

territorium • 26(I)

REVISTA INTERNACIONAL DE RISCOS | INTERNATIONAL JOURNAL OF RISKS

INCÊNDIOS FLORESTAIS

Imprensa da Universidade de Coimbra
Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

2019



RISCOS



SEVERIDAD DEL FUEGO EN LOS MEGA INCENDIOS FORESTALES OCURRIDOS EN CHILE, EN 2017.
ACCIONES PARA MEJORAR EL SISTEMA DE PROTECCIÓN*

5

FIRE SEVERITY IN MEGA WILDFIRES IN CHILE IN 2017.
ACTIONS TO IMPROVE THE PROTECTION SYSTEM

Miguel Castillo S.

Laboratorio de Incendios Forestales, Universidad de Chile (Chile)
ORCID 0000-0002-3880-9441 migcasti@uchile.cl

Jorge Saavedra S.

Sección Análisis y Predicción de Incendios Forestales en Corporación Nacional Forestal (Chile)
jorge.saavedra@conaf.cl

Jordi Brull B.

Sección Análisis y Predicción de Incendios Forestales en Corporación Nacional Forestal (Chile)
jordi.brull@conaf.cl

RESUMEN

Se analizan tres grandes incendios forestales ocurridos en Chile en la pasada temporada de 2017. Fueron eventos catastróficos nunca antes vistos en este país, por lo menos desde la época de la colonización del sur de Chile, hace más de 150 años. El artículo se organiza, primero, con una breve descripción de la ocurrencia y cifras de daños, para luego aplicar el concepto de severidad en estos tres incendios. Luego se explican algunas referencias sobre las líneas de investigación necesarias para mejorar el actual programa de protección contra incendios forestales en Chile.

Palabras clave: Incendio forestal, riesgo, peligro, severidad.

ABSTRACT

We analysed the three major forest fires that occurred in Chile in 2017. They were catastrophic events never before seen in this country, at least since southern Chile was colonized more than 150 years ago. After a brief description of the events and the cost of damage, we applied the concept of severity to the three events, and discuss some of the research needed to improve the current programmes protecting against wildfires in Chile.

Keywords: Forest fire, risk, danger, severity.

* O texto deste artigo foi submetido em 10-09-2018, sujeito a revisão por pares a 19-11-2018 e aceite para publicação em 14-12-2018.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 26 (I), 2019, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introducción

Los últimos mega incendios forestales ocurridos en Chile durante 2017, se desarrollaron bajo condiciones ambientales de comportamiento extremo, favorecidos por la prolongada condición de sequía que ha afectado al país en los últimos 8 años, junto al aumento de las condiciones de peligro, especialmente por la acumulación de combustible forestal seco y factores de continuidad espacial de bosques y plantaciones que permitieron el rápido avance de las llamas. En tan sólo 3 semanas, se consumieron aproximadamente 460.000 ~~460.000~~ hectáreas, lo que equivale a más de 7 veces el promedio anual en un período de 8 meses de incendios forestales. En toda la temporada de incendios, se quemaron 575.000 hectáreas de vegetación. Estudios realizados por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile (Castillo *et al.*, 2016), indican que la condición de propagación está aumentando violentamente en los últimos años, haciendo que los modelos matemáticos creados para Chile necesiten ser revisados permanentemente para poder estimar los futuros escenarios bajo condiciones de peligro que no se presentaban en años anteriores, particularmente en lo referente a la susceptibilidad de la vegetación a la ignición e inflamabilidad.

Este nuevo escenario involucra un área aproximada de 14,5 millones de hectáreas que comprometen la región centro-sur de Chile, en donde coexisten distintas formaciones de bosque nativo, y que en el área de estudio corresponde a especies del matorral y bosque esclerófilo (Garfias *et al.*, 2018) y también plantaciones forestales con fines de producción, cuyas principales especies corresponden a pino radiata y eucaliptus (diversas especies de este género). En particular, los mayores daños se presentaron en el bosque esclerófilo, formación representada por especies nativas tolerantes a las condiciones mediterráneas de sequía, pero extremadamente dañadas por los incendios debido a los altos niveles de intensidad alcanzados por el fuego y la severidad extrema resultante de la propagación descontrolada en miles de hectáreas. De acuerdo a estudios de este Laboratorio, Garfias *et al.*, (2018) concluyen determinan que se perdió cerca de un 18 % de este tipo de bosque en la región central, en el verano de 2017, dando paso a extremas condiciones de exposición y degradación de cuencas hidrográficas que han iniciado un proceso de erosión producto de las primeras lluvias que comenzaron a presentarse a contar del mes de abril. Actualmente, pasados 5 meses de estos enormes incendios, se hace necesario establecer un catastro sobre aquellas áreas de la investigación que están vigentes y aquellas que necesitan ser revisadas para poder mejorar la calidad del conocimiento en manejo del fuego en Chile, y permitir con ello proponer nuevas estrategias

para fortalecer los mecanismos de prevención y combate de incendios forestales.

Los incendios forestales en Chile Central, particularmente entre las latitudes 32°22'S-36°48'S, se constituyen anualmente en un agente de perturbación en el paisaje vegetal del bosque nativo mediterráneo, también en plantaciones forestales con fines comerciales y en una extensa variedad de infraestructuras cercanas a zonas forestales, especialmente viviendas e industrias.

El cambio climático, la dinámica existente en el uso del suelo y el aumento en la intencionalidad como causa de inicio de incendios, son realidades que han abierto la necesidad de seguir perfeccionando los programas de defensa contra incendios forestales en el país, acentuando fuertemente el énfasis en la modernización de la infraestructura preparada para la ocurrencia y propagación de incendios cada vez más conflictivos, como también en la ineludible misión de fortalecer la institucionalidad del Estado de Chile para resguardar el patrimonio forestal y ambiental derivado de la existencia de más de 15 millones de hectáreas vulnerables al impacto de los incendios forestales (Castillo *et al.*, 2016). Adicionalmente en los últimos 10 años se ha evidenciado un significativo aumento de la condición de peligro del material vegetal combustible inserto en condiciones fisiográficas que favorecen el avance del fuego.

Existe además una urgente necesidad de modernizar la legislación en el sistema de regulaciones y sanciones debido al uso irresponsable del fuego y el sostenido aumento de la intencionalidad pese a los enormes esfuerzos hechos por el Estado de Chile para dotar con mayor cantidad de recursos año tras año al inicio de las temporadas de incendios. Existen dos aspectos aún deficitarios: debilidades en la formación educativa ambiental de los niños y jóvenes, y el escaso interés de las agencias de financiamiento al estímulo de proyectos de investigación en manejo del fuego.

La actual legislatura ha estado nuevamente proponiendo iniciativas para avanzar en el ámbito de la protección contra incendios forestales y también iniciativas de organismos privados y académicos en el estudio de los daños y efectos producidos por el fuego. Los últimos incendios ocurridos en 2017 en la zona mediterránea produjeron enormes pérdidas económicas y también daños al funcionamiento ecológico de ecosistemas que ciertamente están adaptados a la presencia del fuego, pero con límites de resiliencia que fueron notoriamente superados por las características de intensidad y severidad de los daños.

En este artículo se presenta un breve análisis de las características que adquirieron los principales incendios ocurridos en la zona central de Chile ocurridos en el mes de enero 2017.

Referencias iniciales

La ocurrencia de incendios forestales está normalmente asociada a aquellos factores, causas y situaciones que de una u otra manera facilitan la acción inicial de todo evento de fuego, y que corresponde a la acción del encendido. Este fenómeno, producido por la interacción del calor, oxígeno y material combustible, originan la ignición inicial y con ello la propagación del fuego. En el contexto de los incendios forestales, los elementos causales varían dependiendo de la región geográfica en cuestión, de aspectos socioculturales de las naciones, de la forma en que se percibe el manejo del fuego para múltiples tareas silvoagropecuarias, y también de aspectos de tipo normativos que regulan la actividad. En muchos casos, el aumento de la intencionalidad y el uso irresponsable del fuego agravan el problema, ocasionando con ello un notorio aumento en las estadísticas de ocurrencia de incendios forestales. En ecosistemas mediterráneos del Sur de Europa, California, Sur de Australia, Nueva Zelanda y Chile, este fenómeno está condicionado en gran medida por la actividad humana, siendo la intencionalidad, una de las principales causas de incendios forestales, con variantes y énfasis dependiendo de los países insertos en las regiones antes señaladas.

Este fenómeno de encendido, con una causa conocida, se denomina riesgo. En un sentido estadístico y de evaluación prolongada (múltiples temporadas de incendios forestales), corresponde a la formación de áreas críticas de ocurrencia (número de incendios forestales que ocurren en un área determinada, en un período de evaluación - normalmente anual o cada 5 años - y que se evalúan en relación a una unidad de superficie estandarizada y conocida). Esta área crítica, dependiendo de la escala geográfica, da lugar a problemas de concentración específica de incendios, denominado sector crítico. En el caso de Chile, y también en muchos países de ecosistema mediterráneo, estas áreas con presencia frecuente de incendios forestales dependen de: la ocurrencia histórica de incendios (y sus causas asociadas), la presencia de caminos y sectores de alto tránsito de personas y vehículos, la presencia de actividades relacionadas a tareas silvoagropecuarias, la localización de centros poblados y también otro tipo de actividades locales que puedan concentrar alta afluencia de personas en un área y período determinado.

Lo anterior, para un efecto de análisis estratégico, se denomina riesgo de incendios forestales. Es un fenómeno que no depende directamente de las condiciones meteorológicas ni tampoco de la vulnerabilidad, dado que se enfoca específicamente a la casuística de ocurrencia. De hecho, es frecuente encontrar temporadas con condiciones meteorológicas muy propicias para el encendido, y sin embargo éste no se produce, o bien la estadística muestra una disminución

en la tasa de ocurrencia. Esto último sucede cuando el factor de ignición no se hace presente, aun cuando se cumplan todas las condiciones para el entorno para una fácil propagación del fuego.

En el sentido meteorológico, el riesgo de incendios forestales posee un significado distinto. En Chile está referido a la probabilidad de ocurrencia diaria de un evento, principalmente dependiente de los siguientes factores: temperatura, humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento, un factor acumulado de sequía de los combustibles forestales y un factor de estacionalidad referido a la condición de vulnerabilidad de la vegetación en períodos secos. De esta manera se generan ecuaciones que expresan la probabilidad de ocurrencia acotada a zonas geográficas específicas, en las cuales también se considera el historial acumulado de incendios forestales. Este indicador puede ser expresado a distintas escalas geográficas, y puede ser evaluado varias veces durante el transcurso de un día determinado, siendo posible conocer su tendencia acumulada durante un período mayor, complementando muy bien los resultados derivados del análisis histórico de Riesgo de incendios forestales.

El riesgo histórico de incendios forestales como también la probabilidad de ocurrencia diaria, una vez que se expresan en el inicio de un incendio forestal declarado, pasa entonces a depender de un segundo factor denominado peligro, y que corresponde a aquellos aspectos relacionados con la propagación potencial del fuego. Este concepto basa su comprensión en el análisis del comportamiento del fuego, principalmente lo relacionado a la velocidad de avance de las llamas, la intensidad calórica, el tamaño y forma de la expansión del área quemada, el efecto de la topografía, el clima local, y por sobre todo el resto de estos factores, las características de la vegetación que está siendo afectada por el incendio. En tal sentido, un modelo de análisis multicriterio caracteriza el peligro como las condiciones necesarias para la expansión de los incendios, de acuerdo a las variables de vegetación, topografía y clima antes señaladas. De esta manera, es posible establecer pronósticos en la propagación del fuego basado en el apoyo de simuladores que consideran todos estos elementos para recrear, con un cierto grado de error en las estimaciones, la dirección potencial de avance del fuego, sus posibilidades de crecimiento, y también proporcionar información base para establecer acciones técnicas para el eventual control en su propagación perimetral.

Este componente de peligro está presente en consecuencia, en los análisis territoriales de determinación de prioridades de protección que normalmente se establecen para extensas superficies de bosques e infraestructura vulnerable a la acción del fuego. En cuanto a su utilidad como componente operativo, y de la misma manera que el riesgo, el peligro puede ser utilizado mediante análisis

dinámico respecto al pronóstico de la propagación, incluso actualmente con la utilización de una variada gama de datos y herramientas de apoyo basadas en sensores remotos tales como MODIS y VIIRS, capaces de monitorear las características de desarrollo de un incendio forestal de gran magnitud, tal como los ocurridos en varias partes del mundo en 2017.

El fuego se desarrolla de manera dinámica dependiendo de la tasa de producción de energía y del comportamiento de las llamas en relación a las condiciones locales, especialmente topográficas y el viento (velocidad y dirección). Esta producción energética se denomina intensidad, y que depende esencialmente de la velocidad de reacción, de la profundidad del estrato superficial de combustibles, también del poder calorífico del material en combustión, del contenido de humedad de la vegetación y los minerales integrados al suelo. La combinación de todos estos componentes, producen un valor de energía, normalmente expresado en kilocalorías de calor radiante que se propaga por los estratos horizontal y vertical del material en ignición. Se trata de un proceso dinámico y complejo pues en él pueden interactuar una diversidad de tipos de combustibles y factores externos que aceleran o retardan el proceso de liberación de energía, entre ellos el viento y la columna de convección de gases incandescentes.

Los incendios forestales en Chile

Chile destaca por poseer un buen sistema estadístico de registro de incendios forestales, desde el año 1986

en adelante. La dinámica de la ocurrencia y daños ha podido ser estudiada a lo largo de este período, evidenciándose importantes cambios en la recurrencia de episodios críticos a partir de 1998, que es cuando en el país se presentan con mayor frecuencia e intensidad los episodios prolongados de sequías y consecuentemente, un aumento en la condición de peligro. En la fig. 1 se observa una síntesis del número de incendios en los últimos 55 años. Las bajas cifras observadas desde 1986 hacia atrás se deben principalmente a que en esos años no se contaba con estadísticas completamente fiables, siendo muy esperable que la cantidad de incendios haya experimentado una tendencia similar a la observada en los tiempos presentes.

Respecto a los daños ocasionados por incendios forestales en Chile, las cifras son en general estables en el tiempo, salvo la temporada 2016-2017, en donde se quemaron cerca de 575.000 hectáreas entre bosques, matorrales, pastizales y plantaciones forestales. La variabilidad de estas cifras ha sido notable, posiblemente debido a la escasez de datos con anterioridad a 1990, y también por cambios en la dinámica de la ocurrencia y causalidad en los últimos 15 años. En la temporada 2016-2017 ocurrieron los más grandes y desastrosos incendios forestales en la historia contemporánea de Chile (Bowman *et al.*, 2017). En sólo 3 meses, miles de hectáreas de bosque nativo, matorral y plantaciones fueron arrasadas por el fuego, acentuando aún más la necesidad de desarrollar iniciativas y estudios para la restauración de ecosistemas degradados por el fuego. Como se indicaba anteriormente, se combinaron distintos

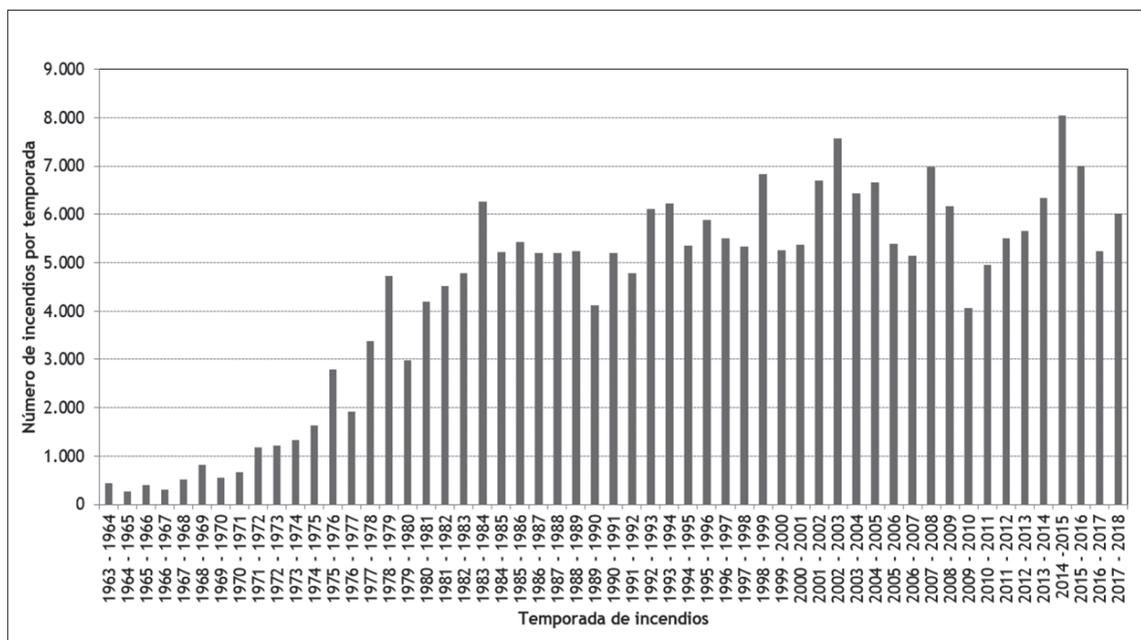


Fig. 1 - Número de incendios forestales en Chile, desde 1963 (Fuente: Corporación Nacional Forestal (CONAF)).

Fig. 1 - Number of wildfires in Chile, since 1963 (Source: National Forestry Corporation (CONAF)).

factores causales de los grandes incendios forestales: sequía acumulada, alta carga de combustible seco y liviano, condiciones favorables de continuidad horizontal y vertical del material vegetal, y factor meteorológico local expresado en altas temperaturas y fuertes vientos que se desarrollaron en toda la región central de Chile. Estos factores, permitieron el desarrollo de una alta condición de peligro en la propagación, la cual fue expresada en la ocurrencia y posterior crecimiento de los incendios forestales (fig. 2).

Sin embargo, paralelo a estos efectos, el fuego actúa como factor selectivo que trae como consecuencia la adaptación de organismos vivos, adaptación que llega en ocasiones hasta la dependencia. En la vegetación mediterránea de Chile se encuentran varias especies que exhiben adaptaciones al fuego, entre ellas la Palma Chilena (*Jubaea chilensis* Mol.), Peumo (*Criptocarya alba* Mol. Looser), Boldo (*Peumus boldus* Mol.), Litre (*Lithraea caustica* Mol.), y Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) (Gajardo, 1994; Quintanilla, 1999). No obstante,

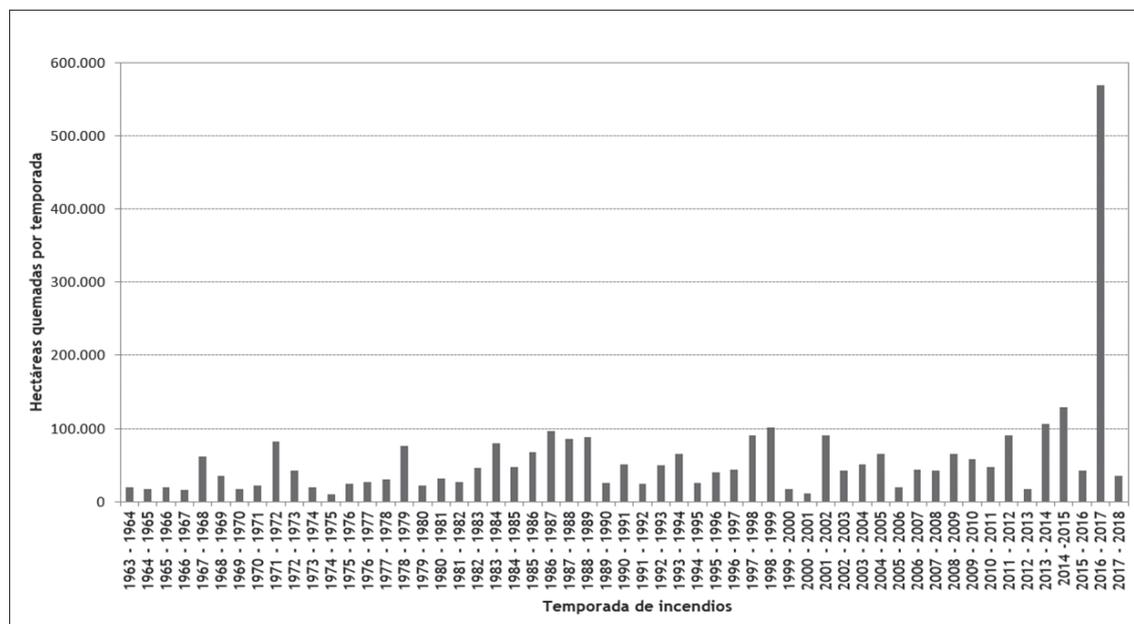


Fig. 2 - Daño ocasionado por incendios forestales en Chile, desde 1963 (Fuente: Corporación Nacional Forestal (CONAF)).

Fig. 2 - Area burned by wildfires in Chile, since 1963 (Source: National Forestry Corporation (CONAF)).

En los últimos 10 años el promedio ha aumentado a 5.864 incendios/año y superficie afectada de 124.957 has., es decir, más de dos veces la cifra histórica desde 2007 hacia atrás. En 2018 las cifras han sido más bajas, principalmente por un cambio en las condiciones climáticas de Chile Central, lo que trajo consigo mayores precipitaciones y menores temperaturas en la zona donde se registraron la mayor cantidad de incendios en 2017.

Los incendios de vegetación tienen serias consecuencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas, aun en aquellos aparentemente adaptados a fuegos frecuentes. El fuego puede destruir completamente extensas áreas de vegetación nativa, así como de plantaciones forestales, con el consiguiente impacto sobre los servicios ecosistémicos y los daños económicos. Se ha reportado que los daños del fuego sobre los suelos pueden también ser importantes; en particular facilitan la pérdida de suelo por erosión y la pérdida de nutrientes como consecuencia de la formación de capas de hidrofobicidad (García-Chevesich *et al.*, 2010; Pausas *et al.*, 2008).

el aumento de la fragmentación de paisajes, el cambio en el uso del suelo y la creciente demanda de agua, ha ocasionado el aumento en la vulnerabilidad de muchas especies del bosque nativo de Chile Central.

Dado su valor ecológico, en especial su importante biodiversidad, los bosques nativos de Chile mediterráneo requieren protección inmediata. Esta necesidad es aún más urgente en vista de los catastróficos incendios de vegetación recientes y la probabilidad cierta de que puedan ocurrir otros, en virtud de la severidad de las condiciones meteorológicas que se vislumbran, serán cada vez más evidentes.

Los estudios de caracterización de la conducta del fuego en los incendios de vegetación han experimentado un notable aumento en los últimos años, a la par del incremento de la frecuencia y la severidad de los incendios en distintas regiones del mundo (Ferreira-Leite *et al.*, 2016; Roldán-Zamarrón *et al.*, 2006; Keeley *et al.*, 2008; Costafreda-Aumedes *et al.*, 2017), como también por las grandes dimensiones que logran

alcanzar en condiciones meteorológicas extremas para la propagación del fuego (Ferreira-Leite *et al.*, 2017; Franca Rocha, 2017). Estos dos últimos autores abordan el fenómeno de expansión de grandes incendios forestales ocurridos en Brasil, mientras que Ferreira-Leite *et al.*, (2015) abordan distintos estudios de caso sobre mega incendios ocurridos en los últimos años en el mundo. Este conocimiento es trascendente ya que contribuye por una parte a las iniciativas para la prevención, manejo y combate de los incendios y por la otra el desarrollo de métodos para la evaluación de los daños actuales y potenciales causados por los incendios. Pero además, y posiblemente más importante, contribuyen al diseño de estrategias adecuadas para la recuperación de los ecosistemas dañados por el fuego. En esta dirección apunta la estimación de los daños potenciales y la condición de peligro en los procesos de recuperación, basados en la evaluación de la intensidad y severidad de los incendios (Keeley, 2009). Desde un punto de vista ecológico, el estudio del comportamiento del fuego en paisajes con permanentes perturbaciones relacionadas a los incendios forestales, ayudan a entender la dinámica de respuesta de la vegetación, por ejemplo en ecosistemas mediterráneos (Pausas *et al.*, 2008), como también en el entendimiento de los daños y efectos a distintas escalas de análisis (Keeley *et al.*, 2008). Los estudios de conducta del fuego tienen varios antecedentes en Chile (Julio 2007; Castillo *et al.*, 2012; Fernández *et al.*, 2010) así como en otras regiones mediterráneas del mundo. Los resultados muestran las relaciones entre las características de la vegetación, el clima y el cambio climático y la conducta del fuego (intensidad, severidad) y las implicaciones para la recuperación (Săglam *et al.*, 2008, en Turquía; De Luis *et al.*, 2004, en España; Litell *et al.*, 2010, en USA, entre otros).

Los incendios ocurridos en 2017

La propagación de los grandes incendios forestales que afectaron a la región central del país, comprometieron el patrimonio forestal de tres regiones (fig. 3). La ocurrencia casi simultánea de tres eventos críticos, conformaron un escenario de comportamiento extremo del fuego, promovido principalmente por el efecto aditivo de los factores climáticos, y de continuidad y carga de combustible forestal.

Métodos aplicados para el análisis de severidad

La severidad de un incendio forestal es un término descriptivo que integra los cambios físicos, químicos y biológicos ocurridos en un lugar como consecuencia del fuego (White *et al.*, 1996). Dicho de una manera más simple, corresponde a la caracterización de los daños en el ambiente, en sus componentes bióticos y abióticos. En el contexto de ecosistemas mediterráneos, existen estudios

que tipifican este concepto mediante la definición de escalas de afectaciones, tal como lo plantean Castillo *et al.*, (2014) para ecosistemas de bosque esclerófilo en Chile Central, o Keeley *et al.*, (2008) en el estudio de matorrales mediterráneos en California. En cualquiera de los casos, las diferencias observadas en severidad están íntimamente relacionadas con el impacto causado por la cantidad de calor desprendida. El análisis de la severidad resulta de interés por varios motivos: para la generación de una cartografía evaluativa post-incendio, con el propósito de orientar las labores de restauración, extracción de madera, seguimiento en la regeneración y protección del suelo frente a la erosión, entre otras acciones. También la evaluación de la severidad proporciona valiosa información para la construcción de modelos probabilísticos de simulación de incendios a base del estudio de las relaciones existentes entre severidad y parámetros ambientales (Kushla y Ripple, 1997).

En este mismo contexto de la severidad, puede ser evaluada mediante indicadores de campo, pero también por métodos indirectos (últimamente los más desarrollados y utilizados), a través de los sensores remotos. De esta manera, los efectos del fuego tales como pérdida de biomasa forestal, los fenómenos de calcinación del terreno, alteraciones del color de la vegetación y suelo, y otras alteraciones posibles de identificar a distintas escalas, pueden ser identificadas mediante distintos productos satelitales, aun cuando es necesario tomar ciertos resguardos respecto a la calidad de los datos a interpretar y los factores de corrección atmosférica y geométrica de las imágenes que deben ser considerados para asegurar la mejor calidad en los datos adquiridos, dependiendo de la naturaleza del sensor (White *et al.*, 1996), y que influyen directamente en la calidad de los datos. En este contexto se ha realizado un análisis de severidad apoyando las labores de post análisis, entregando soporte a la restauración, monitoreo y seguimiento de los incendios forestales de magnitud en Chile. Para el desarrollo de esta tarea, y en el contexto de los sensores remotos, se han definido técnicamente los conceptos de severidad e índice normalizado, para posteriormente efectuar los cálculos para cada uno de los tres mega-incendios forestales, indicados en la fig. 3.

a) Severidad del incendio (Burn Severity): Evaluación cualitativa del pulso de calor dirigido hacia el suelo durante un incendio. La severidad del incendio relaciona el calor del suelo (calentamiento), el consumo de combustibles gruesos y mantillo, consumo de la hojarasca y capa orgánica bajo los árboles y matorrales aislados, y mortalidad de partes enterradas de las plantas. Fuente: National Wildfire Coordination Group (2008) Glossary of Wildland Fire Terminology. El grado en que un sitio ha sido alterado perturbado por el fuego, en líneas generales un producto de la intensidad del fuego y el tiempo de residencia.

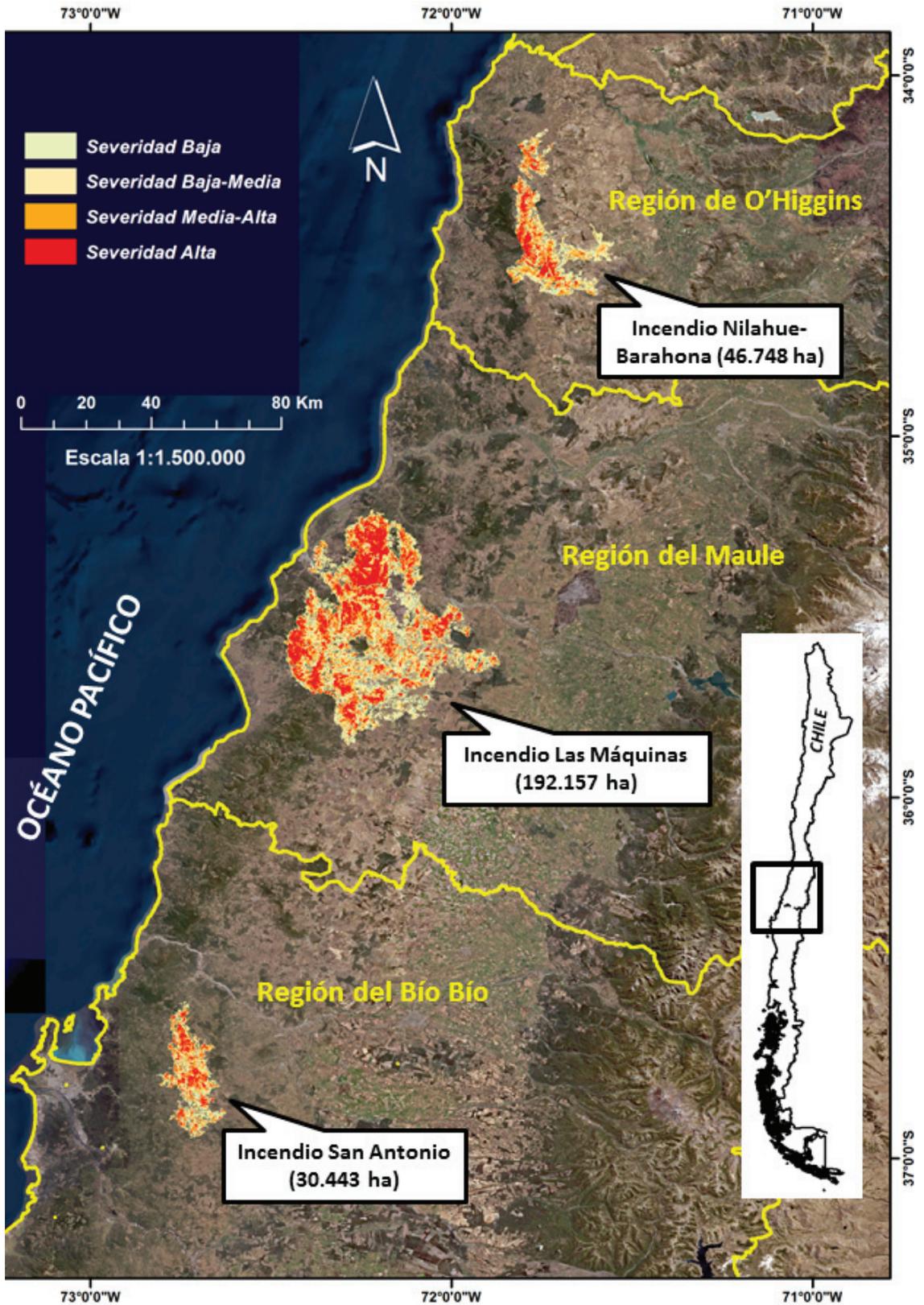


Fig. 3 - Detalle de los tres grandes incendios forestales que afectaron a Chile en la temporada 2017 (Fuentes: Conaf - Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile).

Fig. 3 - Detailed representation of the three main wildfires that occurred in Chile in 2017 (Sources: Conaf and Wildfire Laboratory, University of Chile).

- b) Índice Normalizado de Quema (NBR): es un índice que enfatiza la respuesta espectral de la vegetación afectada por el fuego mediante el uso de las bandas Landsat TM/ETM (infrarrojo cercano e infrarrojo medio), con el fin de proveer el mejor contraste entre salud fotosintética y la vegetación quemada. El NBR se calcula para la escena pre-incendio y post-incendio mediante la siguiente ecuación:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$
, donde NIR es la banda del infrarrojo cercano, y SWIR en el infrarrojo medio.

Cuanto más próximas se encuentran las firmas espectrales menor severidad. Cuanto mayor sean las diferencias entre las firmas mayor destrucción vegetal existirá y, por tanto, es posible obtener un mayor grado de severidad de incendios durante los análisis. A medida que el territorio se recupera los niveles de reflectividad de la banda NIR ascenderán mientras comenzará una mayor absorción en el SWIR.

- c) Diferencial del Índice Normalizado de Quema (dNBR): Un diferencial de imagen NBR, o imagen de cambio, creado donde el NBR post-incendio es sustraído desde el NBR pre-incendio. El dNBR puede ser usado para discriminar áreas quemadas de las no quemadas e identificar clases de severidad de quema de la vegetación.

El dNBR es calculado como: $dNBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio}$.

De esta manera en el proceso de cálculo, el análisis de la severidad de un incendio se obtiene de la diferencia (resta) del Índice Normalizado de Quema (dNBR). Este ofrece una medida cuantitativa del cambio medioambiental producido por el incendio, o diferencia temporal (Key and Benson, 1999; Key and Benson, 2004). El dNBR representa un índice escalado de la magnitud del cambio causado por el fuego (Eidenshink *et al.*, 2007; van Wagtenonk *et al.*, 2004).

Para el caso de los incendios acá estudiados, se consideraron los umbrales de dNBR determinados por diversos autores para casos de ecosistemas mediterráneos afectados por incendios. La severidad en este indicador

es clasificada por Key y Benson (2006), en el análisis post-incendio en paisajes vegetales con recurrencia de incendios. El producto satelital utilizado es Landsat TM/ETM+, con previas correcciones geométricas y atmosféricas, dando como resultado una clasificación de referencia, indicada en la TABLA I.

TABLA I - Clasificación utilizada para rangos de severidad basado en dNBR.

TABLE I - Classification used for severity ranges based on dNBR.

Rango	Categoría
-0.1 a 0.1	No quemado
0.1 a 0.27	Severidad baja
0.27 a 0.44	Severidad moderada a baja
0.44 a 0.66	Severidad moderada a alta
> 0.66	Severidad alta

Referencia/Sorce: Key & Benson, 2006.

Resultados

En consideración a los datos obtenidos para las superficies afectadas, y la disponibilidad de información satelital para el cálculo de la severidad, fue posible determinar la severidad clasificada para los tres principales incendios forestales ocurrido en 2017 en Chile (fig. 4). En esta estadística, se consideraron las cuatro categorías que representan las frecuencias más altas de daños, tomando para ello el indicador dNBR. Los resultados se muestran en la TABLA II.

En los tres incendios analizados, el 100 % de superficie se alcanza contabilizando las áreas no quemadas al interior de los perímetros identificados en el análisis satelital.

Las afectaciones de las categorías más altas se concentran principalmente en formaciones de bosque y matorral denso y semidenso, con formaciones de especies nativas del área mediterránea, seguidos de mezclas de matorrales y plantaciones. Se trata de ecosistemas que dan fuente de trabajo a miles de personas en el ámbito forestal y agroganadero. Los efectos de los incendios fueron variados, concentrándose no precisamente en la pérdida de superficie arbolada, sino más bien en el deterioro del paisaje vegetal, efectos en el suelo, cuencas hidrográficas,

TABLA II - Resumen de los valores de severidad para cada incendio evaluado. Enero de 2017. Chile.

TABLE II - Summary of severity values for each wildfire analyzed. January 2017. Chile.

Nombre incendio	Superficie (ha)	Severidad (%)			
		Baja	Moderada a Baja	Moderada a Alta	Alta
Nilahue-Barahona	46.748	23,7	24,4	21,8	17,4
Las Máquinas	192.157	21,3	20,3	18,4	22,5
San Antonio	30.443	23,0	24,5	22,0	18,7
Totales	269.348	68,0	69,2	62,2	58,6

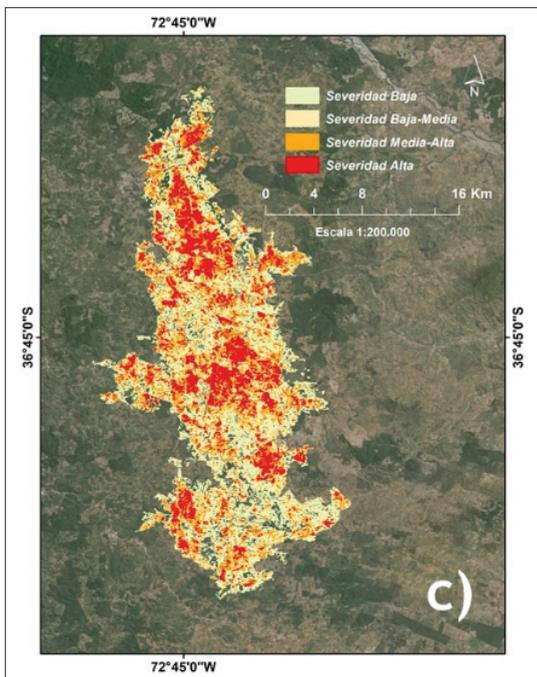
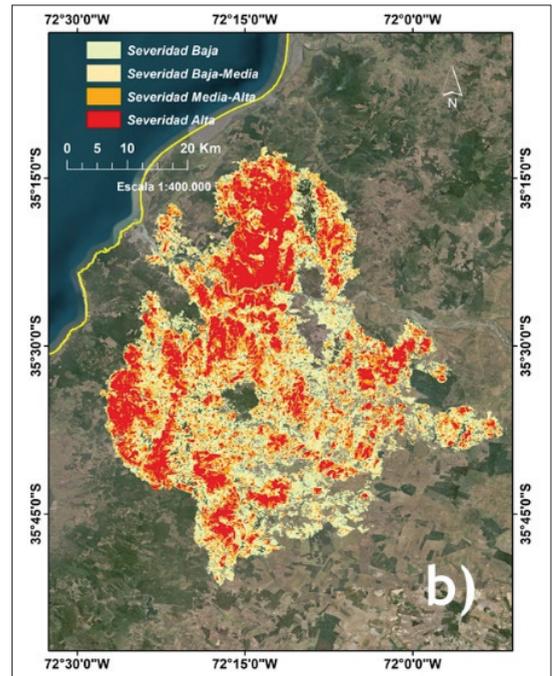
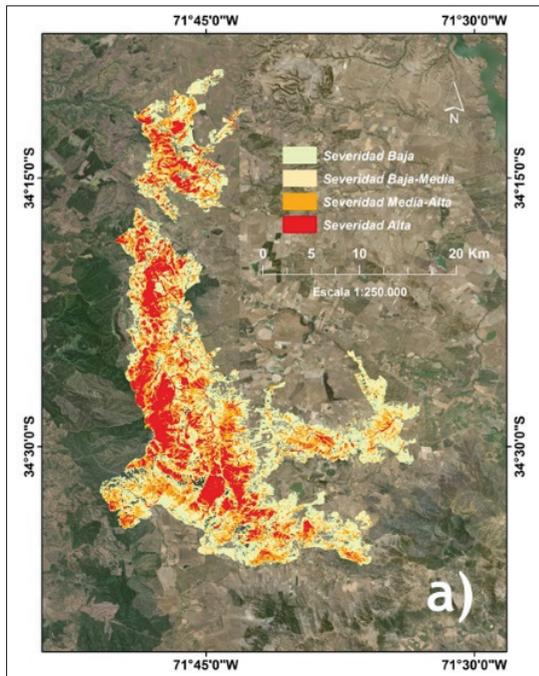


Fig. 4 - Mapas de severidad para
 a) Nilahue-Barahona,
 b) Las Máquinas,
 c) San Antonio
 (Fuentes: Conaf - Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile).

Fig. 4 - Severity maps for
 a) Nilahue-Barahona,
 b) Las Máquinas,
 c) San Antonio
 (Sources: Conaf and Wildfire Laboratory, University of Chile).

desabastecimiento industrial y daños a la población de diversas especies de aves, mamíferos e insectos. Uno de los ecosistemas mayormente afectados por el paso del fuego corresponde al bosque de ruil (*Nothofagus alessandrii*), el cual fue estudiado por Valencia *et al.* (2018), posterior al incendio de Las Máquinas (Región del Maule en Chile Central), también mediante el empleo de dNBR basado en imágenes Landsat. Utilizando también la escala de Key y Benson (2006), se consideraron 10 puntos de muestreo, en donde la severidad se concentra preferentemente en categoría ‘alta’, con 29,6 % total de

afectación, respecto al área total estudiada. Ello lleva como consecuencia severos efectos sobre la sobrevivencia de poblaciones adultas de ruil, aun cuando se trata de una especie que forma extensos renovales asociados a la presencia de disturbios como el fuego.

Discusión

Los rangos aplicados al cálculo de la severidad post-fuego, pueden tener variantes, dependiendo del tipo de ecosistema estudiado, la intensidad y extensión del

incendio, la temporada o factor estacional, y en el caso de las aplicaciones basadas en teledetección, por la disponibilidad de imágenes cercanas a la fecha del disturbio (Díaz-Delgado, 1999). Por ejemplo, Santos *et al.*, (2017), utilizan imágenes NOAA y MODIS (Aqua/Terra), para detectar focos de calor en un área de Parque Nacional en Brasil, aportando antecedentes respecto a las consecuencias de los incendios, expresados posteriormente en una cartografía de severidad. Por ello, los umbrales de severidad pueden ser planteados mediante la definición de otros rangos. Mediante el uso de otros productos satelitales, los límites de 1,25 y 2,25 son comúnmente usados (e.g. Soverel *et al.*, 2010; Cansler y McKenzie, 2012), mientras que no existe un consenso para el límite que separa las zonas sin quemar de las afectadas por baja severidad. Por ejemplo, Miller y Thode (2007) utilizan 0,1 y Picotte y Robertson (2011) utilizan 0,75. En este caso se usaron las marcas de clase de los rangos no quemado y bajo de la clasificación de Key y Benson (2006).

En cuanto al sentido que posee este artículo en cuanto a la clasificación de la severidad, corresponde a una cuantificación de los efectos a gran escala que produce la propagación descontrolada del fuego, y que en muchos casos compromete una diversidad de bienes y servicios ambientales que impactan directamente a la población, a las instituciones de protección, y que además colocan de manifiesto la necesidad de establecer mejores prácticas preventivas para la prevención del peligro de incendios forestales.

La severidad de los incendios en el contexto de Chile

A raíz de los extensos y severos daños ocasionados por la pasada temporada de incendios forestales 2016-2017, se vio en evidencia la necesidad de efectuar una profunda revisión de sus planes, protocolos, programas y aspectos legislativos relacionados a la gestión en manejo del fuego, porque claramente existen tareas pendientes, y que por áreas temáticas resultan inabordables todas al mismo tiempo, lo que implica la necesidad de plantear prioridades y aportar con ello al fortalecimiento del esquema político e institucional al servicio de la protección de los recursos forestales. Se describen a continuación algunos de estos ejes o líneas prioritarias, sobre las cuales el Gobierno de Chile, a través del Ministerio de Agricultura, se encuentra desarrollando nuevas estrategias pensando en la temporada de incendios 2018-2019.

a) Silvicultura preventiva: La propagación del fuego en ambientes rurales requiere el establecimiento de normas sobre distanciamientos en cortafuegos y cortacombustibles, dependiendo del área a proteger. En las áreas de interfaz urbano-forestal de Chile, los últimos incendios ocurridos en

2017 evidenciaron la falta de medidas silvícolas asociadas al manejo del combustible en áreas cercanas a edificaciones y viviendas, como también en la disponibilidad de biomasa en bosques y plantaciones, como factor de peligro potencial para la propagación de los incendios. Por lo anterior, en Chile se han constituido grupos de trabajo para proponer estándares en el ancho de fajas libres de combustibles, para aminorar de esa forma la intensidad o calor radiante de las llamas. Una primera propuesta elaborada para zonas de interfaz con predominio de pastizales, plantea un ancho mínimo de 10 metros y 20 en presencia de arbustos y arbolado, mientras que hacia el interior de los bosques, la recomendación es realizar silvicultura preventiva hasta una distancia de 80 metros luego de la faja de cortafuegos y cortacombustibles. En el caso del comportamiento del fuego en superficie existen modelos matemáticos que permiten recrear el avance en propagación libre; sin embargo, existen escasos antecedentes respecto al avance por copas, especialmente en incendios de muy alta intensidad, lo cual no permite aún proponer modelos matemáticos que se adecúen a las condiciones de bosques en Chile Central.

b) Modelación de combustibles: Chile cuenta con una cartografía de modelos de combustibles que agrupa la vegetación en cinco categorías: Pastizales, Matorrales, Arbolado Nativo, Plantaciones Forestales, y otros tipos de combustibles susceptibles de ser considerados en propagación de incendios forestales. Estas categorías permiten la definición de 34 tipos de combustibles que definen y representan la cobertura forestal en Chile (Castillo *et al.*, 2013), no obstante, existen otros modelos intermedios que son necesarios estudiar y que están asociados a mezclas entre plantaciones y bosques, y también en la caracterización de la vegetación en zonas de interfaz urbano-forestal. Esta modelación permite, entre otros beneficios, disponer de una base cartográfica actualizada para el desarrollo e implementación del simulador de incendios forestales, desarrollado en Chile desde el año 1993, y que ha permitido respaldar importantes programas de prevención a lo largo del país, junto con disponer de una base científica basada en el estudio del comportamiento del fuego en distintas situaciones de bosques, basado en el conocimiento de las propiedades físicas, del potencial de propagación del fuego en cada tipo de vegetación, y la resistencia al control del fuego mediante el empleo de herramientas manuales para la construcción de líneas de contención. Actualmente, esta modelación necesita ser revisada nuevamente, para ampliar la gama de situaciones vegetacionales presente en Chile, y con

ello, perfeccionar las tablas de coeficientes técnicos que permiten modelar el avance del fuego en distintas situaciones de peligro de incendios (Castillo *et al.*, 2016).

- c) Grado de Peligro: Las condiciones meteorológicas extremas de temperatura, humedad relativa y la velocidad del viento, ocasionan entre otros efectos, una disminución en la humedad de los combustibles forestales y que en consecuencia, producen un aumento en el nivel de peligro para la propagación del fuego. En Chile, estas condiciones han sido cada vez más extremas por la prolongada sequía y la acumulación de biomasa seca generada por rebrotes de renuevos en períodos de invierno. Se suma además la escasez de medidas efectivas para el control del peligro mediante silvicultura preventiva, lo que ha ocasionado adicionalmente que el potencial de propagación siga en aumento, especialmente en aquellas áreas de alta continuidad de plantaciones y también en zonas de interfaz urbano-forestal. El grado de peligro en Chile, se concibe como la combinación de factores fijos y variables, que condicionan la condición de riesgo potencial de incendios y además el escenario de propagación que tendrá el fuego bajo condiciones meteorológicas, topográficas y de las características de la vegetación. Actualmente este tipo de sistema de pronóstico se lleva a cabo mediante el Índice de Grado de Peligro, que contempla macro-regiones en Chile para la determinación de la ocurrencia potencial (Castillo, 2015). Esta línea de investigación necesita mayor desarrollo, integrando aspectos relacionado a la teledetección y el análisis de series temporales que involucren antecedentes climáticos más detallados que den cuenta de la susceptibilidad de la vegetación a la ignición e inflamabilidad. Actualmente el Grado de Peligro en Chile se sustenta en las ecuaciones de índice de riesgo de incendios forestales, cuya operación sigue estando vigente para todas las regiones de Chile.
- d) Comportamiento del fuego: Conceptualmente corresponde al conjunto de efectos de carácter físico y mecánico que se observan en el ambiente afectado por la propagación del fuego en ambientes rurales (Castillo *et al.*, 2016). Esta definición, no necesariamente representa el consenso de autores en comportamiento del fuego, pero incluye los principales procesos propios de la propagación del fuego, y cuyas características de desarrollo dependen de las variables (longitud de llama, intensidad calórica, efecto scorch), y los factores ambientales (pendiente, exposición, las propiedades físico-químicas y estructurales de la vegetación combustible, contenido de humedad de los tejidos vegetales, y el viento). En todos estos componentes el fuego se propaga dependiendo de las condiciones favorables para el crecimiento de un incendio. En condiciones de extrema sequía, acumulación de vegetación (carga), baja humedad del aire y altas temperaturas, el fuego puede desarrollar un comportamiento extremo. El Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile ha determinado valores medios de propagación superficial del fuego en condiciones mediterráneas normales en un año promedio, en torno a 3,2 ha/hora (Castillo y Rodríguez y Silva, 2015a). Este valor ha sido determinado mediante las expresiones matemáticas del sistema chileno KITRAL, diseñado y adaptado para las condiciones de este país. El conocimiento de la tasa de propagación del fuego en distintas condiciones ambientales, proporcionan pautas para la determinación de tiempos de respuesta frente al combate de los incendios, tal como se ha estudiado en distintas situaciones de propagación en ambientes mediterráneos (Castillo y Rodríguez y Silva, 2015b). No obstante, en un escenario de comportamiento extremo, especialmente en los últimos mega incendios forestales ocurridos en 2017, los valores de propagación y la intensidad de los frentes de avance, reportaron valores muy superiores a los valores que normalmente se desarrollan en comportamiento extremo. Lo anterior lleva entonces a la necesidad de replantear nuevos escenarios en modelación de la propagación, bajo un escenario de extremo peligro de incendios forestales. En Chile, este aumento en la condición de peligro ha ocasionado un alza significativa en la cantidad de superficie afectada, aun cuando la cantidad de incendios sólo ha experimentado una leve alza en los últimos 5-10 años.
- e) Ecología del fuego y restauración: Corresponde a un área del conocimiento en manejo del fuego, que ha experimentado avances importantes basados en la experiencia acumulada, principalmente en incendios en bosque nativo. Sin embargo, existen líneas de desarrollo aún poco exploradas en este campo, relacionadas principalmente con la condición del suelo post-incendio y con la aplicación más precisa de indicadores de severidad a escala local. Particularmente en Chile, la mayor proporción del daño en incendios se concentra en la región centro-sur, donde coexiste el bosque nativo esclerófilo con otras formaciones vegetales, entre ellas las plantaciones con especies exóticas destinadas a la producción forestal. En todos estos casos, las iniciativas en restauración ecológica se han concentrado preferentemente en acciones de tipo físicas sobre el suelo y en la plantación asis-

tida para recuperar sectores calcinados. No obstante existe un área de desarrollo todavía débil, y que corresponde a la siembra directa y protección inmediata al suelo calcinado mediante hidrosiembra, mulch y trabajo localizado mediante una evaluación sectorizada y detallada de la severidad en el sustrato superficial. Dada la extensa superficie afectada por los últimos incendios, actualmente existen en Chile numerosas cuencas hidrográficas que poseen alto riesgo de aluviones por la carencia de una superficie vegetal inicial que permita amortiguar el efecto de la escorrentía producto de las lluvias. Esto es materia de investigación, en donde se necesita la experiencia de nuevos proyectos en el área de restauración ecológica.

Comentarios finales

Chile se enfrenta a un nuevo escenario de peligro de incendios forestales, bajo la necesidad de ampliar la investigación en distintas áreas del manejo del fuego. Una revisión de los últimos episodios de fuegos indican la urgencia de establecer protocolos de manejo de la vegetación basados en la silvicultura preventiva que permitan disminuir la carga de combustible y con ello atenuar el efecto potencial de la propagación del fuego, especialmente en zonas de alta continuidad de vegetación. Paralelamente es necesario avanzar en la modelación de tipos de vegetación combustibles, que permitan el mejor funcionamiento de los modelos de pronóstico de incendios forestales. Adicionalmente se instala la necesidad de proponer nuevos estándares de cortafuegos y corta-combustibles, no sólo al interior de los bosques sino también en zonas de interfaz urbano-forestal. No obstante existen estándares propuestos en esta materia, no están respaldados por estudios confiables que propongan cifras específicas para cada condición de bosque. En este sentido, la nueva Ley de Incendios Forestales que se desea promulgar prontamente en Chile, deberá indicar con total claridad los estándares técnicos por los cuales será necesario efectuar intervenciones silvícolas a los bosques, de manera de poder disminuir la condición de peligro frente a la propagación del fuego.

Agradecimientos

A la Sección Análisis y Predicción Departamento de Control de Incendios Forestales Gerencia de Protección contra Incendios Forestales de la Corporación Nacional Forestal de Chile, por proporcionar los antecedentes base para los análisis satelitales y generación de resultados, y al Proyecto CONAF 008/2016 por proporcionar antecedentes locales sobre afectaciones en bosque nativo, que ayudaron a complementar los análisis acá descritos.

Bibliografía

- Bowman, D., Moreira, A., Kolden, C., Chávez, R., Muñoz, A., Salinas, F., González, A., Rocco, R., de la Barre, F., Williamson, G., Borchers, N., Cifuentes, L., Abatzoglou, J., Johnston, F. (2018). Human-environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1084-1>
- Cansler, A., McKenzie, D. (2012). Climate, fire size, and biophysical setting control fire severity and spatial pattern in the northern Cascade Range, USA. *Ecological Applications*, 24(5), 2014, 1037-1056.
- Castillo, M., Molina, J-R., Rodríguez y Silva, F., García-Chevesich, P., Garfias, R. (2016). A system to evaluate fire impacts from simulated fire behavior in Mediterranean areas of Central Chile. *Science of the Total Environment*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.139>
- Castillo, M. (2015). Diagnosis of Forest Fires in Chile. In: *Wildland Fires - A worldwide reality*. Book. Elsevier, 211-224. Nova Publishers.
- Castillo, M., Rodríguez y Silva, F. (2015a). Quantitative analysis of forest fire extinction efficiency. *Forest Systems* 24(2). 032. 9p (electronic version). DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2015242-06644>
- Castillo, M., Rodríguez y Silva, F. (2015b). Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires. A case study: Mediterranean - Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(1): 97-107.
- Castillo, M., Julio, G., Garfias, R. (2014). Current status of risk and prognosis of forest fires in Chile. Progress and future challenges. *Wildfire Hazards and Disasters*. Book. Elsevier Inc. Chapter 4. 59-75.
- Castillo, M., Molina, J-R., Rodríguez y Silva, F., Julio, G. (2013). Fire vulnerability model in Mediterranean ecosystems of South America. *Ecological Informatics* 13, 106-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.06.004>
- Castillo, M., Garfias, R., Julio, G., González, L. (2012). Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. *Interiencia* 37: 796-804.
- Costafreda-Aumedes, S., Comas, C., Vega-García, C. (2017). Human-caused fire occurrence modelling in perspective: a review. *International Journal of Wildland Fire* 26, 983-998.
- De Luis, M., Baeza, M., Raventos, J., Hidalgo, J. (2004). Fuel characteristics and fire behaviour in mature Mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire* 13: 79-87.

- Díaz-Delgado, X. (1999). Empleo de imágenes de teledetección para el análisis de los niveles de severidad causados por el fuego. Teledetección, avances y aplicaciones. *VIII Congreso Nacional de Teledetección*. Albacete, España, 1999, 252-255.
- Eidenshink, J., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z. (2007). A project for monitoring trends in burn severity. *Fire Ecology* 3(1): 3-21.
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M., Montenegro, G. (2010). *Restauración Ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales*. Pontificia Universidad Católica de Chile y Corporación Nacional Forestal. 162 p.
- Ferreira-Leite, F., Ganho, N., Bento-Gonçalves, A., Botelho, F. (2017). Iberian atmospheric dynamics and large forest fires in mainland Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology* 247: 551-559.
- Ferreira-Leite, F., Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Nunes, A., Lourenço, L. (2016). Incidence and recurrence of large forest fires in mainland Portugal. *Natural Hazards* 84(2): 1035-1053.
- Ferreira-Leite, F., Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., da Vinha, L. (2015). Mega-Fires Around The World: A Literature Review In: *Wildland Fires: A Worldwide Reality* Edited by: António José Bento Gonçalves and António Avelino Batista Vieira, 15-34, Hauppauge New York: Nova Science Publishers ISBN:978-1-63483-397-4.
- Franca Rocha, W., Moura, S., dos Santos, B., Bento-Gonçalves, A., Ferreira-Leite, F. (2017). Are There Mega Fires in Brazilian Savannas?. The National Park of Chapada Diamantina Case (Bahia, Brazil) In: *Wildfires: Perspectives, Issues and Challenges of the 21st Century* Edited by: António José Bento Gonçalves, António Avelino Batista Vieira, Maria Rosário Melo Costa, and José Tadeu Marques Aranha, 29-54, Hauppauge New York: Nova Science Publishers ISBN:978-1-53612-890-1.
- Gajardo, R. (1994). *La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica*. Editorial Universitaria, Santiago de Chile. 165 p.
- García-Chevesich, P., Pizarro, R., Stropki, C., Ramírez de Arellano, P., Folliott, P., DeBano, L., Neary, D., Slack, D. (2010). Formation of post-fire water-repellent layers in Monterrey pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in South-Central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10, 399-406.
- Garfias, R., Castillo, M., Ruiz, F., Vita, A., Bown, H., Navarro, R. (2018). Remanentes del bosque esclerófilo en la zona mediterránea de Chile Central: caracterización y distribución de fragmentos. *Interciencia*, 43(9): 655-663.
- Julio, G. (2007). *Formulación de Lineamientos Políticos y Estratégicos para la Protección contra Incendios Forestales en Chile*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España. 341 p.
- Keeley, J. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18, 116-126.
- Keeley, J., Brennan, T., Pfaff, A. (2008). Fire severity and ecosystem responses following crown fires in California shrublands. *Ecological Applications* 18, 1530-1546.
- Key, C., Benson, N. (1999). The normalized burn ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. US Geological Survey Northern Rocky Mountain Science Center. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center.
- Key, C.H. and N.C. Benson, (2006). Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index, and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, S. Sutherland, and L.J. Gangi. 2006. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD: LA1-51.
- Key, C.H., and Benson, N.C. (2004). Remote Sensing Measure of Severity: The Normalized Burn Ratio. In *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C.
- Kushla, J., Ripple, W. (1997). The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest Ecology and Management*. Volume 95, Issue 2, 97-107. ISSN 0378-1127.
- H. Key, N. C. Benson, & L. J. Gangi (eds), Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, p. LA1-16.
- Littell, J.S., Oneil, E.E., McKenzie, D. (2010). Forest ecosystems, disturbance, and climatic change in Washington State, USA. *Climatic Change* 102: 129-158.
- Miller, J., Thode, A. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109: 66-80.
- NWCG (2008). *Introduction to Wildland Fire Behavior*. Training Development Program - National Interagency Fire Center - 3833 S. Development Avenue, Boise, Idaho 83705, 62 p.

- Pausas J., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo, R. (2008). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? - A review. *International Journal of Wildland Fire* 17, 713-723.
- Picotte, J., Robertson, K. (2011). Timing Constraints on Remote Sensing of Wildland Fire Burned Area in the Southeastern US. *Remote Sensing* 3, 1680-1690.
- Quintanilla, V. (1999). Modificaciones por efecto del fuego en el bosque esclerófilo de quebradas húmedas de Chile Central y su incidencia en la Palma chilena. *Terra Australis* 44: 7-18.
- Roldán-Zamarrón, A., Merino de Miguel, S., González, F., García, S., Cuevas, J. (2006). Minas de Riotinto (South Spain) forest fire: Burned area assessment and fire severity mapping using Landsat 5-TM, Envisat-MERIS, and Terra-Modis post-fire images. *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences* 111, G04S11. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JG000136>
- Sağlam, B., Omer, K., Ertügrül, B., Bahar, D., Ismail, B. (2008). Estimating Fuel Biomass of Some Shrub Species (Maquis) in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 32: 349-356.
- Santos, S., Franca-Rocha, W., Bento-Gonçalves, A., Baptista, G. (2017). Quantificação e avaliação dos focos de calor no parque nacional da chapada diamantina e entorno no período de 2007 a 2016. *Revista Brasileira de Cartografia* 69(4): 701-712.
- Soverel, N., Perrakis, D., Coops, N. (2010). Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sensing of Environment* 114, 1896-1909.
- Valencia, D., Saavedra, J., Brull, J., Santelices, R. (2018). Severidad del daño causado por los incendios forestales en los bosques remanentes de *Nothofagus alessandrii* Espinosa en la Región del Maule de Chile. *Gayana Bot.* 75(1): 531-534. Comunicación breve.
- Van Wagtendonk, J., Root, R., Key, C. (2004). Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment* 92, 397-408.
- White, J., Ryan, K., Key, C., Running, S. (1996). Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire* 6, 125-136.