

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN EL VIGOR DE LA VEGETACIÓN  
AFECTADA POR EL MEGA-INCENDIO DE 2017 EN LA COMUNA DE  
EMPEDRADO, REGIÓN DEL MAULE, CHILE**

**FRANCISCO ANTONIO CAMPO ASCENCIO**

**Santiago, Chile**

**2020**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN EL VIGOR DE LA VEGETACIÓN  
AFECTADA POR EL MEGA-INCENDIO DE 2017 EN LA COMUNA DE  
EMPEDRADO, REGIÓN DEL MAULE, CHILE**

**EVALUATION OF VIGOR CHANGES IN VEGETATION AFFECTED BY THE  
MEGA-FIRE OF 2017 IN THE COMMUNE OF EMPEDRADO, REGION OF  
MAULE, CHILE**

**FRANCISCO ANTONIO CAMPO ASCENCIO**

**Santiago, Chile**


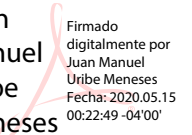

**2020**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN EL VIGOR DE LA VEGETACIÓN  
AFECTADA POR EL MEGA-INCENDIO DE 2017 EN LA COMUNA DE  
EMPEDRADO, REGIÓN DEL MAULE, CHILE**

Memoria para optar al Título Profesional de:  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**FRANCISCO ANTONIO CAMPO ASCENCIO**

<b>Profesor Guía</b>		<b>Calificaciones</b>
Sr. Cristian Mattar B. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.		7,0
<b>Profesores Evaluadores</b>		
Sr. Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo.	Juan Manuel Uribe Meneses  Firmado digitalmente por Juan Manuel Uribe Meneses Fecha: 2020.05.15 00:22:49 -04'00'	7,0
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,4

**Santiago, Chile**

**2020**

*A mi familia y amigos*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer especialmente a Karol, Cami, Giovanni y mi familia por acompañarme y apoyarme en este proceso.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
Objetivo General .....	5
Objetivos Específicos .....	5
MATERIALES Y MÉTODOS .....	6
Área de Estudio .....	6
Materiales .....	7
Métodos .....	10
RESULTADOS.....	13
Estimación del área afectada por el incendio .....	13
Determinación de la severidad de daño.....	14
Análisis de promedio y desviación estándar de NDVI.....	16
Análisis de dNBR a través del tiempo.....	19
DISCUSIÓN .....	21
CONCLUSIONES .....	23
BIBLIOGRAFÍA .....	24
APÉNDICES.....	31

### Índice de cuadros

Cuadro 1. Imágenes Sentinel-2 utilizadas.....	8
Cuadro 2. Tipos de cobertura de suelo para la zona según la cartografía de Zhao et al. (2016). .....	8
Cuadro 3. Usos y Sub-usos para la zona según la cartografía de CONAF (2016). .....	9
Cuadro 4. Clasificación de área quemada en base a Key y Benson (2006), 2019. ....	10
Cuadro 5. Reclasificación de coberturas de Zhao et al. ....	16
Cuadro 6. Reclasificación de sub-usos de CONAF. ....	16

### Índice de figuras

Figura 1. Ubicación comuna de Empedrado .....	7
Figura 2. Máscara de vegetación de Zhao et al. (2016) y máscara de vegetación de CONAF (2016). .....	9
Figura 3. Área afectada por el incendio en la comuna de Empedrado de acuerdo con la digitalización realizada.....	13

Figura 4. Clasificación de severidad de daño según el índice dNBR y los criterios de Key y Benson (2006), el índice RdNBR y los criterios de Miller y Thode (2007) y el índice RBR y los criterios de Parks et al. (2014).....	15
Figura 5. Porcentaje de la vegetación total afectada clasificada según tres índices de severidad de daño. ....	15
Figura 6. Serie temporal de NDVI y desviación estándar para la comuna de Empedrado, para el área total afectada y para las coberturas de vegetación indicadas (según reclasificación de coberturas de Zhao et al. (2016)). ....	17
Figura 7. Serie temporal de NDVI y desviación estándar para los sub-usos de vegetación indicados (según reclasificación de sub-usos de CONAF (2016)). ....	18
Figura 8. (a) Porcentaje de superficie de vegetación total afectada según Zhao et al. (2016) y (b) porcentaje de superficie de vegetación total afectada según CONAF (2016), según nivel de severidad, para cada año.....	20

## RESUMEN

En la temporada 2016/2017 se produjo un mega-incendio en la zona centro-sur de Chile que afectó más de 518.000 ha y permaneció activo durante aproximadamente 40 días. Este trabajo tiene como objetivo analizar los efectos de dicho siniestro y los posteriores cambios en el vigor de la cobertura vegetal, focalizando la investigación en la Comuna de Empedrado, zona que resultó arrasada casi por completo por el fuego. Para esto, se utilizaron imágenes generadas a partir de información del sensor pasivo *Multispectral Instrument* (MSI) de la misión Sentinel-2. En total, se analizaron cinco imágenes del periodo 2016-2020. La estimación de la superficie quemada se realizó a través del análisis visual y textural de las imágenes del área afectada, y de la clasificación del índice “*Difference Normalized Burn Ratio*” (dNBR) en base a Key y Benson (2006). Luego, para estimar la severidad del daño provocado por el incendio se utilizaron tres índices: el dNBR, el “*Relative difference Normalized Burn Ratio*” (RdNBR), y el “*Relativized Burn Ratio*” (RBR). Finalmente, para estudiar los cambios de vigor de la vegetación se calcularon las tasas de cambio del índice “*Normalized Difference Vegetation Index*” (NDVI) y los cambios en la clasificación de severidad del daño de la superficie a través del tiempo representados por el dNBR. En Empedrado, el incendio afectó un área de aproximadamente 53 mil hectáreas, las que equivalen a un 94% de la superficie vegetacional de la comuna. Todos los índices de severidad utilizados mostraron que la mayor parte de la vegetación afectada presentó un grado de “Severidad alta”, y que la mayor superficie quemada con alta severidad corresponde a plantaciones forestales. Con relación al vigor de la vegetación, se observó una disminución en los valores de NDVI luego del incendio y un posterior aumento en el tiempo, atribuible a la regeneración vegetacional. Sin embargo, las tasas de aumento del vigor disminuyeron año a año y no se alcanzaron los niveles de NDVI previos al incendio durante el periodo analizado. En el estudio del cambio de vigor a través del índice dNBR se pudo apreciar que los porcentajes de superficie de la vegetación clasificada como “No quemado” aumentaron y los porcentajes de superficie de la vegetación clasificada con “Severidad alta” disminuyeron en el tiempo, evidenciándose un cambio regenerativo mayor durante el segundo año posterior al siniestro. Este trabajo sirve como fuente de información clave para la toma de decisiones en el manejo de la recuperación y monitoreo de las zonas afectadas por el incendio.

**Palabras clave:** Mega-incendio, severidad, vigor vegetacional, dNBR, NDVI, regeneración vegetacional.



## ABSTRACT

During the 2016/2017 season, a mega-fire occurred in south-central Chile, affecting more than 518,000 hectares and remaining active during approximately 40 days. This work aims to analyze the effects of this mega-fire on the vegetation cover and vigor. The study is focused on Empedrado, an area that was almost completely devastated by the fire. For this, I utilized satellite imagery from the passive Multispectral Instrument (MSI) sensor on board the Sentinel-2A and Sentinel-2B platforms. In total, five images for the 2016-2020 period were used. The determination of the burnt area was done through visual and textural analysis of the satellite images and the “Difference Normalized Burn Ratio” (dNBR) classification based on Key and Benson (2006). Then, the burn severity was estimated using three severity indices: the dNBR, the “Relative Difference Normalized Burn Ratio” (RdNBR), and the “Relativized Burn Ratio” (RBR). Finally, the changes in vegetation vigor were analyzed using the rate of change of the “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) and the changes in the dNBR burn severity classification. On Empedrado, the fire affected an area of approximately 53 thousand hectares, which correspond to around 94% of the vegetation surface area. Regardless of the severity index used, of the affected vegetation, most was classified as “High severity”, and the largest area burned with high severity corresponds to plantation forests. In relation to the vigor of the vegetation, it was observed that in general, the NDVI values decreased after the fire and subsequently increases through the studied period, which can be attributed to vegetational regeneration. However, the rates of vigor increase diminished with the years, and the levels of NDVI prior to the fire were not achieved within the studied period. The study of change in vigor through the dNBR index, showed an increase on the percentages of vegetation surface area classified as “Unburned”, and a decrease of the percentages of vegetation surface area classified as “High severity”, evidencing a stronger regenerative change during the second year since the fire. This work serves as a source of key information for decision-making in the management of the recovery and monitoring of the areas affected by the fire.

**Keywords:** Mega-fire, severity, vegetation vigor, dNBR, NDVI, vegetational regeneration.

## INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales se producen cuando existen las cantidades suficientes de oxígeno en la atmósfera, biomasa potencialmente combustible y fuentes de calor (Pausas y Keeley, 2009) de manera que son fenómenos que han acompañado al ser humano desde siempre (Belcher, 2013). Hasta ahora se ha comprobado que el fuego juega un rol en la sostenibilidad de la biodiversidad y la salud ecosistémica (North et al., 2015) y en muchas partes del mundo los incendios han moldeado el paisaje, actuando como un agente ecosistémico (Mataix-Solera y Cerdà, 2009). Sin embargo, un incendio forestal se puede convertir en un “mega-incendio” (incendio que afecta al menos 40.469 ha) cuando existen condiciones meteorológicas extremas tales como baja humedad, altas temperaturas y fuertes vientos, asociadas a una alta disponibilidad de material combustible (Kodas, 2017). Tales condiciones favorecen la ocurrencia de dichos eventos y se generan comportamientos extremos del fuego, que exceden todos los esfuerzos de control convencional, resultando en un incendio de larga duración y extensa área quemada, por lo que este tipo de incendios forestales son los que ameritan mayor atención por sus importantes consecuencias (Bento-Gonçalves y Vieira, 2015).

En las últimas décadas, los mega-incendios tienden a ser más frecuentes en algunas zonas del mundo, tales como Australia, Grecia, Estados Unidos, Siberia y la Amazonía. Este aumento se debe principalmente al clima y a los cambios en la interfase urbano-rural (Ganteaume y Jappiot, 2013). Las áreas urbanas se han extendido constantemente hacia zonas rurales, produciendo más fuentes de ignición (provocadas y accidentales) y exponiendo a más personas a incendios forestales (Pausas y Keeley, 2009). Los incendios forestales provocados en la interfase urbano-rural son conocidos como incendios de “V generación” (Alexander, 1982), esto es, “incendios de gran intensidad que ocurren en lugares inaccesibles, con personas e infraestructura que debe ser salvada antes de apagar el fuego” (Costa et al., 2011).

El fuego puede generar efectos positivos o negativos en los ecosistemas. En ecosistemas tales como sabanas y bosques de coníferas boreales puede tener un rol positivo ya que éstos dependen del fuego en los procesos físicos y biológicos de renovación de suelo y regeneración de la vegetación, diversificando el paisaje con un efecto positivo sobre los ciclos biogeoquímicos y la productividad involucrada (Flannigan y Wotton, 2001). En cambio, los efectos negativos se explican porque las diversas especies vegetales presentes en los distintos ecosistemas responden de forma diferencial al fuego; así, en especies carentes de adaptaciones de resistencia o tolerancia al fuego, los incendios, incluso cuando su intensidad es baja, pueden causar una alta mortalidad (Lloret y Vilà, 2003). Si estas adaptaciones están ausentes en gran parte de las especies que componen la comunidad, el impacto sobre el ecosistema puede cambiar drásticamente la dinámica y composición de la vegetación y el resto de la cadena trófica (Jaksic y Fariña, 2015).

Los impactos de los incendios forestales dependen principalmente de las características del incendio (e.g. tamaño, calor liberado, duración e intensidad) (Bento-Gonçalves y Vieira, 2015). Los incendios alteran la vegetación fisiológicamente, inhiben la regeneración e incrementan el riesgo de enfermedades y plagas (Castillo et al., 2003). Sumado a esto, entre los efectos indirectos se incluyen la pérdida de hábitat y

biodiversidad, el deterioro de la calidad del aire, la alteración del pH del suelo, la degradación del suelo, la contaminación de acuíferos, la modificación de los ciclos hidrológicos y la pérdida de cobertura vegetal (Costa et al., 2011; Stoof, 2011; Valderrama et al., 2018; Watts, 2013). Por otro lado, los incendios forestales liberan dióxido de carbono contenido en la vegetación, el que se mantiene en la atmósfera si ésta no se recupera (Rubio et al., 2015; Williams, 2013). Todos estos efectos negativos son más intensos cuando se trata de un mega-incendio.

Por otra parte, el fuego es un factor que influye en la productividad biológica y en la composición vegetal en los ecosistemas mediterráneos (Iniguez et al., 2008). Después del incendio y luego del deterioro y la pérdida de la vegetación, se generan espacios abiertos en donde se activa la germinación del banco de semillas y el rebrote de individuos de especies pre-existentes (Calvo et al., 2008; Sang et al., 2008; Vidal y Reif, 2011). Adicionalmente, especies pioneras o invasoras se ven favorecidas al colonizar los sitios perturbados (Pickett et al., 1987; Richardson et al., 1994; Cobar-Carranza et al., 2015). Por otro lado, en climas mediterráneos la mayoría de las comunidades de plantas tienen algún grado de resistencia a los incendios forestales y muchas especies han desarrollado adaptaciones al fuego, siendo éstas condiciones que favorecen la regeneración vegetal post-incendio (Keeley y Keeley, 1986).

Dada la importancia que los incendios pueden tener en términos de daños al suelo, a la vegetación, a los animales y a las personas, se hace indispensable contar con técnicas de monitoreo para la detección y manejo del fuego, sus efectos y la posterior regeneración de la cobertura vegetal. Desde hace unos años se utiliza la teledetección para caracterizar el área afectada por los incendios forestales, para predecir y gestionar el impacto de éstos (Chowdhury y Hassan, 2015), pudiendo aplicarse en tres grandes fases: determinación de condiciones de peligro, detección de focos activos y evaluación de daños (Chuvienco, 2009; Chuvienco et al., 2010).

Hoy en día, una de las herramientas que se usa para detectar focos de incendios activos a nivel global, es el sistema *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), el que utiliza productos de los sensores *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) y *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) (NASA, 2018). La eficacia en la detección de incendios activos está fuertemente relacionada con el tiempo de revisita del satélite, la resolución espacial del sensor y los niveles de saturación del detector (Chuvienco et al., 2008). Las herramientas satelitales más utilizadas en la evaluación de la severidad de daños en la vegetación quemada son los índices espectrales, tales como *Composite Burn Index* (CBI) (Key y Benson, 2003), *Difference Normalized Burn Ratio* (dNBR) (Key y Benson, 2006), *Relative Difference Normalized Burn Ratio* (RdNBR) (Miller y Thode, 2007), entre otros. Estos corresponden a combinaciones de bandas de los productos de satélites con sensores multiespectrales tales como Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros. La severidad de un incendio es un término descriptivo que integra los cambios físicos, químicos y biológicos ocurridos en un lugar como consecuencia del fuego (White et al., 1996), corresponde al grado de cambio del suelo y la vegetación causado por el fuego (Escuin et al., 2008).

En Chile, la mayoría de los estudios sobre las causas de los incendios forestales concluyen que casi todos éstos son de origen antropogénico (Úbeda y Sarricolea, 2016). Según

CONAF (2018a), las causas de los incendios forestales en Chile durante el quinquenio 2013 – 2017, fueron accidentes y negligencias (58,1%) incendios intencionales (36,4%), causas desconocidas (5,0%) y causas naturales (0,4%). Adicionalmente, la región con mayor ocurrencia de incendios es la Región del Biobío con un 42,2% del total del periodo. Sin embargo, la región con mayor superficie quemada acumulada corresponde a la Región del Maule, con un total de 307.574,2 ha incendiadas, las que corresponden al 35,6% del total del periodo (CONAF, 2018b).

Algunas de las investigaciones realizadas en Chile en esta última década, se han focalizado en la ocurrencia de incendios, el impacto ecológico, la cobertura vegetal afectada, la severidad del daño y la restauración ecológica, entre otros (CONAF, 2017a; Díaz-Hormazábal y González, 2016; Gómez y Hahn, 2017; Gómez et al., 2018; Mattar et al., 2012; Rivera et al., 2017; Sabadin et al., 2016; Úbeda y Sarricolea, 2016; Valencia et al., 2018; Valderrama et al., 2018). Dado que el cambio climático está favoreciendo las condiciones para la ocurrencia de más incendios forestales en Chile y el mundo (González et al., 2011), es de vital importancia seguir investigando sobre qué ocurre en la vegetación después de los siniestros para entender mejor los procesos de regeneración y poder así hacer un mejor manejo de los ecosistemas dañados.

A inicios del 2017, en la zona centro-sur de Chile, se produjo un mega-incendio que afectó un área de 518.174 ha, y permaneció activo durante aproximadamente 40 días, lo que se convirtió en un episodio mundial, siendo el primero de la llamada “VI generación” de incendios. Sus consecuencias lo llevaron a transformarse en uno de los incendios más destructivos conocido, tanto es así que recibió el nombre de “Tormenta de fuego” (UE 2017; CONAF 2017b). En esta ocasión la Región del Maule fue la más afectada (CONAF, 2017a) y en particular la especie nativa *Nothofagus alessandrii* (Ruil) (Valencia et al., 2018). Debido a esto, la presente memoria tiene como objetivo analizar los efectos de dicho siniestro y los posteriores cambios del vigor de la cobertura vegetal, focalizando la investigación en la comuna de Empedrado (Región del Maule), área que resultó arrasada casi por completo por este mega-incendio.

### **Objetivo General**

Evaluar el cambio en el vigor de la vegetación afectada por el mega-incendio de 2017 en la comuna de Empedrado, Región del Maule, Chile.

### **Objetivos Específicos**

Cuantificar la severidad del mega-incendio en la comuna de Empedrado a través de tres índices de incendios.

Estimar los cambios en el vigor de la cobertura de la vegetación post incendio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la Comuna de Empedrado (Figura 1), ubicada al suroeste de la Provincia de Talca, Región del Maule, entre los 35° 28' 30'' y 35° 44' 06'' latitud sur y entre los 72° 02' 06'' y 72° 27' 36'' longitud oeste, ocupando la vertiente occidental de la Cordillera de La Costa que queda comprendida en la Zona denominada secano interior con influencia marítima (I. Municipalidad de Empedrado, 2014). Posee una superficie total de 56.629,9 ha, de las cuales 42.888 ha corresponden a plantaciones forestales, 6.756,2 ha a bosques, 3.709,3 ha a matorrales, 726,8 ha a praderas, 2.395,1 ha a terrenos agrícolas, 141,6 ha a áreas urbanas e industriales, 5,7 ha a cuerpos de agua, 4,3 ha a humedales y 2,9 ha a áreas sin vegetación (CONAF, 2016).

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger, en la Comuna de Empedrado existen dos climas: Clima mediterráneo de lluvia invernal y Clima mediterráneo de lluvia invernal con influencia costera (Kottek et al., 2006). Presenta un régimen pluviométrico irregular, con un promedio (de 39 años) de 742,8 mm anuales, con un periodo seco de 5 a 6 meses (I. Municipalidad de Empedrado, 2014).

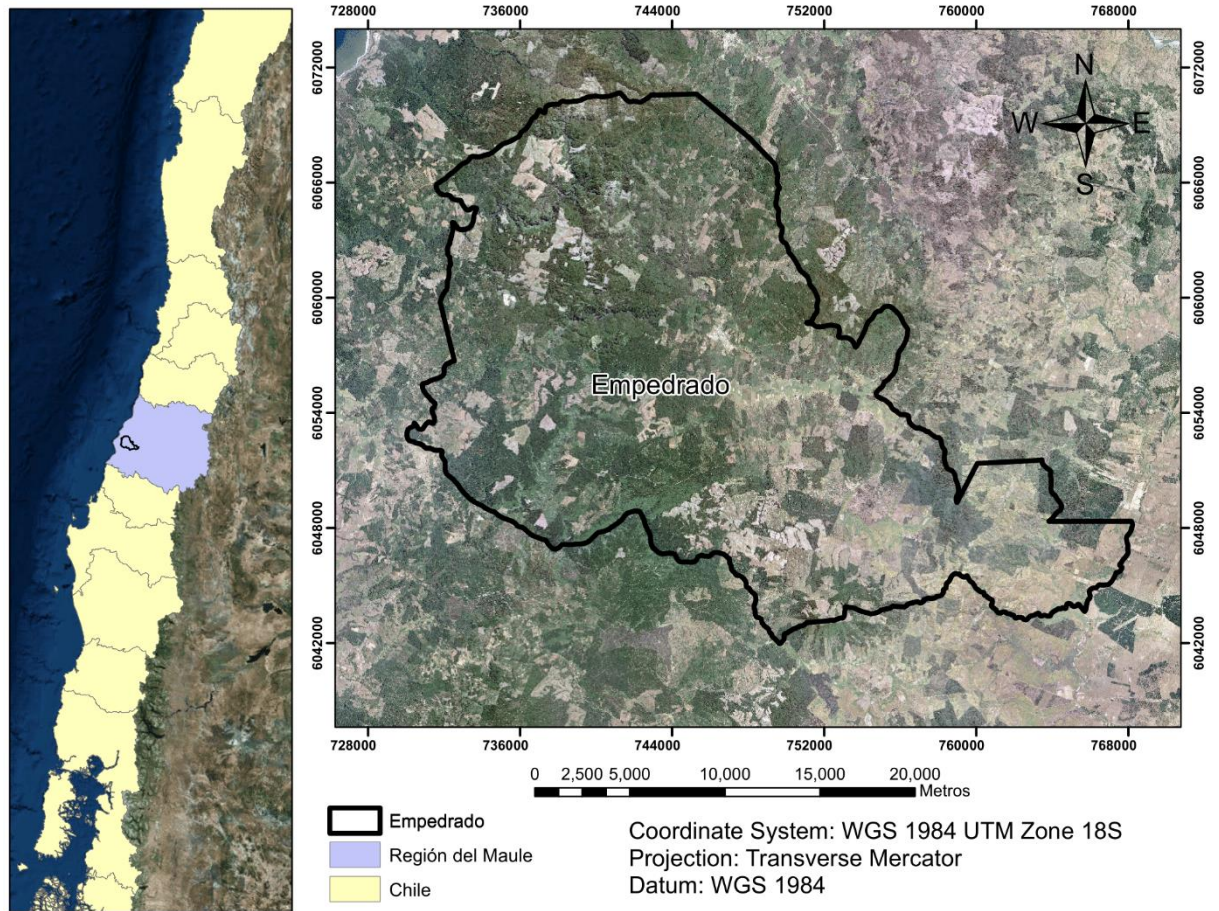


Figura 1. Ubicación comuna de Empedrado

## Materiales

Para la presente investigación se utilizaron datos de teledetección obtenidos desde el sensor remoto Sentinel-2 MSI, entre los años 2016 y 2020. Se seleccionó una imagen previa al incendio (2016) y cuatro imágenes posteriores al incendio (2017, 2018, 2019 y 2020). Además, para contar con información del tipo de vegetación existente en la zona de estudio antes del gran incendio, se utilizó la información cartográfica de cobertura de suelo de Chile continental (Zhao et al., 2016), correspondiente al año 2014, y el Catastro de Uso de Suelo y Vegetación proporcionado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), correspondiente al año 2016. De ambas fuentes se obtuvo información con distintos criterios de clasificación de la vegetación.

**Sentinel-2 MSI.** Corresponden a escenas provenientes del sensor pasivo *Multispectral Instrument* (MSI) de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, que poseen una resolución espacial de 10 m (20 m para la banda SWIR), y un tiempo de revisita de 5 días (Gatti y Galoppo, 2018). Las escenas se descargaron a través de la plataforma *Copernicus Open Acces Hub* de la Agencia Espacial Europea (ESA) (disponible en <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>).

Como criterio de selección se utilizaron sólo escenas que tuviesen un porcentaje menor o igual a un 10% de nubes y que el área de estudio estuviese idealmente, en su totalidad, despejada de nubes y humo. Las imágenes utilizadas se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Imágenes Sentinel-2 utilizadas.**

ID	Fecha	Cobertura nubosa (%)	Nivel de procesamiento	Pre/Post Incendio
S2A_MSIL1C_20161220T143742_N0204_R096_T18HYF_20161220T145131	2016-12-20	5,27	1C	Pre-Incendio
S2A_MSIL1C_20170320T143741_N0204_R096_T18HYF_20170320T145159	2017-03-20	0,00	1C	Post-Incendio
S2B_MSIL1C_20180320T143749_N0206_R096_T18HYF_20180320T193554	2018-03-20	5,15	1C	Post-Incendio
S2A_MSIL1C_20190320T143751_N0207_R096_T18HYF_20190320T211439	2019-03-20	5,15	1C	Post-Incendio
S2B_MSIL1C_20200109T143719_N0208_R096_T18HYF_20200109T175951	2020-01-09	0,28	1C	Post-Incendio

Como se utilizaron imágenes de reflectancia real (BOA, *Bottom Of Atmosphere*) y no de reflectancia aparente en el techo de la atmósfera (TOA, *Top Of Atmosphere*), a las imágenes que se descargaron se les realizó una corrección atmosférica y de iluminación utilizando la herramienta SEN2COR disponible en la plataforma *Sentinel Application Platform* (SNAP) (Louis et al., 2016). Así las imágenes nivel 1C pasaron al nivel de procesamiento 2A, es decir, a reflectancia a nivel de superficie.

**Land Cover de Chile.** Se utilizó una cartografía de la cobertura de suelo de Chile continental para el año 2014, que posee una resolución espacial de 30 m (Zhao et al., 2016). Los tipos de cobertura de suelo correspondientes a esta cartografía se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Tipos de cobertura de suelo para la zona según la cartografía de Zhao et al. (2016).**

Nivel 1	Nivel 2	ID
Cultivos	Otros Cultivos	130
	Huertos	140
	Barbechos	150
Bosques	Nativo de Hoja Ancha	212
	Nativo de Coníferas	222
	Mixtos	232
	Plantaciones de Hoja Ancha	241
	Plantaciones de Coníferas	251
Pastizales	Praderas	311
	Otros Pastizales	320
	Pastizales Áridos	330
Matorrales	Matorrales	410
	Matorrales Arborescentes	420
	Otros Matorrales Áridos	450
Humedales	Marismas	510

Para efectos de este estudio, las coberturas “Cuerpos de Agua”, “Superficies impermeables”, “Tierras Desnudas” y “Hielos y Nieves” no fueron consideradas por no corresponder a categorías de clasificación de la vegetación.

**Catastro de Uso de Suelo y Vegetación.** Se utilizó una cartografía del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación realizado por CONAF para la Región del Maule, correspondiente al año 2016 y a una escala de 1:50.000. Los tipos de Uso y Sub-uso correspondientes a esta cartografía se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Usos y Sub-usos para la zona según la cartografía de CONAF (2016).

Uso	Sub-uso
Bosques	Bosque Mixto
	Bosque Nativo
	Plantación
Humedales	Vegas
	Matorral
Praderas y Matorrales	Matorral Arborescente
	Matorral-Pradera
	Praderas
	Rotación Cultivo-Pradera
Terrenos Agrícolas	Terreno de Uso Agrícola

Para efectos de este estudio, los sub-usos “Cajas de Ríos”, “Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales”, “Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques”, “Minería Industrial”, “Otros sin Vegetación” y “Ríos” no fueron considerados por no corresponder a categorías de clasificación de la vegetación.

A continuación, en la Figura 2 se muestra las máscaras de vegetación creadas a partir de la clasificación de cobertura de suelo de Zhao et al. (2016) y la clasificación del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación de CONAF (2016).

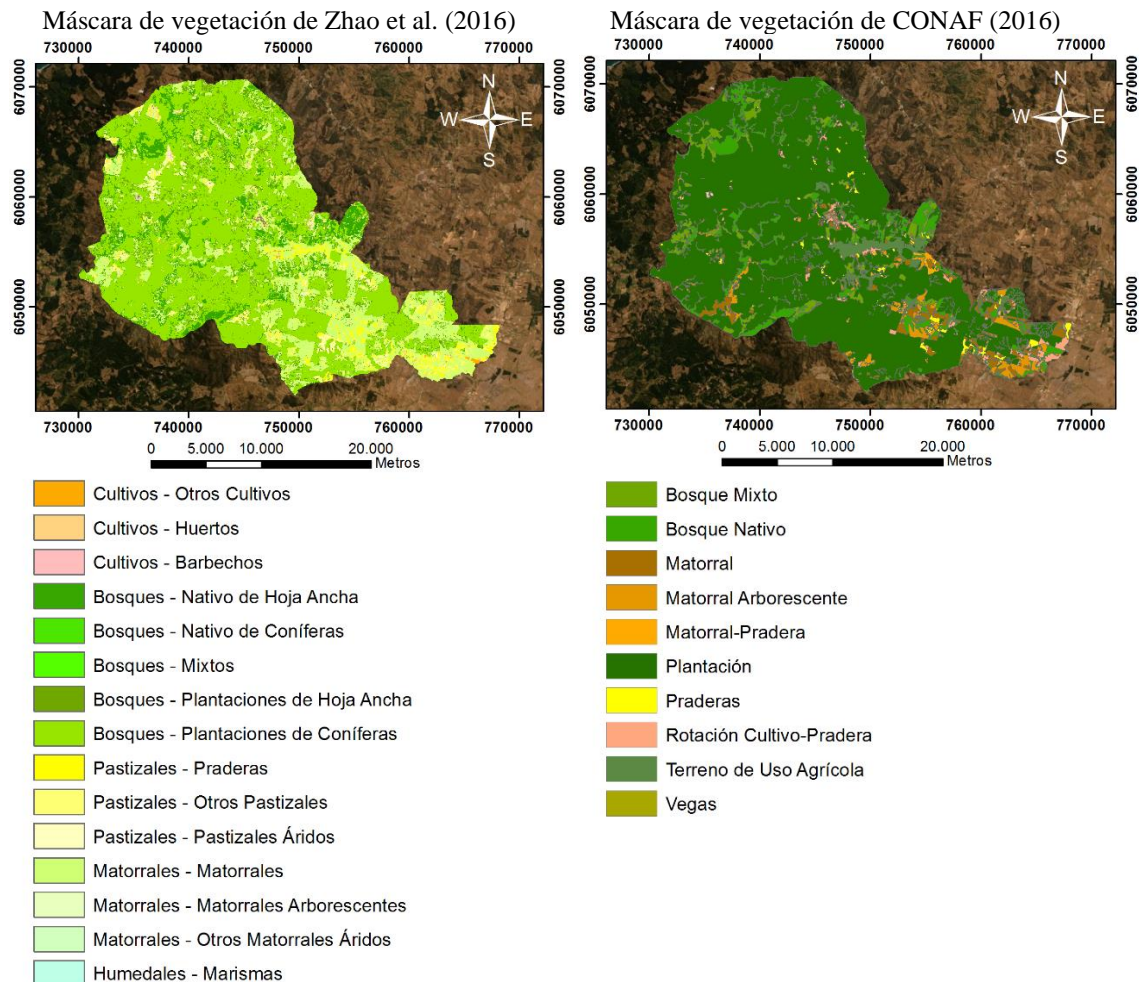


Figura 2. Máscara de vegetación de Zhao et al. (2016) y máscara de vegetación de CONAF (2016).



## Métodos

**Objetivo Específico 1:** *Cuantificar la severidad del mega-incendio en la comuna de Empedrado a través de tres índices de incendios.*

Primero, para restringir el procesamiento de las imágenes a sólo el área de estudio se creó una máscara considerando sólo la comuna de Empedrado. Esta información cartográfica se obtuvo del archivo *shapefile* “División Política Administrativa 2018” proporcionada por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, disponible en la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile).

Luego, para obtener un área representativa de las zonas afectadas por el mega-incendio de 2017 en la comuna de Empedrado, se realizó, primeramente, un análisis visual exploratorio a partir de las imágenes post-incendio utilizando una visualización en falso color (bandas 12-8-3 para Sentinel-2 MSI) (Key y Benson, 2006; Mattar et al., 2012; Rivera et al., 2017).

Por otra parte, con la imagen pre-incendio y la primera post-incendio se calcularon los índices espectrales *Normalized Burned Ratio (NBR)* (Ecuación 1) y *Difference Normalized Burned Ratio (dNBR)* (Ecuación 2) (Key y Benson, 2006; Escuin et al., 2008; Mattar et al., 2012; Rivera et al., 2017).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (1)$$

Donde *NIR* es la banda del infrarrojo cercano y *SWIR2* es la banda del infrarrojo de onda corta 2.

$$dNBR = NBR_{pre\ incendio} - NBR_{post\ incendio} \quad (2)$$

Luego, con el índice *dNBR* se realizó una clasificación utilizando la condición que se muestra en el Cuadro 4, obteniendo así un área afectada estimada.

Cuadro 4. Clasificación de área quemada en base a Key y Benson (2006).

Condición	Clasificación área quemada
si $dNBR \leq 0,099$	es área no quemada
si $0,099 < dNBR \leq 1,3$	es área quemada
si $1,3 < dNBR$	es área no quemada

Posteriormente, utilizando la imagen en falso color y la clasificación de área afectada estimada, se procedió a realizar una digitalización (análisis visual y textural de las imágenes) que derivó en una cartografía de área afectada final.

Con el fin de precisar el tipo y superficie de vegetación quemada, se creó una máscara en base a la información cartográfica del Land Cover de Chile de Zhao et al. (2016), correspondiente al año 2014, y otra máscara en base a la información cartográfica del Catastro de Uso de Suelo y Vegetación de CONAF correspondiente al año 2016. En éstas se excluyó todo aquello que no fuese vegetación, como cuerpos de agua, zonas pobladas, zonas desprovistas de vegetación, entre otros.

Para determinar la severidad del daño producido por el mega-incendio se utilizó la imagen pre-incendio (del 20 de diciembre de 2016) y la primera imagen post-incendio (del 20 de marzo de 2017), y a partir de éstas se calcularon los siguientes índices espectrales:  $dNBR$ ,  $RdNBR$  (Ecuación 3) y  $RBR$  (Ecuación 4) (Key y Benson, 2006; Miller y Thode, 2007; Parks et al., 2014).

$$RdNBR = \frac{dNBR}{\sqrt{|NBR_{pre\ incendio}|}} \quad (3)$$

tal que los valores de  $|NBR_{pre\ incendio}| < 0,001$  sean sustituidos por el valor 0,001

$$RBR = \frac{dNBR}{(NBR_{pre\ incendio} + 1,001)} \quad (4)$$

Se utilizó el índice  $RdNBR$  debido a que la clasificación de severidad entregada por este índice es de mayor exactitud para la categoría de severidad alta en paisajes heterogéneos, en comparación con la clasificación de severidad entregada por el índice  $dNBR$  (Miller y Thode, 2007). Además, se utilizó el índice  $RBR$  debido a que la clasificación entregada por este índice representa una mejora en exactitud frente a las clasificaciones entregadas por los índices  $dNBR$  y  $RdNBR$  (Parks et al., 2014).

Utilizando la cartografía de área quemada obtenida anteriormente como máscara, se realizó una clasificación de severidad del daño con los índices  $dNBR$ ,  $RdNBR$  y  $RBR$  según los criterios disponibles en Key y Benson (2006), Miller y Thode (2007) y Parks et al. (2014) respectivamente. Luego de esto, se compararon los resultados de las diferentes cartografías obtenidas.

**Objetivo Específico 2:** *Estimar los cambios en el vigor de la cobertura de la vegetación post incendio.*

Primero se calculó el índice *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* (Ecuación 5) para todas las escenas, y luego, a partir de las imágenes de  $NDVI$  se calculó la media y la desviación estándar de este índice. Después se compararon los promedios y se evaluaron las diferencias de las series temporales utilizando una máscara del área del incendio siguiendo la metodología de Rivera et al. (2017). Esto se hizo calculando la variación entre medias y evaluando si se encontraban o no diferencias significativas entre éstas utilizando la prueba no paramétrica de Wilcoxon. Posteriormente, se calcularon las tasas de cambio (Ecuación 6) año tras año con el fin de estimar la variación del vigor para toda la comuna, para el área quemada y según tipo de cobertura de vegetación.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5)$$

Donde  $NIR$  es la banda del infrarrojo cercano y  $RED$  es la banda del rojo visible.

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ NDVI = \frac{\Delta NDVI}{\Delta t} \quad (6)$$

Donde  $\Delta NDVI$  es la variación de  $NDVI$  promedio y  $\Delta t$  es la variación de tiempo.

Finalmente, se obtuvo el índice  $NBR$  para todas las imágenes y se comparó y evaluó la variación de  $NBR$  ( $dNBR$ ) para todas las combinaciones de imágenes pre- y post-incendio, con el fin de evaluar el grado de cambio del vigor de la cobertura vegetal a través del tiempo. Esto último, se hizo a través del cálculo de la variación del área correspondiente a cada nivel de severidad de daño. Cabe destacar que los cambios de severidad de daño de la vegetación año a año dan cuenta de la regeneración de la vegetación y, por lo tanto, de cambios en el vigor de ésta (García y Caselles, 1991).

Con la información recién descrita más el conjunto de mapas de vigor obtenidos utilizando los índices espectrales calculados, se pudo observar la tendencia al crecimiento o decrecimiento del vigor de la vegetación.

## RESULTADOS

### Estimación del área afectada por el incendio

Utilizando la imagen en falso color y la clasificación de área quemada estimada (con el índice dNBR) se realizó una digitalización que derivó en una cartografía del área afectada por el incendio dentro de la Comuna de Empedrado. Esta cartografía se muestra en la Figura 3.

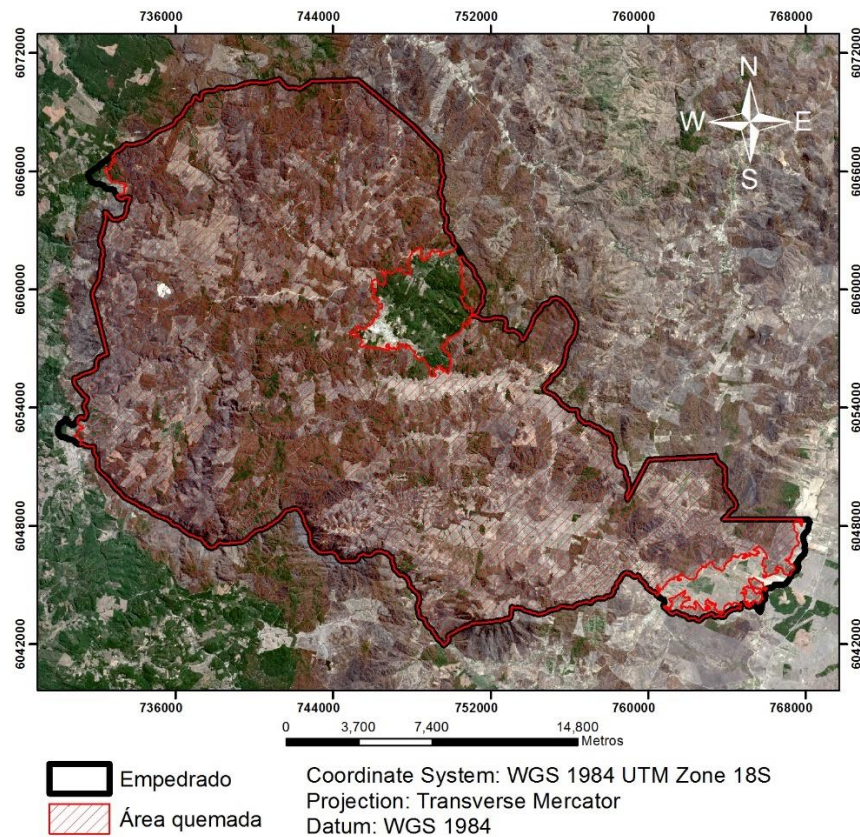


Figura 3. Área afectada por el incendio en la comuna de Empedrado de acuerdo con la digitalización realizada.

La superficie afectada por el incendio alcanzó las 53.030,2 ha, lo que corresponde a un 93,8% del área total de la comuna (56.550,2 ha). La porción no afectada por el incendio corresponde principalmente a la zona urbana de la comuna y a algunas plantaciones forestales colindantes.

Según la máscara de vegetación de Zhao et al. (2016), se quemó un 93,9% del área total de vegetación, lo que equivale a 52.992,3 ha. La cobertura “Plantaciones de Coníferas” presenta la mayor área quemada, con un total de 28.628,2 ha afectadas, lo que corresponde a un 95,7% del total de la cobertura. Los “Matorrales” quemados alcanzan un total de 11.179,0 ha, lo que corresponde a un 91,5% del total de la cobertura. Además,

los “Bosques Nativos de Hoja Ancha” fueron afectados en 4.783,0 ha, lo que equivale a un 95,5% del total de la cobertura. Por otro lado, se pudo observar que tanto las coberturas de “Bosque Nativo de Coníferas”, “Bosques Mixtos” y “Otros Matorrales Áridos” alcanzaban una superficie de sólo 0,2 ha cada una, y éstas fueron quemadas en su totalidad (100% de cobertura quemada). En el Apéndice 1 se presenta la superficie quemada de cada cobertura y el porcentaje que ésta representa respecto del total de la cobertura.

Según la máscara de vegetación de CONAF (2016), se quemó un 94,0% del área total de la vegetación, lo que equivale a 52.987,5 ha. El sub-uso “Plantaciones” presenta la mayor superficie quemada, con un total de 40.871,2 ha afectadas, lo que equivale a un 95,4% del total del sub-uso. El “Bosque Nativo” quemado alcanza un total de 4.235,0 ha, lo que corresponde a un 95,2% del total de “Bosque Nativo”. Además, el “Bosque Mixto” fue afectado en 2.234,8 ha, lo que equivale a un 98,2% del total del sub-uso. Por otro lado, las “Vegas” es el sub-uso con menor representación, con un total de 4,3 ha, las que se quemaron por completo (100% del sub-uso quemado). En el Apéndice 2 se presenta la superficie quemada de cada sub-uso y el porcentaje que éste representa respecto del total del sub-uso.

La comuna de Empedrado estaba dominada por plantaciones forestales monoespecíficas (principalmente de *Pinus radiata*) y a esto se le suma el hecho que la zona estuvo expuesta a una sequía prolongada (Garreaud et al., 2015), condiciones que favorecieron la disponibilidad de biomasa potencialmente combustible. Según varios autores los paisajes homogéneos, continuos y con gran cantidad de material combustible son más propensos a los incendios forestales (Echeverría et al., 2006; Vega-García y Chuvieco, 2006; González et al., 2011; Carmona et al., 2012), y precisamente la comuna de Empedrado cumplía con dichas características.

### **Determinación de la severidad de daño**

Aprovechando la existencia de 3 índices de severidad de daño que poseen distintos niveles de precisión en la determinación de la severidad, se utilizó cada uno de ellos y posteriormente se compararon los resultados. De los índices utilizados, dNBR posee cinco categorías de severidad y los otros dos índices tienen cuatro categorías de severidad. Además, es necesario tener en consideración que éstos cuentan con distintos criterios de clasificación. A continuación, en la Figura 4, se muestran las clasificaciones de severidad de daño según los índices dNBR, RdNBR y RBR.

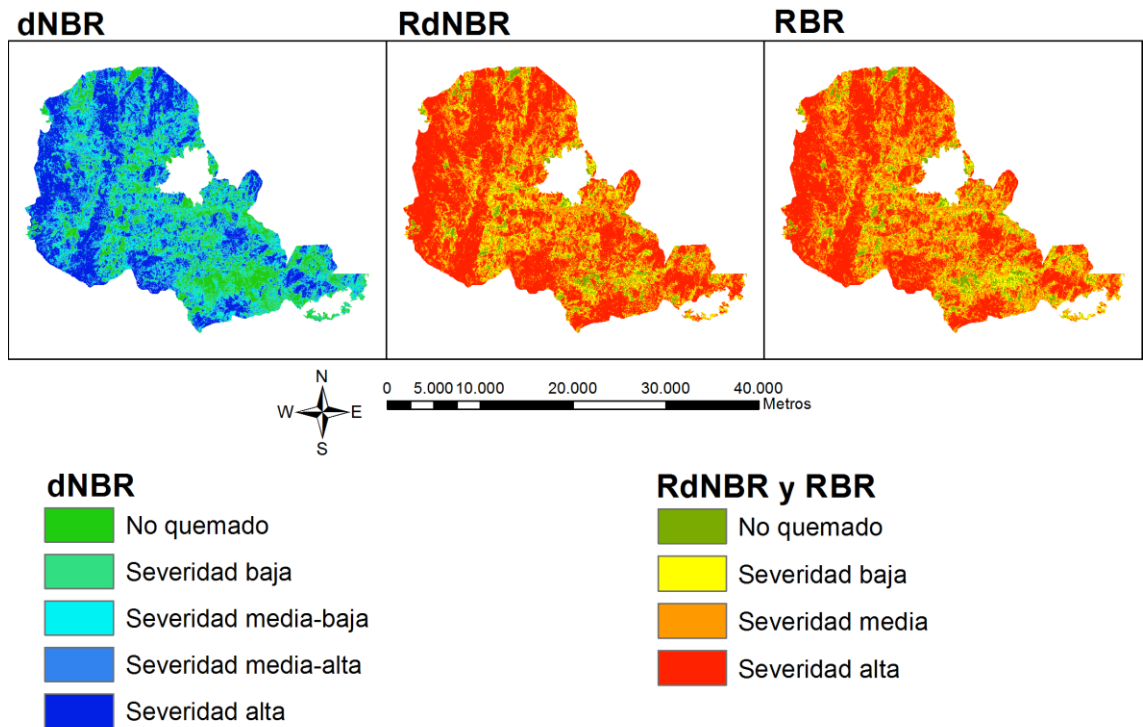


Figura 4. Clasificación de severidad de daño según el índice dNBR y los criterios de Key y Benson (2006), el índice RdNBR y los criterios de Miller y Thode (2007) y el índice RBR y los criterios de Parks et al. (2014).

Tanto para Zhao et al. (2016) como CONAF (2016), se obtuvo que, para los tres índices calculados, el mayor porcentaje de la vegetación total fue clasificado con “Severidad alta” y, por otro lado, el menor porcentaje de la vegetación total fue clasificado como “No quemado”. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 5.

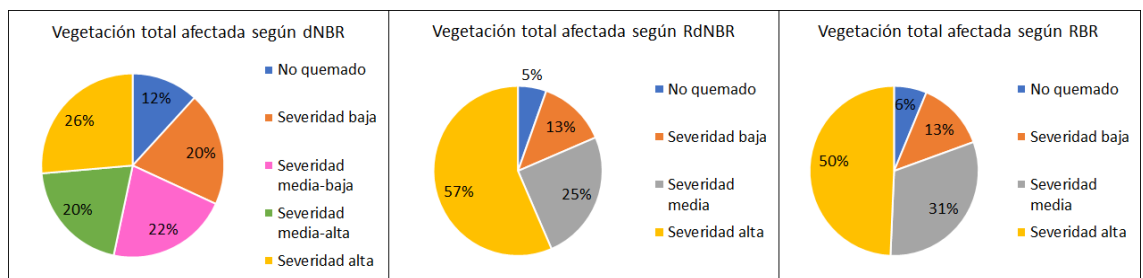


Figura 5. Porcentaje de la vegetación total afectada clasificada según tres índices de severidad de daño.

Además, cabe destacar que, independientemente del índice de severidad utilizado, se tiene que la mayor superficie quemada con alta severidad corresponde a plantaciones forestales (“Plantaciones de Coníferas” para Zhao et al. (2016) y “Plantación” para CONAF (2016)).

La cantidad de superficie y porcentaje de cobertura (según Zhao et al. (2016)) clasificada en cada nivel de severidad de daño según los tres índices calculados, se muestran en los apéndices 3, 4 y 5, y la cantidad de superficie y porcentaje de cada sub-uso (según

CONAF (2016)) clasificado en cada nivel de severidad de daño según los tres índices calculados, se muestran en los apéndices 6, 7 y 8.

### Análisis de promedio y desviación estándar de NDVI

Para este análisis, las coberturas y sub-usos se reclasificaron de acuerdo con lo presentado en los cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Reclasificación de coberturas de Zhao et al. (2016).

Cobertura según Zhao et al.	Reclasificación
Otros cultivos	Cultivos
Huertos	Cultivos
Barbechos	Cultivos
Bosque nativo de hoja ancha	Bosques
Bosque nativo de coníferas	Bosques
Bosque mixto	Bosques
Plantaciones de hoja ancha	Plantaciones
Plantaciones de coníferas	Plantaciones
Praderas	Pastizales
Otros pastizales	Pastizales
Pastizales áridos	Pastizales
Matorrales	Matorrales
Matorrales arborescentes	Matorrales
Otros matorrales áridos	Matorrales
Marismas	Humedales

Cuadro 6. Reclasificación de sub-usos de CONAF (2016).

Sub-uso según CONAF	Reclasificación
Bosque Mixto	Bosques
Bosque Nativo	Bosques
Matorral	Matorrales
Matorral-Pradera	Matorrales
Matorral Arborescente	Matorrales
Plantación	Plantación
Praderas	Praderas
Rotación Cultivo-Pradera	Cultivos
Terreno de Uso Agrícola	Cultivos
Vegas	Humedales

En las figuras 6 y 7 se presenta la serie temporal de NDVI del área total de la comuna y del área quemada por el incendio de 2017, respectivamente para las coberturas según Zhao et al. reclasificadas (Cuadro 5) y para los sub-usos según CONAF reclasificados (Cuadro 6).

Tanto para el área total de la comuna de Empedrado como para el área total afectada por el incendio dentro de la comuna, el comportamiento de los valores promedio de NDVI fue el siguiente: Disminuyó el NDVI luego del incendio y los 3 años siguientes hubo aumentos en los valores de este índice. El mismo comportamiento se evidenció en las coberturas “Cultivos”, “Bosques”, “Plantaciones”, “Pastizales” y “Matorrales”. La cobertura humedales presentó un comportamiento distinto, pero esta cobertura representa sólo 0,3 ha de superficie.

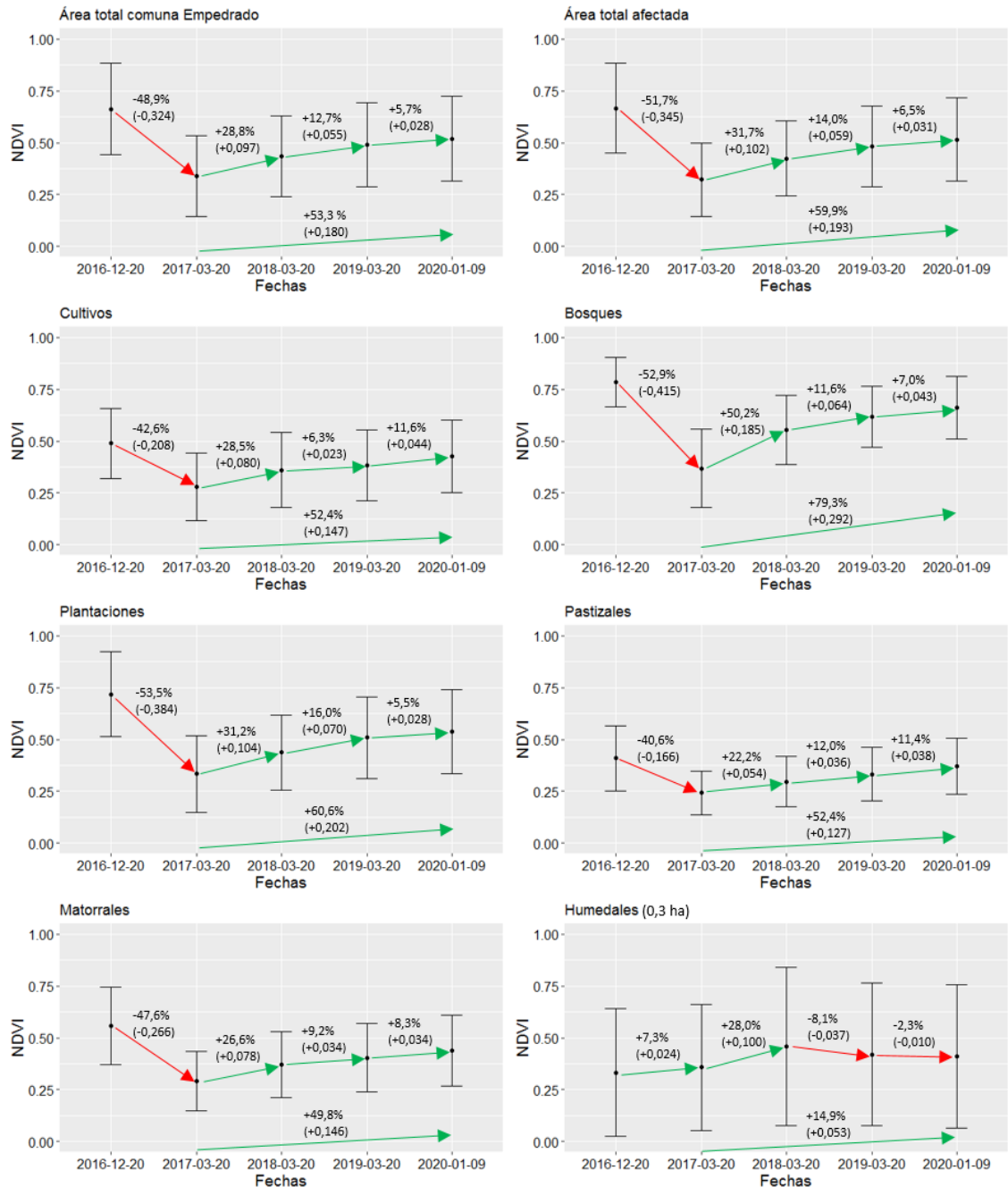


Figura 6. Serie temporal de NDVI y desviación estándar para la comuna de Empedrado, para el área total afectada y para las coberturas de vegetación indicadas (según reclasificación de coberturas de Zhao et al. (2016)). Se muestra el porcentaje relativo de cambio y la variación absoluta de NDVI en paréntesis.

En relación con los sub-usos, se puede apreciar dos comportamientos distintos de los promedios de NDVI: “Bosques”, “Matorrales” y “Plantación” presentan un descenso del vigor luego del incendio y posterior a esto, muestran tres años consecutivos de aumento de los valores de NDVI. Por otro lado, “Cultivos”, “Humedales” y “Praderas” presentan un descenso del vigor luego del incendio, un posterior aumento de este al primer año, al segundo año nuevamente disminuye el NDVI promedio y al tercer año vuelve a aumentar el valor de este índice. Sin embargo, si se considera la variación de NDVI total de los tres



años posteriores al incendio, todos los sub-usos presentan un aumento del vigor vegetacional.

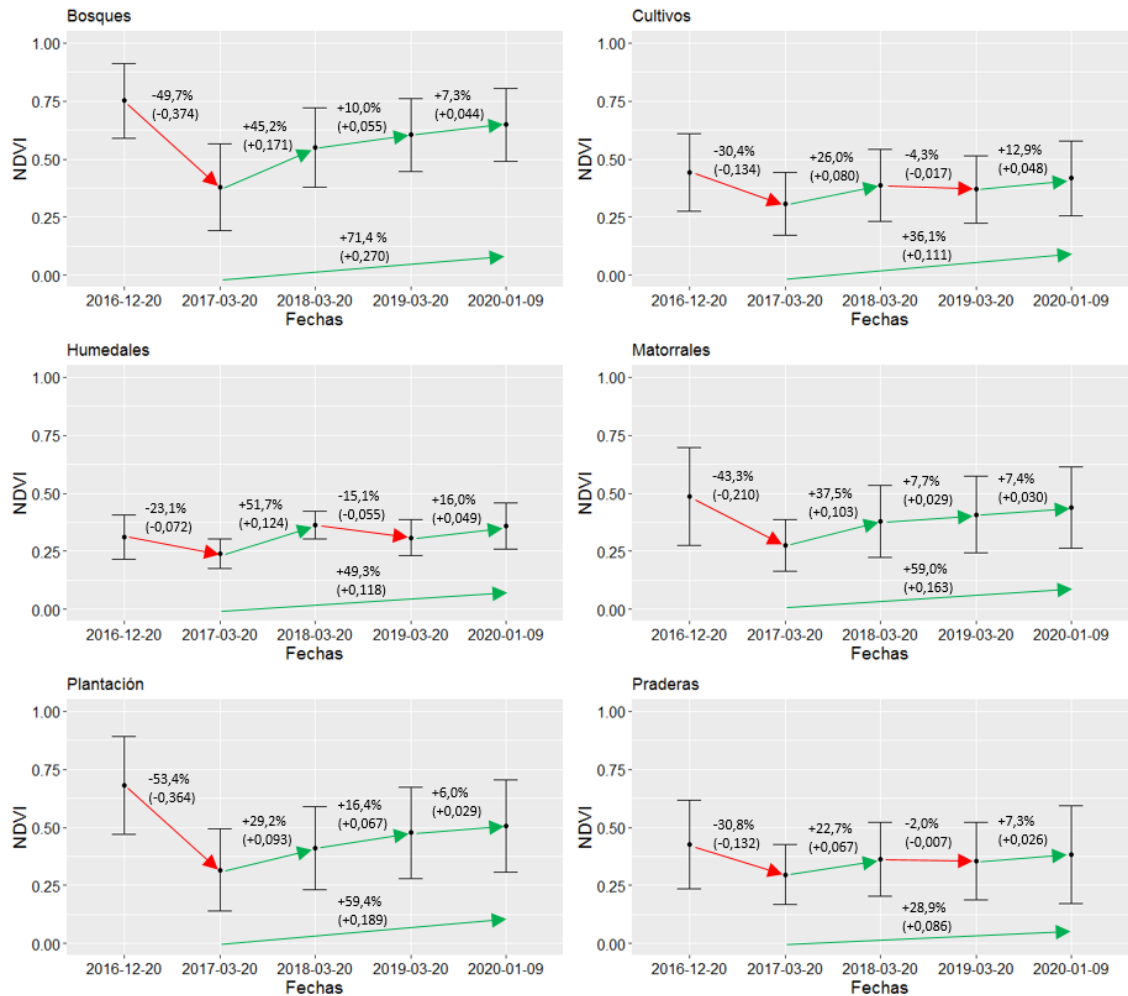


Figura 7. Serie temporal de NDVI y desviación estándar para los sub-usos de vegetación indicados (según reclasificación de sub-usos de CONAF (2016)). Se muestra el porcentaje relativo de cambio y la variación absoluta de NDVI en paréntesis.

A partir de las imágenes de NDVI de toda la comuna y de toda el área quemada, se compararon las medias y se constató que las diferencias de los valores fueron estadísticamente significativas, con un nivel de significación de 0,05. Esto quiere decir que los valores de NDVI en la imagen pre-incendio versus los valores de NDVI inmediatamente post-incendio, presentaron diferencias significativas, como también la diferencia de NDVI entre las imágenes 2017-2018, las imágenes 2018-2019 y las imágenes 2019-2020, evidenciando un aumento estadísticamente significativo del vigor de la vegetación post-incendio, tanto para el primer año como para el segundo y tercer año posterior al incendio (valor-p = 2,2e-16).

### **Análisis de dNBR a través del tiempo**

En la Figura 8a se muestran los porcentajes de superficie de vegetación total según Zhao et al. (2016), clasificada por cada nivel de severidad de daño según el índice dNBR y cómo estos porcentajes van variando a través del tiempo.

Respecto de la vegetación total afectada, se puede apreciar que los porcentajes de superficie clasificada como “No quemado” van en incremento y los porcentajes de superficie clasificada con “Severidad alta” van en decremento, a través del tiempo. Se evidencia un cambio regenerativo más importante al segundo año desde el incendio en comparación con el primer y tercer año.

Para las coberturas “Cultivos”, “Bosques”, “Pastizales” y “Matorrales”, se evidencia un claro y sostenido aumento del vigor desde el año 2017 al año 2020, donde los porcentajes de superficie clasificada en la categoría “Severidad alta” van disminuyendo y los porcentajes de superficie clasificada en la categoría “No quemado” van aumentando a través del tiempo. Para la cobertura “Plantaciones” ocurre algo particular: en el primer año (del 2017 al 2018) la superficie clasificada como “Severidad alta” aumentó de un 30,2% a un 33,4%, en el segundo año y tercer año estos porcentajes disminuyeron. Por otro lado, la superficie clasificada como “No quemado” fue aumentando año a año, evidenciando un aumento del vigor de la vegetación.

La cantidad de superficie y porcentaje de cobertura (según Zhao et al. (2016)) clasificada en cada nivel de severidad de daño según dNBR, para los 4 años estudiados, se muestra en los apéndices 9, 10, 11 y 12. Por otro lado, en la Figura 8b se muestran los porcentajes de superficie de vegetación total según CONAF (2016), clasificada por cada nivel de severidad de daño según el índice dNBR y cómo estos porcentajes van variando a través del tiempo.

En relación con la vegetación total afectada, se puede apreciar que, al igual que en Zhao et al. (2016), los porcentajes de superficie clasificada como “No quemado” van aumentando y los porcentajes de superficie clasificada con “Severidad alta” van disminuyendo a través del tiempo. Se evidencia un cambio regenerativo más importante al segundo año desde el incendio en comparación con el primer y tercer año.

Para todos los sub-usos, el área clasificada como “No quemado” fue aumentando año a año luego del incendio. En cuanto al área clasificada como “Severidad alta”, se evidenció que: el sub-uso “Bosques” presentó una disminución sostenida en el tiempo. En los sub-usos “Plantación” y “Matorrales”, el primer año hubo un leve aumento del área clasificada en “Severidad alta”, y luego, en los posteriores años, estos valores fueron disminuyendo. En “Cultivos” y “Praderas”, los dos primeros años fue disminuyendo el área clasificada en “Severidad alta” y al tercer año hubo un leve aumento de ésta. El sub-uso “Humedales” no presentó área clasificada en “Severidad alta” para los años estudiados.

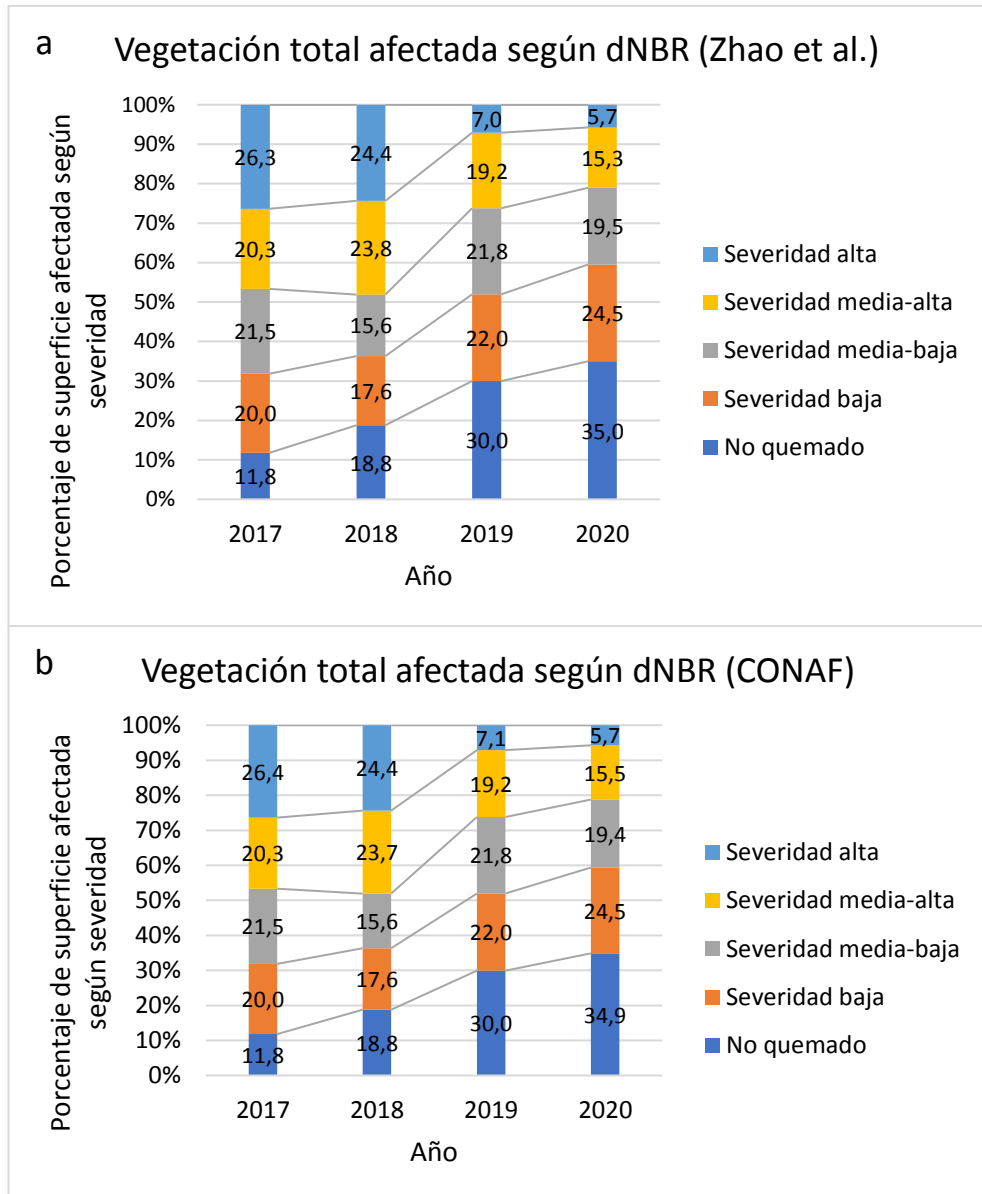


Figura 8. (a) Porcentaje de superficie de vegetación total afectada según Zhao et al. (2016) y (b) porcentaje de superficie de vegetación total afectada según CONAF (2016), según nivel de severidad, para cada año.

La cantidad de superficie y porcentaje de sub-uso (según CONAF (2016)) clasificado en cada nivel de severidad de daño según dNBR, para los 4 años estudiados, se muestra en los apéndices 13, 14, 15 y 16.

## DISCUSIÓN

Lo quemado en el incendio de 2017 en la comuna de Empedrado corresponde principalmente a vegetación y lo no quemado corresponde principalmente al pueblo de Empedrado y a parte de las plantaciones forestales que colindan con el pueblo. Esto hace tener el supuesto que el incendio ocurrido no se inició en esta zona cercana al poblado y que en los alrededores del área habitada posiblemente había cortafuegos en el momento del incendio, o que simplemente el viento no fluyó hacia esa zona y la gente y sus casas tuvieron suerte de aquello. Sin embargo, estudios señalan que la cercanía de zonas urbanas y caminos con plantaciones forestales está relacionada con mayores riesgos de incendio, debido a que casi la totalidad de los incendios forestales en Chile son provocados por la acción antrópica (Altamirano et al., 2013; CONAF, 2017a; De la Barrera y Ruiz, 2017).

En el centro-sur de Chile, la ocurrencia de incendios forestales se asocia estrechamente a las condiciones en el Pacífico tropical (El Niño Oscilación del Sur, ENOS) y a las variaciones en los patrones de circulación atmosférica en latitudes medias y altas que influyen la precipitación y temperatura (Veblen et al., 1999; Kitzberger y Veblen, 2003; González y Veblen, 2006). En estas latitudes (32-35°S), donde predomina la vegetación arborescente y abierta (tipo esclerófila), inviernos y primaveras más lluviosos en años Niño promoverían la acumulación de combustible, generando condiciones para la ignición y propagación de incendios. Así, esta acumulación de combustible durante años Niño estaría acompañada luego de la ocurrencia de condiciones más secas de lo normal asociadas al fenómeno de La Niña, lo que resultaría en una mayor superficie quemada durante la temporada de incendios (González et al., 2011).

Previo al incendio de 2017, hubo un periodo asociado al Niño desde noviembre de 2014 hasta mayo de 2016, seguido de un periodo asociado a La Niña desde agosto de 2016 hasta diciembre de 2016 (NOAA, 2020). Tal como describe González et al. (2011), en el centro-sur del país se dieron las condiciones climáticas que probablemente facilitaron la ocurrencia del mega-incendio en la zona, dado que durante El Niño posiblemente aumentó la biomasa combustible y durante La Niña esta biomasa se reseco y quedó más disponible para la combustión.

Se constató que hubo una baja considerable del vigor luego de ocurrido el incendio en casi la totalidad de la cobertura vegetal, y en los años siguientes estudiados, se evidenció un incremento significativo de éste. El decremento del vigor se atribuye directamente a los efectos del incendio en la vegetación de la zona debido a que se sabe que cuando la vegetación se encuentre sana, ésta presenta una gran absorción de la radiación solar en la región espectral del rojo (debido a la presencia de clorofila foliar), y a su vez, para la región espectral del infrarrojo cercano, ésta exhibe una alta reflexión de la radiación solar. Así, mientras más vigorosa se encuentre la vegetación, más alta es su diferencia de reflexión entre el rojo y el infrarrojo cercano y, por lo tanto, se obtienen mayores valores para el NDVI. En la zona post-incendio, las superficies recientemente quemadas muestran una reflectividad relativamente baja en el infrarrojo cercano y una muy baja reflectancia en la banda del rojo, mostrando así menores valores para el NDVI (Jones y Vaughan, 2010; Pepe y Parente, 2018).

El incremento en el vigor posterior al incendio probablemente se debe a la regeneración vegetal; sin embargo, no es posible determinar qué tipo de especies son las responsables del aumento de verdor y productividad, dado que las imágenes satelitales no son capaces de entregar esa información a la escala y resolución utilizadas. Además, es necesario señalar que, como indica Bastos et al. (2011) y Peña y Ulloa (2017), el concepto de regeneración o recuperación vegetal empleado aquí, alude únicamente a la capacidad de una cubierta vegetal de restablecer sus niveles de biomasa anteriores al incendio, por lo que no se refiere a la recuperación de funciones y biodiversidad del ecosistema afectado necesariamente.

Si bien las mediciones del vigor de la vegetación posteriores al incendio constataron aumentos sucesivos de éste, con una tendencia ascendente, no se lograron restablecer los valores de NDVI previos al incendio dentro del periodo estudiado, hecho que coincide con lo encontrado en las investigaciones de Chen et al. (2011) y Díaz-Delgado y Pons (1999) (con 7 y 9 años de estudio respectivamente), donde también se estudió la regeneración vegetal en coberturas con dominancia de especies del género *Pinus*.

Aunque todas las coberturas vegetacionales presentaron un patrón de cambio de vigor similar, éstas presentan diferencias en la magnitud de las tasas de cambio, donde las plantaciones y bosques mostraron tasas de cambio mayores que cultivos, pastizales y matorrales. Esto se debe a que las tasas de recuperación de la vegetación dependen del tipo de cobertura y de la severidad de daño del incendio, entre otros factores (Díaz-Delgado y Pons, 1999; Bastos et al., 2011; Chen et al., 2011; Peña y Ulloa, 2017).

## CONCLUSIONES

El mega incendio de 2017 afectó un total de 53.030 ha en la Comuna de Empedrado, lo que corresponde a un 93,8% de la superficie total de la Comuna. Del área total afectada, la mayor parte correspondió a plantaciones forestales, alcanzando una superficie de 28.628 ha según Zhao et al. (2016) y una superficie de 40.871 ha según CONAF (2016). La diferencia debe a los distintos criterios de clasificación de la vegetación de dichas cartografías.

Se estudió la severidad de daño del incendio de 2017 utilizando tres índices derivados de imágenes satelitales y se obtuvieron los distintos niveles de severidad de daño del terreno afectado por el incendio. Si bien, estos índices utilizados presentaban diferencias en el número de categorías y los criterios de clasificación, se pudieron encontrar ciertas similitudes en los resultados como, por ejemplo, se constató que un porcentaje mayor de la superficie vegetal presentó daños de alta severidad y, por otro lado, la mayor superficie quemada con alta severidad correspondió a plantaciones forestales.

Tanto el NDVI como el dNBR fueron útiles para estudiar las variaciones del vigor de la vegetación y poder identificar posibles tendencias de éste a través del tiempo. Se obtuvo que, en general, hubo un descenso del vigor de la vegetación inmediatamente después del incendio y en las mediciones posteriores se constató que hubo aumentos consecutivos del vigor. Las tasas de aumento del vigor fueron descendiendo a través del tiempo y no se logró alcanzar los niveles de NDVI previos al incendio en el periodo estudiado, sin embargo, estas tasas muestran una tendencia ascendente del vigor, atribuible a la regeneración vegetal aunque lo descrito no se refiere necesariamente a recuperación de funciones y biodiversidad del ecosistema afectado.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Alexander, M. E. 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany* 60(4): 349–357.
- Altamirano, A., Salas, C., Yaitul, V., Smith-Ramirez, C. y Ávila, A. 2013. Influencia de la heterogeneidad del paisaje en la ocurrencia de incendios forestales en Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande* (55): 157-170.
- Bastos, A., Gouveia, C., DaCamara, C. C. and Trigo, R. M. 2011. Modelling post-fire vegetation recovery in Portugal. *Biogeosciences Discussions* 8(12): 3593-3607.
- Belcher, C. M. 2013. *Fire phenomena and the Earth system: an interdisciplinary guide to fire science*. Wiley-Blackwell. 347p.
- Bento-Gonçalves, A. and Vieira, A. 2015. *Wildland Fires: A Worldwide Reality*. Nova Science Publishers, New York. 229p.
- Calvo, L., Santalla, S., Valbuena, L., Marcos, E., Tárrega, R. and Luis-Calabuig, E. 2008. Post-fire natural regeneration of a *Pinus pinaster* forest in NW Spain. *Plant Ecology* 197: 81-90.
- Carmona, A., González, M. E., Nahuelhual, L. and Silva, J. 2012. Spatio-temporal effects of human drivers on fire danger in Mediterranean Chile. *Bosque* 33(3): 321-328.
- Castillo, M., Pedernera, P. and Pena, E. 2003. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo* 19(3): 44-53.
- Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C. H., Yang, L., Chengquan, H. and Shi, H. 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing* 32(23): 7905-7927.
- Chowdhury, E. and Hassan, Q. 2015. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104: 224-236.
- Chuvieco, E., Giglio, L. and Justice, C. O. 2008. Global characterization of fire activity: Towards defining fire regimes from earth observation data. *Global Change Biology* 14: 1488-1502.
- Chuvieco, E. 2009. Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 103(1): 173-181.

- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P. et al. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling* 221(1): 46-58.
- Cóbar-Carranza, A.J., García, R., Pauchard, A. y Peña, E. 2015. Efecto de la alta temperatura de germinación y supervivencia de semillas de la especie invasora *Pinus contorta* y dos especies nativas del sur de Chile. *Bosque* 36(1): 53-60.
- CONAF. 2016. [On-line]. Sistema de Información Territorial CONAF. Disponible en el WWW: <https://sit.conaf.cl/>. Citado: 24 de marzo de 2019.
- CONAF. 2017a. Análisis de la Afectación y Severidad de los incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe Técnico. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 51p.
- CONAF. 2017b. Balance Tormenta de Fuego 18 enero al 5 de febrero. Presentación para conferencia de prensa del 17 de febrero 2017.
- CONAF. 2018a. [On-line]. Estadísticas - Causas según Ocurrencia de Incendios Forestales 1987 - 2018. Disponible en el WWW: <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>. Citado: 2 de marzo de 2019.
- CONAF. 2018b. [On-line]. Estadísticas - Resumen Regional Ocurrencia (Número) y Daño (Superficie Afectada) por Incendios Forestales 1977 - 2018. Disponible en el WWW: <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>. Citado: 2 de marzo de 2019.
- Costa, P., Castellnou, M., Larrañaga, A., Miralles, M. y Kraus, D. 2011. La prevención de los grandes incendios forestales adaptados al incendio tipo. Unitat Tècnica GRAF, Cataluña. 88p.
- De la Barrera, F. y Ruiz, V. 2017. Evaluación del impacto de los incendios de Chile Centro-Sur en el verano del año 2017. Primera entrega. International Association of Landscape Ecology (IALE)-Chile. Chile.
- Díaz-Delgado, R. y Pons, X. 1999. Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante el empleo del NDVI. *Revista de teledetección* 12: 73-77.
- Díaz-Hormazábal, I. y González, M. E. 2016. Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)* 37(1): 147-158.
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A. and Newton, A. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation* 130(4): 481-494.



- Escuin, S., Navarro, R. and Fernandez, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* 29(4): 1053-1073.
- Flannigan, M. D. and Wotton, B. M. 2001. Climate, weather and area burned. *Forest Fires*: 335-357.
- Ganteaume, A. and Jappiot, M. 2013. What causes large fires in Southern France. *Forest Ecology and Management* 294: 76-85.
- García, M. J. L. and Caselles, V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International* 6(1): 31–37.
- Garreaud, R., Aldunce, P., Araya, G., Blanco, G., Boisier, J. P., Bozkurt, D. et al. 2015. La Megasequía 2010–2015: Una Lección para el Futuro. Centro de Estudios del Clima y la Resiliencia (CR), 2.
- Gatti, A., and Galoppo, A. 2018. [On-line]. Sentinel-2 products specification document. Disponible en el WWW: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Products-Specification-Document>. Citado: 25 de marzo de 2019.
- Gómez, P., y Hahn, S. 2017. Regeneración posincendio de plantas leñosas en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, zona costera, Región del Maule, Chile central. *Gayana. Botánica* 74(2): 302-306.
- Gómez, P., Garrido, P., Gajardo, J., Ormazábal, Y. y Mena C. 2018. Estudio de Desastres Ambientales: Severidad del daño por incendios en un bosque de alto valor de conservación dominado por *Nothofagus alessandrii* (Ruil) en la cordillera de la Costa, Región del Maule, Chile central. (cap. 5, pp.223-227). En: Centro de Geomática de la Universidad de Talca y el Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (Fach). *Geomática Aplicada*. Primera Edición. Santiago, Chile: Universidad de Talca. 364p.
- González, M. E., Lara, A., Urrutia, R., y Bosnich, J. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)* 32(3): 215–219.
- González, M. E. and Veblen, T. T. 2006. Climatic influences on fire in *Araucaria araucana*-*Nothofagus* forests in the Andean cordillera of south-central Chile. *Ecoscience* 13(3):342-350.
- I. Municipalidad de Empedrado. 2014. [On-line]. Plan de Desarrollo Comunal. Empedrado 2014 – 2018. Disponible en el WWW: <http://www.empedrado.cl/transparenciaempedrado/files/PLADECO%202014-2018.pdf>. Citado: 24 de marzo de 2019.

- Iniguez, J.M., Swetnam, T.W. and Yool, S.R. 2008. Topography affected landscape fire history patterns in southern Arizona, USA. *Forest Ecology and Management* 256: 295-303.
- Jaksic, F. M., y Fariña, J. M. 2015. Incendios, sucesión y restauración ecológica en contexto. *Anales del Instituto de la Patagonia* 43(1): 23-34.
- Jones, H. G. and R. A. Vaughan. 2010. *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*. New York: Oxford University Press. 365p.
- Keeley, J.E., and S. Keeley. 1986. Chaparral and wildfires. *Fremontia (United States)* 14: 18-21.
- Key, C. H., and Benson, N. C. 2003. The composite burn index (CBI): field rating of burn severity. US Geological Survey Northern Rocky Mountain Science Center. US Department of the Interior, Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center.
- Key, C. and Benson, N. 2006. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. In: Lutes D.C., R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, & LJ Gangi (eds) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: 1-51.
- Kitzberger, T. and Veblen, T. T. 2003. Influences of climate on fire in northern Patagonia, Argentina. (cap. 10, pp. 296-321). In: Veblen, T. T., Baker, W. L., Montenegro, G. y Swetnam, T. W. (Eds.). *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas*. New York, NY: Springer. 444p.
- Kodas, M. 2017. *Megafire: The race to extinguish a deadly epidemic of flame*. Houghton Mifflin Harcourt. 368p.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3): 259-263.
- Lloret, F. and Vilà, M. 2003. Diversity patterns of plant functional types in relation to fire regime and previous land use in Mediterranean woodlands. *Journal of Vegetation Science* 14(3): 387-398.
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-Knorn, M., Bieniarz, J., Mueller-Wilm, U. et al. 2016. Sentinel-2 SEN2COR: L2A processor for users. In *Proceedings of the Living Planet Symposium*, Prague, Czech Republic (pp. 9-13).
- Mataix-Solera, J. y Cerdà, A. 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos, in: Cerdà, A., Mataix-Solera, J. (Eds.) *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*, Cátedra Divulgación de la Ciencia, 27-53.

- Mattar, C., Santamaría-Artigas, A. y Durán-Alarcón, C. 2012. Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. *Revista de Teledetección* 38: 36-50.
- Miller, J. D. and Thode, A. E. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109(1): 66-80.
- NASA. 2018. [On-line]. LANCE Citation, Acknowledgements and Disclaimer. Disponible en el WWW: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/citation#ed-firms-citation>. Citado: 1 de marzo de 2019.
- NOAA. 2020. Cold & Warm Episodes by Season. [en línea]. Recuperado en: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) Consultado el: 20 de febrero de 2020.
- North, M. P.; Stephens, S. L.; Collins, B. M.; Agee, J. K.; Aplet, G.; Franklin, J. F. and Fule, P. Z. 2015. Reform forest fire management. *Science* 349(6254): 1280-1281.
- Parks, S.; Dillon, G. and Miller, C. 2014. A new metric for quantifying burn severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing* 6(3): 1827-1844.
- Pausas, J. G. and Keeley, J. E. 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *BioScience* 59(7): 593-601.
- Peña, M. A. y Ulloa, J. 2017. Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre- y post-incendio. *Revista de Teledetección* (50): 37-48.
- Pepe, M., and C. Parente. 2018. Burned area recognition by change detection analysis using images derived from Sentinel-2 satellite: The case study of Sorrento Peninsula, Italy. *Journal of Applied Engineering Science* 16(2): 225-232.
- Pickett S.T., Collins, S.L. and Armesto, J.J. 1987. Models, mechanisms and pathways of succession. *The Botanical Review* 53: 335-371.
- Richardson, D.M., Williams, P.A. and Hobbs, R.J. 1994. Pine invasions in the southern hemisphere: Determinants of spread and invasibility. *Journal of Biogeography* 21: 511-527.
- Rivera, C., Mattar, C. y Durán-Alarcón, C. 2017. Tendencia de la cobertura vegetal afectada por incendios en el Parque Nacional Torres del Paine. *Revista de Teledetección* 50: 71-87.
- Rubio, M., Lissi, E., Gramsch, E. and Garreaud, R. 2015. Effect of nearby forest fires on ground level ozone concentrations in Santiago, Chile. *Atmosphere* 6(12): 1926-1938.

- Sabadin, P., Gómez, M., Ginocchio, R., Peña, I. and Montenegro, G. 2016. Effect of fire on herbaceous “matorral” vegetation of Central Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(3): 415-425.
- Sang, W., Chen, S. and Li, G. 2008. Dynamics of leaf area index and canopy openness of three forest types in a warm temperate zone. *Frontiers of Forestry in China* 3(4): 416-421.
- Stoof, C. 2011. Fire effects on soil and hydrology. Tesis de Doctorado. Wageningen University. 182p.
- Úbeda, X. and Sarricolea, P. 2016. Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change* 146: 152-161.
- Unión Europea- UE. 2017. Informe técnico de la misión en Chile 2017. Análisis de los incendios forestales en regiones del Maule y Biobío. Elaborado por expertos de EU de Lead Emergency Management Authority (LEMA). 34p.
- Valencia, D., Saavedra, J., Brull, J., y 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 Botánica* 75(1): 531-534.
- Valderrama, L., Contreras-Reyes, J. and Carrasco, R. 2018. Ecological impact of forest fires and subsequent restoration in Chile. *Resources* 7(2): 26.
- Veblen, T. T., Kitzberger, T., Villalba, R. and Donnegan, J. 1999. Fire history in northern Patagonia: the roles of humans and climatic variation. *Ecological Monographs*, 69(1): 47-67.
- Vega-García, C. and Chuvieco, E. 2006. Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes. *Landscape Ecology*, 21(4): 595-605.
- Vidal, O.J. and Raif, A. 2011. Effect of a tourist-ignited wildfire on *Nothofagus pumilio* forests at Torres del Paine biosphere reserve, Chile (Southern Patagonia). *Bosque* 32: 64-67.
- Watts, A. C. 2013. Organic soil combustion in cypress swamps: moisture effects and landscape implications for carbon release. *Forest Ecology and Management* 294: 178-187.
- White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. and Runnings, S. W. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire* 6(3): 125-136.
- Williams, J. 2013. Exploring the onset of high-impact mega-fires through a forest land management prism. *Forest Ecology and Management* 294: 4-10.

Zhao, Y., Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J. et al. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment* 183: 170-185.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Área y porcentaje quemado, según tipo de cobertura de la vegetación.

Cobertura	Área total		Porcentaje quemado del total de la cobertura	
	(ha)	Área quemada (ha)	(%)	
Cultivos - Otros Cultivos	81,9	43,9	53,6	
Cultivos - Huertos	265,3	240,7	90,7	
Cultivos - Barbechos	220,7	193,5	87,7	
Bosques - Nativo de Hoja Ancha	5.009,3	4.783,0	95,5	
Bosques - Nativo de Coníferas	0,2	0,2	100,0	
Bosques - Mixtos	0,2	0,2	100,0	
Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha	4.431,9	4.240,2	95,7	
Bosques - Plantaciones de Coníferas	29.907,5	28.628,2	95,7	
Pastizales - Praderas	2.147,8	1.790,1	83,3	
Pastizales - Otros Pastizales	1.190,0	943,0	79,3	
Pastizales - Pastizales Áridos	973,3	928,2	95,4	
Matorrales - Matorrales	12.211,9	11.179,1	91,5	
Matorrales - Matorrales Arborescentes	22,3	21,8	97,6	
Matorrales - Otros Matorrales Áridos	0,2	0,2	100,0	
Humedales - Marismas	0,4	0,3	75,0	
Vegetación total	56.462,7	52.992,3	93,9	

### Apéndice 2. Área y porcentaje quemado, según tipo de sub-uso.

Sub-uso	Área		Porcentaje quemado del total del sub-uso	
	(ha)	Área quemada (ha)	(%)	
Bosque Mixto	2.276,3	2.234,8	98,2	
Bosque Nativo	4.449,6	4.235,0	95,2	
Matorral	1.716,1	1.475,8	86,0	
Matorral-Pradera	235,3	215,3	91,5	
Matorral Arborescente	1.754,6	1.453,3	82,8	
Plantación	42.860,8	40.871,2	95,4	
Praderas	718,9	573,9	79,8	
Rotación Cultivo-Pradera	902,2	509,1	56,4	
Terreno de Uso Agrícola	1.482,3	1.414,9	95,5	
Vegas	4,3	4,3	100,0	
Vegetación total	56.400,5	52.987,5	94,0	

### Apéndice 3. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice dNBR.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos - Otros Cultivos	8,73	20,00	22,50	51,55	8,82	20,21	3,15	7,22	0,45	1,03
Cultivos - Huertos	65,17	27,33	62,28	26,12	38,07	15,97	42,84	17,97	30,06	12,61
Cultivos - Barbechos	46,53	24,05	48,78	25,21	44,37	22,93	41,94	21,67	11,88	6,14
Bosques - Nativo de Hoja Ancha	222,50	4,66	646,07	13,54	1.004,93	21,07	1.016,54	21,31	1.879,98	39,41
Bosques - Nativo de Coníferas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	100,00
Bosques - Mixtos	0,00	0,00	0,09	50,00	0,00	0,00	0,09	50,00	0,00	0,00
Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha	317,37	7,49	688,64	16,25	908,08	21,43	1.040,84	24,57	1.282,06	30,26
Bosques - Plantaciones de Coníferas	2.756,92	9,65	4.915,92	17,21	6.375,20	22,32	5.899,88	20,66	8.614,58	30,16
Pastizales - Praderas	621,23	34,71	608,54	34,01	315,92	17,65	179,83	10,05	64,00	3,58
Pastizales - Otros Pastizales	277,58	29,35	346,98	36,69	179,92	19,03	111,88	11,83	29,25	3,09
Pastizales - Pastizales Áridos	129,97	14,01	269,66	29,07	228,62	24,65	228,62	24,65	70,75	7,63
Matorrales - Matorrales	1.803,47	16,17	2.979,33	26,71	2.258,82	20,25	2.171,33	19,47	1.940,73	17,40
Matorrales - Matorrales Arborescentes	2,61	12,13	4,41	20,50	4,41	20,50	5,58	25,94	4,50	20,92
Matorrales - Otros Matorrales Áridos	0,00	0,00	0,18	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Humedales - Marismas	0,09	33,33	0,18	66,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetación total	6.252,16	11,82	10.593,57	20,03	11.367,18	21,49	10.742,53	20,31	13.928,42	26,34

Apéndice 4. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice RdNBR.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos - Otros Cultivos	2,25	5,15	5,49	12,58	21,24	48,66	14,67	33,61
Cultivos - Huertos	29,52	12,38	48,15	20,20	47,88	20,08	112,87	47,34
Cultivos - Barbechos	25,74	13,30	24,75	12,79	36,09	18,65	106,93	55,26
Bosques - Nativo de Hoja Ancha	109,63	2,30	584,69	12,25	1.325,53	27,78	2.751,88	57,67
Bosques - Nativo de Coníferas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	100,00
Bosques - Mixtos	0,00	0,00	0,09	50,00	0,09	50,00	0,00	0,00
Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha	166,60	3,93	460,12	10,86	1.047,41	24,72	2.563,22	60,49
Bosques - Plantaciones de Coníferas	1.580,34	5,52	3.712,79	12,98	7.103,36	24,83	16.207,31	56,66
Pastizales - Praderas	203,69	11,38	344,91	19,27	492,52	27,52	748,41	41,82
Pastizales - Otros Pastizales	84,97	8,99	159,85	16,90	204,23	21,60	496,57	52,51
Pastizales - Pastizales Áridos	38,52	4,15	69,67	7,51	149,05	16,07	670,37	72,27
Matorrales - Matorrales	648,32	5,81	1.503,12	13,48	2.791,30	25,02	6.211,39	55,69
Matorrales - Matorrales Arborescentes	1,17	5,44	3,06	14,23	4,50	20,92	12,78	59,41
Matorrales - Otros Matorrales Áridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	100,00
Humedales - Marismas	0,09	33,33	0,18	66,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetación total	2.890,85	5,46	6.916,87	13,07	13.223,22	24,98	29.896,76	56,49

Apéndice 5. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice RBR.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos - Otros Cultivos	3,15	7,22	11,61	26,60	21,24	48,66	7,65	17,53
Cultivos - Huertos	35,19	14,76	55,35	23,22	58,23	24,42	89,65	37,60
Cultivos - Barbechos	29,43	15,21	30,42	15,72	58,59	30,28	75,07	38,79
Bosques - Nativo de Hoja Ancha	116,92	2,45	449,23	9,41	1.437,68	30,13	2.767,90	58,01
Bosques - Nativo de Coníferas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	100,00
Bosques - Mixtos	0,00	0,00	0,09	50,00	0,09	50,00	0,00	0,00
Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha	182,62	4,31	413,40	9,76	1.243,18	29,34	2.398,15	56,60
Bosques - Plantaciones de Coníferas	1.710,32	5,98	3.185,80	11,14	8.814,94	30,82	14.892,76	52,07
Pastizales - Praderas	273,89	15,31	510,79	28,54	625,55	34,96	379,29	21,20
Pastizales - Otros Pastizales	111,25	11,76	238,97	25,27	351,12	37,13	244,28	25,83
Pastizales - Pastizales Áridos	53,10	5,72	132,49	14,28	312,59	33,70	429,42	46,29
Matorrales - Matorrales	800,79	7,18	1.959,00	17,56	3.606,32	32,33	4.788,02	42,93
Matorrales - Matorrales Arborescentes	1,35	6,28	3,42	15,90	5,22	24,27	11,52	53,56
Matorrales - Otros Matorrales Áridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	100,00	0,00	0,00
Humedales - Marismas	0,09	33,33	0,18	66,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetación total	3.318,11	6,27	6.990,76	13,21	16.534,94	31,24	26.083,88	49,28

Apéndice 6. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice dNBR.

SUB-USO	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosque Mixto	106,62	4,78	268,64	12,04	376,13	16,86	428,21	19,19	1.051,43	47,13
Bosque Nativo	465,17	11,00	901,61	21,32	904,01	21,38	773,64	18,29	1.184,53	28,01
Matorral	453,44	30,76	478,00	32,42	189,79	12,87	127,21	8,63	225,81	15,32
Matorral-Pradera	100,00	46,47	76,51	35,55	25,09	11,66	9,94	4,62	3,65	1,70
Matorral Arborescente	336,51	23,18	367,74	25,33	223,13	15,37	206,97	14,26	317,38	21,86
Plantación	4.004,95	9,81	7.441,66	18,23	9.201,25	22,54	9.032,21	22,12	11.147,14	27,30
Praderas	220,72	38,50	194,86	33,99	102,15	17,82	44,11	7,69	11,48	2,00
Rotación Cultivo-Pradera	193,72	38,13	193,63	38,11	79,75	15,70	30,90	6,08	10,10	1,99
Terreno de Uso Agrícola	370,21	26,18	685,66	48,48	273,64	19,35	76,26	5,39	8,50	0,60
Vegas	3,28	77,06	0,97	22,82	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetación total	6.254,62	11,82	10.609,28	20,04	11.374,94	21,49	10.729,44	20,27	13.960,03	26,38

Apéndice 7. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice RdNBR.

SUB-USO	No quemado		Severidad baja		Severidad media		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosque Mixto	56,45	2,53	243,13	10,88	483,58	21,64	1.451,13	64,95
Bosque Nativo	158,68	3,75	741,71	17,53	1.319,69	31,18	2.011,82	47,54
Matorral	122,69	8,32	299,64	20,31	356,92	24,20	695,76	47,17
Matorral-Pradera	31,30	14,54	55,91	25,98	61,92	28,77	66,09	30,71
Matorral Arborescente	86,85	5,98	221,50	15,25	313,10	21,56	830,72	57,21
Plantación	2.157,82	5,28	4.850,55	11,87	9.608,87	23,52	24.244,30	59,33
Praderas	86,27	15,05	131,07	22,86	188,02	32,80	167,96	29,30
Rotación Cultivo-Pradera	63,12	12,42	122,10	24,03	172,62	33,97	150,26	29,57
Terreno de Uso Agrícola	116,56	8,24	283,91	20,07	700,55	49,53	313,24	22,15
Vegas	0,57	13,33	1,65	38,80	1,50	35,34	0,53	12,53
Vegetación total	2.880,31	5,44	6.951,17	13,12	13.206,77	24,93	29.931,81	56,51

Apéndice 8. Número de hectáreas de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice RBR.

SUB-USO	No quemado		Severidad baja		Severidad media		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosque Mixto	59,77	2,68	189,63	8,49	536,82	24,03	1.448,07	64,81
Bosque Nativo	199,28	4,71	713,51	16,86	1.446,79	34,19	1.872,32	44,24
Matorral	169,90	11,52	404,24	27,41	481,03	32,61	419,83	28,46
Matorral-Pradera	40,28	18,72	86,15	40,03	69,10	32,11	19,67	9,14
Matorral Arborescente	123,88	8,53	325,68	22,43	402,10	27,69	600,51	41,35
Plantación	2.367,12	5,79	4.513,91	11,05	12.464,30	30,50	21.516,20	52,66
Praderas	112,48	19,62	168,78	29,44	219,18	38,23	72,88	12,71
Rotación Cultivo-Pradera	87,46	17,21	170,48	33,55	195,10	38,40	55,06	10,84
Terreno de Uso Agrícola	150,81	10,66	430,42	30,43	714,34	50,51	118,69	8,39
Vegas	1,37	32,10	2,60	61,23	0,28	6,68	0,00	0,00
Vegetación total	3.312,36	6,25	7.005,40	13,23	16.529,04	31,20	26.123,23	49,32

Apéndice 9. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2017.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos	120,4	25,3	133,6	28,1	91,3	19,2	87,9	18,5	42,4	8,9
Bosques	222,5	4,7	646,2	13,5	1.004,9	21,1	1.016,6	21,3	1.880,2	39,4
Plantaciones	3.074,3	9,4	5.604,6	17,1	7.283,3	22,2	6.940,7	21,2	9.896,6	30,2
Pastizales	1.028,8	28,1	1.225,2	33,4	724,5	19,8	520,3	14,2	164,0	4,5
Matorrales	1.806,1	16,2	2.983,9	26,7	2.263,2	20,3	2.176,9	19,5	1.945,2	17,4
Humedales	0,1	33,3	0,2	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	6.252,2	11,8	10.593,6	20,0	11.367,2	21,5	10.742,5	20,3	13.928,4	26,3

Apéndice 10. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2018.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos	196,1	41,3	100,2	21,1	96,7	20,3	69,0	14,5	13,4	2,8
Bosques	458,3	9,6	760,7	15,9	976,7	20,5	1.658,9	34,8	917,4	19,2
Plantaciones	3.648,8	11,1	5.126,2	15,6	4.626,2	14,1	8.465,3	25,8	10.974,1	33,4
Pastizales	1.871,3	51,1	840,9	23,0	545,0	14,9	346,0	9,4	59,1	1,6
Matorrales	3.751,4	33,6	2.477,4	22,2	1.986,5	17,8	2.033,5	18,2	926,7	8,3
Humedales	0,1	33,3	0,1	33,3	0,1	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	9.926,1	18,8	9.305,5	17,6	8.231,2	15,6	12.572,8	23,8	12.890,7	24,4



Apéndice 11. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2019.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos	241,6	50,8	115,8	24,4	86,1	18,1	28,7	6,0	3,0	0,6
Bosques	736,3	15,4	1.425,8	29,9	1.571,3	32,9	902,8	18,9	135,7	2,8
Plantaciones	7.410,6	22,6	6.671,6	20,3	7.528,6	22,9	7.887,3	24,0	3.331,8	10,1
Pastizales	2.344,4	64,1	739,2	20,2	424,7	11,6	135,0	3,7	14,0	0,4
Matorrales	5.119,2	45,8	2.705,9	24,2	1.902,9	17,0	1.203,1	10,8	243,0	2,2
Humedales	0,2	66,7	0,0	0,0	0,1	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	15.852,3	30,0	11.658,4	22,0	11.513,8	21,8	10.156,9	19,2	3.727,5	7,0

Apéndice 12. Número de hectáreas y porcentaje de cobertura por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2020.

Cobertura	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Cultivos	268,9	56,6	117,6	24,8	69,4	14,6	18,0	3,8	1,3	0,3
Bosques	1.050,5	22,0	1.815,0	38,0	1.410,9	29,6	441,2	9,2	53,5	1,1
Plantaciones	9.028,3	27,5	7.588,7	23,1	6.819,7	20,8	6.618,5	20,2	2.769,5	8,4
Pastizales	2.596,3	71,0	663,0	18,1	301,9	8,3	84,6	2,3	12,2	0,3
Matorrales	5.561,6	49,8	2.787,9	24,9	1.690,7	15,1	934,5	8,4	198,7	1,8
Humedales	0,1	33,3	0,2	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	18.505,6	35,0	12.972,4	24,5	10.292,6	19,5	8.096,8	15,3	3.035,2	5,7

Apéndice 13. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2017.

Sub-uso	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosques	571,8	8,9	1.170,3	18,1	1.280,1	19,8	1.201,9	18,6	2.236,0	34,6
Matorrales	890,0	28,3	922,3	29,4	438,0	13,9	344,1	11,0	546,8	17,4
Plantación	4.004,9	9,8	7.441,7	18,2	9.201,2	22,5	9.032,2	22,1	11.147,1	27,3
Praderas	220,7	38,5	194,9	34,0	102,1	17,8	44,1	7,7	11,5	2,0
Cultivos	563,9	29,3	879,3	45,7	353,4	18,4	107,2	5,6	18,6	1,0
Humedales	3,3	77,1	1,0	22,8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	6.254,6	11,8	10.609,3	20,0	11.374,9	21,5	10.729,4	20,3	13.960,0	26,4

Apéndice 14. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2018.

Sub-uso	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosques	1.173,3	18,1	1.013,0	15,7	1.160,0	17,9	1.910,7	19,5	1.209,1	18,7
Matorrales	1.786,5	56,9	539,1	17,2	383,0	12,2	312,5	9,9	121,3	3,9
Plantación	5.570,3	13,6	6.972,7	17,1	6.482,9	15,9	10.241,2	25,1	11.593,3	28,4
Praderas	348,4	60,8	139,2	24,3	61,0	10,6	21,0	3,7	3,8	0,7
Cultivos	1.056,3	54,9	626,4	32,6	191,3	10,0	42,6	2,2	5,7	0,3
Humedales	3,4	79,4	0,9	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	9.938,1	18,8	9.291,3	17,5	8.278,1	15,6	12.527,9	23,7	12.933,3	24,4

Apéndice 15. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2019.

Sub-uso	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosques	1.549,1	24,0	1.689,0	26,1	1.883,5	29,1	1.143,1	17,7	201,5	3,1
Matorrales	2.147,1	68,3	567,2	18,0	287,3	9,1	122,8	3,9	18,0	0,6
Plantación	10.520,0	25,8	8.801,8	21,6	9.165,3	22,4	8.838,5	21,6	3.516,3	8,6
Praderas	397,8	69,4	113,5	19,8	45,7	8,0	12,7	2,2	3,5	0,6
Cultivos	1.239,3	64,5	496,0	25,8	156,5	8,1	27,2	1,4	2,5	0,1
Humedales	4,2	99,3	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	15.857,6	29,9	11.667,6	22,0	11.538,2	21,8	10.144,3	19,2	3.741,7	7,1

Apéndice 16. Número de hectáreas y porcentaje de sub-uso por categoría de severidad de daño según el índice dNBR 2016-2020.

Subuso	No quemado		Severidad baja		Severidad media-baja		Severidad media-alta		Severidad alta	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosques	1.824,8	28,2	2.317,0	35,8	1.837,2	28,4	458,5	7,1	27,8	0,4
Matorrales	2.225,6	68,3	604,7	18,5	260,6	8,0	167,2	5,1	2,2	0,1
Plantación	12.540,0	30,7	9.618,8	23,6	8.104,0	19,8	7.574,6	18,5	3.001,8	7,4
Praderas	417,6	72,9	112,6	19,7	27,9	4,9	7,0	1,2	7,5	1,3
Cultivos	1.491,6	77,6	346,0	18,0	67,9	3,5	13,1	0,7	3,0	0,2
Humedales	4,3	99,9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vegetación total	18.503,8	34,9	12.999,1	24,5	10.297,6	19,4	8.220,4	15,5	3.042,2	5,7