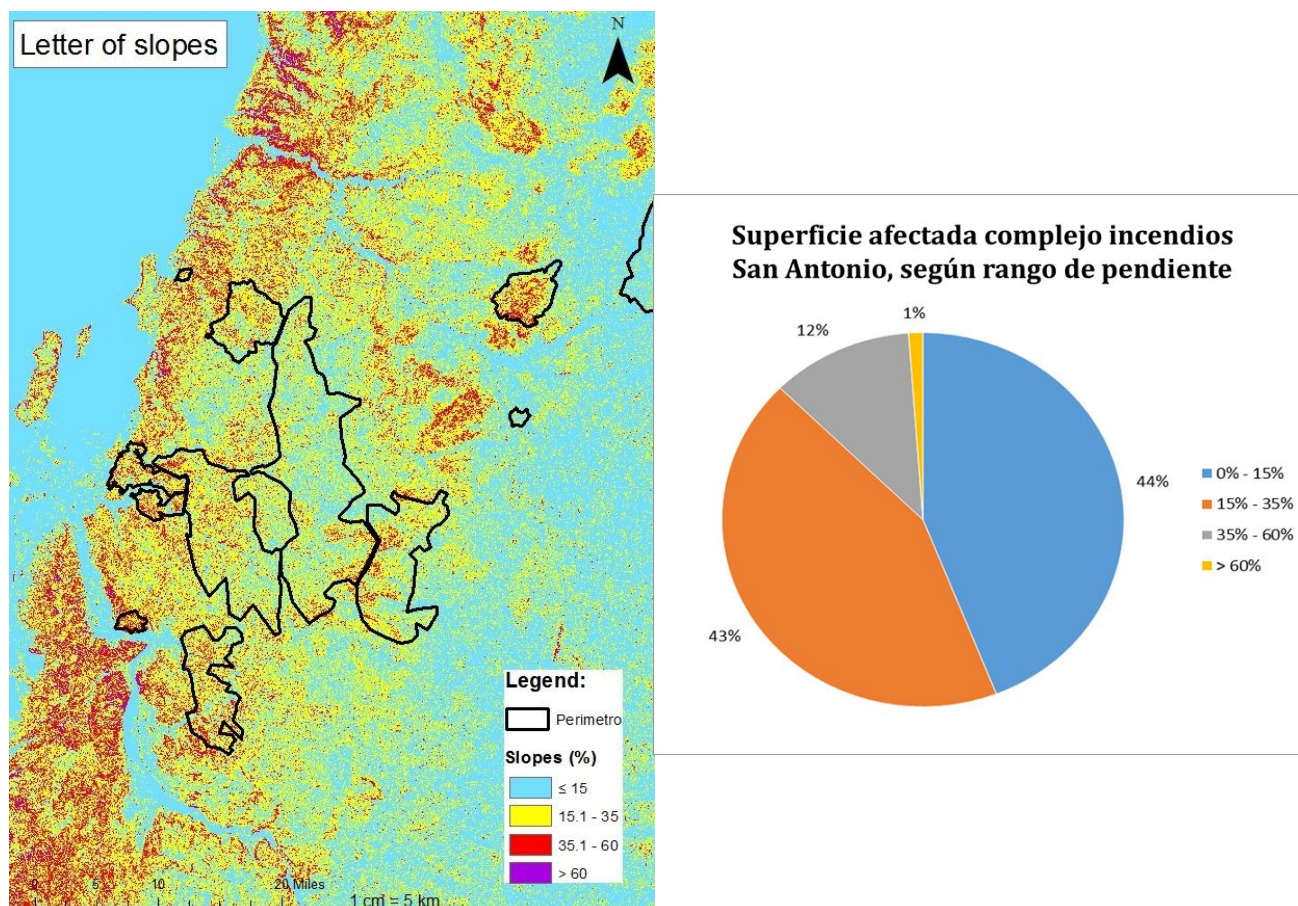
La estación de Chiguayante, que es la más próxima a los puntos de inicio de los incendios, registra entre los días 21 y 24 de enero humedades relativas mínimas entre el 30% y el 40%, sin alcanzar las temperaturas máximas los 30°C. En las horas centrales de los días 25 y 26, sin embargo, la humedad baja del 20% y la temperatura sube hasta casi 40°C. Esta circunstancia coincide además con un aumento de la velocidad del viento, que roza los 40 km/h.

El empeoramiento de las condiciones de humedad y temperatura los días 25 y 26 también es registrado por la estación de Punta Parra, que es la más próxima a la costa. En cuanto a la estación de Nueva Aldea, situada al interior y probablemente más representativa de las condiciones que se dieron durante el desarrollo de los incendios, la temperatura roza los 40°C el día 25 y los supera el 26, rondando la humedad relativa mínima el 10%. En ninguna de estas dos estaciones la velocidad del viento registrada llega a los 30 km/h.

### 2.2.3. Topografía

En la figura 2.21 se observa el mapa de pendientes de la zona afectada por el complejo de incendios, así como el porcentaje de superficie afectada en relación a dicho parámetro.





**Figura 2.21.** Mapa de pendientes del complejo de incendios de San Antonio. Porcentaje de superficie afectada en relación a la pendiente. Fuente: EUCP team a partir de modelo digital del terreno facilitado por CONAF.

Es destacable que el 87% del terreno afectado por el complejo de incendios tiene una pendiente inferior al 35%, estando la mitad de dicha superficie por debajo del 15%. No se contempla por tanto que la topografía tuviese una influencia decisiva en el avance del incendio.

#### 2.2.4. Combustible

En la figura 2.22 se muestra un mapa con la distribución de los modelos de combustible sobre los que se desarrolló el complejo de incendios, de acuerdo a la clasificación del sistema KITRAL, mientras que en la figura 2.23 se observa el porcentaje de superficie afectada en relación a este parámetro. En la tabla 2.2 se recogen las características teóricas de cada modelo.

Más del 55% del incendio se desarrolló sobre plantaciones, en torno a un 23% sobre matorral y alrededor de un 18% sobre pasto. La superficie de bosque nativo afectada estuvo por debajo del 2%.



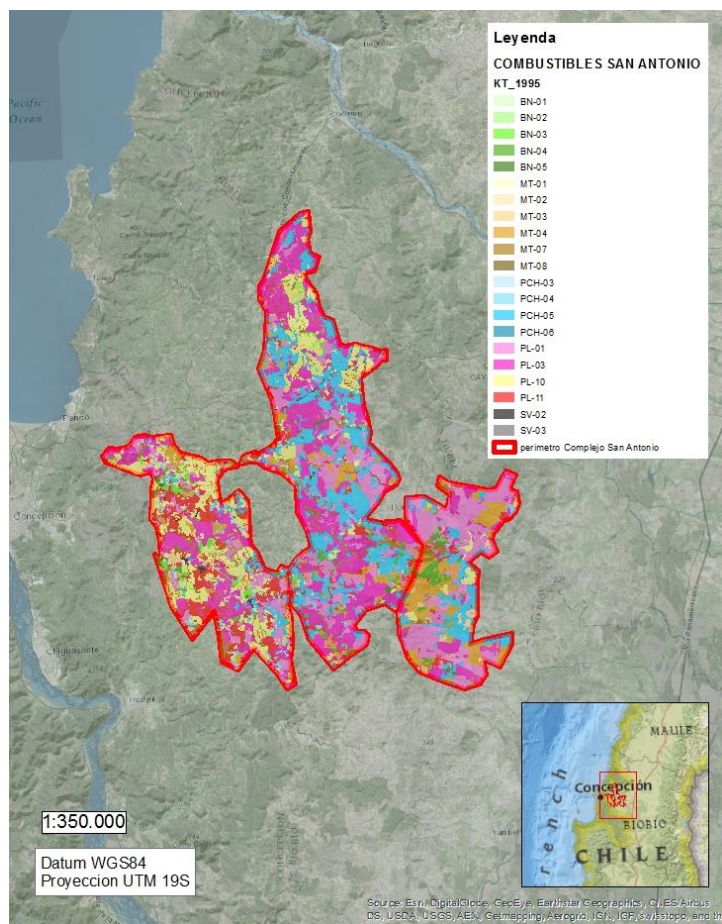


Figura 2.22. Mapa de modelos de combustible del complejo de incendios de San Antonio, según clasificación del sistema KITRAL. Fuente: EUCP Team a partir de cartografía facilitada por CONAF.

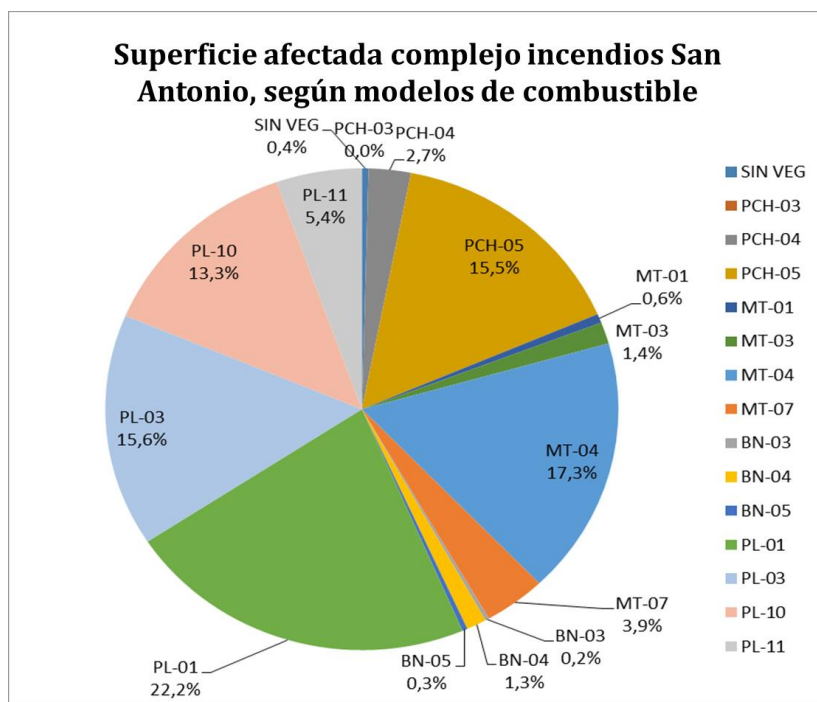


Figura 2.23. Porcentaje de superficie afectada en relación al modelo combustible, según la clasificación del sistema KITRAL. Fuente: EUCP Team.

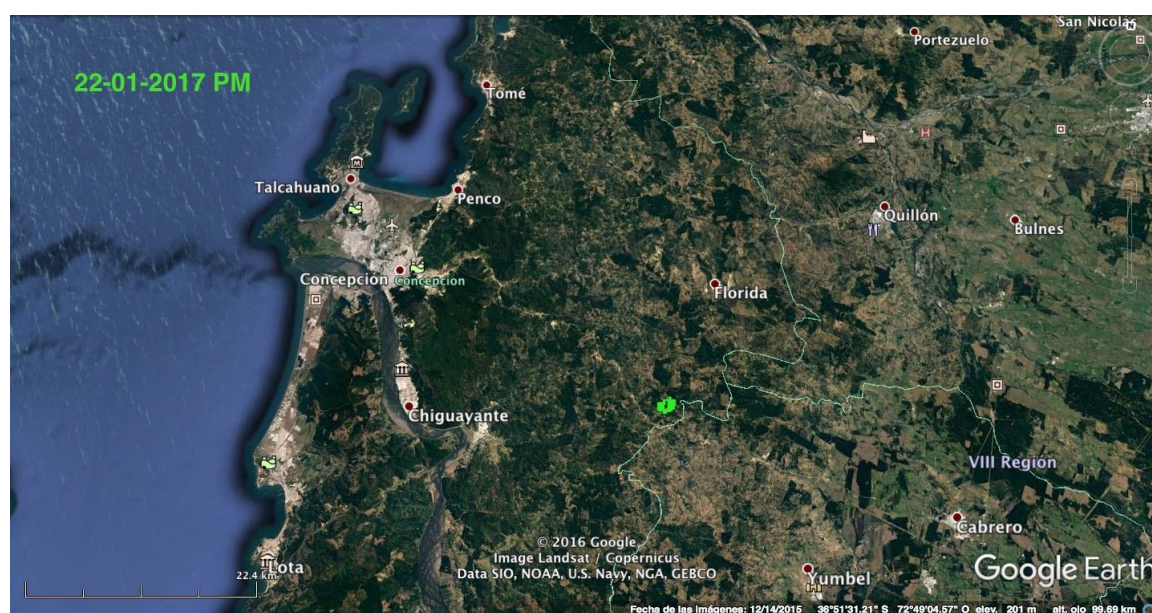


Modelo de combustible	Carga original (TON/ha)	Consumo normal (%)	Combustible disponible (Kg/m2)	Descripción modelos de combustible	Velocidad de propagación lineal (VPL) (m/s)
PCH 03	7,2	95	0,684	Pastos	0,010235
PCH 04	5.86	90	0.527		0.008690
PCH 05	10.81	60	0.649		0.001009
MT 01	41.76	70	2.923	Matorrales	0.007603
MT 03	47,25	70	3,308		0,001672
MT 04	21,28	65	1,383		0,004886
MT 07	45.56	70	3.189		0.001672
BN 03	50.63	70	3.544	Bosque nativo	0.000979
BN 04	33.29	65	2.164		0.001556
BN 05	32,57	60	1,954		0,002365
PL 01	8.82	95	0.838	Plantaciones	0.013174
PL 03	47.62	70	3.333		0.002481
PL 10	39.17	70	2.742		0.003799
PL 11	37.90	65	2.464		0.001325

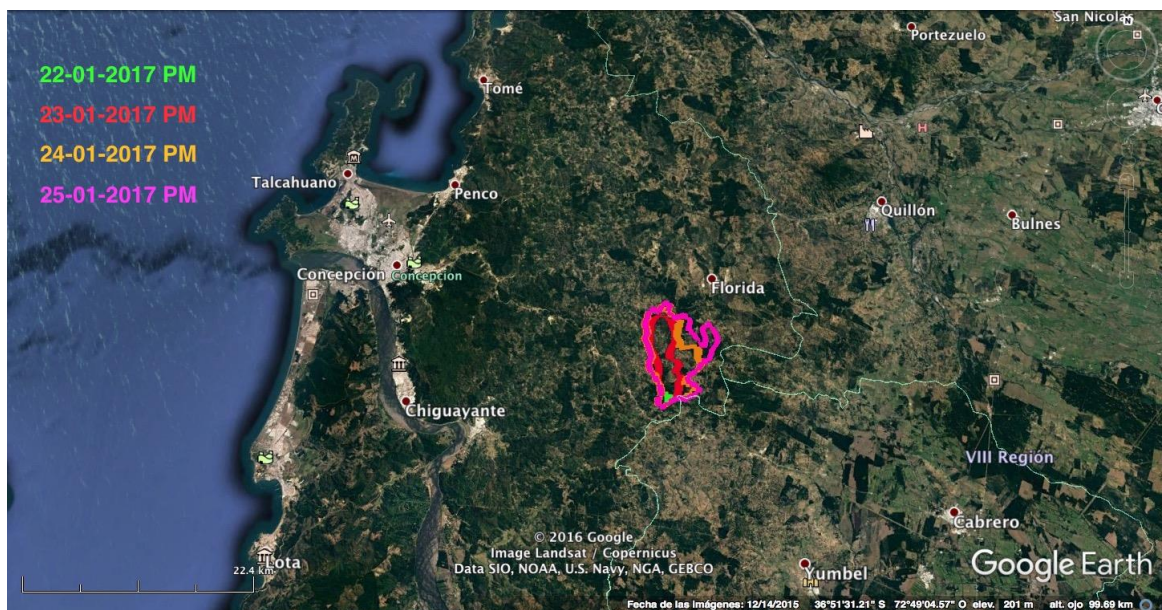
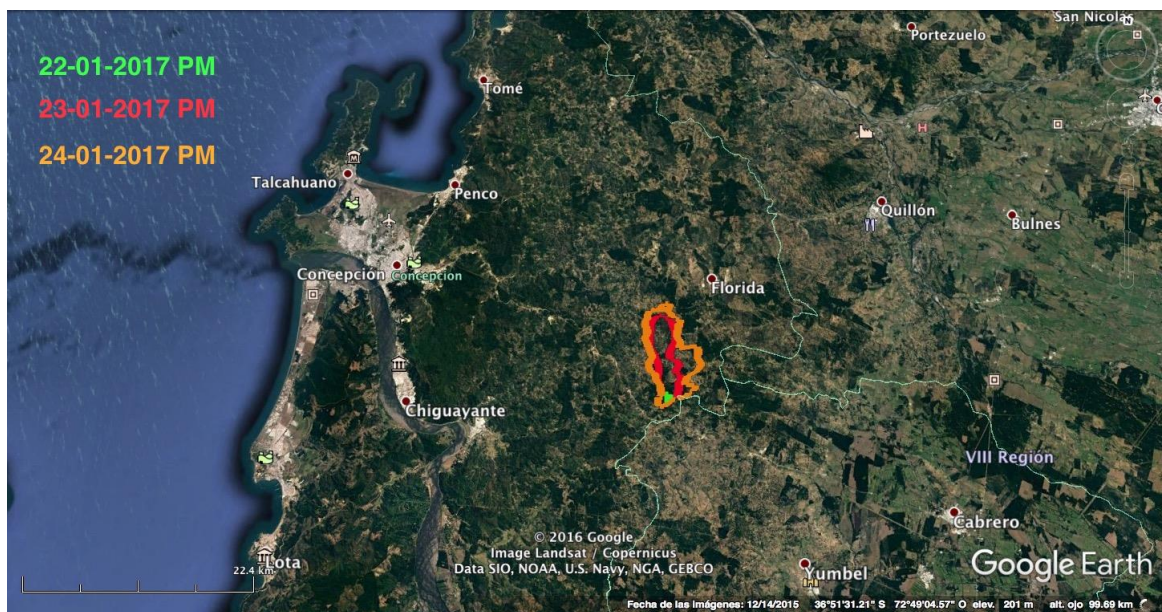
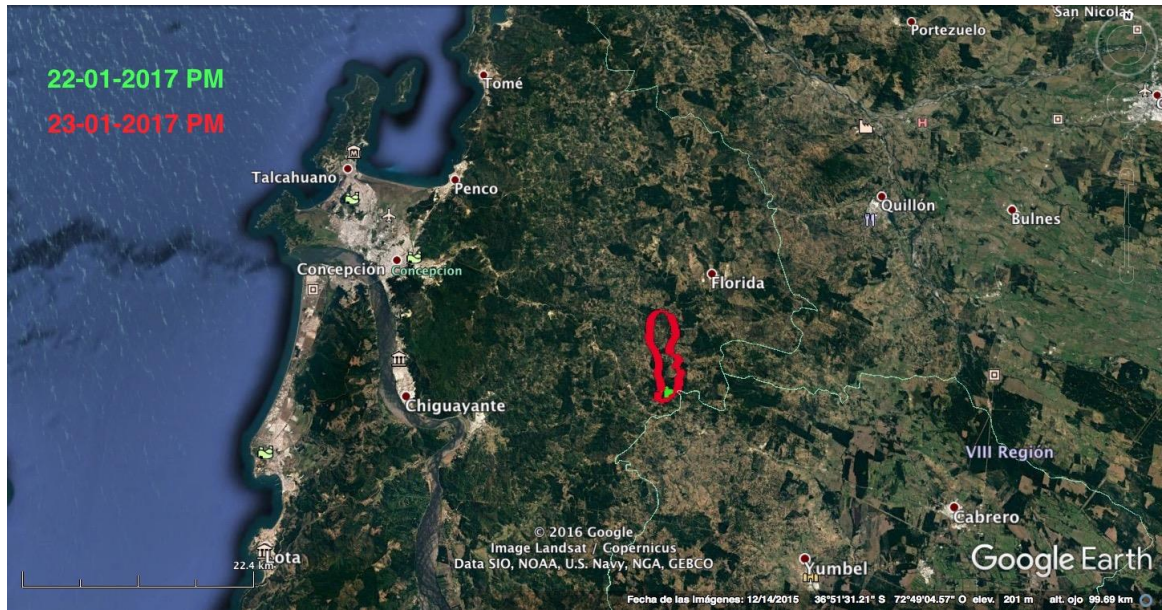
Tabla 2.2. Características teóricas de los modelos de combustible del sistema KITRAL sobre los que se propagó el incendio de Las Máquinas. Fuente: EUCP Team. Elaborado a partir de datos proporcionados por CONAF.

### 2.2.5. Desarrollo del complejo de incendios

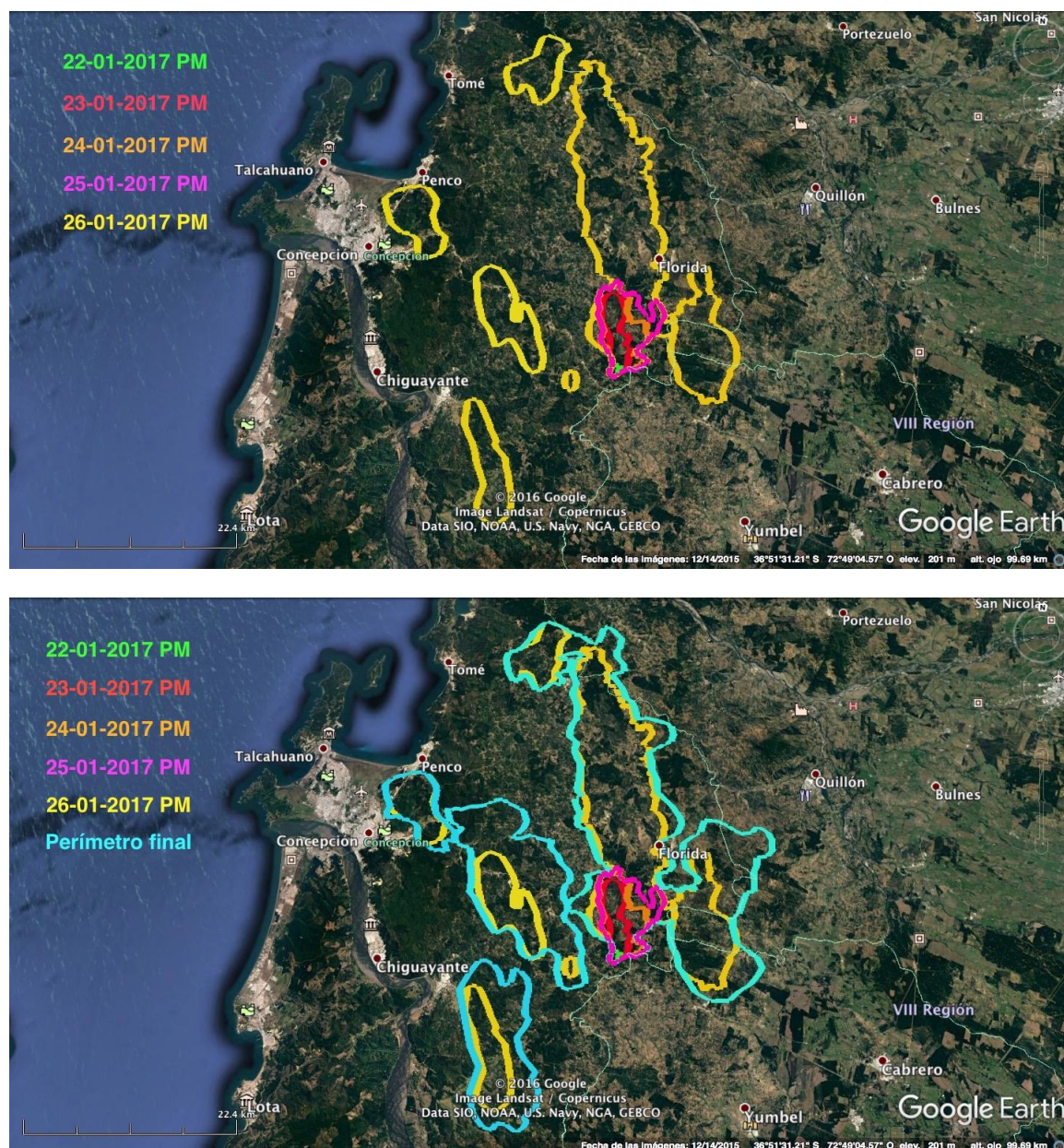
En la secuencia de imágenes recogida en la figura 2.24 se muestra el desarrollo del complejo de incendios de San Antonio desde el 22/01/2017 hasta el 26/01/2017, comparándolo finalmente con los perímetros definitivos.











**Figura 2.24.** Evolución de perímetros del complejo de incendios de San Antonio desde el 22/01/2017 al 26/01/2017. En la última imagen, perímetro final. Fuente: EUCP Team.

En el desarrollo del complejo de incendios de San Antonio pueden diferenciarse tres fases en función de cómo se comportó el fuego; una primera, desde su inicio hasta el 25 de enero por la mañana, en la que puede decirse que el comportamiento fue “predecible” o ajustable a las previsiones; una segunda fase, entre el 25 por la tarde y el 26 por la noche, en la que el comportamiento pasó a ser extremo y escapó de cualquier posibilidad de control; y una tercera, a partir del 27 de enero, en la que las condiciones pasaron a ser más favorables y el comportamiento se atenuó. La secuencia de imágenes mostrada previamente en la figura 2.24 da una idea de este desarrollo.



### **Primera fase**

El incendio de San Antonio se inició el 21 de enero de 2017 en una zona de plantación con topografía ondulada (ver figura 2.25). El viento general de componente SE, con velocidad en torno a 20 km/h, fue el principal vector de propagación hasta el 25 de enero por la tarde, si bien durante estos días existió una franja horaria (aproximadamente de 15:00 h a 18:00h) en la que un viento local de componente SO pasó a dominar al viento general. Probablemente se trató de un viento de costa, acentuado por el levantamiento de aire que la insolación de la cordillera de Los Andes genera en las horas centrales del día y el consiguiente efecto de succión sobre la zona de los incendios. Esto generó aperturas del flanco derecho que condicionaron el avance del incendio y pusieron en riesgo a la localidad de Florida.

Esta influencia del viento local de componente SO también se observó en los primeros días del incendio de Las Máquinas, afectando a la evolución de su flanco derecho, tal y como se puede comprobar en la secuencia de imágenes de la figura 2.11.

Por otro lado, la alta disponibilidad del combustible y las condiciones de temperatura y humedad, unidas a la presencia de zonas de pasto y de restos de cortas a hecho de las plantaciones (con grandes acumulaciones de combustible fino muerto) facilitaron el avance del frente por pavesas. El 25 de enero por la mañana el incendio alcanzaba unas 4.100 ha y no había superado aún la carretera que une Florida con Concepción.



**Figura 2.25.** En primer plano, zona de inicio del incendio de San Antonio. Al fondo se observa zona de corta con acumulación de restos finos. Fuente: EUCP Team.

### **Segunda fase**

El 25 de enero por la tarde el comportamiento del incendio cambia, pasando a ser mucho más virulento. Salta la carretera de Florida a Concepción y avanza de forma totalmente descontrolada hacia el N-NO. A las 18:38 h se detecta otro incendio al SE; es el de



Tomeco. El 26 de enero por la tarde un nuevo incendio se inicia en Caserío Chaimávida, al O del de San Antonio.

Entre la tarde-noche del día 25 y la tarde del 26 el complejo de incendios alcanza un crecimiento de hasta 2.700 ha/h. Si bien las estaciones meteorológicas cercanas no registran vientos de más de 40 km/h, los testimonios sobre el terreno hablan de vientos de 80-100 km/h. Los efectos sobre los árboles en algunas zonas corroboran esta posibilidad (ver figura 2.26).



**Figura 2.26** Carrera principal del incendio de San Antonio, una vez supera la carretera Florida-Concepción. Se observan efectos sobre el arbolado. Fuente: EUCP Team.

Tal y como se indicó en el punto relativo al desarrollo del incendio de Las Máquinas, se contempla la hipótesis de que la acumulación de varios factores adversos (estrés de la vegetación por la sequía acumulada, meteorología extrema, simultaneidad y magnitud de incendios en las regiones de Maule y Biobío), unida a la ruptura brusca de la estabilidad atmosférica entre los días 25 y 26 (tras varios días de bloqueo anticiclónico sostenido) explicaría este comportamiento. Este análisis se desarrolla en el punto 3.

### **Tercera fase**

A partir del 27 de enero mejoran las condiciones y remite el comportamiento extremo del complejo de incendios de San Antonio.





### **3. Análisis del episodio de incendios**

#### **3.1. El escenario precursor.**

##### **3.1.1. Factores geomorfológicos**

Los incendios tienen lugar en el ámbito territorial de la zona centro de la cordillera de la Costa chilena. Se trata de una cordillera de relieve suave y de altitud que pocas veces llega a superar los 1.000 m que contrasta con la imponente cordillera andina, separadas ambas por el valle Central. La geomorfología de los incendios estudiados nos muestra una orografía general suave (figuras 2.7, 2.8 y 2.21) aunque debido a las grandes extensiones áridas, siempre aparecen zonas con barrancos o con elevaciones más pronunciadas.

Un análisis rápido de orientaciones y pendientes nos muestra un territorio dominado por pendientes suaves de 15 a 35%, con ejes de orientaciones oscilando en la diagonal NW/SE. Este tipo de paisaje no es especialmente perjudicial para incendios que se desarrollan con niveles de radiación normales, sin embargo, favorece el crecimiento de los incendios convectivos al crear una ventana de actividad intensa desde primera hora de la mañana (calentamiento E y SE) hasta las últimas horas de la tarde (Calentamiento W y NW). Este aspecto es crítico para mantener actividad de fuego de copas y generar grandes 'ambientes de fuego'. Coincide este hecho con las observaciones geomorfológicas de episodios anteriores como los ocurridos en las zonas del litoral mediterráneo y atlántico europeo, donde las zonas de baja rugosidad presentan los incendios más grandes en los episodios significativos de las campañas de incendios como las de los años 1994, 1998, 2003, 2005, 2009, 2012 y 2016.

Por tanto, el factor geomorfológico es determinante para el comportamiento del fuego en este tipo de incendios. Los efectos principales de un relieve poco rugoso son la capacidad de mantener la propagación en base a focos secundarios, favorecer el fuego de copas sostenido y, especialmente, la facilidad para mantener desde primera hora de la mañana las condiciones de ambiente de fuego convectivo que estos incendios necesitan para poder evolucionar y mantener intensidades de propagación superiores a los 15.000 kW/m. Básicamente, con vientos ligeros del S y SW y atmósferas secas y estables se favorece la concentración de calor para la transición de fuego de radiación a fuego convectivo. Por el contrario, este proceso se dificulta con vientos generales que disipan la energía o con geomorfología con diferente orientación que llenarían la zona de contravientos. Incluso con un relieve más abrupto se generaría una intermitencia entre zonas muy favorables a la propagación y otras muy desfavorables que disminuirían la capacidad energética del incendio.

En la tabla 3.1 se resumen los efectos de los factores geomorfológicos.



<i>Factor</i>	<i>Impacto sobre comportamiento del fuego</i>
<i>Rugosidad del terreno</i>	<p><b>Un valor bajo favorece la propagación sostenida de incendios de frente amplio.</b> Un incendio pequeño depende de la pendiente donde se desarrolla, pero un incendio de frente amplio siempre tendrá partes subiendo ladera y generando convección por mucho que tenga partes en descenso. En rugosidades mayores el incendio puede propagar muy intensamente cuando está en ascenso pero va a perder fuerza si su frente está totalmente en descendente o en zonas llanas.</p> <p><b>Un valor bajo favorece el crecimiento por focos secundarios.</b> Los incendios convectivos basan su crecimiento rápido e intenso en la extensión e interacción de los focos secundarios con el frente principal. Rugosidades de valles pequeños facilitan que los focos secundarios siempre encuentren laderas ascendentes donde ganan intensidad y tiran de la cabeza del incendio.</p>
<i>Orientación NW</i>	<p><b>Facilita la entrada de viento</b> del flujo dominante de aire cuando las altas presiones dominan frente al litoral Chileno. El viento vendrá de S a SW, creará empuje ascendente y con crecimiento hacia el interior en las zonas del paisaje donde se encuentre con estas laderas.</p>
<i>Orientación S + E</i>	<p><b>Facilita al incendio mantenerse en plena alineación</b> con la radiación solar incidiendo desde primera hora del día. De esta forma se garantiza un ambiente de fuego desde la mañana hasta el final del día, cuando lo normal sería una ventana convectiva solo de 4 a 5 horas durante la tarde.</p>

**Tabla 3.1.** Impacto de los factores geomorfológicos en las condiciones de incendios convectivos durante el episodio de incendios de enero 2017 en Chile. Fuente: EUCP Team.

### 3.1.2. Combustibles-meteorología

La vegetación y su estado es siempre el otro gran factor estructural en grandes incendios forestales. El paisaje en las regiones donde se han dado los grandes incendios corresponde a un mosaico de plantaciones, bosque nativo y matorrales adheridos por el pastoreo. La proporción de los mismos es variable pero oscila entre 60 % de plantaciones y un mosaico nativo de arbolado frondoso de hoja ancha y esclerófila o matorral con mosaico de pastos adheridos.

Para el caso de los combustibles en los incendios estudiados se pueden describir en base a los modelos de combustible propios de Chile, el sistema KINTRAL (JULIO, 1987) que establece 6 grandes grupos de modelos:

- Grupo I: Praderas y agrícolas, 5 modelos



- Grupo II: Matorrales, 8 modelos
- Grupo III: Bosque Nativo, 5 modelos
- Grupo IV: Plantaciones, 11 modelos
- Grupo V: Desechos explotación forestal, 2 modelos
- Grupo VI: Sin vegetación, 3 modelos

Sus características se pueden ver resumidas en la tabla 3.2 y en la figura 3.1.

MODELO DE COMBUSTIBLE	CARGA ORIGINAL (TON/ha)	CONSUMO NORMAL (%)	COMBUSTIBLE DISPONIBLE (Kg/m2)
PCH1	9,66	95	0,918
PCH2	6,49	95	0,617
PCH3	7,20	95	0,684
PCH4	5,86	90	0,527
PCH5	10,81	60	0,649
MT01	41,76	70	2,923
MT02	27,29	70	1,910
MT03	47,25	70	3,308
MT04	21,28	65	1,383
MT05	35,63	85	3,029
MT06	41,52	85	3,529
MT07	45,56	70	3,189
MT08	29,27	65	1,903
BN01	37,49	70	2,624
BN02	35,54	65	2,310
BN03	50,63	70	3,544
BN04	33,29	65	2,164
BN05	32,57	60	1,954
PL01	8,82	95	0,838
PL02	40,26	75	3,019
PL03	47,62	70	3,333
PL04	49,98	65	3,249
PL05	51,09	80	4,087
PL06	53,06	70	3,714
PL07	62,51	65	4,063
PL08	10,06	90	0,905
PL09	42,19	75	3,164
PL10	39,17	70	2,742
PL11	37,90	65	2,464
DX01	110,00	75	8,250
DX02	95,00	75	7,125

**Tabla 3.2.** Resumen de las cargas de combustible total y disponible en los modelos de combustible Chilenos. Fuente: JULIO, 1987.



- MT04.** Matorrales y Arbustos Nativos Higromórficos, de Densidad Media a Rala (separación entre especímenes). Comprende formaciones compuestas por las siguientes especies principales: Ñirre y Lengua.
- MT05.** Formaciones con presencia predominante de Quila y Colihue (*Chusquea* sp.).
- MT06.** Formaciones con presencia predominante de Ulex, Aliaga Marina o Espino (*Ulex* spp.).
- MT07.** Renovales Nativos correspondientes a formaciones diferentes al Tipo Forestal Siempreverde.
- MT08.** Renovales Nativos correspondiente a formaciones del Tipo Forestal Siempreverde.

GRUPO III

**ARBOLADO NATIVO.** Incluye 5 Modelos de Combustibles:

- BN01.** Alerzales. Formaciones con predominancia de la especie Alerce (*Fitzroya cupressoides*).
- BN02.** Araucaria. Formaciones con predominancia de la especie Araucaria (*Araucaria araucana*).
- BN03.** Arbolado Nativo Denso (contacto entre los especímenes). Comprende formaciones tales como: Roble-Raulí-Coihue, Siempreverde, Roble Hualo, Lengua, Coihue-Lengua, Coihue-Raulí-Tepa y Alerce-Coihue-Tineo.
- BN04.** Arbolado Nativo de Densidad Media (separación entre especímenes hasta de 5 metros). Comprende formaciones tales como: Roble-Raulí-Coihue, Coihue-Raulí-Tepa, Siempreverde, Lengua y Coihue-Lengua.
- BN05.** Arbolado Nativo Ralo (separación entre especímenes superior a 5 metros). Comprende formaciones tales como: Lengua, Coihue-Raulí-Tepa, Siempreverde y Alerce-Canelo-Coihue.

GRUPO IV

**PLANTACIONES FORESTALES.** Incluye 12 Modelos de Combustibles.

- PL01.** Plantaciones Nuevas de Coníferas (0 a 3 años), sin manejo.
- PL02.** Plantaciones Jóvenes de Coníferas (4 a 11 años), sin manejo.
- PL03.** Plantaciones Adultas de Coníferas (12 a 17 años), sin manejo.
- PL04.** Plantaciones Mayores de Coníferas (sobre 17 años), sin manejo.
- PL05.** Plantaciones Jóvenes de Coníferas (4 a 11 años), con manejo.
- PL06.** Plantaciones Adultas de Coníferas (12 a 17 años), con manejo.
- PL07.** Plantaciones Mayores de Coníferas (sobre 17 años), con manejo.
- PL08.** Plantaciones Nuevas de Eucaliptus spp (0 a 3 años).
- PL09.** Plantaciones Jóvenes de Eucaliptus spp (4 a 10 años).
- PL10.** Plantaciones Adultas de Eucaliptus spp. (sobre 10 años).
- PL11.** Plantaciones de Latifoliadas y Mixtas con predominancia de especies Latifoliadas. Comprende formaciones arbóreas de especies como *Populus* spp. Latifoliadas Nativas y Latifoliadas con Coníferas.

**Figura 3.1.** Modelos de Combustible del sistema KITRAL en Chile representativos para la zona de los grandes incendios de enero 2017. Fuente: JULIO, 1987.



La importancia de las plantaciones destaca como una parte básica del paisaje afectado por los incendios, a la vez que es base de la economía de las comunidades locales y del país (figuras 3.2 y 3.3). Estas plantaciones forman un mosaico de grandes manchas con la vegetación nativa, las zonas de pastoreo y las explotaciones agrícolas. Su régimen de explotación está basado en turnos que oscilan entre 17 y 25 años, lo cual configura siempre una estructura forestal densa y joven.

Si nos fijamos en las cargas de combustible que componen estos tipos de vegetación, podemos observar que tanto las plantaciones como los matorrales nativos presentan cargas de combustible de alrededor de las 40-50 Tn/ha. La diferencia entre ambas estructuras radica en su capacidad de facilitar el fuego de copas. Básicamente las estructuras nativas de las regiones del Maule y del Biobío propagan de superficie. Su alta carga permite que puedan propagar en alta intensidad, más si cabe que las plantaciones, pero su estructura irregular permite mantener el fuego de copas en estado pasivo (antorcheo). Por otro lado, las plantaciones pueden presentar fuegos de copas en condiciones extremas, aunque bajo las condiciones meteorológicas normales presentan comportamientos de fuego en superficie con algún antorcheo en plena alineación.

Es reseñable que estudios en plantaciones de *Pinus radiata* en Galicia (España) destacan que estos rodales tienen su máximo potencial de fuego de copas alrededor de los 20 años, reduciendo su potencial en su estadio adulto, a partir de esa edad (RUÍZ-GONZÁLEZ Y ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2011). Por tanto, el modelo de producción favorece la transición al fuego de copas, cuando las condiciones meteorológicas extremas están presentes.



**Figura 3.2.** Imagen de plantaciones jóvenes. El turno de las mismas oscila entre 17-25 años. Fuente: EUCP Team.





Año	Total	Pino Radiata	Eucalipto	Atriplex	Tamarugo/ Algarrobo	Pino Oregón	Alamo	Nothofagus sp	Otras especies
1990	1.460.530	1.243.293	101.700	37.878	23.801	11.343	3.526	-	38.989
1991	1.555.255	1.305.325	130.915	40.663	23.801	11.731	3.660	-	39.160
1992	1.609.295	1.312.812	171.520	46.003	23.801	12.135	3.718	-	39.306
1993	1.694.104	1.360.918	206.711	45.193	23.814	12.090	3.798	-	41.580
1994	1.747.523	1.375.886	238.312	47.232	23.860	12.379	3.798	-	46.056
1995	1.818.185	1.379.746	302.248	48.274	23.862	12.477	3.842	-	47.736
1996	1.835.985	1.387.041	308.762	49.316	23.880	12.477	4.055	-	50.454
1997	1.881.925	1.420.015	317.212	49.320	23.950	12.620	4.115	-	54.693
1998	1.914.846	1.437.520	330.952	49.324	24.057	13.225	4.287	-	55.481
1999	1.952.288	1.458.320	342.415	50.787	24.113	13.942	4.298	-	58.413
2000	1.989.101	1.474.773	358.616	52.894	24.165	14.286	4.151	-	60.216
2001	2.037.403	1.497.340	376.786	53.682	24.263	14.184	4.077	-	67.071
2002	1.997.580	1.436.586	408.630	56.196	24.422	15.212	4.107	741	51.686
2003	2.046.430	1.446.414	436.706	57.615	24.539	15.627	5.084	934	59.511
2004	2.078.647	1.408.430	489.603	58.501	25.254	16.459	6.008	1.176	73.216
2005	2.135.323	1.424.569	525.057	58.512	25.999	16.769	5.983	-	78.434
2006	2.201.585	1.438.383	585.078	61.781	26.415	17.054	6.173	-	66.701
2007	2.299.334	1.461.212	638.911	58.851	25.799	16.075	6.395	-	92.091
2008	2.300.090	1.457.224	661.388	59.093	25.878	16.676	6.278	-	73.553
2009	2.277.896	1.478.369	667.796	59.264	-	-	-	-	72.467
2011	2.349.250	1.480.803	740.360	60.240	-	-	-	-	67.847
2012	2.414.389	1.470.665	773.997	60.814	-	-	-	-	64.863
2013	2.447.592	1.469.718	810.539	60.772	-	-	-	-	62.566

Figura 3.3. Las plantaciones de *Pinus radiata* en Chile suponen casi 1,5 millones de ha. Este pino es la especie dominante en las plantaciones seguido a distancia por el eucalipto. Fuente: CONAF.

En condiciones meteorológicas normales, las plantaciones son modelos de combustible ligeros dada su escasa carga de combustible en superficie y presentan velocidades de propagación reducidas. Son estructuras que en incendios de superficie no presentan un reto para la capacidad de un sistema de extinción bien organizado como el que presentan CONAF y ONEMI (Ministerio de Interior y Seguridad Pública) en Chile. Incluso bajo estas condiciones propagan el incendio con menos intensidad y velocidad que los modelos de matorral nativos. Como podemos ver en la tabla 3.3, la velocidad de propagación en matorrales y plantaciones es equivalente en estas condiciones normales.

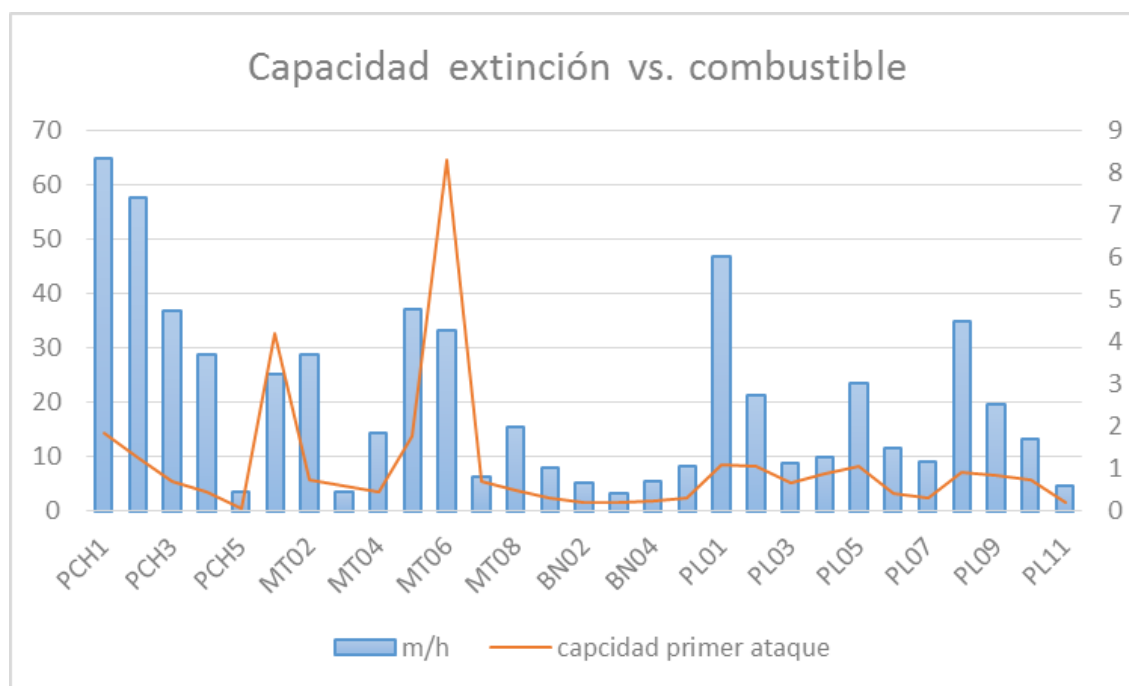
Es importante destacar que el índice de capacidad de extinción se dispara en los matorrales debido a su estructura. A diferencia de las plantaciones que concentran su combustible en copas, los matorrales presentan la mayor carga en el estrato superficial, creando condiciones difíciles para el trabajo y propagando, cuando están disponibles, incendios mucho más intensos que los fuegos de superficie de las plantaciones. Un análisis resumido de las condiciones de propagación de los modelos de combustible en la zona (tabla 3.3) nos arroja la conclusión de que tanto un modelo como otro favorecen los incendios de superficie en situaciones normales pero que en caso de sequía extrema transforman el paisaje en un manto de capacidad extrema de propagación. En otras palabras, el mosaico plantaciones-bosque nativo es un paisaje que en condiciones normales no favorece propagación sostenida de gran incendio, al presentar diversidad de estratos de propagación, pero en caso de sequía extrema la diversidad desaparece, sumándose la velocidad superficial del matorral y el bosque nativo con la velocidad e intensidad del fuego de copas de las plantaciones.



	Condiciones <b>SIN</b> sequía	Condiciones <b>CON</b> sequía
<b>Matorral &amp; incendio diurno</b>	Nativo y bien adaptado a los ciclos climáticos del lugar. Quema de cabeza con intensidad pero mantiene flanco y colas en media-baja intensidad.	El incendio genera focos secundarios en la cabeza y propaga en alta intensidad de flancos y colas. Es un factor de aceleración y ensanchamiento de los incendios.
<b>Matorral &amp; incendio nocturno</b>	Incendios que detectan muy rápido la mejora de condiciones meteorológicas nocturnas al basar su carga en fino. Propagan de baja intensidad y se auto extinguen.	Propaga a media intensidad de noche al basar su carga ya en material fino y seco (1 y 10 H). No se auto extinguen y siguen ensanchando fuegos de noche.
<b>Plantaciones &amp; incendio diurno</b>	Mantienen el fuego en superficie, compuesto por combustible de hojarasca que quema en baja-media intensidad. Pueden ser rápidos.	Fuego de antorcheo o copas que genera incendios convectivos fuera de capacidad de extinción. Crecimiento por saltos de fuego.
<b>Plantaciones &amp; incendio nocturno</b>	Dentro de capacidad de extinción y con poca capacidad de superar la noche.	Incendios de superficie que propagan durante la noche y pueden mantener antorcheos.  Con viento también propagan de copas.

**Tabla 3.3.** Comparativa del comportamiento del fuego en matorrales y plantaciones, durante el día y durante la noche y en condiciones de sequía o sin ella. Fuente: EUCP Team.

Como puede observarse en la figura 3.4, las velocidades estimadas estandarizadas de propagación, siempre en condiciones de radiación, de los diferentes tipos de vegetación se sitúan a niveles bajos, totalmente asequibles por el sistema de extinción. Los índices de capacidad de extinción son siempre cercanos a 1, a excepción de dos modelos de matorrales que claramente escapan a la capacidad del primer ataque. Estos datos son calculados con situaciones estandarizadas sin sequía y de fuego de superficie.



**Figura 3.4.** Valores básicos de propagación (m/h), según modelos de combustible estandarizados y considerando fuego de radiación en superficie. Valores de capacidad de primer ataque según ratio: (metros crecimiento fuego)/(metros trabajo brigadista). Valores cercanos a 1 o inferiores implican capacidad de extinción. Valores por encima de 1 indican fuera de capacidad de extinción. Fuente: EUCP Team.

En los últimos años, tal y como se aprecia en la figura 1.2, se han venido dando comportamientos más extremos que han dado lugar a mayores superficies anuales afectadas por los incendios, probablemente debido a la existencia de una mayor carga de combustible compuesto de vegetación muerta disponible. Este hecho, en gran parte causado por la sequía, se puso de manifiesto en la campaña 2014-2015, batiendo el record de superficie quemada hasta ese momento. La del 2016-2017 ha vuelto a batirlo con solo el primer mes de verano.

Hay que destacar también una alta correlación entre la duración de los años de sequía y el tamaño final de los grandes incendios que se vienen dando. Esta sequía es la más larga de la historia de Chile (VICENCIO, 2017), aunque no tan severa como anteriores más cortas en 1924, 1968 y 2007. Son precisamente estas sequías las que añaden disponibilidad de combustible a los modelos y favorecen la disponibilidad de copas a nivel de rodal. Este efecto, observado en la sequía de 3 años del SE de Europa en 2012 o en la del SW de dicho continente en 2007, está en la base de todos los recientes eventos de grandes incendios a escala global. De hecho, la sequía provoca la disponibilidad para quemar de la vegetación viva desde un principio, al situarse su nivel de contenido hídrico muy por debajo de su estado habitual. Es decir, la vegetación está sometida a un estrés hídrico severo que facilita la combustión.

Si consideramos un estudio de la facilidad de subida de fuego a copas en plantaciones de *Pinus radita* en Galicia (España) (RUÍZ-GONZÁLEZ Y ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2011), se indica el alto potencial de subida a copas que tienen estas plantaciones de pinos en estado adulto hasta la edad de 20 años. Por tanto los modelos PL3 y PL7 son los más vulnerables de sufrir el paso de fuego de superficie a fuego de copas.

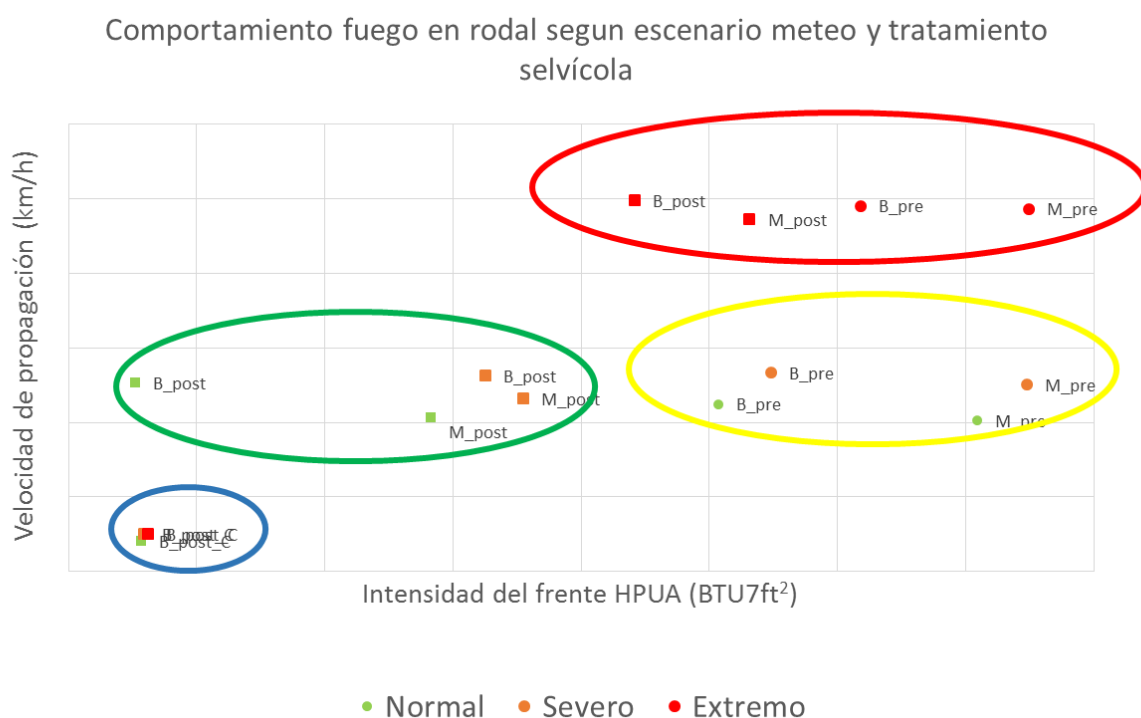


Un análisis más detallados de los modelos PL3 y PL7 nos arroja una clara visión de cómo con condiciones desfavorables, la misma vegetación pasa de quemar en superficie a quemar de copas (DOMENECH et al, 2017). En el citado estudio, se realiza un ejercicio de simulación en base a modelos de copas. Se analizan dos rodales de pinar (B y M en el gráfico) en diferentes escenarios meteorológicos:

- Escenario normal o que se dan el 50% de días de riesgo,
- Escenario severo o solo el 20% de días de riesgo y
- Escenario extremo o solo el 5% de los días de riesgo

Con ello, pretendemos parametrizar su comportamiento considerando la velocidad de propagación y tipología de fuego de copas que pueden mostrar en función de su carga de combustible según tres tipos de actuaciones sobre la masa:

- pre (combustible sin reducir),
- post (combustible tratado mecánicamente) y
- C (combustible quemado en quema precrita bajo arbolado).



**Figura 3.5.** Proporción de relación entre la Velocidad de propagación (ROS, km/h) y calor liberado (HPUA, BT/ft<sup>2</sup>) para los diferentes escenarios y tratamientos (DOMENECH et al, 2017).

Podemos observar (figura 3.5) como en función del escenario meteorológico (normal, severo o extremo) el comportamiento de incendio agrupa las parcelas por zonas:

- ✓ Indistintamente de tratamiento, los escenarios extremos son los más rápidos y están claramente separados del resto de escenarios (círculo rojo).



- ✓ La diferencia entre extremo y severo no está en la velocidad pero sí en la intensidad (círculo amarillo versus círculo rojo).
- ✓ La diferencia entre escenarios normales y severos sin tratamiento es poco significativa (círculo amarillo).
- ✓ Con tratamiento sí que los escenarios normales están en zona de escasa severidad de fuego (círculo verde).
- ✓ Los escenarios gestionados con quemas coinciden todos en poca capacidad de propagación (círculo azul).

Podemos concluir que en base al análisis hecho, las situaciones de escenarios normales o severos se parecen y mantienen unos rangos similares de velocidad, diferenciándose más por la intensidad. Es importante observar que en ellos la inversión en tratamientos selvícolas es eficiente. Si bien los escenarios severos aportan más velocidad al fuego es con la intensidad donde se diferencian con claridad. Esto entra en el rango de lo esperable debido a que a peor meteorología más carga de combustible disponible y por tanto, si no superamos límites de salto a fuego de copas activo, aumentaremos con ello más bien intensidad que velocidad.

Es el caso del escenario extremo en el que nos tenemos que fijar, pues define las condiciones de enero de 2017, se da un salto en velocidad tanto en las zonas tratadas como no tratadas silvícolamente. Esto define un incendio rápido e intenso y prácticamente independiente de la gestión. Para estos incendios, mientras se mantengan las condiciones extremas de meteorología, el paisaje se comporta como si fuera continuo y por lo tanto mantienen la capacidad de propagación extrema.

Este análisis viene a confirmar el hecho que el salto a escenario extremo de este enero 2017 en Chile ha superado con creces, a nivel de comportamiento de fuego, el salto que venía dándose en años anteriores más acordes a escenarios normales o severos meteorológicamente hablando. La carga de combustible bajo estas condiciones meteorológicas excepcionales da un salto a un nuevo tipo de incendio fuera del alcance del sistema de extinción, durante el día y durante la noche. La causa hay que buscarla en la alineación de todos los factores que se explican a lo largo de este punto.

Cabe observar, a modo anecdótico para la discusión que nos ocupa, que las parcelas quemadas en superficie se agrupan en un comportamiento muy bajo y sin distinción de escenario meteorológico. Esto se explica por la imposibilidad de mantener antorcheos o fuegos pasivos en estas parcelas y con lo que tenemos comportamientos dentro de capacidad de extinción.

La implicación de los fuegos de copas cuando el combustible en ellas esta plenamente disponible supera los escenarios acostumbrados, incluso los peores (que hasta el momento eran los severos), situando el comportamiento del fuego en otro nivel, como se observa en el gráfico 3.5 en los datos del círculo rojo.

Este fenómeno se viene conociendo como el de paisaje de incendio binario:

- El incendio propaga dentro de parámetros conocidos y previsibles, por muy intenso o rápido que pueda ser. Tenemos incendios grandes en estas condiciones,





pero su rango de intensidad y velocidad son conocidos y planificamos estrategias en consonancia.

- El incendio propaga sorpresivamente y por espacios de tiempo definidos con intensidades y velocidades fuera del rango acostumbrado. Deja el sistema fuera de capacidad, incluso de previsión.

En estos casos la transición no es gradual, el comportamiento del fuego da un salto. Esto parece ser lo sucedido durante los días de enero. Para comprobarlo se ha simulado los mismos escenarios de combustible con la variabilidad del viento. Se pretende buscar el punto de salto de unas condiciones conocidas a unas condiciones 'insostenibles' para el sistema extinción.

Para hacer la simulación, se ha usado NEXUS (SCOTT and REINHARD, 2001), donde podemos comparar las implicaciones entre un escenario severo y un extremo en parcelas con tratamiento de poda y una que no. Comparamos en el gráfico las variables:

- *SPRT final*: velocidad del incendio final (superficie + copas)
- *SPRT Surface*: velocidad del fuego en superficie
- *Torching index*: velocidad viento a la que empieza el incendio a antorchar las copas
- *Crowning Index*: velocidad del viento a la que el incendio se sustenta en copas

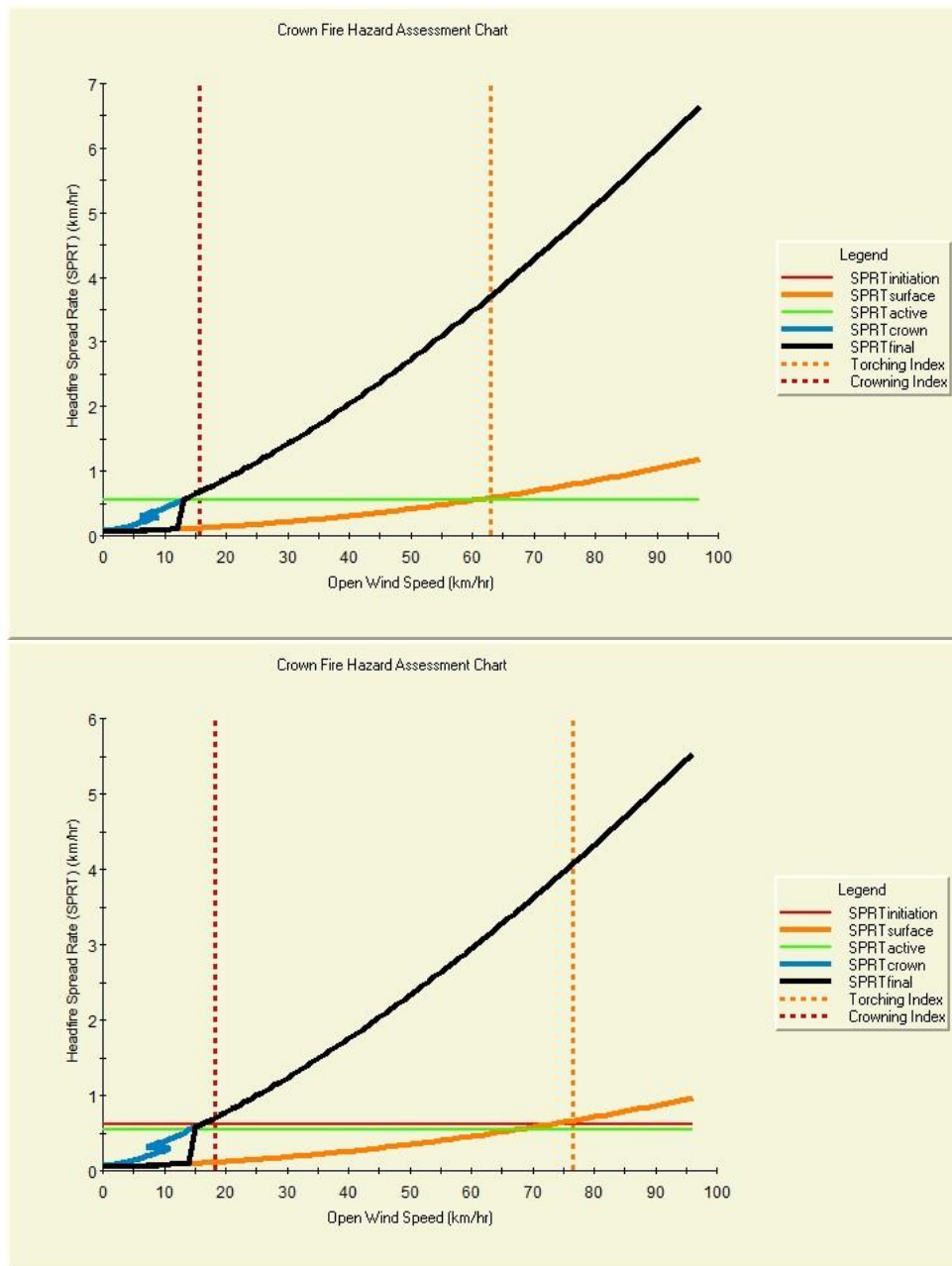
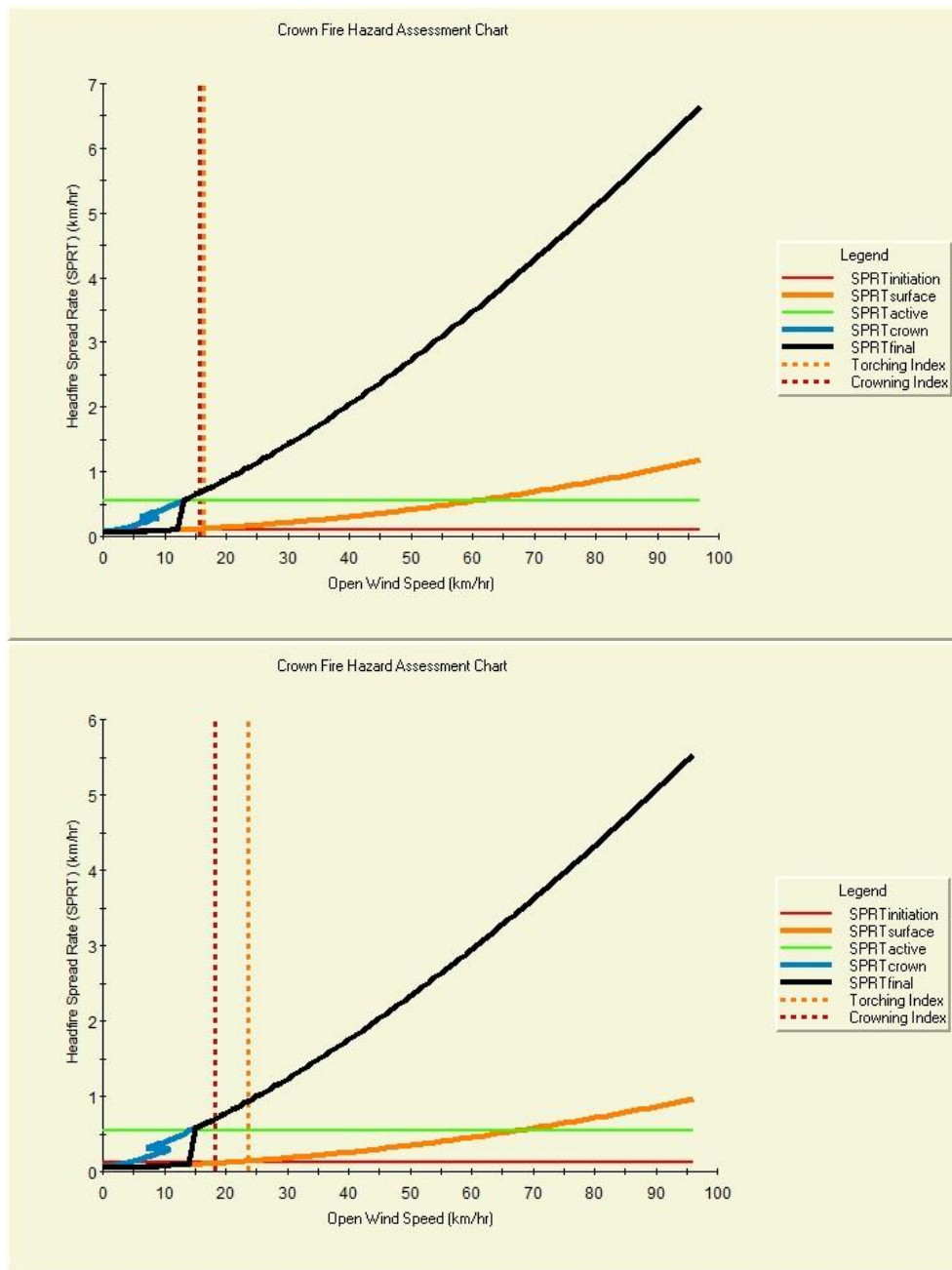


Figura 3.6. Gráfico de comportamiento fuego de copas en las parcelas SI gestionadas, según un escenario extremo (superior) o severo (inferior).



**Figura 3.7.** Gráfico de comportamiento fuego de copas en las parcelas NO gestionadas, según un escenario extremo (superior) o severo (inferior).

El modelo muestra claramente que las parcelas gestionadas pueden iniciar fuego de copas de antorcheo y pasivo alrededor de los 15 km/h de viento en escenario extremo y los 20 km/h en escenario severo. Con todo el fuego de copas activo de extrema intensidad necesita vientos de 64 y 76 km/h.

Por el contrario, las parcelas NO gestionadas pueden iniciar fuego de copas de antorcheo y pasivo alrededor de los 15 km/h de viento en escenario extremo y los 20 km/h en escenario severo. En este caso el fuego de copas activo de extrema intensidad necesita vientos de 16 o 24 km/h.



El análisis es concluyente y refuerza los datos de la gráfica 3.5, pero además, nos amplifica el entendimiento del brusco contraste de comportamientos observados en el incendio. Si bien hay una clara diferencia en parcelas gestionadas entre el momento de antorchar o de mantenerse en copas (necesita 40km/h más de viento), en las parcelas no gestionadas esto desaparece, y el incendio salta directamente de superficie a sustentarse en copas. Es un comportamiento binario con un límite de salto en unos muy normales vientos de 15 a 25 km/h.

Este análisis es determinante para entender como un país no había nunca sufrido este tipo de incendios y de repente se produce este comportamiento tan extremo de forma sorpresiva. El modelo de combustible dominante en Chile es binario a estos efectos, y una sequía estructural, sumado a los diferentes efectos que contribuyen a cargar las copas para propagar fuego activo e independiente en ellas ha contribuido determinantemente a ello.

### **Efecto perverso en copas**

Al largo período de sequía de los últimos 10 años, que puede calificarse como extrema en los últimos 4 en el centro y sur del país (figura 1.3), hay que sumar la meteorología extrema de enero (figura 1.4). Esta combinación de factores puede considerarse como un elemento detonante que afecta de forma notoria a la capa de combustible en las copas. Con una vegetación estresada hídricamente y al límite, el calor extremo y persistente termina por marchitar las hojas hidratadas y la vegetación reduce el porcentaje vivo de las mismas al mínimo para sobrevivir.

Este fenómeno observado en zonas de anteriores grandes incendios en Europa (Galicia 2006, Castilla-La Mancha 2009, Cataluña 2012) coincide con observaciones de las diferentes unidades de vegetación en el paisaje del centro y sur de Chile (figura 3.8) que presentan un alto contenido de hoja muerta en base de la copa. Este es el efecto más perverso, pues como hemos descrito, bajo condiciones normales en las zonas forestales donde la gran acumulación de vegetación fina y muerta está en el suelo (combustibles de superficie), los incendios propagan en baja-media intensidad. Sin embargo, la situación excepcional actual sitúa en las copas el combustible disponible, asegurando un comportamiento de incendio de copas y extrema intensidad. Esto es un inmenso cambio con respecto al comportamiento de los incendios, ya que pasarán de propagarse de superficie en baja o media intensidad a hacerlo activamente de copas, propagando el incendio en condiciones convectivas y con capacidad de crear incendios que superen la capacidad de control de los medios de extinción. En ese caso, las intensidades y velocidades del incendio se pueden multiplicar exponencialmente.

Para poder mantener el fuego en copas se necesita una carga de combustible en ellas elevada y disponible, es decir, una densidad aparente (*bulk density*) alrededor de 0.3 kg/m<sup>3</sup>. Esta carga inicialmente estaba en las copas de forma viva, pero la sequía ha contribuido a desecarla y posicionarla todavía en copas en forma de combustible muerto totalmente disponible.

Hay que destacar que en años de sequía y desecación continuada las copas de los árboles se defienden descargándose de combustible. Si bien este año en Chile no se ha observado este efecto, justo lo contrario. Si miramos la figura 1.3, observamos que diciembre



presenta un superávit hídrico en la zona central. Aunque en un principio esto puede parecer favorable, cuando la sequía es larga y profunda el efecto para los incendios y en particular los incendios convectivos es justo el contrario; desfavorable. Esta lluvia ha disparado el efecto de respuesta de las masas forestales bajo estrés. Éste consiste en que el árbol crea hoja nueva en el momento que se hidrata después de un largo periodo de estrés, y acto seguido tira la hoja vieja y poco eficiente. Este momento coincidió con enero y el inicio del episodio, confluendo el mayor aporte de acícula seca y por tanto de combustible fino con el peor momento meteorológico de altas temperaturas y humedades relativas bajas. Es decir, se alinearon el efecto climático a largo plazo, la respuesta fenológica de la vegetación y finalmente el episodio meteorológico extremo. Esto explicaría el salto de comportamiento del fuego, las velocidades anormales y los crecimientos en intensidad que han manifestado los incendios en este episodio de enero de 2017.

Resumiendo, la situación del combustible era de una anormal disponibilidad de las copas, empeorada por las lluvias tardías primaverales que añaden todavía más combustible que no puede mantenerse hidratado ante la extrema meteorología de enero. La consecuencia ha sido una copas más cargadas de combustible y más disponibles que nunca (figura 3.8).



**Figura 3.8. (izquierda)** Interior de las plantaciones. Obsérvese la carga de combustible fino en copa. Modelo de combustible KITRAL PL3.

**(derecha)** Imagen del combustible desde el borde mismo de uno de los rodales. Modelo combustible KITRAL PL7. A destacar la cantidad de combustible fino en copa que facilita la propagación del fuego de copas. Fuente: EUCP Team.

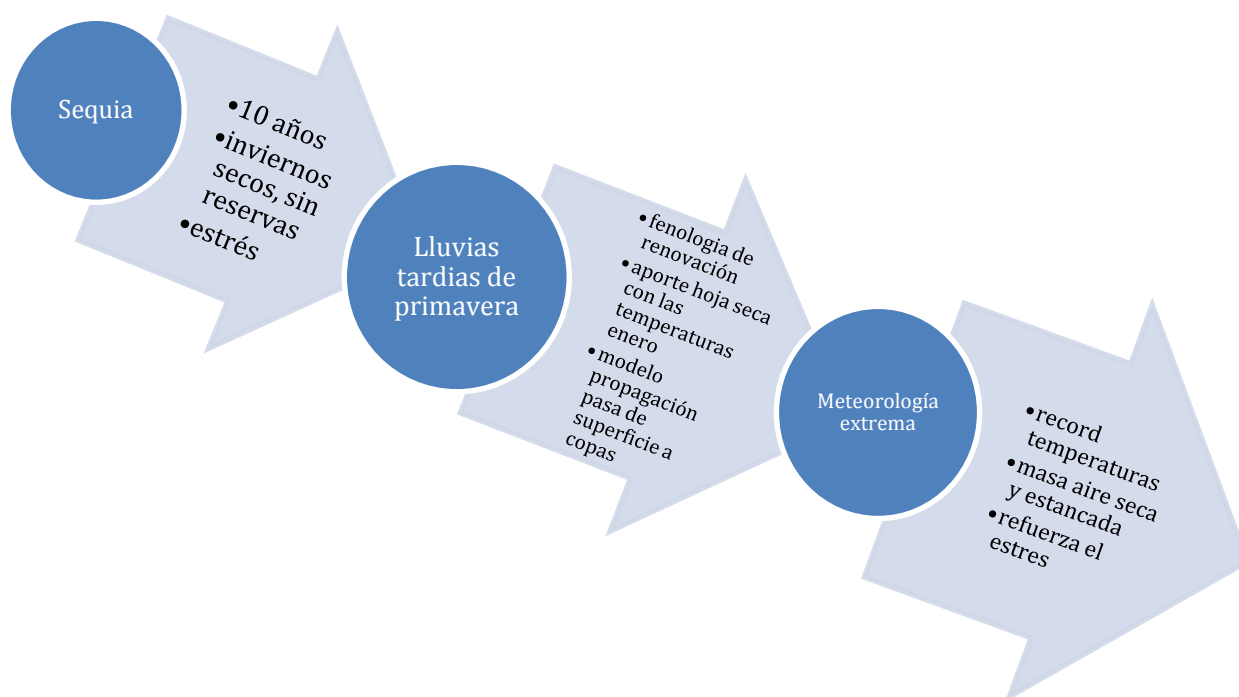


Un análisis detallado de la superficie quemada en ambos complejos de incendios arroja una dominancia del tipo de combustibles susceptibles a este efecto en el paisaje afectado. En concreto en el complejo de Las Máquinas se quema un 72,2% de arbolado frente un 21% de matorral. En el complejo de San Antonio la proporción es de 56,5% de arbolado por 23,2% de matorral, tal y como se indicaba en el punto 2 del informe (ver figuras 2.9 y 2.22). Claramente, los fuegos de copas han dominado la propagación en ambos complejos de incendios y en el de Las Máquinas, el más intenso, la proporción es mayor todavía. Estos datos preliminares vendrían a confirmar la importancia de los combustibles de copas extras y excepcionales en estos episodios de incendios.

Los combustibles más afectados han sido evidentemente los dominantes en el paisaje, pero en ningún caso se ha observado una reducción del comportamiento en las zonas de vegetación nativa, también extremadamente disponible y afectada por la extrema sequía y meteorología de enero.

Centrándonos en la disponibilidad de combustible, el efecto más destacable es que la disponibilidad ha sido acumulativa desde diciembre, llegando al máximo de disponibilidad la segunda quincena de enero.

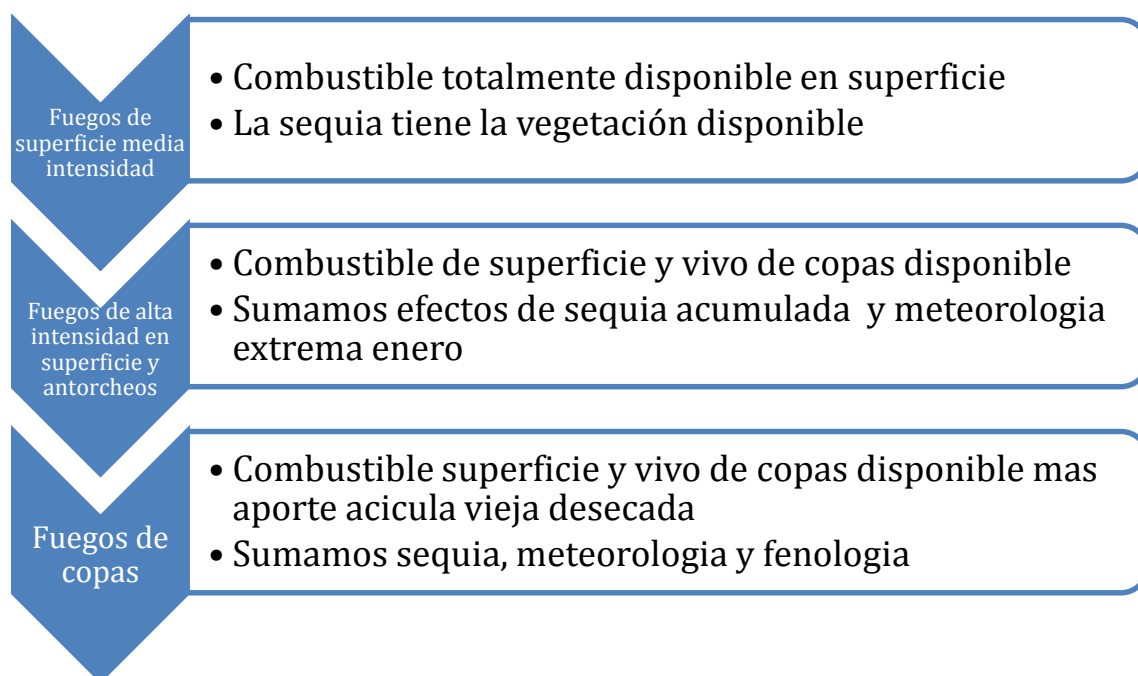
A modo de resumen y esquema de todo lo expuesto con anterioridad (figura 3.9), la secuencia de sequía de los últimos 48 meses en el centro del país (figura 1.3) sumada a unas lluvias de primavera y a una meteorología desecante y sofocante en enero ha garantizado un cambio del modelo de combustible de superficie a un modelo de combustible de copas. La zona centro del país en base a este efecto, ha pasado a estar fuera de capacidad de extinción bajo estas condiciones.



**Figura 3.9.** Esquema de la acumulación de factores que ha llevado a la situación de los combustibles en enero de 2017. Fuente: EUCP Team.

### 3.2. El comportamiento del fuego

El comportamiento observado de los incendios puede clasificarse como extremo, si bien tuvo una evolución progresiva, equiparable a la evolución de los efectos descritos que llevaron a la extrema disponibilidad de la carga de combustible tal y como se esquematiza en la figura 3.10.



**Figura 3.10.** Evolución del comportamiento del fuego en función de los cambios experimentados por el combustible. Fuente: EUCP Team.

En referencia a las intensidades de los incendios estudiados, sin duda el que presenta un comportamiento todavía más extremo es el complejo de incendios de Las Máquinas. Dicho complejo presenta unas evidencias de un comportamiento convectivo mucho más intenso que el complejo de San Antonio.

Dentro de un incendio hay multitud de condiciones que generan diferentes intensidades, desde intensidades extremas en la cabeza y altas o muy altas en flancos ascendentes en horas centrales del día, hasta aquellas intensidades medias que han ardido en los flancos, colas y propagaciones nocturnas. Con todo, si bien hay una gran extensión afectada con fuego de superficie, las carreras principales de los incendios, especialmente los días 25 y 26 de enero en el complejo de Las Máquinas, alcanzan intensidades clasificadas dentro de deflagración durante tormenta de fuego, superando los 30.000 kW/m que definen las condiciones para que se den dichas tormentas de fuego (figura 3.11).



Intensity (kW/m) / Readiness		Difficulty of Suppression / Fire Description
<b>1</b>	<b>&lt; 500</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spot ignition sources that cause an ignition to occur are self-extinguishing at the lower end of this intensity-readiness level.</li> <li>Creeping or gentle surface fire. Direct manual attack at fire's head or flanks by fire fighters with handtools and water is possible. Constructed breaks or firelines should hold (Alexander and deGroot 1989).</li> <li>These are Head Fire Intensities, <i>Planned Burning</i> opportunities at the higher end of this Intensity Class depending upon burn objectives.</li> </ul>
<b>2</b>	<b>500 – 2,000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>This is the level of fireline intensity where the majority of planned burning takes place and where ember production and spotting commences.</li> <li>Very little ember production and spot fire activity at less than 1,000 kW/m (Gould et al. 2007).</li> <li>Fires at the upper end of the scale can be challenging if the fuels are prone to ember production and spotting. Hand constructed firelines are likely to be challenged.</li> <li><i>Planned Burning:</i> These are Head Fire Intensities, Risk Manage intensity by Controls of ignition pattern and/or diurnal cycle, control resources.</li> </ul>
<b>3</b>	<b>2,000 – 4,000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Challenging but achievable fire suppression at lower ends of this fireline intensity-readiness level. Firefighter support with heavy equipmentsuch as dozers, ground tankers and air tankers generally successful.</li> <li>This is the fire intensity level where automatic dispatch rules for aircraft and heavy equipmentsupport begins in many Canadian agencies.</li> <li>Very vigorous or extremely intense surface fire (torching common in conifer fuels). Control efforts at head may fail at the upper levels (4,000 kW/m) (Alexander and DeGroot 1989).</li> <li><i>Planned Burning:</i> These are Head Fire Intensities, Risk Manage intensity by Controls of ignition pattern and/or diurnal cycle, control resources.</li> </ul>
<b>4</b>	<b>4,000 – 10,000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>8% house loss category (Harris et al. 2010)</li> <li>Limit of fireline intensity at the lower end of the level for suppression success in natural grass fires.</li> <li>4,000 kW/m is estimated to be the approximate threshold for direct attack on a head fire with dozers, ground tankers and air tankers support. This success is highly dependent upon the degree of ember production and spotting.</li> <li>Threshold for continuous crown fire (10,000 kW/m). Control is extremely difficult and all efforts at direct control are likely to fail. Direct attack is rarely possible given the fire's probable ferocity except immediately after ignition and should only be attempted with the utmost caution.</li> <li>Otherwise, any suppression action must be restricted to the flanks and back of the fire. Indirect attack with aerial ignition (i.e., helitorch and/or A.I.D. dispenser), if available, may be effective depending on the fire's forward rate of spread (Alexander and Cole 1995).</li> </ul>
<b>5</b>	<b>10,000 – 30,000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>24% house loss category (Harris et al. 2010).</li> <li>10,000 kW/m threshold for continuous crown fire. This has the potential for a dramatic increase in fire intensity with the addition of the crown fuel consumption. This will produce a related increase in ember production and spotting.</li> </ul>
<b>6</b>	<b>&gt; 30,000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>70% house loss category (Harris et al. 2010).</li> <li>Fireline intensity of greater than 30,000 kW/m is commonly understood as blow-up or conflagration level fire intensity. Intensities exceeding 30,000 kW/m were a defining feature of the 7 February, Black Saturday Fires (Gellie et al, Cruz et al in press).</li> <li>Wilson (1984) identified that fire intensity was at least 60,000 kW/m for the Belgrave fire during Ash Wednesday 16 February 1983.</li> </ul>

Figura 3.11. Clasificación de las intensidades de comportamiento del fuego y efectos de las mismas sobre capacidad de extinción, vegetación e interfaz urbana. Fuente: HARRIS et al, 2011.

Si bien, en ambos complejos de incendios hay porciones importantes del paisaje que se sitúan por debajo de este límite, la mayoría está al límite de la capacidad de extinción, alrededor de los 4000-6000 kW/m.

Hay que destacar que estos valores han sido calculados a posteriori, en base a imágenes de los incendios, observaciones en el terreno de los efectos de las carreras y la clasificación de la severidad del incendio.

Centrándonos en el complejo de incendios de Las Máquinas, que ha sido el más intenso, el máximo comportamiento promedio observado cabría situarlo alrededor de los 28.000 a 37.000 kW/m con carreras localizadas la noche del 25 al 26 enero alcanzando los 55.000-72.000 kW/m. Observaciones preliminares han arrojado valores muy puntuales y extremos de la noche del 25 al 26 en el salto del río Maule alrededor de los 92.000 a 113.000 kW/m. Este tipo de intensidades situaría este evento entre los más extremos de los casos de tormentas de fuego que vienen observándose (figura 3.12).

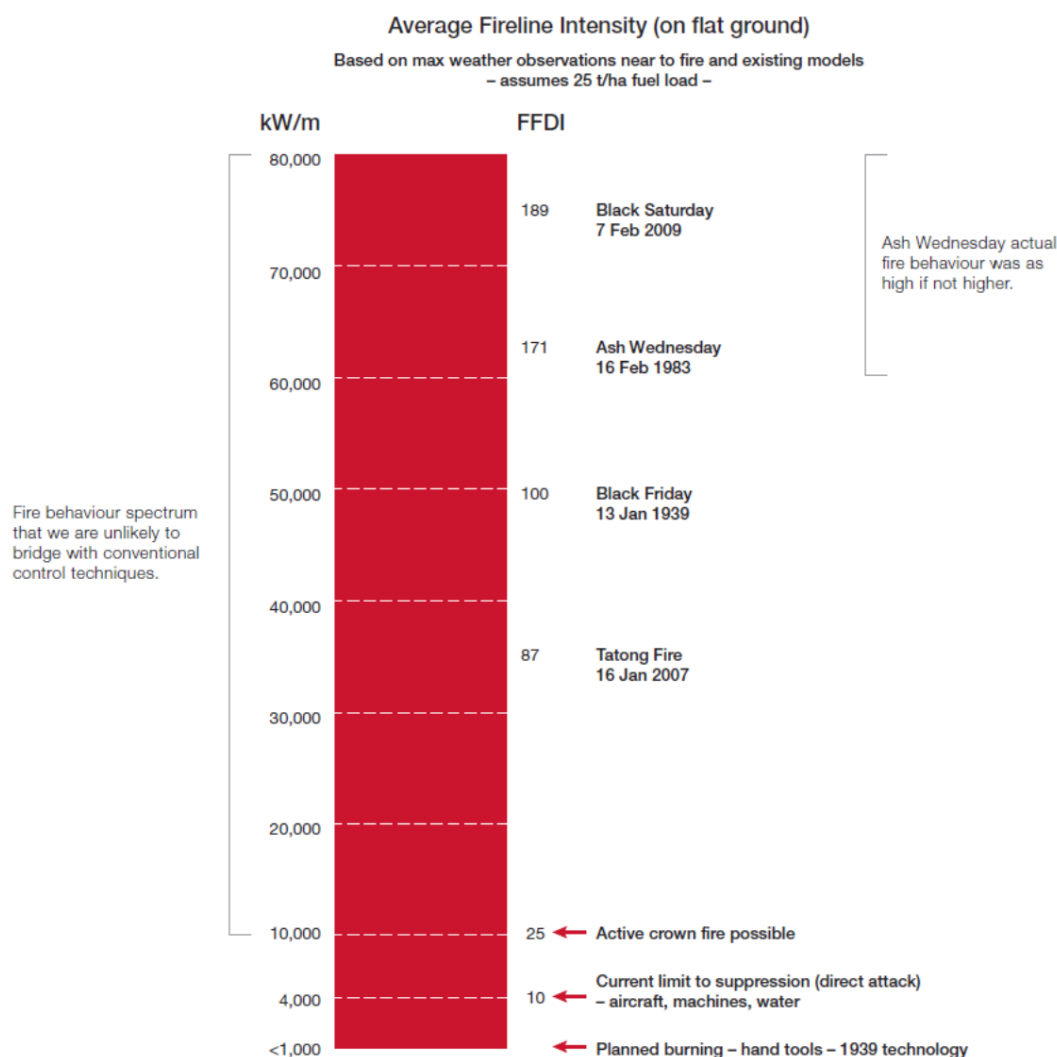


Figura 3.12. Gráfico de posición histórica de grandes incendios en función de su intensidad. Fuente: HARRIS et al, 2011.

Los datos meteorológicos recogidos no aportan estas intensidades de fuego observadas en el campo, como tampoco los datos de simulaciones realizadas con el *Wildfire Analyst Simulator* (TECNOSYLVA 2010). Ahora bien, esto entra dentro del rango normal esperado. Las tormentas de fuego generan su propio ambiente de fuego, alterando la meteorología que las envuelve (COUNTRYMAN, 1972). Esto explica la diferencia de viento, temperatura y humedad relativa entre la zona del incendio y la zona exterior.

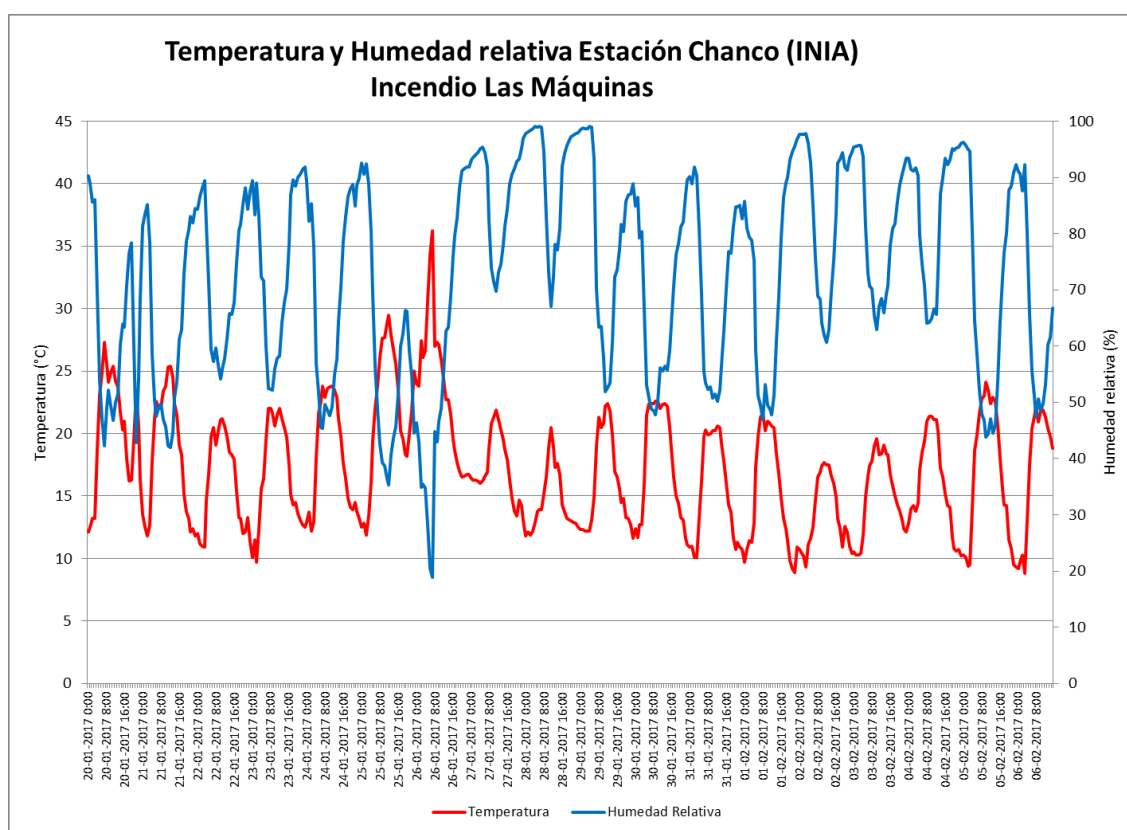
Esto mismo pasa con los simuladores, que utilizan ecuaciones de propagación basadas en radiación y no en convección, por lo que hay que ajustarlos con datos reales medidos en campo dentro de la burbuja de ambiente de fuego generado.

En los datos de la estación meteorológica del Chanco (ver figura 3.13), afectada por los incendios, tenemos registrada una idea de lo que sería el ambiente de fuego. La recuperación de humedades no se produce durante la noche del 25 al 26, bajando al mínimo del periodo con un 6%, y la temperatura asciende a los 36°C en plena noche, cuando lo normal sería que estuviera alrededor de 25°C. Esta diferencia entre dentro y fuera del



ambiente de fuego es lo que garantiza día y noche condiciones favorables al incendio y lo que define a los incendios convectivos, capaces de alterar la meteorología de su entorno creando una atmosfera favorable para su propagación. Con los modelos de combustibles presentes y usando el simulador estático NEXUS (SCOTT and REINHARD, 2001), los resultados muestran que las condiciones dentro del ambiente de fuego son de propagación de copas independiente, mientras que fuera del ambiente de fuego son de fuego de superficie de media intensidad.

Este fenómeno convectivo y de ambiente de fuego tan particular hace difícil reconstruir y simular el incendio. Un análisis basado solo en la meteorología y los combustibles no arroja la posibilidad de un incendio de semejante propagación e intensidad. Son las intensidades observadas en el terreno lo que permite reconstruir un incendio convectivo en base a una anormal carga de combustibles en copas.



**Figura 3.13.** Gráfico de evolución de temperatura y humedad relativa elaborado a partir de los datos registrados por la estación meteorológica de Chanco. Fuente: CONAF.

La severidad es una buena estimación de la intensidad del incendio y se puede obtener en base al análisis de las imágenes vía satélite (figura 3.14). Los datos preliminares nos muestran una distribución esperada de intensidades: un 64 % de media intensidad, un 28% de alta intensidad (que define la tormenta de fuego) y solamente un 6 % con intensidades extremas (figura 3.15).

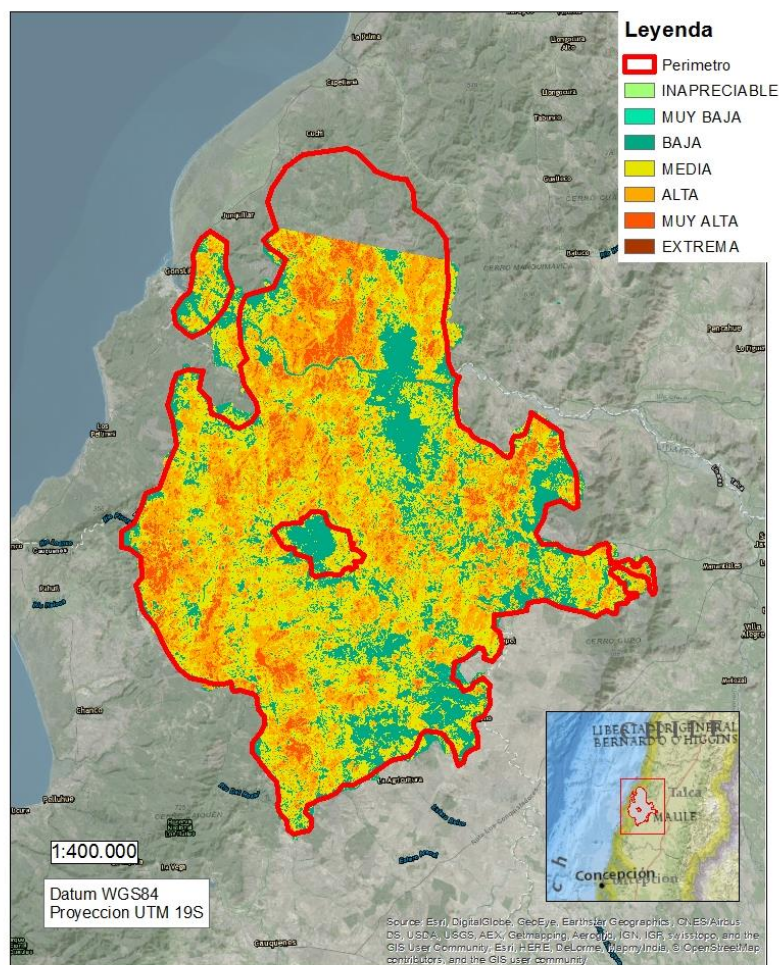


Figura 3.14. Mapa de severidad del incendio de Las Máquinas. Fuente: EUCP Team.

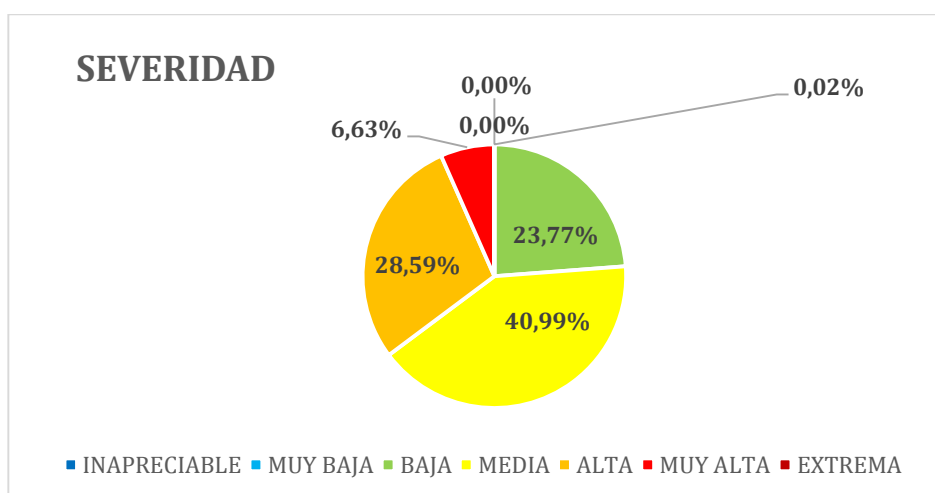


Figura 3.15. Porcentajes de severidad del incendio de Las Máquinas. Fuente: EUCP Team.

En un análisis más detallado de las intensidades de los incendios en base a los modelos de combustible simulados (figura 3.16), las intensidades reconstruidas en el



incendio y la comparativa con incendios similares nos muestra una realidad abrumadora de mantenimiento de las intensidades a lo largo de los días, a diferencia de lo sucedido en otras tormentas de fuego registradas como la que tuvo lugar el 7 de febrero en Victoria, Australia, en el año 2009.

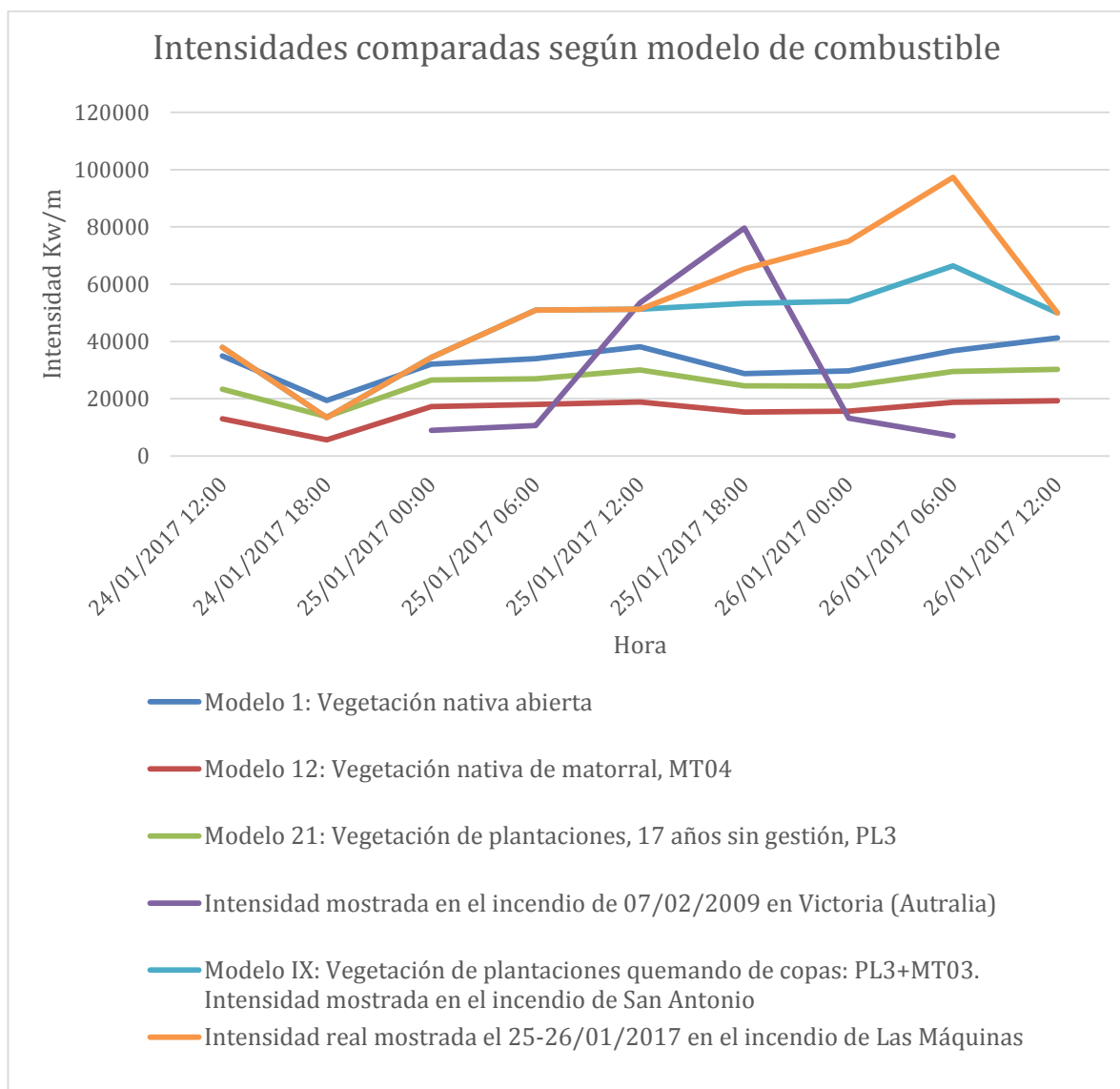


Figura 3.16. Comparativa de intensidades del fuego teóricas según modelo de combustible. Fuentes: CONAF, GRAF, UNAP. Fuente para fuego 2009 Australia, Al Beaver, 2014.

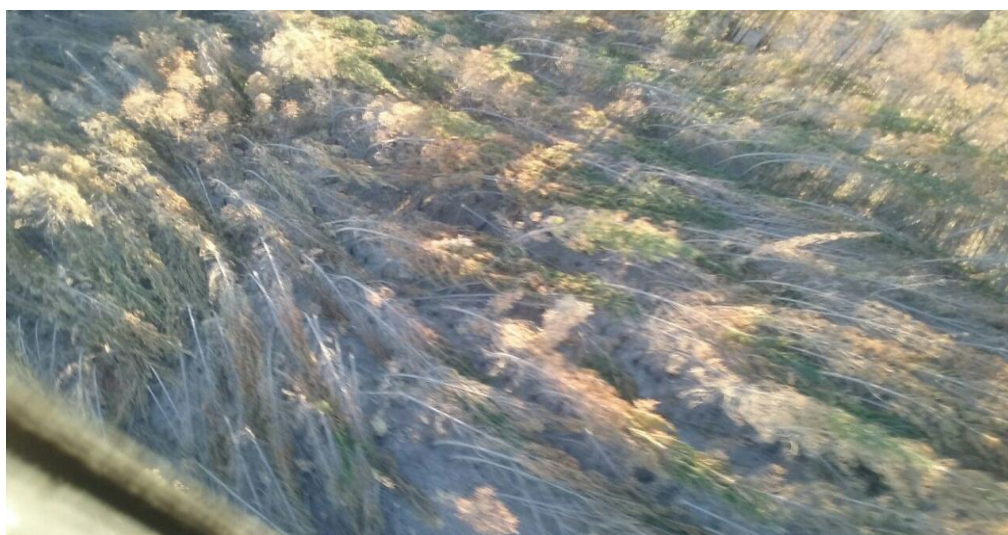
Si se fijan los 10.000 kW/m como límite de fuegos extremos y 30.000 kW/m como límite de los fenómenos de tormenta de fuego, se está ante un episodio muy extremo, situado al mismo nivel de los grandes episodios registrados en otras regiones del mundo como Australia. La noche del 24 de enero es el último momento en que el incendio reduce su intensidad de forma normal y esperada con la mejora meteorológica habitual nocturna. A partir de ese momento, la situación meteorológica empeora al igual que el comportamiento del incendio. La noche del 25 al 26 de enero, tuvo un máximo de tormenta de fuego que deja un paisaje con comportamientos extremos y avances de incendio de 8.200 ha/h de media





durante casi 14 horas, quemando 114.000 ha en ese periodo. Este comportamiento ha sido analizado en campo las carreras de copas y las zonas con los arboles tirados al suelo o directamente rotos (ver figuras 3.16, 3.17 y 3.18). Este tipo de efectos van asociados a velocidades de viento extremas, alrededor de los 100-120 km/h.

Se insiste en que los datos de las estaciones no arrojan condiciones para este tipo de intensidades, pero las observaciones de los efectos del fuego en campo, y en base a los modelos empíricos del CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) (FCFDG, 1992), sí que arrojan la capacidad de que se diesen si la meteorología dentro del ambiente de fuego era la que se desprende de la figura 3.13 y con vientos de 100 a 130 km/h. Estos vientos, aunque no registrados pero sí descritos por testimonios de brigadistas sobre el terreno, concordarían con los efectos de grandes zonas arboladas rotas y tiradas al suelo en el momento del paso próximo del frente de fuego y las corrientes que éste generaba (ver figuras 3.17, 3.18 y 3.19), alimentando la aparición de torbellinos y fenómenos de deflagración.



**Figura 3.17.** Efectos de la corriente de viento generada por el frente de llamas sobre el arbolado. Fuente: EUCP Team.







**Figura 3.18.** Efectos de la corriente de viento generada por el frente de llamas sobre el arbolado (2). Fuente: EUCP Team.



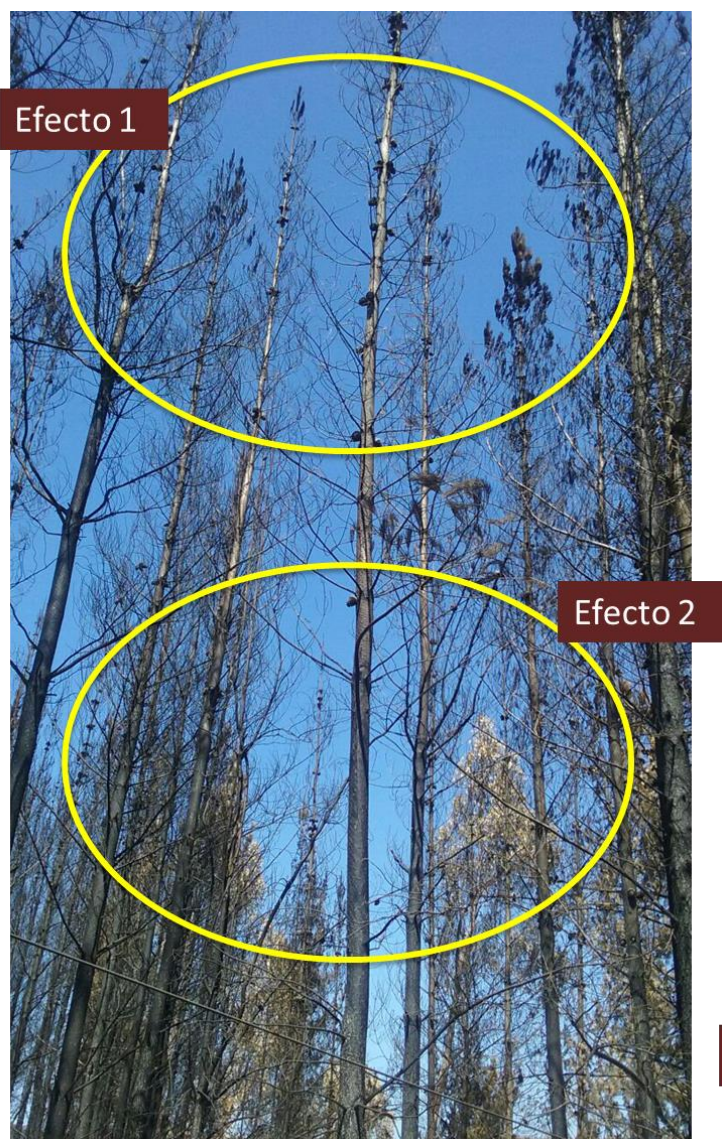
**Figura 3.19.** Efectos de la corriente de viento generada por el frente de llamas sobre el arbolado (3). Fuente: EUCP Team.

### 3.3. La morfología de las carreras de copas

Una vez establecido un orden de magnitud para las intensidades máximas de los incendios, la reconstrucción y análisis de las carreras de fuego más intensas pueden arrojar más datos sobre el comportamiento de los incendios y sobre la posición del combustible disponible que llevó al incendio hacia ese comportamiento tan extremo.

Destaca especialmente la presencia de acículas no consumidas (solo chamuscadas) en la parte alta de las copas (figura 3.20). Este efecto indica que la máxima intensidad no se ha dado en la parte alta de copas y encaja con la observación de altísimas cargas de combustible muerto en la parte baja de las copas, efecto ya explicado en el apartado anterior. Este hecho se ha analizado al detalle en las observaciones de las carreras en campo y se pueden diferenciar cuatro efectos distintos que representan cuatro estratos diferentes de combustión dentro de las masas que han ardido con comportamiento de fuego de copas activo (figuras 3.20 y 3.21).





**Figura 3.20.** Efectos del frente de llamas sobre las partes alta y media-alta del arbolado. Fuente: EUCP Team.



**Figura 3.21.** Efectos del frente de llamas sobre las partes media-baja y baja del arbolado. Fuente: EUCP Team.

Estos cuatro efectos o estratos de combustión se pueden interpretar según la tabla 3.3.

Efecto 1	<b>Parte superior.</b> Las partes altas de las copas, si bien se han quemado, no están consumidas en su totalidad y conservan parte de la hoja y todo el combustible de ramas entre 1 y 10 horas. El fuego les ha afectado pero no se ha sustentado en ellas.
Efecto 2	<b>Parte central superior.</b> El fuego ha consumido esta parte intensamente, consumiendo todo el combustible de 1 y 10 horas.
Efecto 3	<b>Parte central Inferior.</b> La zona de máxima intensidad, dejando la corteza extremadamente consumida con color blanco. Es el estrato donde el fuego se ha sustentado.



Efecto 4	<b>Parte Inferior.</b> Zona afectada e intensamente consumida por fuego de superficie. Los troncos están negros y no blancos, indicando una intensidad inferior que en la parte central-inferior.
----------	---

**Tabla 3.3.** Niveles de efectos del fuego sobre el arbolado. Fuente: EUCP Team.

Este tipo de efectos encaja con dos de las observaciones en campo:

- Las copas de los árboles habían aprovechado las lluvias de diciembre para crecer y como consecuencia habían secado acícula vieja de la que se desprendieron. Esta acícula muerta se encuentra en la parte media-baja de la copa mientras que la de la parte alta es la acícula joven más hidratada
- La sustentación del fuego de copas en la parte central del estrato arbóreo necesariamente crea corrientes de succión a nivel medio o bajo, lo que explica la cantidad de árboles tumbados o rotos a ese nivel, donde se han tenido que dar las corrientes de succión para alimentar la célula convectiva de la carrera de fuego de copas activo.

Al igual que sucede en cualquier incendio y como se ha visto en el análisis de severidad del incendio de Las Máquinas (figuras 3.14 y 3.15), no todo el incendio ha consumido ni ha ardido de la misma manera. El análisis detallado de los patrones de intensidad sobre el paisaje da una idea de dónde y cuándo se produjo la tormenta de fuego y dónde el incendio se comportó de manera más normal. De esta forma, se han analizado los patrones del fuego de copas y sus carreras. El tamaño de estas carreras de copas y su morfología son la mejor estimación del comportamiento del fuego a nivel de intensidad, capacidad de generar ambiente de fuego y capacidad de verse afectado por las condiciones ambientales o ser él mismo el que las afecte y las determine (tabla 3.4).

Intensidad	% del total	Descripción del comportamiento del fuego
Baja	23,7	Comportamiento de superficie sin afectación a la masa arbolada
Media	40,9	Intensidad de fuego que soflama las copas y puntualmente puede antorchar, consumiéndolas puntualmente
Alta	28,5	Antorcheos por rodal discontinuos
Muy alta	6,1	Fuego de copas continuo en carreras paralelas
Extrema	0,8	Fuego de copas continuo implicando la totalidad de la masa arbolada

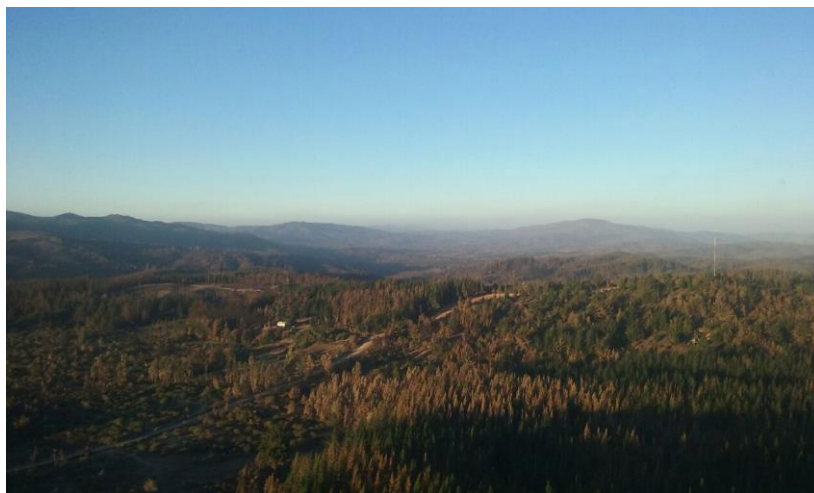
**Tabla 3.4.** Porcentaje de superficie afectada en función de la intensidad del fuego en el incendio de Las Máquinas, región del Maule. Fuente: EUCP Team.

El efecto de media-baja intensidad ha sido el dominante en el incendio (figura 3.22), especialmente en los días iniciales y en las partes donde el incendio se solapó con zonas quemadas bajo arbolado en incendios recientes del 2011 y del 2014. Esta intensidad





representa aproximadamente el 64% de la superficie afectada por el mismo, donde ha dejado la mayor parte de las masas arboladas soflamadas.



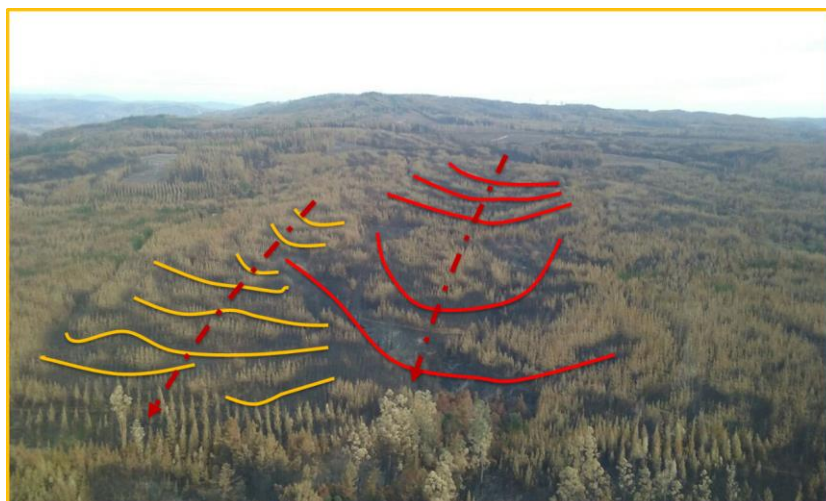
**Figura 3.22.** Efectos de la baja y media intensidad en el incendio de Las Maquinas, región del Maule. Se puede observar el mosaico de copas marrones de fuego de media intensidad superficial y las manchas verdes donde el fuego se ha comportado en baja intensidad superficial. Fuente: EUCP Team.

La alta intensidad, la normal en los grandes incendios, acostumbra a usar las pendientes ascendentes para crear carreras de fuego activo (figura 3.23). Esto ha ocurrido en un 28,5% de la superficie afectada por el fuego en el complejo de Las Máquinas. Este tipo de comportamiento se considera fuera de la capacidad de extinción. Con todo, al estar ligado a la pendiente, para poder favorecer sustento en copas se trata también de un comportamiento limitado a la morfología del terreno, es decir, son carreras que desaparecen en el descenso. Este tipo de fuegos no alteran el ambiente a gran escala, aunque sí generan corrientes fuertes y gran paveseo en el momento de coronar la ladera. Este es el comportamiento habitual de los grandes incendios forestales, es decir, del rango medio observado hasta ahora en Europa y que también venía observándose en Chile hasta ahora.

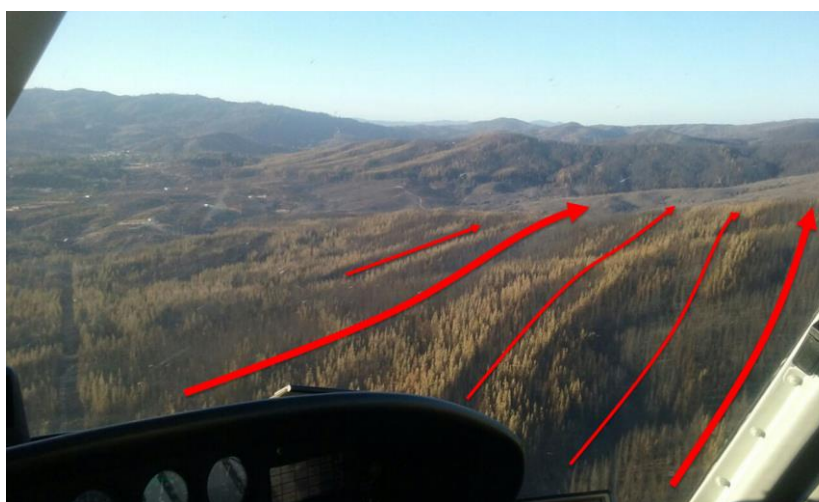


**Figura 3.23.** Efectos de la alta intensidad en el incendio de Las Máquinas, región del Maule. Fuente: EUCP Team.





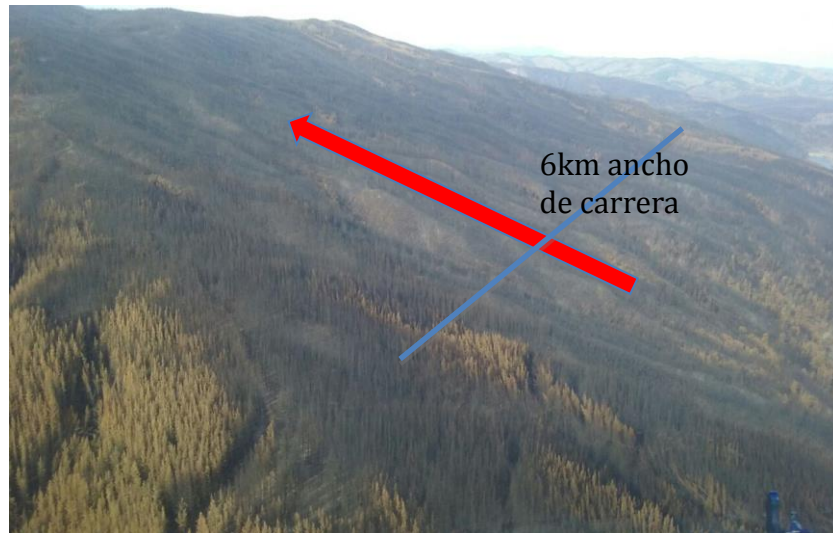
**Figura 3.24.** Efectos de la muy alta intensidad en el incendio de Las Máquinas, región del Maule. Fuente: EUCP Team.



**Figura 3.25.** Efectos de la muy alta intensidad en el incendio de Las Máquinas, región del Maule. Fuente: EUCP Team.

Los efectos de la muy alta intensidad se aprecian en un 6 % del incendio. Son los efectos más contundentes por carreras en “oleada” (figura 3.24) o por carreras en “paralelo” (figura 3.25). Son momentos de intensidad por encima del límite de 30.000 kw/m. Este es ya el fenómeno de tormenta de fuego que estira y ensancha el incendio totalmente fuera de capacidad de extinción, creando torbellinos y alterando las condiciones meteorológicas del entorno, creando una atmósfera envolvente que se denomina “ambiente de fuego” (COUNTRYMAN, 1972). Como se puede observar, estas intensidades ya no dependen de la ayuda del factor pendiente. Son claramente condiciones dentro de lo que denominamos la atmósfera alterada por el propio incendio. Estas serían las carreras que aprovechan la alineación de efectos que se han dado en este episodio. Sin éstos no serían posibles.

En el complejo de incendios de Las Máquinas cabe destacar que existe una carrera que las supera a todas; tiene casi 6 km de anchura (figura 3.26) y se proyecta a lo largo de 11 km de distancia. Es un comportamiento muy extremo que genera la extrema intensidad de fuego y convección la noche del 25 al 26 de enero y su propagación más virulenta.



**Figura 3.26.** Efectos de la extrema intensidad en el incendio de Las Máquinas, región del Maule. Fuente: EUCP Team.

Esta enorme carrera se produce porque la propagación del incendio se alinea con la pendiente ascendente, una vez saltado el río Maule, realizando la carrera más intensa y ancha del incendio, a un ritmo de 8.200 ha/h.

### **3.4. La tormenta de fuego: el comportamiento extremo la noche del 25 al 26 de enero**

Todo lo visto en los puntos anteriores en relación a la sequía, los combustibles, la forma de quemar, la intensidad y la estructura de las carreras de fuego son fenómenos extremos pero observados en otras tormentas de fuego como las registradas en Portugal 2003, Grecia 2007, Australia 2009 y España 2012, entre otras.

Sin embargo, en este caso aparece un factor nuevo. De las tormentas de fuego anteriormente mencionadas, en todas hay un factor de viento importante. Pero en este episodio, si observamos los datos de las estaciones meteorológicas próximas a los incendios (recogidos en el punto 2 del informe) veremos que a excepción de la sequía y la temperatura el resto de datos no son extremos. Hay, en general, una recuperación significativa de humedades y unos vientos dentro del rango normal, con puntas de 20-25 km/h (a excepción de los 40 km/h que alcanza puntualmente una de las estaciones próximas al complejo de incendios de San Antonio). Estas no son las condiciones que definen un episodio extremo.

Para que se dieran unas condiciones de tormenta de fuego como las que se produjeron esperaríamos encontrar humedades relativas por debajo al 10% y vientos superiores a 40-50 km/h. Por tanto, la única explicación que se puede encontrar es que las condiciones atmosféricas en altura y en superficie hayan favorecido incendios convectivos, y que dentro del ambiente de fuego generado por el complejo de incendios se hayan creado las



condiciones necesarias para desarrollar la tormenta tal y como se infiere por el análisis de los efectos en el terreno.

### **Proceso de formación de la baja térmica en la zona central de Chile**

La situación de bloqueo anticlónico sobre el Pacífico sur fue el primer paso previo y creó las condiciones para estancar la atmósfera sobre la zona de los incendios, situados entre dichas altas presiones sobre el océano y los Andes. En la figura 3.27 se observa la estabilidad que se dio a partir del 19 de enero, con todo el valle Central cubierto por humo.



**Figura 3.27.** Imagen de la estabilidad atmosférica del valle Central de Chile donde se observa el humo generado por los incendios. Imagen tomada desde un helicóptero de extinción de incendios sobre Talca (Maule) el 23/01/2017. Fuente: Xavi Vilaró piloto de helicópteros de la compañía Helitrans.

A partir del día 21 de enero se observan dos factores que se sumarán: las altas presiones mencionadas, que profundizan y se bloquean ante la costa de Chile (figura 3.27), y la aparición en el norte del país de una baja térmica en superficie. Vemos en los mapas como el área de altas presiones entre el Pacífico y el cono sur continental va creciendo y ampliando su influencia. En los días sucesivos y hasta el día 24 la dorsal se va desplazando al oeste para quedar situado su núcleo sobre el Pacífico, permitiendo el flujo de vientos del sur en el valle central de Chile (figura 3.28).

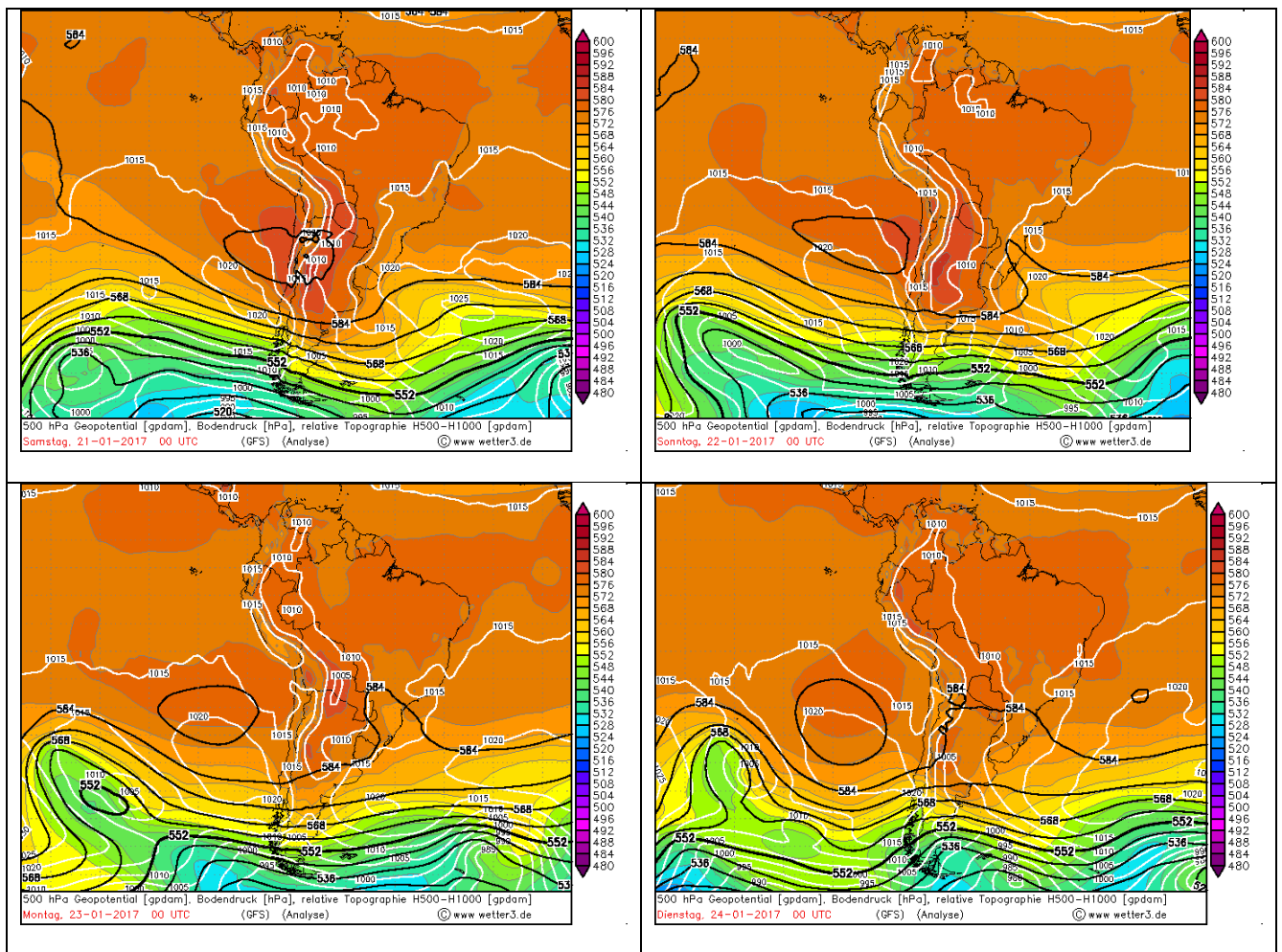
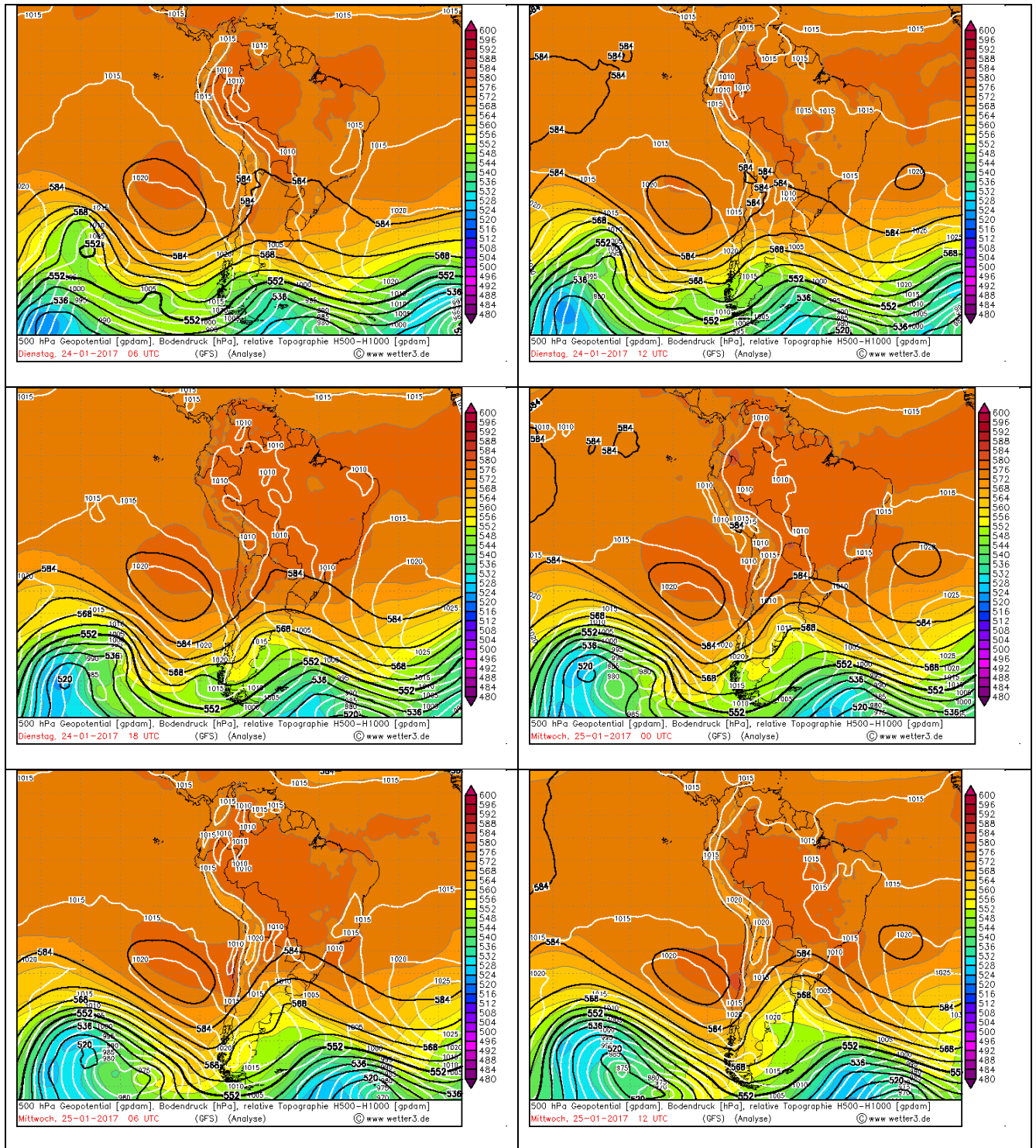


Figura 3.28. Evolución de la situación sinóptica (500 hPa) diaria entre los días 21 y 24 de enero de 2017. Fuente: Modelo GFS extraído de [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).

En la secuencia descrita en la figura 3.29 se aprecia cómo durante los días 24 y 25 de enero, el anticiclón del Pacífico comienza a calentar la masa de aire superficial y al ir desplazándose hacia el continente, la vorticidad del mismo empieza a generar una baja térmica costera habitual en este tipo de situación sinóptica.





**Figura 3.29.** Evolución de la situación sinóptica (500 hPa) cada seis horas entre los días 24 y 25 de enero de 2017. Fuente: Modelo GFS extraído de [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).

Finalmente (figura 3.30), se observa cómo el día 25 de enero partimos de una situación de bloqueo anticiclónico y cómo en las horas sucesivas, ese aire más cálido atrapado entre las altas presiones y los Andes comienza a formar una baja térmica costera en la noche del 25 al 26. A partir del mediodía del día 26 dicha baja relativa comienza a dispersarse volviendo a una situación atmosférica muy similar a la del día 22 de enero.

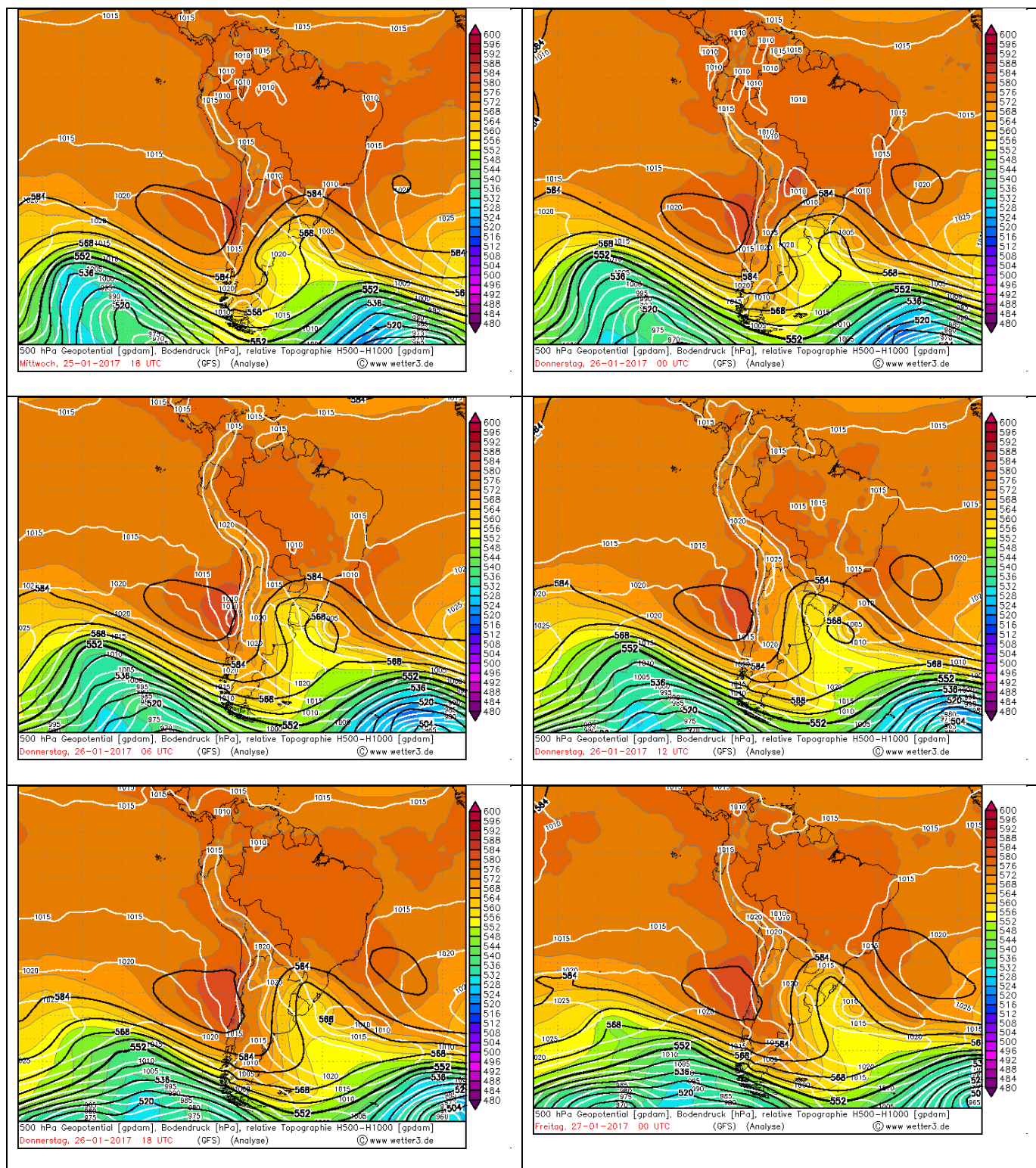


Figura 3.30. Evolución de la situación sinóptica (500 hPa) entre los días 25 y 27 de enero de 2017. Fuente: Modelo GFS extraído de [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).

La situación a 850 hp (figura 3.31) muestra una masa de aire cálido en altura (aproximadamente a 1.500 m) concentrada en toda la parte central y norte de Chile, que coincide con las alertas meteorológicas por ola de calor en el país. El día 25 por la tarde este calentamiento alcanza su máximo, para que el día 26 empiece a dispersarse por el Pacífico.



La forma y dimensiones de esta dispersión sugieren que sea a causa de la circulación de masas de aire generada por el incendio. Las imágenes de satélite confirman que una densa columna de humo ocupaba toda la zona.

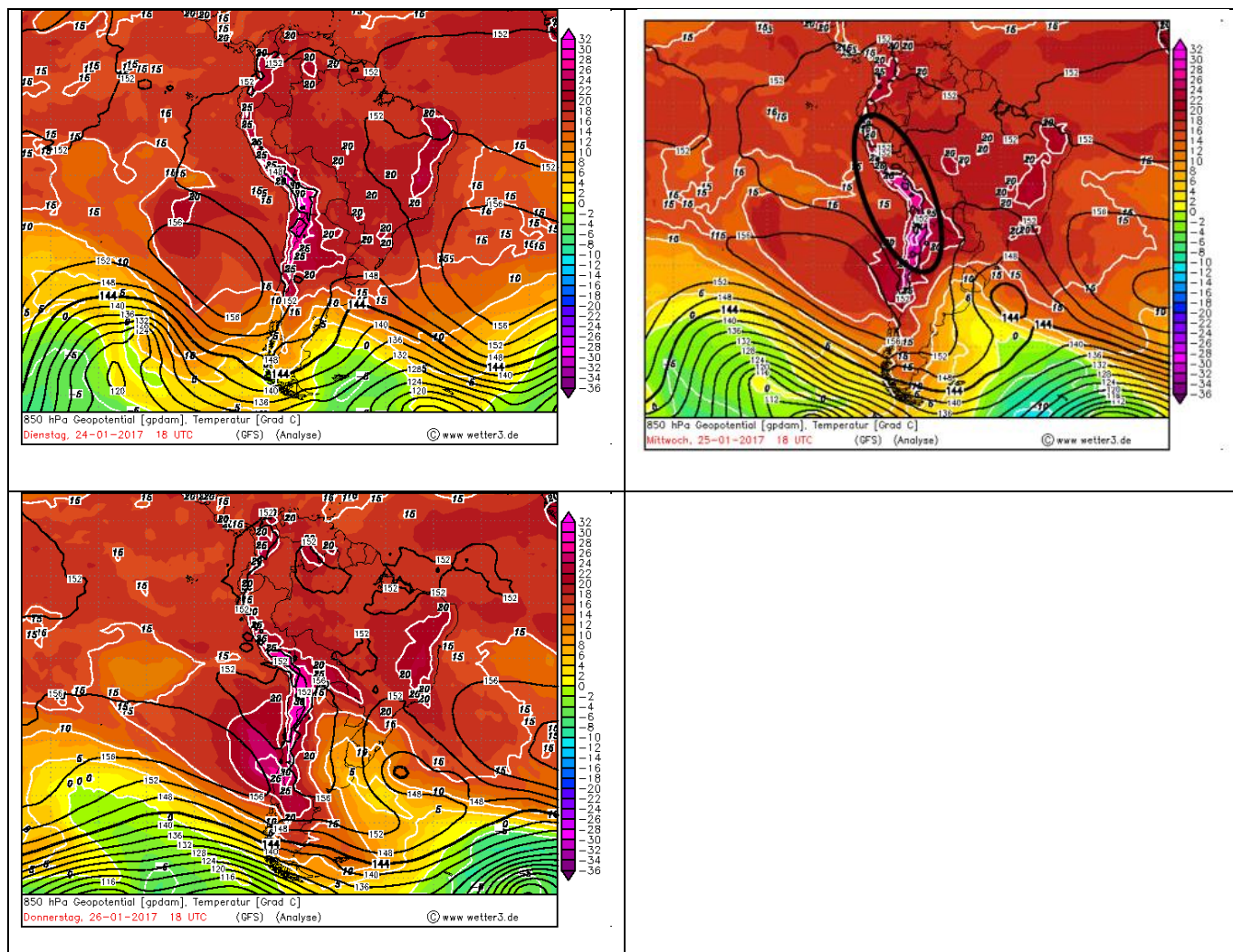


Figura 3.31. Evolución de la situación sinóptica (850 hPa) entre los días 24 y 26 de enero de 2017. Fuente: Modelo GFS extraído de [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).

En cuanto al viento observado (figura 3.32), el día 24 se aprecia el flujo del anticiclón del Pacífico que provoca vientos de componente sur en las regiones centrales de Chile que se mantiene el día 25 para reflejar un cambio de dirección del centro al norte de Chile el día 26 con la formación de la baja térmica costera.

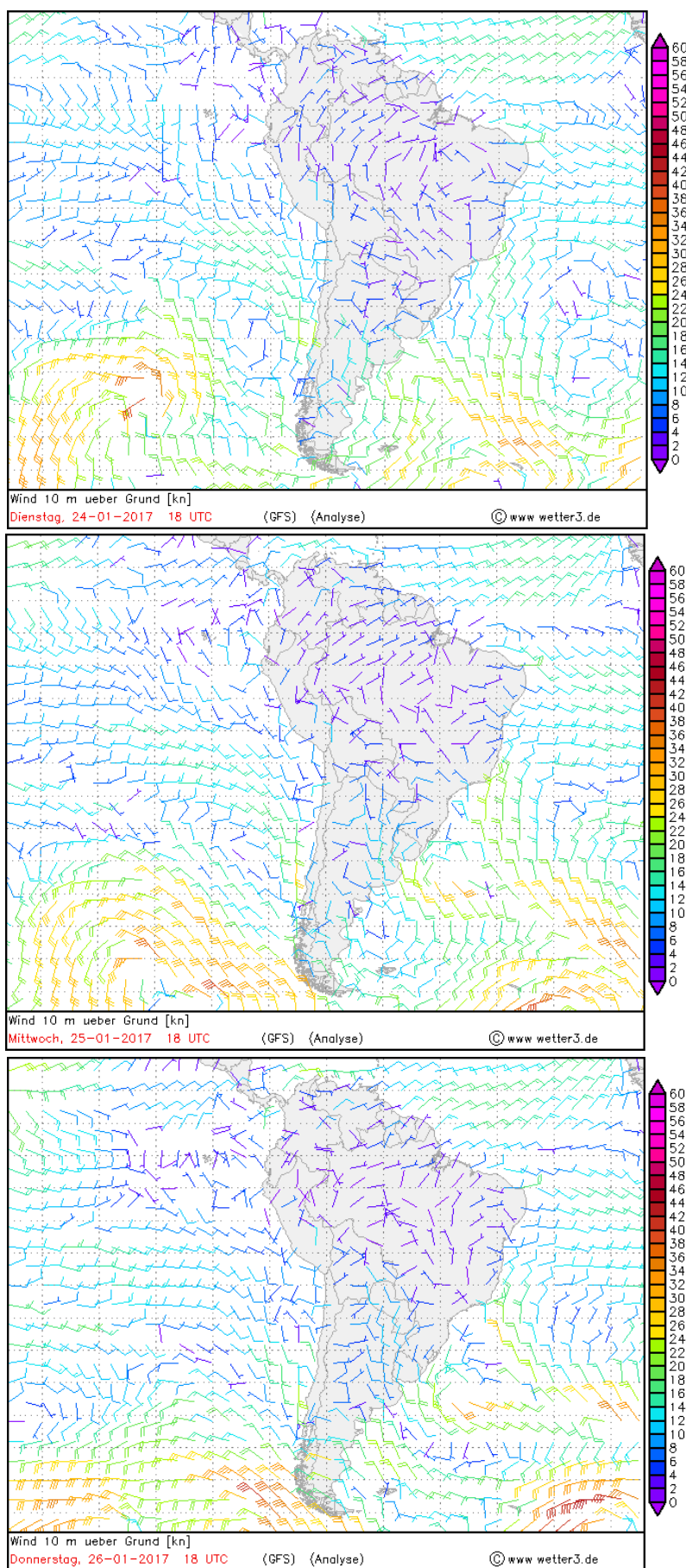


Figura 3.32. Flujo de viento observado en toda América del Sur para los días 24, 25 y 26 de enero. Fuente: Modelo GFS extraído de [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).





### La ruptura de la estabilidad.

Para profundizar más en el episodio meteorológico analizamos los radiosondeos de los días 25 y 26 que nos ofrece la estación de Santo Domingo (región de Valparaíso, Chile) (figuras 3.33 y 3.34). En ellos podemos ver varios efectos, siendo el más destacable la rotura nocturna de la inversión térmica que venía dándose desde hacía días.

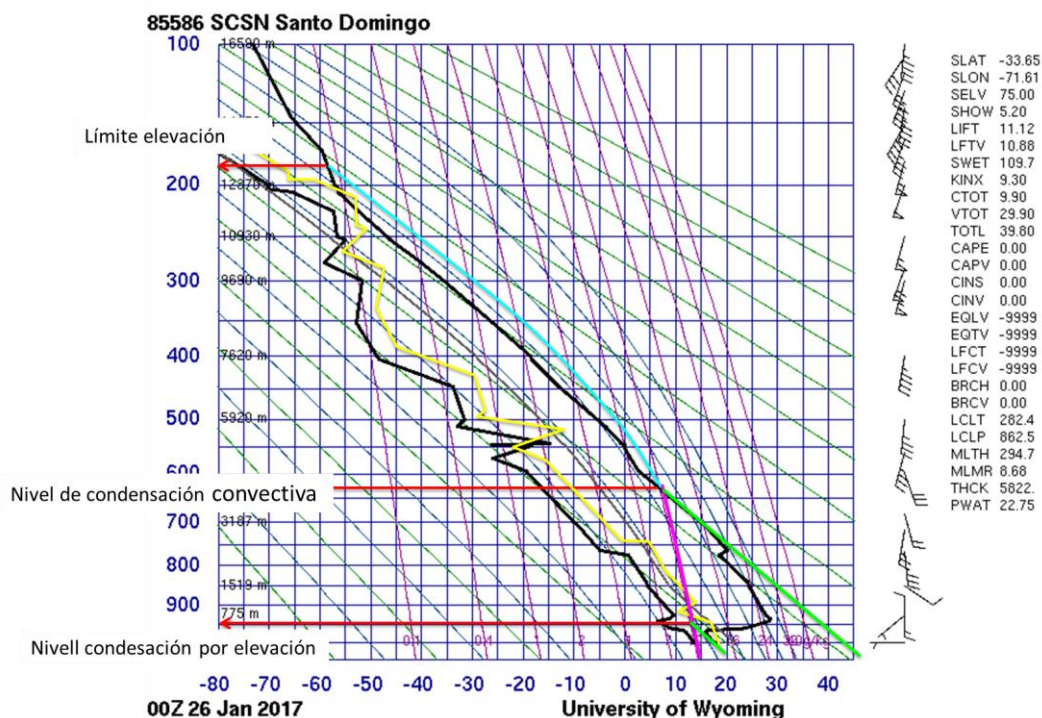


Figura 3.33. Radiosondeo de Santo Domingo (Chile) de la medianoche 25 a 26 enero.

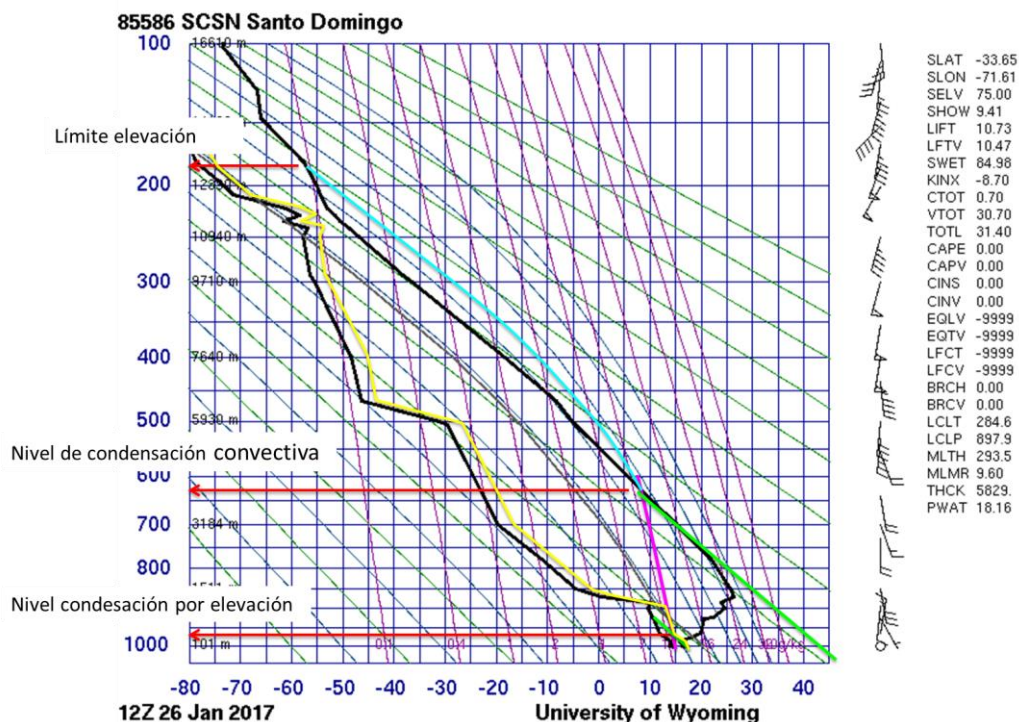


Figura 3.34. Radiosondeo de Santo Domingo (Chile) a mediodía del 26 enero.



En la noche del 25 todavía se aprecia una clara capa de inversión térmica superficial que mantenía toda la zona cubierta por el humo del fuego y creaba una atmósfera estanca que acumulaba energía (figura 3.33). Se detecta claramente la influencia del humo de los incendios en el hecho de que en la capa de inversión la curva de temperatura de rocío tiene un diente que indica acumulación de aire cálido y seco. Este mismo fenómeno se ha apreciado en zonas donde ha habido incendios anteriores junto con inversión térmica asociada.

Este pico de la curva de la temperatura de rocío ha desaparecido en el radio sondeo a mediodía del 26 de enero (figura 3.34) lo que implica que se ha roto la inversión térmica. En ese momento la tormenta de fuego estaba en su máximo crecimiento. Hay que destacar la atmósfera extremadamente seca en toda la altura del radio sondeo, y como esta se amplía aún más cuando la inversión se ha roto

Otro aspecto importante que merece la pena estudiar es la inclinación de las curvas de los radiosondeos. En un radiosondeo bajo condiciones normales la curva de temperatura no tendría tanta inclinación, es decir, estaría más vertical. Si observamos la línea verde de ambos radiosondeos (figuras 3.33 y 3.34), nos indica que la temperatura del aire en el punto de condensación convectiva y su proyección se corresponde claramente con temperaturas superficiales de 45 o 50 °C. Estas condiciones están indicando una atmósfera enrarecida, recalentada y en ningún caso normal. Con estos datos, es evidente la influencia que estaban teniendo los incendios sobre el estado de la atmósfera.

### **El proceso de la tormenta de fuego.**

De forma esquemática, podemos establecer en este proceso que la meteorología de enero con condiciones de sequedad y estabilidad de altas presiones duraderas, junto con la energía que iban liberando todos los incendios forestales, han favorecido la acumulación de un *potencial* que se libera con la aparición de la baja térmica que rompe la estabilidad. Este fenómeno se observa en muchos incendios situados en valles de zonas montañosas y constituye uno de los fenómenos a observar para la seguridad de los intervinientes. De hecho la rotura de la capa de estabilidad está dentro de las causas de grandes accidentes en incendios y de crecimientos sorpresivos de los mismos. En este caso estamos delante de un caso a escala continental. Lo más sorprendente es que el centro de la baja se sitúa justo sobre el incendio de las Máquinas el 25 y 26 de enero. Las primeras observaciones vía satélite del proceso y la anomalía de los datos arrojan la hipótesis que se tendrá que validar en detalle de que es el propio complejo de incendios el que atraen la baja térmica y la ensancha sobre ellos creando una sorpresiva tormenta de fuego a mesoescala.

En la tabla 3.5 se resume este proceso.

<b>Etapas</b>	<b>Efectos</b>
Meteorología extrema	Crea incendios intensos sobre una base de un territorio ya muy propenso por la sequía acumulada.
Situación de estabilidad	Mantiene la sequedad de la atmósfera y la inversión térmica asociada mantiene el humo y la energía liberada por los incendios en la zona. Hecho que va creando



atmosférica duradera	inercia en la atmosfera.
Aumento de la vorticidad sobre Chile	Genera la situación para la aparición de la baja térmica costera de Chile.
Baja presión formada	La aparición de la baja presión, junto con la energía acumulada por el incendio, rompe la estabilidad y crea un escape hacia capas altas, lo que permite al incendio crecer exponencialmente al tener convección a gran escala.
Tormenta de fuego	Los hechos se precipitan. El incendio usa la baja presión para evacuar energía y absorber aire fresco del mar. Literalmente engrandece la baja y la absorbe permitiendo generar una tormenta de fuego que forma un vórtice sobre el incendio de Las Máquinas y que interacciona con los incendios de Biobío hasta la zona de O'Higgins. Los incendios giran sobre si mismos en un radio de 400 km. La atmosfera seca y caliente del incendio llega hasta la isla Robinson Crusoe (Archipiélago Juan Fernández, Chile).
Final de la tormenta de fuego	La energía ha sido liberada y la estabilidad atmosférica rota. Las bajas presiones absorbidas hasta el incendio traen humedad a la zona. El comportamiento y crecimiento de los incendios se reduce.
Final del episodio	Sin masas de aire retenidas, la situación se calma progresivamente y los recursos de extinción tienen capacidad de trabajo eficiente. El aumento progresivo de las humedades relativas favorece que el comportamiento dominante del incendio vuelve a ser de radiación con sustento en superficie.

**Tabla 3.5.** Resumen de la hipótesis planteada sobre el proceso de formación de la tormenta de fuego. Fuente: EUCP Team.

Esta concatenación de hechos se puede observar con el seguimiento del crecimiento de los complejos de incendios de Las Maquinas y San Antonio, donde se observa la explosión de crecimiento los días 25 y 26 de enero, el momento álgido de la tormenta de fuego (figuras 2.11 y 2.12 y 2.24).

### **Un fenómeno de mesoescala.**

El gran alcance espacial que tuvo el episodio destaca como una de sus principales aspectos y refuerza la hipótesis expuesta en el apartado anterior. La dimensión planetaria de la tormenta de fuego se observa perfectamente con toda la columna de humo proyectada sobre el Pacífico (figura 3.36). Se puede observar en los datos de la estación de la Isla de Robinsón Crusoe, en el archipiélago Juan Fernández (Chile), a 950 km de la costa en el





Pacífico, cómo la atmosfera en los días del incendio es afectada de forma drástica, con un aumento repentino y nocturno de la temperatura y un descenso totalmente anómalo de la humedad relativa (figura 3.35).

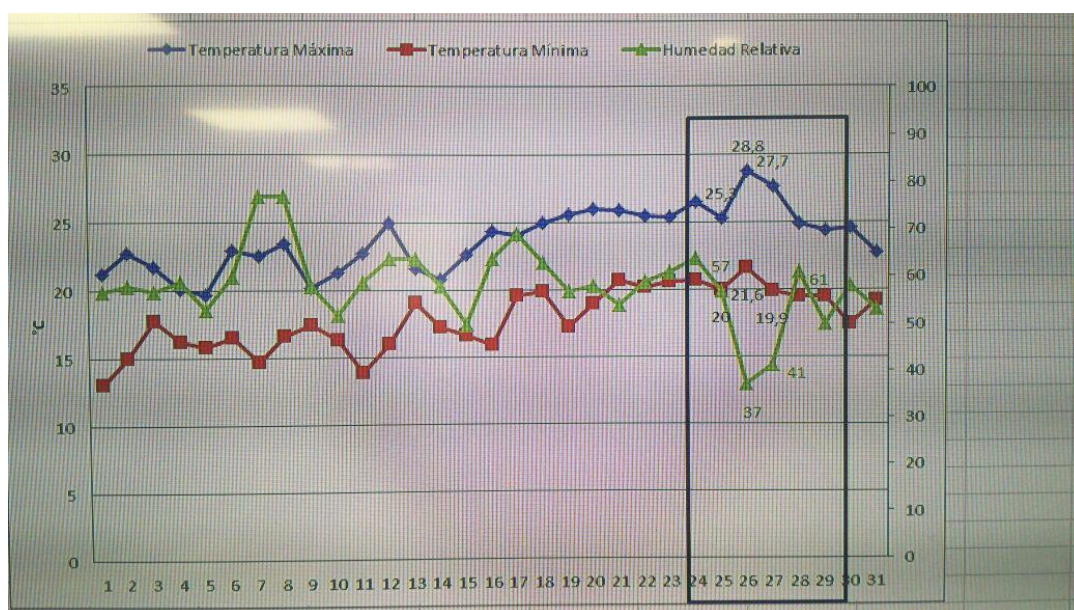


Figura 3.35. Datos meteorológicos de la Isla Robinson Crusoe en el Archipiélago Juan Fernández (Chile), a 950 km océano Pacífico adentro. Fuente: CONAF.



Figura 3.36. Vista a escala planetaria de la columna de humo generada por el episodio de incendios en la zona central de Chile el 26 de enero de 2017. Fuente: Imagen del satélite GOES13 facilitado por CONAF.

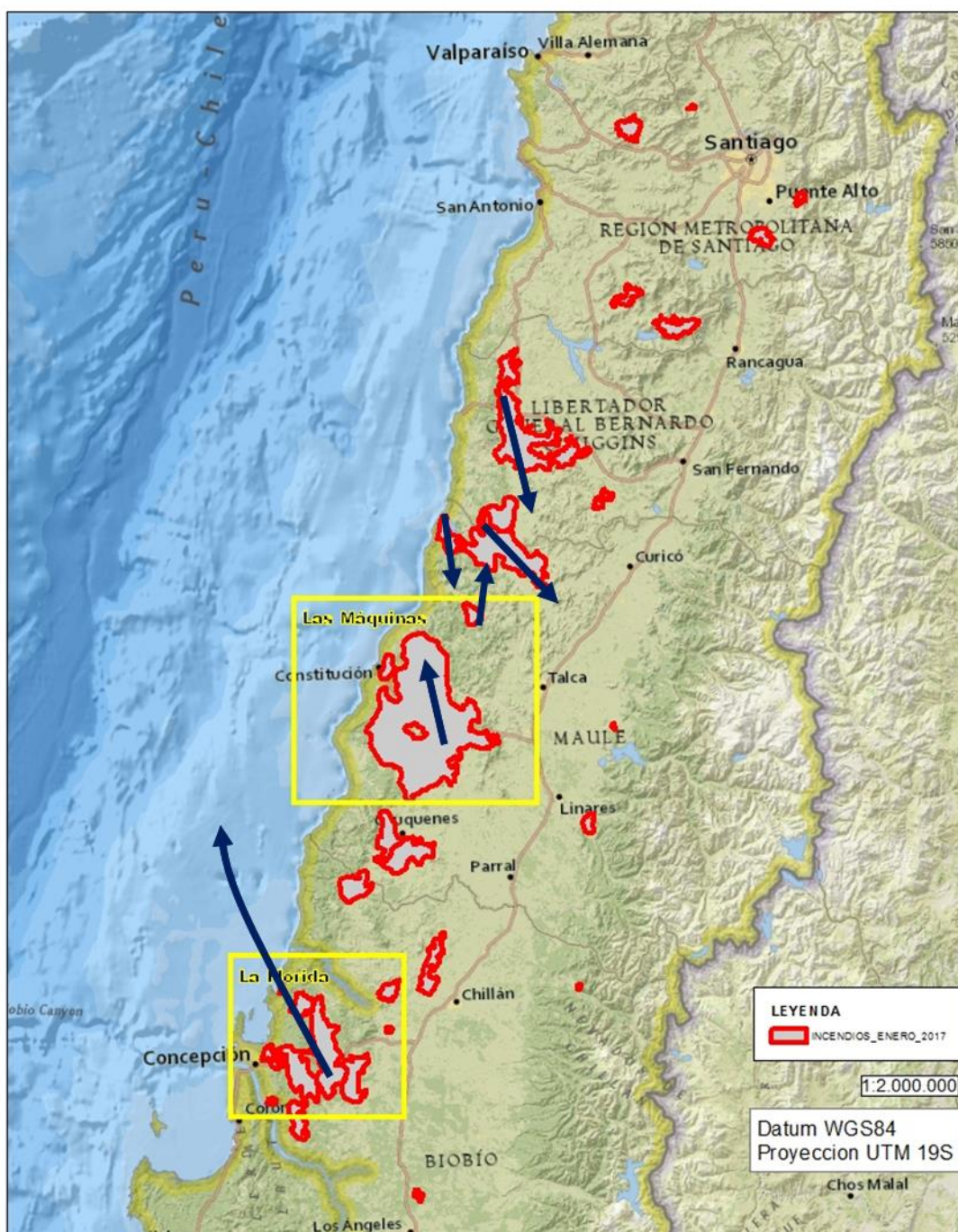




En el mapa de temperatura del aire a 850 hPa del día 26 de enero (figura 3.31) que ofrece el análisis meteorológico GFS, se observa como por efecto de la columna convectiva se ha dispersado por todo el Pacífico todo ese aire caliente acumulado en el valle central en los días anteriores, lo que concuerda con la hipótesis planteada.

Dada la dimensión de las repercusiones que se observa por el episodio de incendios, es importante evaluar el fenómeno de forma conjunta a nivel de mesoescala. Esto se puede observar en el mapa de perímetros de los incendios y sus direcciones de propagación (figura 3.37). Como se puede ver, adquieren el momento álgido del día 25 con un giro ciclónico donde todos interaccionan con todos. No se trata de la misma situación observada en las tormentas de fuego en Portugal 2003, Grecia 2007, Australia 2009 y España 2012, donde todos los incendios se mueven en la dirección del viento. Es este caso claramente los incendios están interaccionando para crear una atmósfera a mesoescala de tormenta de fuego, que explicaría la carrera de 115.000 ha consumidas en 14 horas por un solo incendio, el de Las Máquinas, en la región del Maule.

PERIMETROS INCENDIOS ENERO 2017 ZONA CENTRAL DE CHILE



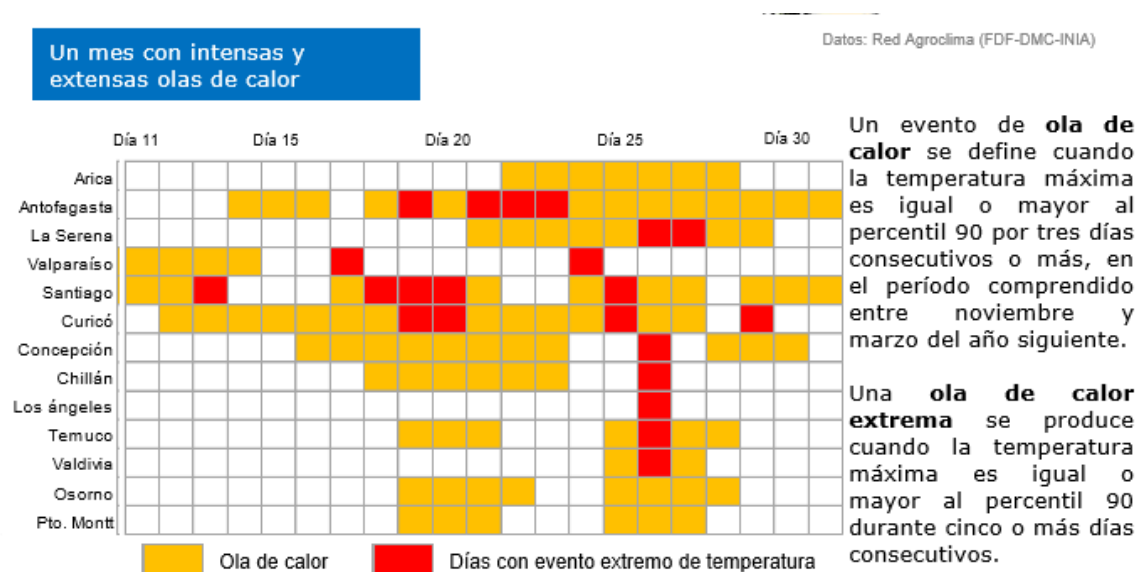
**Figura 3.37.** Detalle a mesoescala de las direcciones de propagación de los incendios. Obsérvese el giro ciclónico de los mismos alrededor del incendio de Las Máquinas, en el centro. Fuente: EUCP Team a partir de datos proporcionados por CONAF.

La interacción entre todos los grandes incendios en las regiones de O'Higgins, del Maule y del Biobío influye en la acumulación de aire caliente sobre la superficie cuando la tormenta de fuego se está generando. Al comenzar la misma, hay una recirculación del ambiente extremo que provoca un empeoramiento conjunto mayor de las condiciones



meteorológicas que se traduce en un comportamiento de fuego extremo. Es la situación ya conocida del ambiente de fuego, pero afectando a nivel de mesoescala.

Un dato que ayuda a entender esta hipótesis se puede entrever en el gráfico publicado por la Dirección General de Meteorología de Chile (figura 3.38). Se observa como sucesivas olas de calor afectan a Chile el pasado enero del 2017. Sin embargo, el punto más álgido del episodio extremo no se produce bajo una situación previa de ola de calor (véase ciudades de Concepción y Chillán en la figura 3.38) pero el día 26 se registra el evento térmico extremo. Esto está claramente relacionado con la rotura de la inversión térmica y la creación de la tormenta de fuego.



En la figura superior se muestran las olas de calor entre el 11 y el 31 de enero. Una ola de calor en Antofagasta duró cerca de 14 días, mientras que en Curicó alcanzó a 17 días consecutivos con temperaturas sobre el umbral mensual (Percentil 90). En Santiago hubo 4 olas de calor y en Chillán solo una. El percentil 90 es un umbral de temperatura que varía de ciudad en ciudad y permite identificar los días más cálidos de cada mes.

Figura 3.38. Extracto del informe de VICENCIO, 2017.

Como conclusión final, de confirmarse toda la hipótesis planteada a lo largo de este apartado y resumida en la tabla 3.5, muy probablemente estaríamos hablando de un fenómeno anómalo consecuencia del cambio climático, donde las nuevas condiciones que están apareciendo sitúan a todo un ecosistema bajo estrés y con sequía persistente. La vegetación, por tanto, entra en alta disponibilidad para arder. Una situación de enorme simultaneidad de incendios agrava aún más la situación de episodio meteorológico extremo y la interacción entre los mayores incendios y la meteorología tiene como resultado una tormenta de fuego sin precedentes en el país y un comportamiento de fuego extraordinariamente extremo cuyo vórtice es el mayor incendio de todos, el complejo de incendios de Las Máquinas.





## 4. Pasos para el futuro: recomendaciones y buenas prácticas generales

NOTA: El mandato del equipo de Protección Civil de la Unión Europea (EUCP Team) ha estado centrado fundamentalmente en dar respuesta a la emergencia, por tanto, los expertos técnicos que han redactado este documento, tienen conocimientos limitados del marco normativo general del país y de los mecanismos de cooperación entre las diferentes instituciones nacionales con responsabilidad en la emergencia. Consecuentemente, las recomendaciones mostradas a continuación que vayan más allá del análisis y los hallazgos preliminares previos, se basan en la experiencia y conocimientos de los propios expertos. Así mismo, las buenas prácticas en relación a la problemática de incendios forestales se encuadran como parte de la experiencia propia dentro de su labor profesional.

Las recomendaciones expuestas a continuación pueden encuadrarse como medidas generales de preparación y mitigación de episodios de incendios forestales de características similares:

- **Acciones de prevención social.** La enorme simultaneidad de incendios ha sido uno de los precursores de este comportamiento extremo, por tanto se sugieren líneas de trabajo en prevención social.
- **Acciones sobre la vegetación y la ordenación de los combustibles.** Las características intrínsecas de las masas forestales predominantes en las zonas afectadas han sido un factor coadyuvante en la generación del fenómeno. En este apartado se agrupan las medidas selvícolas como mitigación del problema.
- **Acciones sobre el operativo de lucha contra incendios forestales.** La estrategia de lucha contra incendios forestales debe adaptarse a las características especiales de estos incendios dominados por la convección. En este apartado se indican algunas recomendaciones que pueden servir como referencia para afrontar este tipo de incendios.

Todas las medidas se encuadrarían dentro de la generación de un marco legal y de planificación que permita regular y racionalizar las mismas, así como priorizarlas en el tiempo y en el espacio.

A continuación se desarrollan las acciones propuestas, agrupadas en los tres aspectos antes mencionados.

### 4.1. Acciones de prevención social

Implementar una metodología que permita recoger información detallada sobre el origen de la totalidad de los siniestros para desarrollar medidas de prevención social basada en dicha investigación de causas.

### 4.2. Acciones sobre los combustibles

De forma general se propone la generación de mosaicos en el paisaje. Resulta muy conveniente la recuperación y el fomento de actividades tradicionales agrarias, como la ganadería extensiva o la agricultura. Del mismo modo se considera oportuno avanzar en la



ejecución de trabajos de prevención de incendios forestales considerando la apertura y mantenimiento de la red de infraestructuras de prevención que se defina en los necesarios documentos de planificación.

Las plantaciones constituyen el modelo más representado en el paisaje de las regiones con mayor afección por incendios. Se propone por ello abrir líneas de trabajo encaminadas a reducir su vulnerabilidad. La ordenación de las masas forestales en relación a su repercusión en el avance de los incendios o el aumento del marco de plantación para permitir un mayor flujo de viento en su interior, facilitando la caída de acículas al suelo, son dos ejemplos de medidas posibles.

La interfaz urbano-forestal se convierte en prioridad ante cualquier incendio, por eso cualquier trabajo de planificación y regulación previo que se realice sobre este aspecto resulta de ayuda inestimable de cara a la estrategia de gestión de la emergencia. Lograr espacios urbanos defendibles debe ser el objetivo de trabajo en este aspecto.

Debe considerarse la incorporación de las quemas prescritas bajo arbolado como medida eficaz para reducir la carga de acículas en suelo. Además de la labor preventiva que las quemas prescritas suponen, hay que destacar su labor como elemento formativo en el comportamiento del fuego y su uso como capacitación en las maniobras para el personal de extinción.

#### **4.3. Acciones sobre el operativo**

Es primordial mejorar en la transferencia del trabajo de la Unidad Técnica de Análisis y Planificación Central hacia la toma de decisiones en la pre-emergencia, en el despacho de medios ante los eventuales incendios forestales y en las operaciones de combate contra el fuego. Dicha unidad debe proporcionar información útil para el operativo a escala regional y provincial. Pero además, dicha información debe ser integrada en los procesos de toma de decisiones, tanto a nivel de despliegue de medios como durante el desarrollo del incendio. Es necesaria también una continua retroalimentación entre ambas partes.

Para lograr un trabajo de análisis que pueda planificar el comportamiento de los incendios de copa, sería conveniente adaptar el modelo de combustibles KITRAL para poder simular este tipo de incendios.

En la misma línea que el párrafo anterior, el comportamiento del fuego en este episodio de incendios nos muestra la necesidad de tener estaciones meteorológicas dentro del ambiente de fuego para tomar datos de las condiciones reales que afectan al comportamiento.

Se considera importante seguir avanzando en el uso de avances tecnológicos que puedan aportar mejoras sustanciales en la gestión de la emergencia y en la planificación de la misma como pueden ser mejora en la localización GPS de los medios, ampliación del seguimiento de flotas incorporando al mismo a los medios aéreos y el acceso a esta información en los puestos de mando. De la misma forma, el uso de teléfonos inteligentes, y la posibilidad de intercambio de imágenes, puede añadir una mejora sustancial en la toma de decisiones tanto en los centros de coordinación como en los puestos de mando.



De forma general, estos episodios de incendios forestales a tan gran escala requieren de altos niveles de preparación y de profesionalización de las brigadas participantes teniendo muy en cuenta la capitalización de la experiencia del personal interviniente y la mejora de la formación continua.

Mejorar en determinados aspectos operativos como las operaciones nocturnas. Las noches presentan oportunidades de extinción que deben aprovecharse con las medidas de seguridad pertinentes.

Incorporar las operaciones con fuego técnico como método eficaz de extinción en grandes incendios forestales. Para la puesta en marcha de esta medida es necesario que el personal que vaya a ejecutar estas acciones esté debidamente formado en la materia.

Si bien cualquier medio aéreo con capacidad de extinguir resulta valioso en un escenario de simultaneidad de incendios como el sufrido, de cara a la gestión y optimización de los recursos en el futuro se considera más efectivo y eficiente el empleo de helicópteros y aeronaves de tamaño medio (de 1.000 a 5.500 litros) que el de aviones cisterna de gran capacidad, ya que los primeros disponen de mayor maniobrabilidad, capacidad de adaptación al terreno y facilidad para operar desde zonas cercanas a la emergencia. El resultado es que permiten alcanzar una mayor cadencia de descargas e interfieren menos en el resto de medios que trabajan en el incendio.





## **BIBLIOGRAFÍA:**

COUNTRYMAN C.M.; 1972. *The fire environment concept*. Berkeley, CA, USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.

DOMÈNECH, R.; PIQUÉ, M.; BELTRÁN, M.; CERVERA, T.; LARRAÑAGA, A.; 2017 *Actuaciones selvícolas en zonas estratégicas para la prevención de incendios en bosques de Pinus nigra: tratamientos mecánicos y quemas prescritas*. Presentación para ICOPSFire 2017.

FCFDG, Forestry Canada Fire Danger Group; 1992. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System*. Forestry Canada, Ottawa, Ontario, Information Report ST-X-3.

HARRIS, S., ANDERSON, W., KILINC, M., FOGARTY, L., 2011, *Establishing a link between the power of fire and community loss: the first step towards developing a bushfire severity scale*, Victorian Government Department of Sustainability and Environment, Melbourne Vic Australia.

JULIO, G.; 1987. *Clasificación Preliminar de Modelos de Combustibles Forestales*. Facultad Ciencias Forestales. U Austral. Informe Convenio 140. Valdivia, Chile. 97 pp.

RUÍZ-GONZÁLEZ, A.D.; ALVÁREZ-GONZÁLEZ J.G.; 2011. *Canopy bulk density and canopy base height equations for assessing crown fire hazard in Pinus radiata plantations*. Can. J. For. Res. 41: 839-850

SCOTT, J. H. and REINHARDT, E. D.; 2001. *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior*. Res. Pap. RMRS-RP-29. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 59 pp.

TECNOSYLVA; 2010. *Wildfire Analyst. Operational wildfire behavior system*. <http://www.wildfireanalyst.com>

VICENCIO, J.; CORTÉS, C.; CAMPOS, D.; TUDELA, V.; 2017. *Informe especial enero 2017: un mes de grandes extremos*. Dirección Meteorológica de Chile. 13 pp.