

**ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA RESERVA  
NACIONAL CHINA MUERTA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA**

Abigail Eugenia Barra Urrea

Proyecto de Título presentado al  
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática  
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

**Ingeniero Geomático**

Escrito bajo la orientación del profesor

M.Sc. Carolina Bouniot Escobar

Aprobado por la comisión

Dr. Guido Staub

Ing. José Cornejo Morales

Los Ángeles

Agosto, 2020.

## Resumen

Los incendios forestales son una de las mayores amenazas que enfrentan los bosques tanto en Chile como en el resto del mundo. El seguimiento de la recuperación de la vegetación mediante técnicas de teledetección es una de las formas más precisa y novedosas que existen, ya que la teledetección es una de las herramientas más poderosas para este tipo de análisis. En este estudio se analizó la severidad del fuego y la recuperación de la vegetación para el incendio ocurrido el año 2015 en la Reserva Nacional China Muerta, ubicado en la Región de la Araucanía Chile; en base a imágenes satelitales (Landsat 8) de la zona durante el periodo 2015-2019, donde se estimó el índice de vegetación Normalized Difference Vegetation Index para los meses posteriores del incendio.



**Palabras clave:** Reserva Nacional China Muerta, Chile, Incendios Forestales, Recuperación vegetación, NDVI, Landsat 8.

## Dedicatoria

*A mi madre Benita Eugenia Urrea Vergara.*

*Por todo el amor que me entregó, por cada uno de sus abrazos, por cada palabra de aliento, y por cada uno de sus consejos que hoy llevo en mi corazón. Gracias mamita por ser mi compañera en cada etapa de mi vida, gracias por guiarme y enseñarme a ser una*

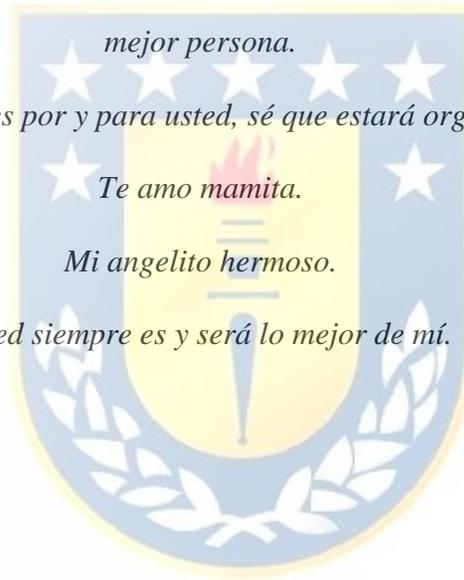
*mejor persona.*

*Este logro es por y para usted, sé que estará orgullosa.*

*Te amo mamita.*

*Mi angelito hermoso.*

*Usted siempre es y será lo mejor de mí.*



## **Agradecimientos**

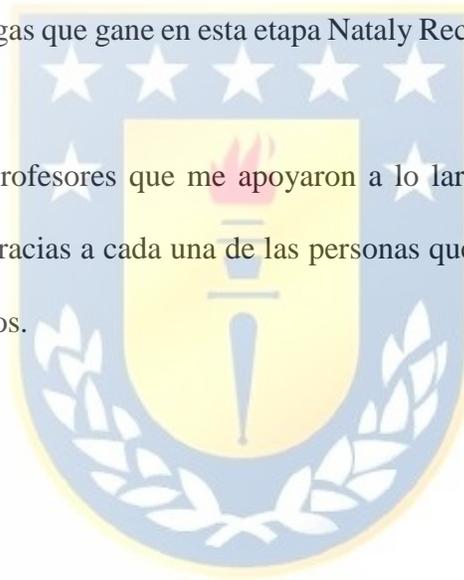
A mi familia, mis hermanos Felipe y Víctor, a mi padre Hernán, gracias por su apoyo incondicional y por siempre confiar en mí.

Al apoyo inigualable de Yerko Rodríguez, mi pareja, mi compañero, mi amigo, mi todo, porque estamos juntos desde el comienzo, apoyándonos, trabajando juntos, amándonos y saliendo adelante.

A mi mejor amiga María Muñoz gracias por siempre estar ahí, en las buenas y en las malas.

También agradezco a las amigas que gane en esta etapa Nataly Recabarren y Nicole Rocha, gracias por todo.

Gracias a cada uno de los profesores que me apoyaron a lo largo de mi pasada por la Universidad. Y en general gracias a cada una de las personas que estuvieron de alguna u otra manera durante estos años.



# Índice de Contenidos

1. Introducción .....	1
1.1. Objetivo General .....	4
1.2. Objetivos Específicos .....	4
2. Antecedentes Generales .....	5
2.1. Incendios forestales .....	5
2.2. Restauración de la vegetación .....	11
2.3. Percepción Remota .....	13
2.4. Índices espectrales .....	17
3. Área de estudio .....	20
3.1. Incendio marzo 2015 .....	22
4. Metodología .....	28
4.1. Obtención de datos .....	28
4.2. Análisis de datos .....	33
5. Resultados .....	37
5.1. Severidad de fuego y digitalización de máscara de incendio .....	37
5.2. Regeneración de la vegetación .....	40
6. Conclusiones y Discusiones .....	50
7. Referencias .....	53

## Lista de Tablas

Tabla 1 Efectos en términos de pérdidas o alteraciones debido a los incendios forestales. Fuente CONAF, (2006). .....	7
Tabla 2 Información sinóptica y estado del programa Landsat. Fuente USGS.....	14
Tabla 3 Bandas de sensor OLI Landsat 8. ....	16
Tabla 4 Bandas de sensor OLI Landsat 8. ....	16
Tabla 5 Adquisición de imágenes satelitales Landsat 8.....	29
Tabla 6 Indicador del estado del suelo mediante $\Delta$ NBR. Fuente Lutes et al 2006.....	33
Tabla 7 Reclasificación realizada por CONAF (2015) de los valores de $\Delta$ NBR para la determinación de la severidad del fuego.....	34
Tabla 8 Grado de severidad y superficie afectada. Fuente CONAF (2015). ....	35
Tabla 9 Clasificación de la actividad fotosintética según NDVI. Fuente Duncan et al., 1993.....	36
Tabla 10 Digitalización máscara de incendio. ....	38
Tabla 11 Actividad fotosintética (NDVI) año 2014 (pre-incendio) y año 2015 (post-incendio). ....	42
Tabla 12 Actividad fotosintética (NDVI) año 2015 y año 2016.....	43
Tabla 13 Actividad fotosintética (NDVI) año 2016 y año 2017.....	44
Tabla 14 Actividad fotosintética (NDVI) año 2017 y año 2018.....	45
Tabla 15 Actividad fotosintética (NDVI) año 2018 y año 2019.....	46
Tabla 16 Recuperación de la vegetación: año 2015 (cuando se produjo el siniestro) en comparación con el último año de este estudio 2019. ....	47

## Lista de Figuras

Figura 1 Número de incendios forestales correspondiente al periodo 1977.2019. Las regiones se encuentran ordenadas de norte (izquierda) a sur (derecha). Región de Antofagasta no registra datos. Fuente Corporación Nacional Forestal.....	10
Figura 2 Distribución Mensual de la Ocurrencia de Incendios Forestales periodo 1985-2019. Fuente CONAF. ....	10
Figura 3 Ubicación Reserva Nacional China Muerta. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 4 Ubicación de la Reserva Nacional China Muerta en la Reserva de la Biosfera Araucarias. Fuente Gobierno Nacional de la Araucanía.....	21
Figura 5 Clasificación por formaciones vegetacionales realizada por Luebert y Plissock (2006) del área afectada por el incendio Reserva Nacional China Muerta.....	26
Figura 6 Cubiertas catastros usos de suelos y vegetación área afectada por el incendio Reserva Nacional China Muerta. Fuente CONAF 2019.....	27
Figura 7 Imágenes en Color Natural RGB (432) LANDSAT 8 OLI-TIRS. Área de estudio Reserva Nacional China Muerta, recolectadas antes y después del incendio. Fechas de imagen: 24 de abril de 2014 (izquierda) y 11 de abril de 2015 (derecha). ....	30
Figura 8 Severidad del incendio realizada por CONAF (2015). ....	34
Figura 9 Digitalización de la máscara de incendio. ....	38
Figura 10 NBR antes y después del incendio. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 11 Digitalización mascara de incendio y grados de severidad a través de NBR. Fuente: elaboración propia.....	39
Figura 12 NDVI de la superficie afectada por el incendio 2014 (preincendio).....	41

Figura 13 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2015.....	42
Figura 14 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2016.....	43
Figura 15 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2017.....	44
Figura 16 NDVI de la superficie afectada del incendio año 2018.....	45
Figura 17 NDVI de la superficie afectada del incendio año 2019.....	46
Figura 18 NDVI 2015 y NDVI 2019. ....	47
Figura 19 Lugares de intervención realizados por CONAF en la imagen correspondiente al año 2015 (post-incendio). Sector L1: Siembra de núcleos de semilla de araucaria (10 ha). Sector L2: Siembra y plantación de semillas de araucaria (15ha). Sector L3: Siembra de núcleos de Araucaria (20 ha). Sector L4: Plantación mixta de núcleos (40 ha). ....	49



# 1. Introducción

El clima de la tierra cambia continuamente bajo la influencia de una serie de fuerzas naturales. Sin embargo, actualmente se observan significativos y rápidos cambios en los regímenes climáticos en todo el mundo que están siendo impulsados por el calentamiento global causado por las actividades humanas que emiten gases que atrapan el calor, conocidos como gases de efecto invernadero (FAO, 2013). El calentamiento del planeta se asocia con un aumento de la variabilidad del clima y, por lo tanto, determina una mayor frecuencia de fenómenos extremos como las olas de calor, las sequías y las tormentas intensas, y se asocia también con el aumento de los niveles del mar.

Las grandes masas forestales son de vital importancia para la humanidad, por lo que su conservación y el fomento de su extensión deberían ser materia prioritaria para los gobiernos y entidades nacionales e internacionales (Castillo, 2003). De sus múltiples beneficios, se destacan los siguientes (FAO, 2013):

- (i) Son sumidero de  $CO_2$  atmosférico: El dióxido de carbono es un Gas de Efecto Invernadero (GEI) clave. Y los bosques como sumideros de carbono que retienen (absorben) el carbono de la atmósfera en forma de  $CO_2$ , llegando a contener la mitad del carbono terrestre del planeta. Asimismo, los bosques son fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la deforestación y a la degradación de los bosques, representando un 17 por ciento de las emisiones globales de GEI.
- (ii) Constituyen una de las principales fuentes de agua potable de calidad que poseemos. El agua dulce se vislumbra como uno de los elementos más escasos del futuro.

- (iii) Preservan y mejoran la calidad del suelo, dulcificando el clima y protegiéndolo contra el avance de la erosión y la desertificación.

El cambio climático es considerado una de las amenazas más serias para el medio ambiente, debido a las emisiones de GEIs que provienen de la utilización de combustibles fósiles, aportando aproximadamente un 75% (CONAF, 2016). Y para el Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), la deforestación y la degradación de los bosques contribuyen entre el 18 y 20%. Se ha reconocido que las formas más eficientes para mitigar las emisiones de GEI se relacionan con la capacidad de los ecosistemas forestales de capturar y almacenar el carbono, por lo que la lucha contra el cambio climático debe incluir esfuerzos para detener la degradación de los bosques y la deforestación (CONAF, 2018). Una de sus principales amenazas son los incendios forestales, a nivel global arrasan anualmente alrededor de 4,7 millones de hectáreas por año década 2010-2020 (FAO, 2020).

En Chile, al año 2017 la superficie cubierta de Bosques representa el 23,3% del territorio nacional con 17,66 millones de hectáreas; de esta el Bosque Nativo alcanza 14,41 millones de hectáreas, lo que representa el 19,04 del territorio nacional, y el 4,07% es ocupado por Plantaciones Forestales, es decir 3,08 millones de hectáreas (CONAF, 2020a). En este sentido, los bosques de Chile se ven amenazados directamente con el aumento del número de incendios forestales. País donde se originan en promedio 5.000 incendios por temporada y que abarcan superficies de hasta 50.000 hectáreas, afectando principalmente vegetación natural, perdiéndose tanto su biodiversidad como los bienes y servicios ecosistémicos y sociales que esa vegetación presta (Fernández, 2010).

Los efectos posteriores a los incendios, como las inundaciones, escurrimientos y avalanchas de lodo, erosión, pérdida de la biodiversidad, etc., pueden ser tanto o más devastadores que la acción del propio fuego (CONAF, 2006).

El incendio forestal ocurrido en marzo de 2015 en la Reserva Nacional China Muerta, rememoro los grandes incendios que sufrió la zona cordillerana como resultado de la ampliación de la frontera agrícola y de la explotación maderera durante la primera mitad del siglo XX, perdiéndose miles de hectáreas de bosques de araucarias producto del fuego y la explotación (Otero, 2006 citado por Figueroa et al. 2018). A raíz de esta pérdida, se crearon las reservas y parques de araucarias en la zona, como medida paliativa y como estrategia de resguardo de este patrimonio natural y estableciéndose en 1990 el monumento natural *Araucaria araucana*, y, por tanto, la prohibición de su tala (Figueroa, 2018).

El incendio de 2015 provocó gran conmoción, y el gobierno de Chile a través de la cuenta pública del año 2015 estableció que se generaría “un plan de restauración de zonas afectadas por incendios en la temporada estival, en especial en las áreas silvestres y parques como China Muerta, Conguillío y Tolhuaca, todas ellas, parte de la Reserva de la Biosfera Las Araucarias. Específicamente el “Plan de Restauración de la Reserva Nacional China Muerta” fue anunciado en septiembre de 2015 con un plazo de 5 años, que contempla acciones como, la producción de plantas, colecta y tratamiento de semillas, enriquecimiento o forestación, siembra directa y cercos de protección; además, se propone un programa de monitoreo respecto al progreso de la recuperación y reforestación de los suelos que se vieron afectados en el incendio de 2015, contemplando una superficie una superficie dañada de 3700 hectáreas (CONAF,2020). En este sentido, se propone el

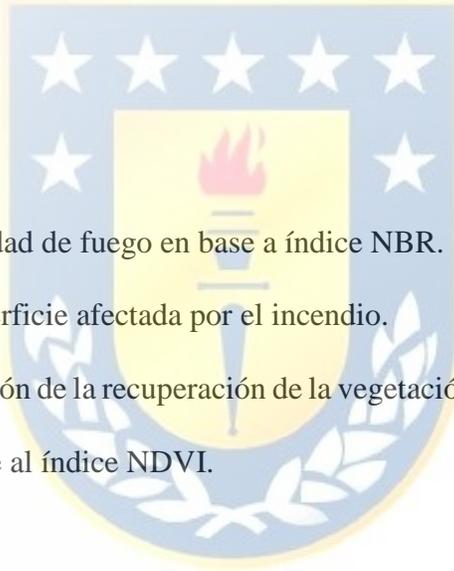
seguimiento de la recuperación de la vegetación mediante técnicas de teledetección, específicamente mediante la implementación del índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a través del tiempo.

### **1.1. Objetivo General**

Analizar la recuperación de la vegetación que ha sufrido la Reserva Nacional China Muerta en los últimos 5 años, posterior al incendio forestal del año 2015, mediante el cálculo del índice de vegetación Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) en imágenes satelitales.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Estimación severidad de fuego en base a índice NBR.
- Cuantificar la superficie afectada por el incendio.
- Analizar la evolución de la recuperación de la vegetación tras 5 años de ocurrido el siniestro en base al índice NDVI.



## 2. Antecedentes Generales

### 2.1. Incendios forestales

En 2006, CONAF definió un incendio forestal como “un fuego que cualquiera sea su origen y cause peligro o daño a las personas, a propiedades o al medio ambiente, y que además se propaga sin control en terrenos rurales, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta” (p.10). Considerado, además, como toda destrucción de la vegetación, por intermedio del fuego y cuando este se propaga libremente y sin control en terrenos denominados forestales (Ley N°20.283, 2008).

Los impactos provocados por el fuego sobre los ecosistemas son diversos y no necesariamente negativos (Fernández et al., 2010), por ejemplo, en los ecosistemas boreales los incendios tienen un rol clave en los procesos físicos y biológicos, haciendo más diverso el paisaje e influenciando positivamente los ciclos biogeoquímicos y el flujo de energía. Sin embargo, en el corto plazo se consideran dañinos, si se toma en cuenta la pérdida de los servicios ecosistémicos que brindan los bosques, tales como la erosión del suelo, aumento de la captación de agua, retención de las precipitaciones, que arrasan con el hábitat de la fauna, contaminan el aire, cambian el paisaje y disminuye los recursos turísticos y económicos. Además, si llegan a núcleos habitados destruyen viviendas, ganados, campos de cultivo o vidas humanas (véase Tabla 1).

Existen diferentes tipos de incendios según el estrato de vegetación afectada por el fuego, cada uno de estos es característico de ecosistemas distintos y condiciona diferentes adaptativas de las plantas. La clasificación y definición de estos incendios no siempre es clara

y varía según los países y autores, en este estudio se consideró la clasificación realizada por Pausas (2012) donde se pueden diferenciar tres grandes tipos:

- a. Incendios de superficie: se desarrollan sobre la superficie del suelo, pero próximos a ella (dejan las copas de los árboles intactas). Dependiendo de la densidad de árboles, estos incendios se suelen llamar “incendios de sotobosque” (en bosques densos), “incendios de sabana” (en bosques abiertos y sabanas) o “incendios de pradera” (en praderas y llanuras sin árboles). En general, son incendios poco intensos pero frecuentes.
- b. Incendios de copa: el fuego afecta prácticamente a todos los estratos de la vegetación y a toda la parte aérea de las plantas, incluyendo las copas de los árboles. Estos incendios son más intensos y en general más severos, que los incendios de superficie.
- c. Incendios de subsuelos: son incendios que no suelen generar llamas en la superficie, sino que arde el subsuelo; se da típicamente en turberas y ciénagas. En general, son poco frecuentes, se propagan lentamente y ocurren solo en años muy secos. Además, pueden durar mucho tiempo (meses) son muy difíciles de controlar y, dada la cantidad de materia orgánica que hay en las turberas, la cantidad de  $CO_2$  vertido en la atmósfera puede ser muy significativa.

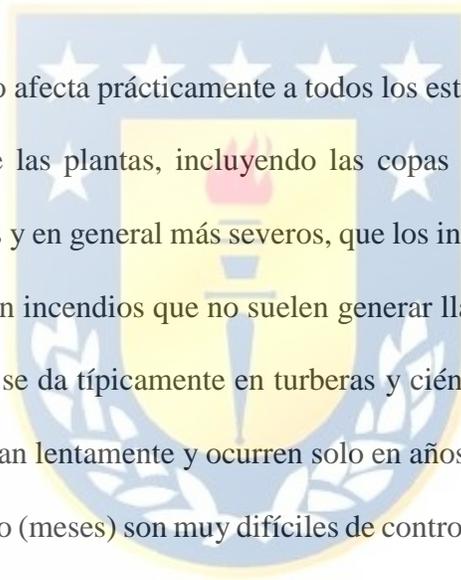


Tabla 1 Efectos en términos de pérdidas o alteraciones debido a los incendios forestales. Fuente CONAF, (2006).

<b>EFFECTOS SOCIOECONÓMICOS</b>	
<b>Salud Publica</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Contaminación de suelos, agua y aire.</li> <li>○ Deterioro del paisaje o belleza escénica.</li> <li>○ Limitaciones para la recreación y prácticas deportivas.</li> <li>○ El humo que genera el fuego cerca de caminos puede ocasionar accidentes de tránsito, debido a que la visibilidad se reduce considerablemente.</li> </ul>	
<b>Desarrollo comunitario</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Daños a la propiedad.</li> <li>○ Deterioro o detención de procesos productivos, como el daño a los cultivos.</li> <li>○ Reducción de fuentes de trabajo.</li> <li>○ Limitaciones al desarrollo rural y al comercio local, debido al deterioro de productos agrícolas y destrucción de infraestructuras.</li> <li>○ Deterioro del turismo, y, por lo tanto, de los ingresos que genera,</li> <li>○ Pérdida de valores culturales e históricos.</li> <li>○ Perjuicios a obras públicas e infraestructura de comunicaciones.</li> <li>○ Empobrecimiento sostenido de la población que habita paisajes degradados.</li> </ul>	
<b>EFFECTOS ECOLÓGICOS</b>	
<b>Suelos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Deterioro de las propiedades físicas del suelo, con la consiguiente disminución de su capacidad de absorción de agua.</li> <li>○ Cambio en las propiedades químicas del suelo, con perdida frecuente de los nutrientes.</li> <li>○ Destrucción del estrato de materia orgánica.</li> <li>○ Erosión de los suelos por exposición al viento y lluvia.</li> </ul>	
<b>Agua y Cuencas Hidrográficas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Incremento del escurrimiento superficial del agua que provoca alteración en los cursos de agua y en su ciclo natural.</li> <li>○ Deterioro en la calidad del agua al arrastrar cenizas o las capas superficiales del suelo.</li> <li>○ En el periodo de lluvias, crecidas de ríos por embancamiento con la consiguiente generación de inundaciones.</li> </ul>	
<b>Vida Silvestre</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Destrucción de formaciones vegetales o alteraciones en la composición de especies.</li> <li>○ Migraciones de animales, aves, insectos y microorganismos, o la destrucción de estos.</li> <li>○ Desequilibrios ecológicos o rupturas en la cadena biológica al cambiar el número de especies y su diversidad.</li> <li>○ Fragmentación del bosque y con ellos debilitamiento de los ecosistemas.</li> </ul>	
<b>Aire y Atmosfera</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alteraciones físico-mecánicas de la atmosfera.</li> <li>○ Incorporación de emisiones contaminantes.</li> </ul>	

En el mundo existe una superficie forestal total de 4.060 millones de hectáreas (ha), que cubren el 31 por ciento de la superficie terrestre total. El mundo ha perdido en total 178 millones de hectáreas de bosque desde 1990, siendo una de sus principales amenazas, los incendios forestales, que arrasan anualmente alrededor de 4,7 millones de hectáreas (FAO, 2020).

El cambio climático es considerado una de las amenazas más serias para el medio ambiente, debido a las emisiones de GEI. En este contexto, se ha reconocido que una de las formas más eficientes para mitigar las emisiones de GEI se relacionan con la capacidad de los ecosistemas forestales de capturar y almacenar el carbono, por lo que la lucha contra el cambio climático debe incluir esfuerzos para detener la degradación de los bosques y la deforestación (Goldammer, 2001).

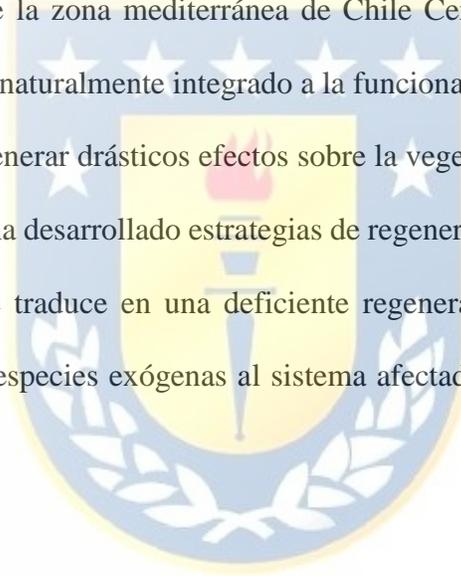
- **Incendios forestales en Chile**

Existen incendios de origen natural y por causas humanas; los primeros, muy escasos en nuestro país, son los producidos por erupciones volcánicas y por caída de rayos en tormentas eléctricas secas, sin presencia de lluvia; y los segundos, son incendios forestales provocados por el ser humano, ya sea por descuido, desconocimiento o intencionalmente.

Actualmente el mayor porcentaje de los incendios registrados en Chile se ubican entre la Región de Valparaíso y la Región de Los Lagos (Figura 1). Hacia el norte, en el desierto de Atacama, la vegetación es escasa o inexistente, mientras que, en regiones meridionales, la abundante humedad y la baja densidad poblacional protegen a los milenarios bosques naturales de los fuegos.

CONAF (2020), señala que en Chile ocurren por año un promedio de 6.000 a 7.000 incendios forestales, debido a las condiciones climáticas, tales como la carencia de lluvias, la mayor temperatura del aire y los flujos de viento Sur, condiciones que se dan desde la primavera de un año hasta el otoño del siguiente, es decir, desde los meses de noviembre a mayo (Figura 2). Favoreciendo la ignición de la vegetación combustible a causa de una fuente de calor aportada por el ser humano.

Con respecto, a los efectos que tiene el fuego en la vegetación chilena, Fernández (2010), señala que los ecosistemas de la zona mediterránea de Chile Central son sensibles al fuego, ya que el fuego no está naturalmente integrado a la funcionalidad del sistema, por lo que los incendios pueden generar drásticos efectos sobre la vegetación. En general, la flora de estos ecosistemas no ha desarrollado estrategias de regeneración evolutivamente asociadas al fuego, lo que se traduce en una deficiente regeneración post-fuego que facilita el establecimiento de especies exógenas al sistema afectado (Montenegro *et al*, 2004).



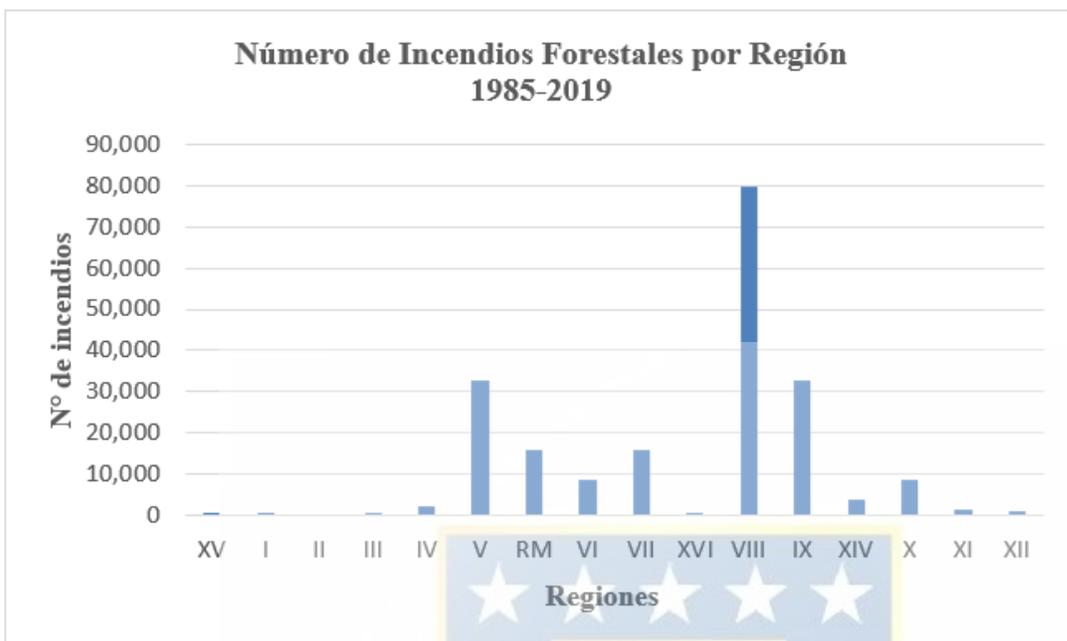


Figura 1 Número de incendios forestales correspondiente al periodo 1977.2019. Las regiones se encuentran ordenadas de norte (izquierda) a sur (derecha). Región de Antofagasta no registra datos. Fuente Corporación Nacional Forestal.

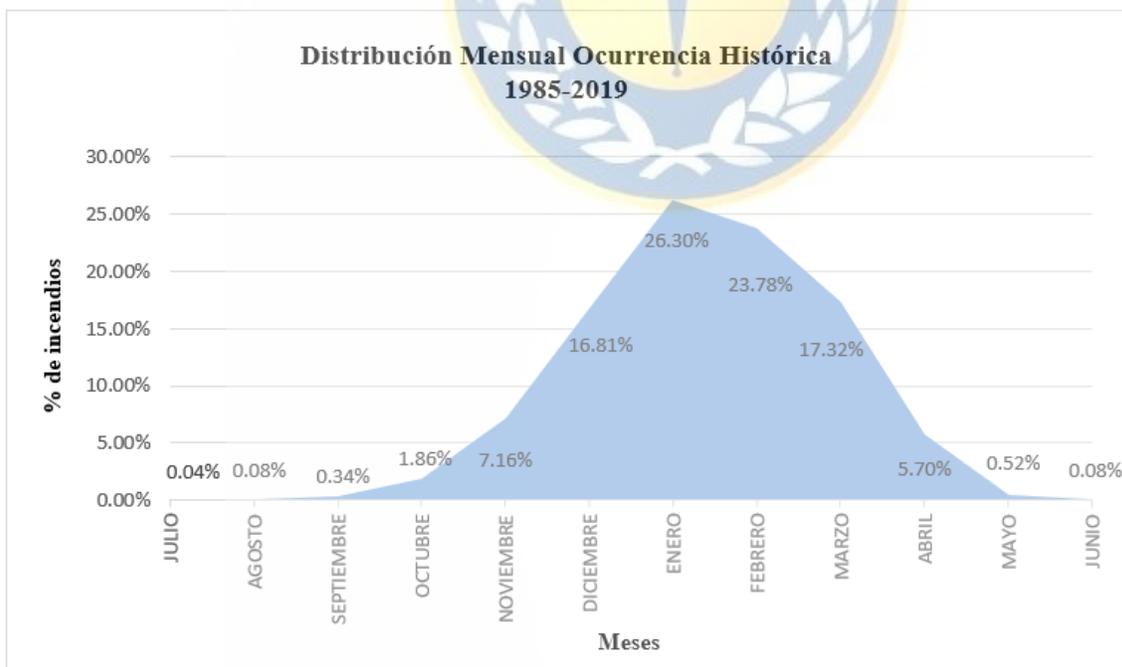


Figura 2 Distribución Mensual de la Ocurrencia de Incendios Forestales periodo 1985-2019. Fuente CONAF.

## 2.2. Restauración de la vegetación

Los ecosistemas han estado permanentemente influenciados por agentes perturbadores de origen natural, aunque en la actualidad el principal agente perturbador es el ser humano (SER, 2010). Junto con la transformación de hábitats para urbanización, agricultura y silvicultura, los incendios forestales han sido uno de los mayores causantes de perturbación sobre los hábitats naturales en Chile, generando severos impactos sobre los hábitats nativos, impactos que en algunos casos hasta el día de hoy no han sido capaces de recuperarse (Fernández, 2010).

Con el objetivo de reducir los impactos causados por los incendios forestales sobre los ecosistemas se recurre a la “Restauración Ecológica”. Estos impactos negativos radican en que los ecosistemas brindan importantes servicios, ya que regulan el clima, purifican el agua, descontaminan el aire, controlan las inundaciones, etc. (Fernández – Méndez, 2016). En este sentido, los planes de restauración deben considerarse como un factor clave para restituir los daños.

- **Restauración Ecológica**

La restauración ecológica es una actividad intencional que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema nativo con respecto a su salud, integridad y sustentabilidad. Como referencia se puede definir, de forma general, como el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (SER, 2004).

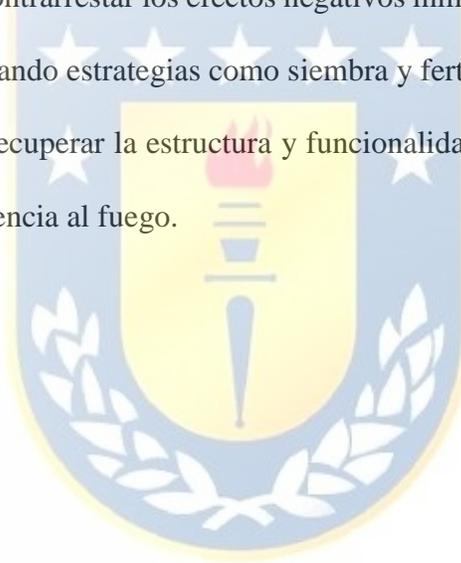
- **Restauración Ecológica Post-fuego**

El daño a los recursos es altamente dependiente de la severidad del incendio. Los incendios con un alto nivel de severidad destruyen la vegetación, consumen la cubierta

vegetal orgánica y exponen el suelo mineral a la erosión (Fernández-Méndez *et al*, 2016),, además de incrementar la impermeabilidad de los suelos reduciendo la infiltración e incrementando la escorrentía superficial.

Luego que un ecosistema es afectado por un incendio, se deben considerar dos fases para su recuperación. Una primera a corto plazo, denominada *Rehabilitación*, que debe ser ejecutada tan pronto como sea posible luego del siniestro (Vega, 2007), y una segunda a mediano y largo plazo denominada Restauración:

- La *Rehabilitación* busca contrarrestar los efectos negativos inmediatos de escorrentía superficial y erosión, aplicando estrategias como siembra y fertilización.
- Y la *Restauración* busca recuperar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, así como también su resiliencia al fuego.



### 2.3. Percepción Remota

La percepción remota es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de las imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales a través de sensores remotos (Pérez et al. 2006). Estos sensores logran captar rangos del espectro electromagnético que el ojo humano no es capaz de percibir, como es el caso de radiaciones infrarrojas, ultravioletas, microondas, entre otras.

La utilización de esta técnica en este estudio es debido a las ventajas que ofrece (Martínez *et al.* 2010):

- i) Realizan una cobertura periódica de la superficie de la Tierra, lo que permite estudio de evolución temporal.
- ii) Permiten una visión global de grandes espacios, lo que homogeniza la toma de datos.

Permiten obtener información sobre regiones no visibles de espectro electromagnético, registrando datos inaccesibles al ojo humano.

#### ○ Programa Landsat

Landsat fue el primer satélite civil de observación de la Tierra, desarrollado por la Nasa. Se lanzó el 23 de julio de 1972, con el lanzamiento del satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), que luego pasó a llamarse Landsat 1. En 1975, 1978, 1982 y 1984, fueron lanzados los Landsat 2, 3, 4 y 5. Landsat 6 no logró alcanzar la órbita en 1993, Landsat 7 se lanzó con éxito en 1999 y el 2013 Landsat 8. En consecuencia, este programa ha puesto en órbita una serie de satélites con diferentes sensores a bordo (t2), donde cada uno es un poco más sofisticado que su antecesor.

El programa Landsat ofrece imágenes a libre disposición desde 1973, esto dio lugar a una inmensa variedad de usos para las imágenes Landsat, potencialmente en el estudio de fenómenos variables en el tiempo y el monitoreo de cambios en la superficie terrestre en los últimos 30 años.

Diferentes autores han utilizado Landsat 7 para la documentación de la ubicación y extensión de las áreas quemadas, la gravedad de los incendios y el posterior crecimiento de la tierra después de un incendio forestal (Lopez, 2020; Hudak, A. *et al*, 2004; Chuvieco, E., 2002), este se encuentra con una falla desde el año 2003 en el Scanner Corrector Lineal (SLC), que provocó el aprovechamiento al 70% de su rendimiento (Landsat Science, 2020); por lo que se prefirió la utilización de Landsat 8, en vista de que presenta mejoras con respecto a la precisión radiométrica y el número de bandas.

*Tabla 2 Información sinóptica y estado del programa Landsat. Fuente USGS.*

<b>SATÉLITE</b>	<b>FECHA DE LANZAMIENTO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>SENSORES</b>
Landsat 1	23 de julio de 1972	Fuera de servicio 06 de enero de 1978	MSS y RBV
Landsat 2	22 de enero de 1975	Fuera de servicio 25 de febrero de 1982	MSS y RBV
Landsat 3	25 de marzo de 1978	Fuera de servicio 31 de marzo de 1983	MSS y RBV
Landsat 4	16 de julio de 1982	Fuera de servicio 15 de junio 2001	TM y MSS
Landsat 5	01 de marzo de 1984	Fuera de servicio 05 de junio de 2013	TM y MSS
Landsat 6	05 de octubre de 1993	No entro en orbita	ETM
Landsat 7	15 de abril de 1999	Baja técnica	ETM+
Landsat 8	11 de febrero de 2013	Operacional	OLI y TIRS

- **Landsat 8**

Landsat 8 se lanzó en un cohete Atlas-V desde la Fuerza Aérea Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013. Es el satélite lanzado más recientemente y lleva los instrumentos Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Sus características básicas son (USGS, 2020):

- **Sensor OLI:**

Construido por Ball Aerospace & Technologies Corporation. OLI captura datos con una precisión radiométrica mejorada en un rango dinámico de 12 bits, lo que mejora la relación señal / ruido general. Esto se traduce en 4096 niveles de gris potenciales, en comparación con solo 256 niveles de gris en los instrumentos Landsat 1-7 de 8 bits. El rendimiento mejorado de señal a ruido permite una caracterización mejorada del estado y la condición de la cubierta terrestre. Este sensor es prácticamente idéntico al sensor ETM+ que posee Landsat 7, solo que OLI cuenta con dos nuevas bandas las cuales son la *Banda 1 Coster* y la *Banda 9 Cirrus* (Tabla 3).

- **Sensor TIRS**

El sensor infrarrojo térmico mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Para la gestión de los recursos hídricos dependen de las mediciones de la energía térmica de la Tierra, es por eso por lo que TIRS fue agregado a la misión Landsat 8, correspondientes a las bandas 10 y 11 (Tabla 4).

Tabla 3 Bandas de sensor OLI Landsat 8.

<b>SENSOR OLI</b>				
<b>BANDA</b>	<b>COLOR</b>	<b>ANCHO DE BANDA</b>	<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>APLICACIONES</b>
1	Coastal/Aerosol	0.43 – 0.45 $\mu\text{m}$	30 m	Estudios costeros y de aerosoles.
2	Blue	0.45 – 0.51 $\mu\text{m}$	30 m	Diferencia entre vegetación y suelo. Aguas costeras.
3	Green	0.53 – 0.59 $\mu\text{m}$	30 m	Mapeo de vegetación. Calidad de agua.
4	Red	0.64 – 0.67 $\mu\text{m}$	30 m	Usos del suelo. Diferenciación de especies vegetales.
5	NIR	0.85 – 0.88 $\mu\text{m}$	30 m	Agricultura y vegetación. Mapeos geomorfológicos y geológicos. Identificación de incendios y áreas húmedas.
6	SWIR 1	1.57–1,65 $\mu\text{m}$	30 m	Usos del suelo. Medición de la humedad de la vegetación.
7	SWIR 2	2.11 – 2.29 $\mu\text{m}$	30 m	Identificación de minerales. Mapeo hidrotermal.
8	Pancromática	0.50–0.68 $\mu\text{m}$	15 m	Resolución de 15 m, definición de imagen más nítida.
9	Cirrus	1.36 – 1.38 $\mu\text{m}$	30 m	Diferenciación nubosidad. Mejor detección de la Contaminación en cirrus (nubes)

Tabla 4 Bandas de sensor OLI Landsat 8.

<b>SENSOR TIRS</b>				
<b>BANDA</b>	<b>COLOR</b>	<b>ANCHO DE BANDA</b>	<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>APLICACIONES</b>
10	Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS 1)	10.6 – 11.2 $\mu\text{m}$	100 m	Estrés térmico en plantas. Corrientes marinas. Propiedades termales del suelo.
11	Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS 2)	11.5 – 12.5 $\mu\text{m}$	100 m	

## 2.4. Índices espectrales

Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales que intentan realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores, como el suelo, las condiciones de iluminación y la atmósfera. Con ellos se pretende conseguir una información más clara sobre las características de la vegetación, consiguiendo una mayor correlación con parámetros agronómicos como biomasa, índice de superficie foliar (LAI) etc., que la conseguida con las bandas espectrales originales (Sánchez, 2000).

Un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert *et al.* 1997).

Estos índices no miden directamente ni la productividad ni la disponibilidad forrajera, pero tienen una estrecha relación con estas variables, por lo que se recomienda utilizarlos para análisis regionales. Los cambios del índice de vegetación permiten decir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto al valor histórico. Estos índices se fundamentan en el comportamiento radiométrico de la vegetación (Aguilar, 2016).

## ○ NDVI

El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) es un índice normalizado que mide el verdor (la biomasa relativa) de la vegetación. Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde  $\rho_{IR}$  es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y  $\rho_R$  la reflectancia correspondiente al canal del rojo. (Rouse *et al.* 1974 citada por Ruiz, 2004),

Este índice genera valores entre -1,0 y 1,0 que representan el verdor y donde cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al suelo desnudo. Los valores muy bajos de NDVI corresponden a áreas desiertas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados, mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales.

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación (Sabins, 1997 citado por Navazo *et al.*, 2015).

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del

tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. (Aguilar, 2016).

- **NBR**

El *Normalized Index of Burned Areas* (NBR), en español el índice Normalizado de Áreas Quemadas, fue definido para detectar y delimitar grandes áreas afectadas por incendio. La ecuación utilizada es muy similar a la del NDVI, con la diferencia de que el NBR utiliza las bandas NIR y SWIR.

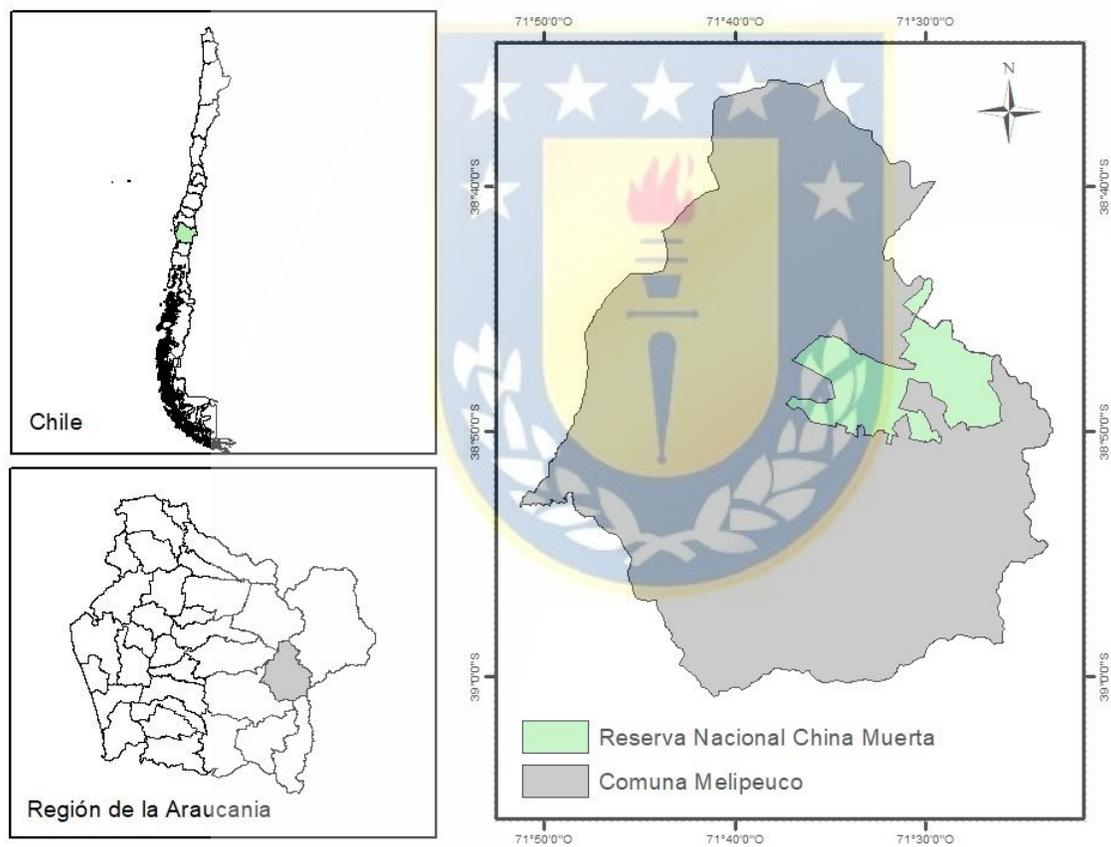
$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\rho_{NIR}$  es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y  $\rho_{SWIR}$  es la reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta, propuesta por Hunt & Rock en 1989 (Navazo *et al.*, 2015).

El NBR fue diseñado originalmente para ser usado con las bandas 4 y 7 de los sensores TM y ETM+, pero puede ser utilizado con cualquier sensor multiespectral que tenga bandas NIR (0.79 – 0.9  $\mu m$ ) y SWIR (2.82 – 2.35  $\mu m$ ).

### 3. Área de estudio

El incendio del año 2015 ocurrió en la Reserva Nacional China Muerta, que presenta una superficie de 11.168 hectáreas, y que se sitúa en la comuna de Melipeuco, Provincia de Cautín y parte de la comuna de Lonquimay, Provincia de Malleco, ambas en la Región de la Araucanía (Figura 3).



*Figura 3 Ubicación Reserva Nacional China Muerta. Fuente: Elaboración propia.*

La reserva forma parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), cuya denominación oficial es Reserva de la Biosfera “Araucarias” (Figura 4), que fue Decretada el 30 de junio de 1983 por el Concejo Internacional del Programa “El Hombre y la Biosfera” (CONAF, 2006).

Es considerada patrimonio forestal perteneciente al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), creada el 28 de junio de 1968 por Decreto N°330 del Ministerio de Agricultura.

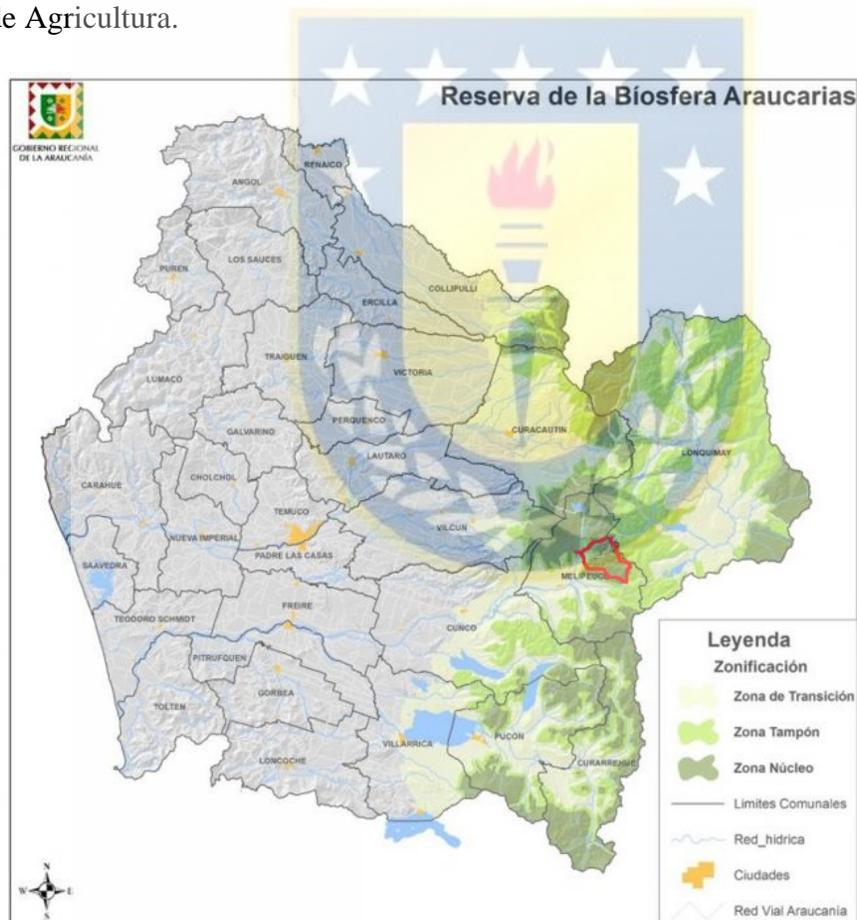


Figura 4 Ubicación de la Reserva Nacional China Muerta en la Reserva de la Biosfera Araucarias. Fuente Gobierno Nacional de la Araucanía.

### 3.1. Incendio marzo 2015

Se inició a raíz de una fogata mal apagada, el día 14 de marzo de 2015, siendo declarado controlado 23 días después, el 6 de abril. En su violenta y rápida propagación afectó terreno de propietarios particulares, extendiéndose luego principalmente hacia la Reserva Nacional China Muerta, y en menor medida hacia el Parque Nacional Conguillio. El área afectada pertenece administrativamente a la comuna de Melipeuco.

Según comunicado oficial por parte de CONAF, el incendio afecto a una superficie de 3.765 hectáreas. Las condiciones climáticas en el momento del comienzo fueron:

- Temperatura máxima del día: 25°C
- Humedad Relativa 33%
- Velocidad del viento y dirección del viento: 12 km/h en dirección Nor-Oeste.

A partir del Plan de Manejo de la Reserva Nacional China Muerta (CONAF, 2014), se obtuvo una descripción ecológica de las áreas afectadas por el incendio forestal:

#### i. Topografía

El área afecta por el incendio presenta una topografía accidentada y escarpada en términos generales, aunque en menos extensión es posible encontrar sectores con montículos a planos, enclavada en la cordillera andina a una altura variable entre los 759 y los 2.000 m.s.n.m. las alturas más destacadas son los cerros Coyán, Cheñe, Allillonco y Cóndor.

Además, la Reserva posee suelos Clase VII, que son los suelos que poseen limitaciones topográficas muy severas, en donde su uso debe limitarse a la actividad forestal; y suelos tipo Clase VIII, que al igual que la clase VII poseen limitaciones topográficas muy severas, pero a diferencia de estos deben ser dedicados a la protección de la flora y la fauna

## ii. Hidrografía

El área incendiada se encuentra dentro del sistema hidrológico de la sub-cuenca del Río Allipén, y específicamente la forma de alimentación de la red hidrográfica al interior del área afectada es de origen pluvial. Al interior de esta área podemos destacar los siguientes cursos de agua: el Río Miraflores que corre hacia la provincia de Malleco, siendo un régimen de agua permanente; y el río Cabeza de Indio, el cual es un río de régimen permanente.

## iii. Clima

Según la clasificación climática de Köppen, el área de estudio presenta características predominantes de clima templado lluvioso, que se localiza de preferencia en la pre-cordillera andina. Producto de lo anterior esto genera un mayor contraste entre las temperaturas, encontrándose mínimas de  $-18^{\circ}\text{C}$  en invierno y máximas de  $26-30^{\circ}\text{C}$  en verano, con una temperatura media de  $7^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, las precipitaciones varían entre los 1.000 y 2.500 mm anuales, con periodos secos de 2 a 3 meses, y una humedad relativa promedio anual aproximado de 85%.

## iv. Flora y fauna

Este es el ítem de mayor relevancia, debido a que la vegetación que se perdió debido al paso del incendio es la razón por la cual se hace necesario el estudio de la recuperación de esta. Los tipos forestales presentes en el área de estudio son principalmente la Araucaria (con la mayor participación en superficie), posteriormente el tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe, y el tipo forestal Lengua ((Gajardo, 1994 citado por CONAF 2014).

- Araucaria

La Araucaria es la especie que domina el paisaje en amplios sectores del área quemada, la cual va formando bosques puros y mixtos. Esta especie se caracteriza por tener una importancia paleobotánica, cultural, económica y ecológica.

Su distribución altitudinal varía de los 1.500 msnm hasta los 1.700 msnm. Corresponde al tipo Forestal *Araucaria araucana* y está catalogada como especie vulnerable (Benoit, 1989).

- Roble – Raulí- Coigue

Este tipo forestal posee gran importancia económica y por tanto social, ya que las especies que lo conforman son de alto interés productivo. Los bosques de roble – raulí – Coigue, se han formado y modelado en función de la acción alteradora del hombre y del catastrofismo de fuerzas naturales. Parte de estos bosques en las que estaban incluidas las especies de *Nothofagus* desaparecieron, desarrollándose en cambio bosques de segundo crecimiento renovales formados por Roble puro, en las áreas bajas; Roble y Raulí en áreas intermedias; y Raulí y/o Coigue puro en las partes más altas.

- Ciprés de la cordillera

Los bosques de Ciprés de la Cordillera (*Austrocedrus chilensis*), se queman de forma rápida, probablemente debido al contenido resinoso de su follaje. Se caracteriza por tener un crecimiento lento, y son en general muy puros en cuanto al dosel superior. Su distribución altitudinal varía al norte sobre los 900 hasta 1800 msnm y al sur fluctúan entre los 400 y 700 msnm. Actualmente esta especie se encuentra en la categoría de vulnerable (Benoit, 1989).

- Coigue – Raulí – Tapa

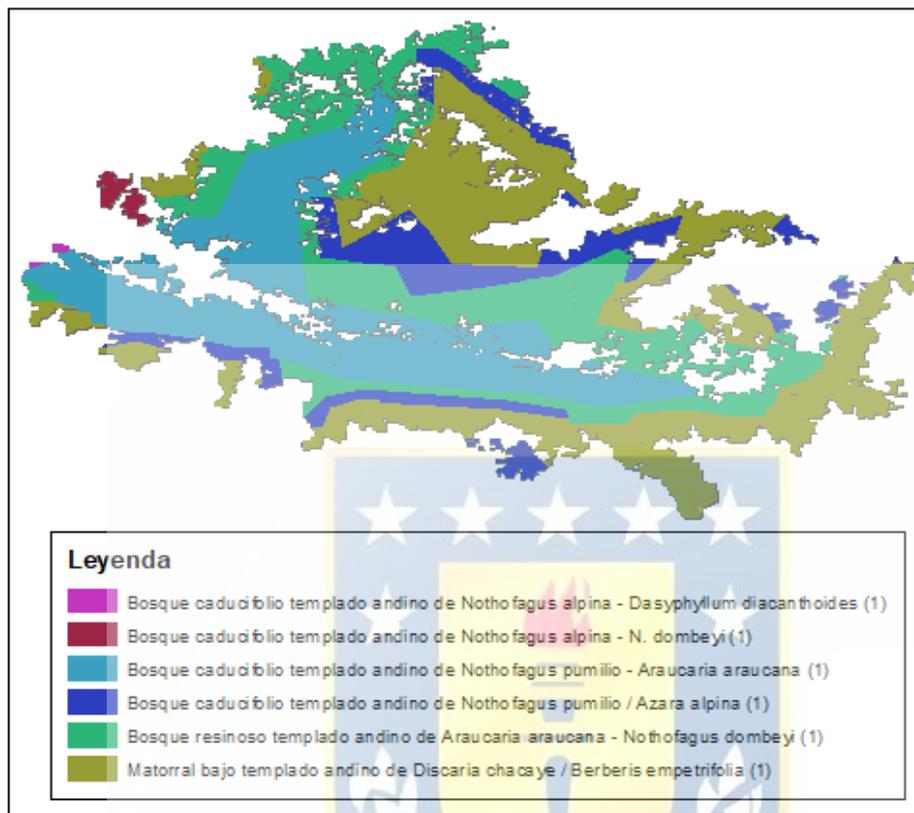
Estos bosques están caracterizados florísticamente por la presencia constante de Coigue, Rauli y Tapa a lo largo de su distribución geográfica. Los bosques del sector septentrional del tipo están formados por un dosel emergente o dominante constituido por Coihue y Raulí y un dosel intermedio, donde Tapa y Trevo son las especies más importantes o, por lo menos, más frecuentes, y donde aparece Tineo y Olivillo. En el sotobosque destacan Avellano y Piñol.

- Lengua

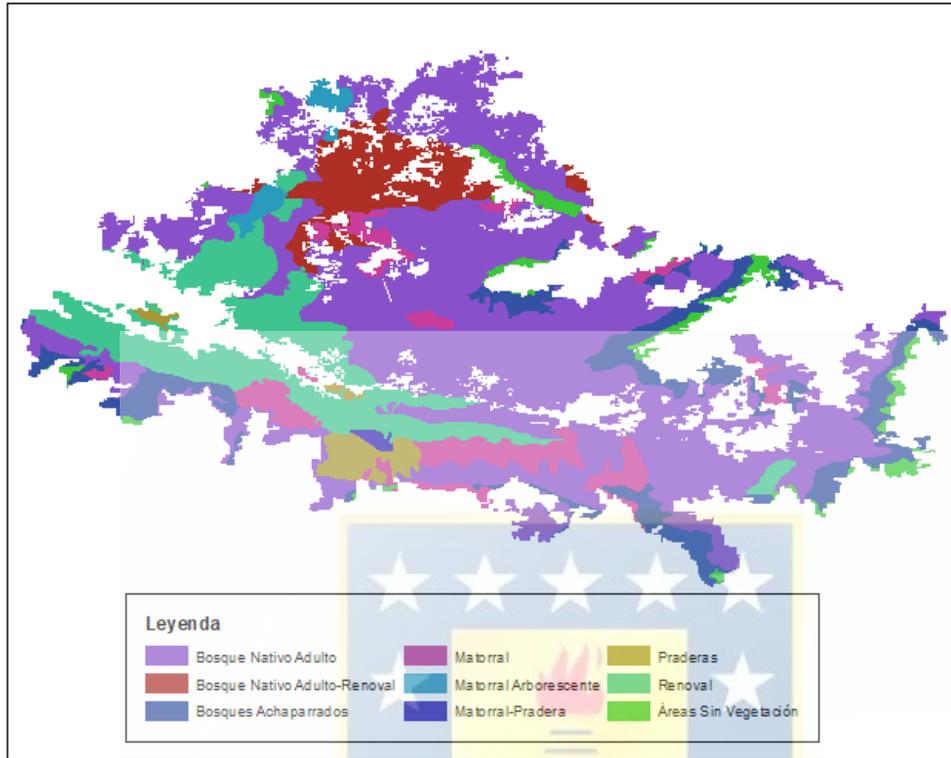
La Lengua se asocia con Coigue y Roble, así como con Araucaria, estos bosques mezclados se ubican a altitudes entre los 900 y 1.200 m.s.n.m., dependiendo de la latitud y exposición sobre ellos se desarrolla el bosque de Lengua puro. El sotobosque de los bosques mezclados está dominado por Colihue, Quillay y Canelo enano.

La clasificación de las formaciones vegetacionales realizadas por Luebert y Pliscoff (2006) se encuentran representadas en la Figura 5. Además de la clasificación realizada por Gajardo, CONAF (2019), realiza continuamente catastros vegetacionales, siendo la última el año 2014 para la Región de la Araucanía (Figura 6), en donde se identifica el uso bosque nativo con la mayor participación en superficie.

La fauna silvestre que se puede encontrar dentro del área afectada por el incendio forestal y de las cuales su hábitat se vio dañada, corresponde a zorros, pumas, chilla, guiñas (especies declaradas en peligro de extinción), pudu (especie declarada como vulnerable); y aves como el loro choroy, el carpintero negro (especie vulnerable), halcón peregrino (en peligro de extinción), chercán, entre otros.



*Figura 5 Clasificación por formaciones vegetacionales realizada por Luebert y Pliscoff (2006) del área afectada por el incendio Reserva Nacional China Muerta.*



*Figura 6 Cubiertas catastros usos de suelos y vegetación área afectada por el incendio Reserva Nacional China Muerta. Fuente CONAF 2019.*

## 4. Metodología

El objetivo principal de este estudio es el análisis de la recuperación de la vegetación de la Reserva Nacional China Muerta, a 5 años del incendio ocurrido el año 2015.

### 4.1. Obtención de datos

Generalmente los datos digitales deben pasar por un proceso previo a su introducción en el sistema, ya sea para hacerlos compatibles o accesibles al mismo. Allí, se requieren tratamientos que los configuren adecuadamente para cubrir las necesidades específicas del método.

#### ○ Selección de imágenes

Unos de los puntos delicados en los estudios de Teledetección es la selección de las imágenes con las que se va a trabajar, ya que se considera la base del trabajo. En este caso, se seleccionó la plataforma Landsat, específicamente Landsat 8 y su sensor OLI.

Se selecciono el satélite Landsat, por diversas razones, siendo dos las principales. En primer lugar, porque otros autores la han empleado y validado en trabajos previos empleando distintas metodologías que se podían adaptar a este caso de estudio (Navazo et al. 2015). En segundo lugar, porque son imágenes gratuitas, con una óptima resolución espacial, espectral y temporal para el estudio de un incendio de grandes dimensiones como es este caso (Chuvienco, 2002)

La elección de Landsat 8 y no Landsat 7 se debió a que este último presenta problemas en sus bandas (bandas con ausencia de información en sus imágenes) desde el año 2003; además, de que Landsat 8 presenta mejor calidad de los datos y la resolución radiométrica

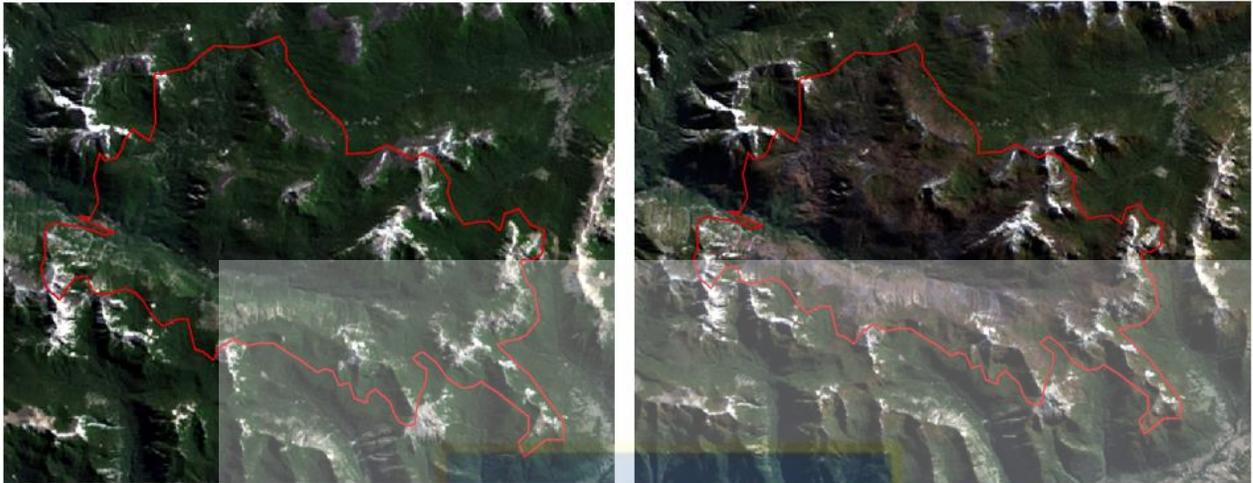
aumento a 16 bits respecto a los 8 bits de satélites anteriores, proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

La elección de las fechas más adecuadas para las imágenes es otro elemento de importancia. Como los procesos de este estudio son multitemporales, es decir, en la adquisición de una imagen previa e imagen posterior al incendio, la fecha más aconsejable para evaluar las consecuencias del fuego esta entre 7 a 30 días tras su control (Chuvieco *et al.*, 1988 citado por Ruiz 2004). El mismo autor señala, que la fecha previa es menos delicada, sobre todo en ecosistemas maduros en donde los cambios en la vegetación son mínimos, pero si se debe cuidar que ambas imágenes provengan de una época del año semejante. En este sentido, la imagen previa puede ser incluso de 2 a 3 años antes del incendio. Las fechas de las imágenes adquiridas se encuentran en la Tabla 5 y Figura 7.

Las imágenes seleccionadas se encuentran desprovistas de nubes, bien en su totalidad o al menos dentro del área de estudio. Todas las imágenes post-incendio se encuentran dentro del mes siguiente al control del fuego (abril), a excepción de los años 2017, 2018 y 2019 que corresponden al mes de marzo, debido a que las imágenes del mes de abril contaban con la presencia de demasiada nubosidad en el área de estudio.

*Tabla 5 Adquisición de imágenes satelitales Landsat 8.*

<b>SENSOR</b>	<b>FECHA</b>	<b>HORA DE ADQUISICIÓN</b>	<b>IMAGEN</b>
Landsat 8 OLI	07-03-2014	14:29:39	Pre-incendio
Landsat 8 OLI	11-04-2015	14:28:28	Post-incendio
Landsat 8 OLI	04-04-2016	14:35:03	Post-incendio
Landsat 8 OLI	22-03-2017	14:34:54	Post-incendio
Landsat 8 OLI	25-03-2018	14:34:46	Post-incendio
Landsat 8 OLI	12-03-2019	14:34:52	Post-incendio



*Figura 7 Imágenes en Color Natural RGB (432) LANDSAT 8 OLI-TIRS. Área de estudio Reserva Nacional China Muerta, recolectadas antes y después del incendio. Fechas de imagen: 24 de abril de 2014 (izquierda) y 11 de abril de 2015 (derecha).*

- **Tratamientos previos a las imágenes**

Las imágenes satelitales pueden tener una serie de deformaciones geométricas que alteran la posición de los píxeles, causados por diferentes factores: movimiento de la plataforma, rotación y curvatura de la Tierra, etc. Por lo tanto, la corrección geométrica consiste en realizar pequeños cambios en la posición de los píxeles en la imagen original, con el fin de minimizar las distorsiones en la distribución espacial de la información (Sobrino, 2001). En el caso de Landsat, las distorsiones se corrigen en el pre-procesado que realizan los propios organismos que gestionan la distribución de las imágenes (United States Geological Survey).

Los sensores utilizados en Teledetección capturan tanto la radiación solar reflejada por las diferentes coberturas de la superficie terrestre (como la emitida por ellas), la difusa de la atmosfera, el reflejo de los pixeles vecinos, etc. En este proceso de interacción (radiación solar con la superficie) es determinante la estructura y composición de la cubierta. La Reflectividad es el valor físico más importante en esta interacción, considerada como la relación entre la energía reflejada y la incidente (Chuvienco, 2002).

Generalmente, los elementos con mayor influencia son la vegetación, el suelo y el agua. La conversión de valores Números Digitales (ND) a valores físicos reduce considerablemente la distinta calibración de los sensores y de las diferentes condiciones de iluminación, Para ellos se requiere la conversión de estos a valores ND a valores de reflectancia ToA, utilizando la

$$\rho\lambda' = M_{\rho}Q_{CAL} + A_{\rho}$$

Donde  $\rho\lambda'$  es la reflectancia ToA sin corrección del ángulo solar,  $M_{\rho}$  es el factor multiplicativo para cada banda,  $Q_{CAL}$  son los valores registrados en cada píxel (ND) y  $A_{\rho}$  es el factor aditivo para cada una de las bandas.

Luego, para corregir el valor de la reflectancia con el ángulo solar, se tiene:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos\theta_{SZ}} = \frac{\rho\lambda'}{\sin\theta_{SE}}$$

Donde  $\rho\lambda'$  es la reflectancia ToA,  $\theta_{SZ}$  es el ángulo de elevación solar es la escena y  $\theta_{SE}$  es el ángulo solar sobre el zenit (ambos ángulos son extraídos de los metadatos de las imágenes satelitales).

Tanto la conversión de ND a parámetros físicos y posteriormente a Reflectancia ToA, se realizaron mediante el software ENVI. Este software permite el manejo no solo de datos provenientes de sensores o plataformas espaciales, sino también de datos provenientes de radares meteorológicos o militares e información de datos LIDAR. Específicamente se utilizó la herramienta “Radiometric Calibration” para la conversión de los ND; y la herramienta “FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)”, que es un módulo avanzado de corrección atmosférica, el cual se basa en inicialmente en la ecuación estándar de radiancia espectral para cada pixel del sensor, que se aplica al rango de longitud de onda solar (emisión termal es omitida) y superficies Lambertianas, planas o sus equivalentes (Castillo, 2012).



## 4.2. Análisis de datos

### ○ Severidad de fuego

La severidad del fuego puede ser medida como “la cantidad de vegetación que sobrevive al paso del incendio” (Gomez-Sanchez *et al*, 2017), y está íntimamente relacionada con la capacidad de regeneración del ecosistema. Ruiz (2004) entiende la medida de la severidad del fuego como un parámetro relativo, que indica la cantidad de cambio en relación con las condiciones previas de la vegetación, sin tener en cuenta el tipo de comunidad ecológica, localización, etc. es decir, cuanto ha cambiado la vegetación de una zona con respecto al estado previo.

La severidad del fuego se estudió en base al índice NBR ( $NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$  Ecuación 2) que se aplicó a las imágenes del año 2014 (pre-incendio) y del año 2015 (post-incendio), obteniendo el Differenced Normalized Burned Ratio ( $\Delta NBR$ ), que puede ser asimilado como un patrón de severidad. La clasificación de  $\Delta NBR$  fue definida por el programa Fire Effects Monitoring and Inventory Protocol (FIREMON) (Lutes *et al* 2006), se presenta en la Tabla 6.

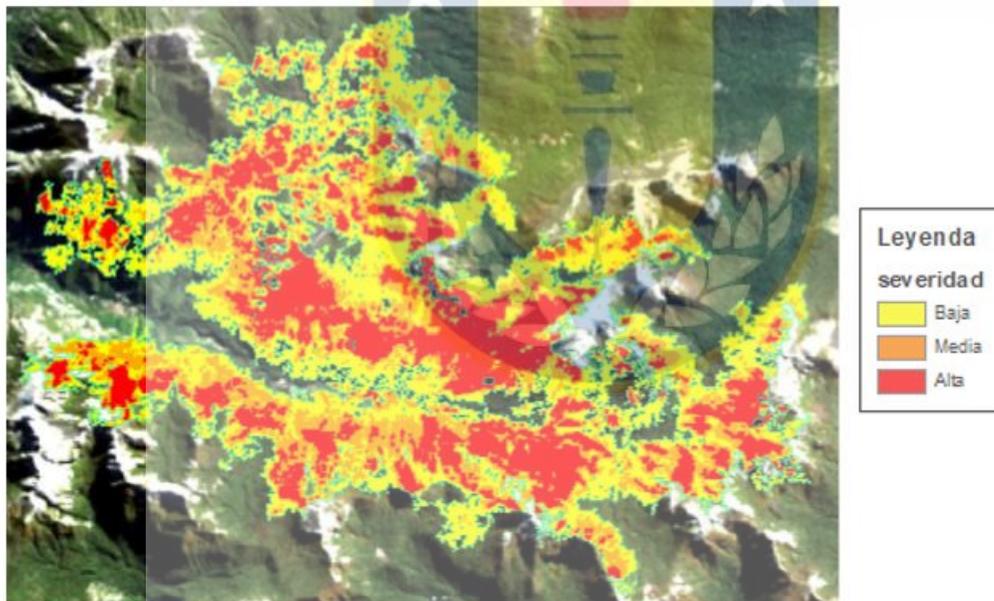
Tabla 6 Indicador del estado del suelo mediante  $\Delta NBR$ . Fuente Lutes *et al* 2006.

$\Delta NBR$	ESTADO DEL SUELO AFECTADO
< -0.25	Alto crecimiento post-incendio
-2.5 a -0.1	Bajo crecimiento post-incendio
-0.1 a 0.1	No quemado
0.1 a 0.27	Quemado de baja severidad
0.27 a 0.44	Quemado de severidad media
0.44 a 0.66	Quemado de severidad media-alta
> 0.66	Quemado de severidad alta

CONAF (2015) inmediatamente después de la extinción del fuego elaboró un plan de restauración, para lo cual calculo los grados de severidad mediante  $\Delta NBR$  para así dar prioridad a las áreas más afectadas por el fuego. CONAF en la Tabla 7 reclasificó el indicador de  $\Delta NBR$ , y obtuvo la severidad del incendio (Figura 8) con su respectivo cálculo de superficie en hectáreas (Tabla 8).

*Tabla 7 Reclasificación realizada por CONAF (2015) de los valores de  $\Delta NBR$  para la determinación de la severidad del fuego.*

$\Delta NBR$	ESTADO DEL SUELO AFECTADO
0.1 a 0.35	Bajo
0.35 a 0.6	Medio
> 0.6	Alto



*Figura 8 Severidad del incendio realizada por CONAF (2015).*

Tabla 8 Grado de severidad y superficie afectada. Fuente CONAF (2015).

<b>TIPO DE SEVERIDAD</b>	<b>SUPERFICIE (ha)</b>
Bajo	1889,70
Medio	908,6
Alto	967,3
<b>Total superficie quemada (ha)</b>	<b>3765,60</b>

Pero debido a que no se contó con la base de datos de CONAF, se realizó el cálculo de la severidad de igual manera en base a  $\Delta NBR$  (que se encontraran en el apartado resultados), mediante el software ArcGIS 10.3.

- **Digitalización de la máscara de incendio**

A la hora de clasificar una zona quemada puede presentarse confusiones, debido a que pueden presentarse zonas con cambios en la cobertura (ya sea vegetal o no), que pueden alterar los resultados finales. Por ejemplo, se debe tener conocimiento si en el área se realizaron quemas de rastrojos, nuevas construcciones, etc. Es por esto, que algunos autores sugieren (Tanaka *et al*, 1983; Ruiz, 2007) la digitalización de forma manual y supervisada, apoyando de información auxiliar, combinaciones de color, etc. De este modo se delimita el área realmente afectada.

En este estudio, se digitalizo una máscara alrededor del incendio, apoyándose en las combinaciones de color de las bandas (432, 543 y 654) y con la ayuda de la determinación de la severidad de fuego. Se dibujo de forma generosa, es decir, sin ajustarse en exceso a los pixeles quemados, en donde la superficie no quemada (o sin daño observable) queda excluida de la delimitación. Estas zonas de menos reflectividad pueden ser roqueríos, o manchas de vegetación natural sin quemar.

- **Regeneración de la vegetación**

La regeneración de la vegetación se estudió en base al índice NDVI, con escenas de la zona afectada antes y después del fuego y su progresión a lo largo de 5 años tras el incendio.

El NDVI, como se mencionó anteriormente, es uno de los índices más ampliamente utilizados en Teledetección (Guillem-Cogollos, 2017). Básicamente, este índice se apoya en el comportamiento diferencial que presenta la vegetación activa en esas bandas, con respecto a otras coberturas.

La estimación del NDVI se realizó en base a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mediante el software ArcGIS, y, el resultado de este índice se puede agrupar en las siguientes clases según la actividad fotosintética:

*Tabla 9 Clasificación de la actividad fotosintética según NDVI. Fuente Duncan et al., 1993.*

NDVI	ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA
< 0	Nula
0 a 0.1	Muy baja
0.1 a 0.2	Baja
0.2 a 0.3	Media
0.3 a 0.4	Media alta
0.4 a 0.6	Alta
> 0.6	Muy alta

## 5. Resultados

El incendio ocurrido en la Reserva fue catalogado como un *incendio de copas* (b) según la clasificación realizada por Pausas (2002).

### 5.1. Severidad de fuego y digitalización de máscara de incendio

La digitalización de la máscara de incendio se realizó en base a combinaciones de bandas y con la determinación de la severidad de fuego, excluyendo del área las zonas con catalogación de no quemadas (Figura 9 y Figura 11). La superficie afectada por el fuego se estimó en 3749,76 hectáreas, obteniendo un error de 15,84 hectáreas, con respecto a los valores oficiales entregados por CONAF (3765,60).

Esta diferencia se pudo haber dado debido a que en la delimitación se excluyeron las áreas consideradas como “no quemadas”, como lo son los terrenos de altas cumbres (que suelen estar cubiertos por nieve), como también lo son las zonas incombustibles (los roqueríos y arenales). El ignorar la fecha exacta de la adquisición de la imagen satelital que utilizó CONAF, puede ser una de las causas de la diferencia en la estimación del área afectada, debido a la mayor o menor presencia de nieve, también confundir la ceniza como zonas incombustibles, como también confundir las áreas sombreadas con zonas que no fueron afectadas por las llamas.

Antes del incendio, con los datos obtenidos del índice NBR, el 99,5% de la superficie presentaba valores positivos, con diferentes intensidades de vegetación. Tras el fuego la superficie con valores positivos se redujo al 74,8% de la superficie total. La Figura 10 muestra el índice NBR antes y después del incendio, y el grado de severidad del mismo en la Figura 11 .

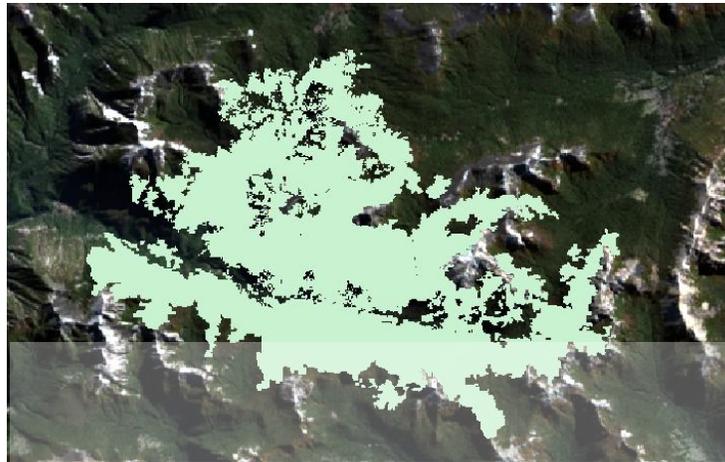


Figura 9 Digitalización de la máscara de incendio.

Tabla 10 Digitalización máscara de incendio.

TIPO DE SEVERIDAD	SUPERFICIE (Ha)	%
No quemado	146,88	3,92
Quemado de baja severidad	1353,15	36,09
Quemado de severidad media	935,82	24,96
Quemado de severidad media-alta	662,94	17,68
Quemado de severidad alta	646,29	17,24
<b>Total superficie</b>	<b>3.765,76</b>	<b>100,00</b>

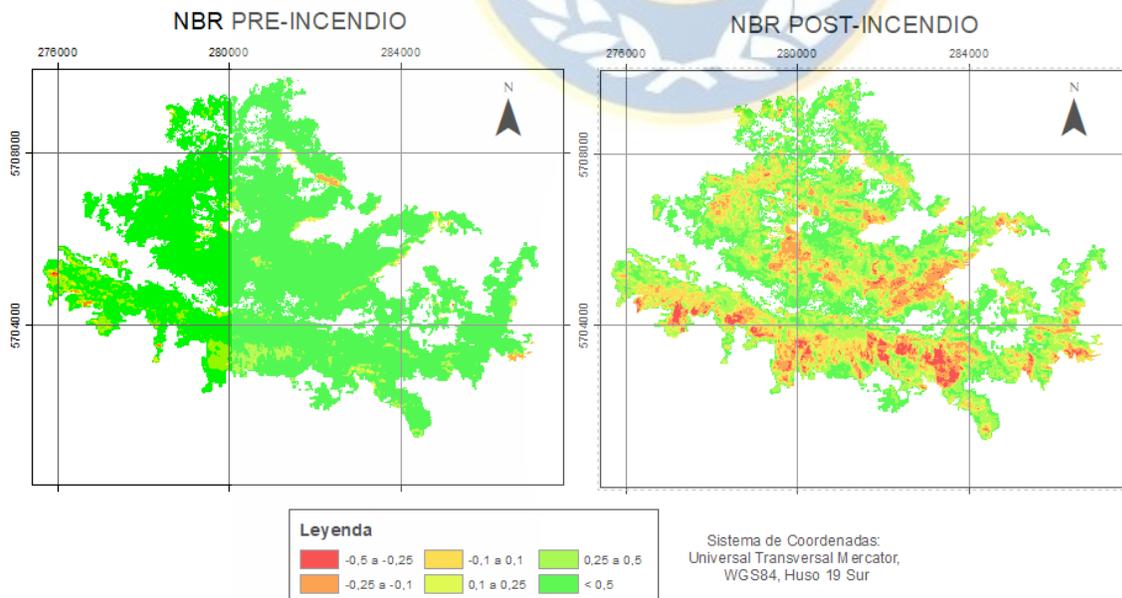
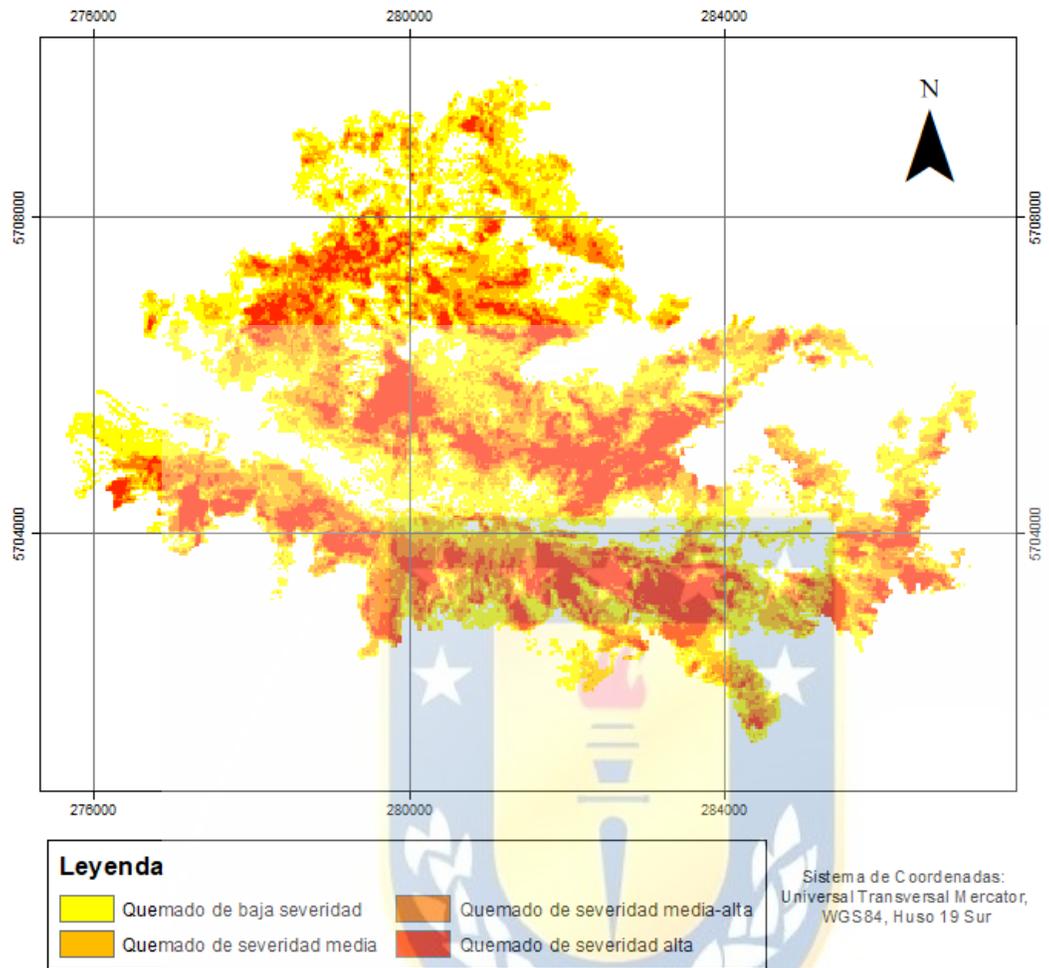


Figura 10 NBR antes y después del incendio. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 11 Digitalización mascara de incendio y grados de severidad a través de NBR. Fuente: elaboración propia.*

## 5.2. Regeneración de la vegetación

Con el objetivo de analizar la recuperación de la vegetación posterior al incendio, de la Figura 12 a la Figura 17 se muestran el NDVI estimado para toda el área afectada. Como ya se dijo anteriormente el NDVI determina la actividad fotosintética de la vegetación.

En el año 2014 (pre-incendio) el 84% de la superficie afectada por el incendio se encontraba con una actividad fotosintética “Alta” (Figura 12), lo que equivale a 3343 hectáreas. (Tabla 11). Tras el fuego (Figura 13) la actividad fotosintética es principalmente muy baja, debido a la pérdida o calcinación de las hojas que concentran la actividad fotosintética. De hecho, esta superficie se redujo a un 5,6 %, equivalente a 211 hectáreas (Tabla 11), lo que significa que se quemó un 94% de la vegetación que contaba con la más alta actividad fotosintética. De la misma manera, la actividad fotosintética “Nula” en el año 2014 equivalía a menos de 1% de la superficie, que para el 2015 aumentaría a un 8%. Por lo tanto, para efectos de pre y post incendio, la actividad fotosintética disminuyó casi en su totalidad aumentando las áreas de baja actividad y disminuyendo las áreas de alta actividad.

Para el año 2016, tal y como se puede apreciar en la Figura 14, la vegetación comienza un proceso de recuperación. Esto se puede comprobar numéricamente (Tabla 12) ya que la actividad fotosintética alta aumentó de un 5% a un 15%, es decir, del nivel “Medio” a “Alto”, lo que indica una recuperación demostrado por el aumento de la actividad. Y con respecto a la actividad fotosintética “Baja”, esta se fue recuperando debido a la disminución de estas zonas, al igual que las zonas de actividad fotosintética “Media”.

En el año 2017 (Figura 15), la recuperación de la vegetación se vio un tanto estancada (Tabla 13), ya que la actividad fotosintética solo tuvo una pequeña mejoría en el nivel “Alto”, en donde aumento en un 10% aproximadamente.

Para el año 2018 (Figura 16) la recuperación de la vegetación siguió mejorando a un ritmo del 10% aproximadamente en los niveles del “Medio” al “Alto”. En cambio, los niveles de actividad fotosintética “Nula” a “Media” fueron aumentando.

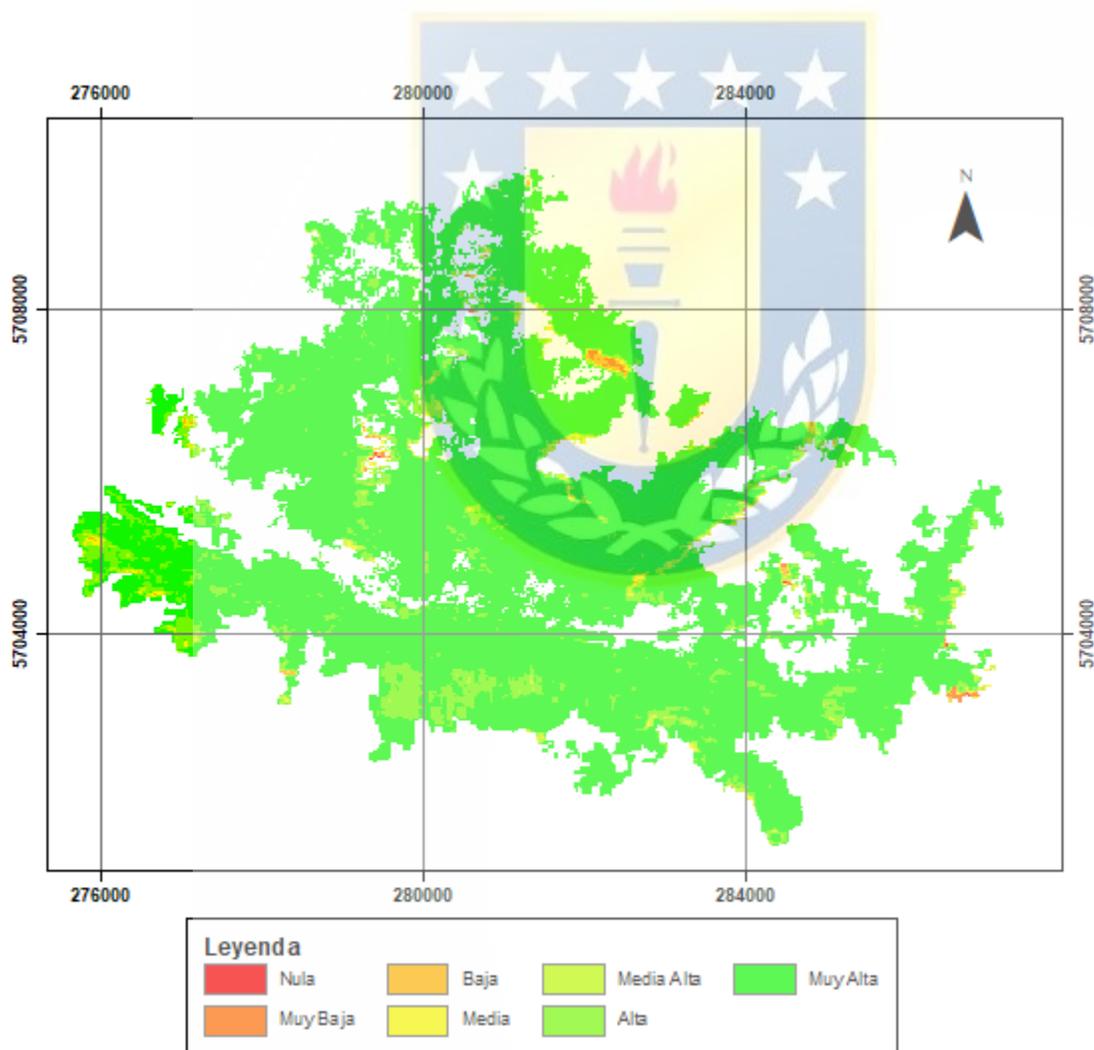


Figura 12 NDVI de la superficie afectada por el incendio 2014 (preincendio).

Tabla 11 Actividad fotosintética (NDVI) año 2014 (pre-incendio) y año 2015 (post-incendio).

Actividad fotosintética	Año 2014		Año 2015	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	0,81	0,02	325,44	8,68
Muy baja	8,1	0,22	275,76	7,35
Baja	11,43	26,19	405,99	10,83
Media	25,38	0,68	533,07	14,22
Media alta	43,65	1,16	670,14	17,87
Alta	316,89	8,45	1327,59	35,40
Muy alta	3343,5	89,17	211,77	5,65

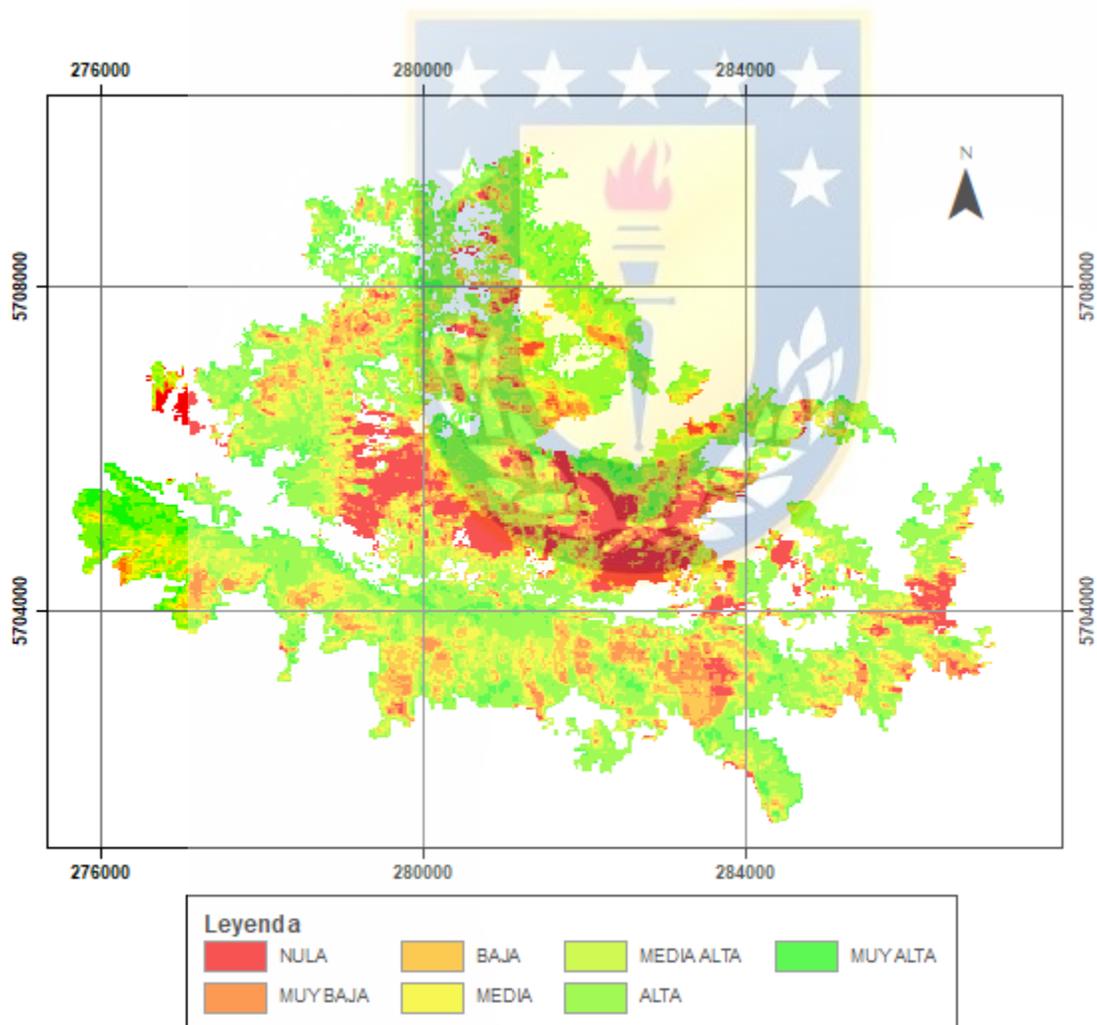


Figura 13 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2015.

Tabla 12 Actividad fotosintética (NDVI) año 2015 y año 2016.

Actividad fotosintética	Año 2015		Año 2016	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	325,44	8,68	44,10	1,17
Muy baja	275,76	7,35	158,04	4,19
Baja	405,99	10,83	552,06	14,63
Media	533,07	14,22	872,55	23,12
Media alta	670,14	17,87	689,49	18,27
Alta	1327,59	35,40	883,44	23,41
Muy alta	211,77	5,65	574,56	15,22

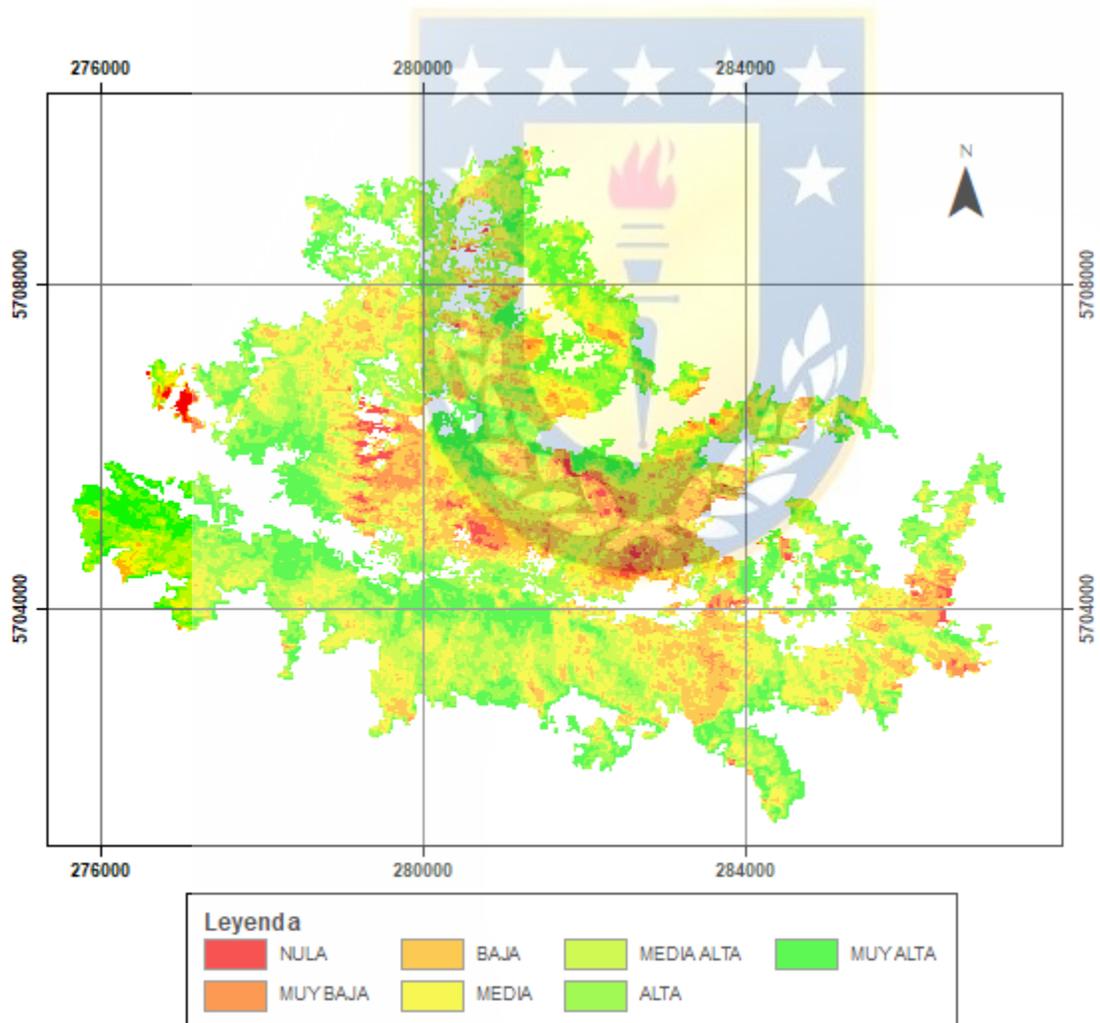


Figura 14 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2016.

Tabla 13 Actividad fotosintética (NDVI) año 2016 y año 2017.

Actividad fotosintética	Año 2016		Año 2017	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	44,10	1,17	47,52	1,26
Muy baja	158,04	4,19	123,66	3,28
Baja	552,06	14,63	427,23	11,32
Media	872,55	23,12	689,67	18,27
Media alta	689,49	18,27	678,51	17,98
Alta	883,44	23,41	1295,55	34,33
Muy alta	574,56	15,22	512,1	13,57

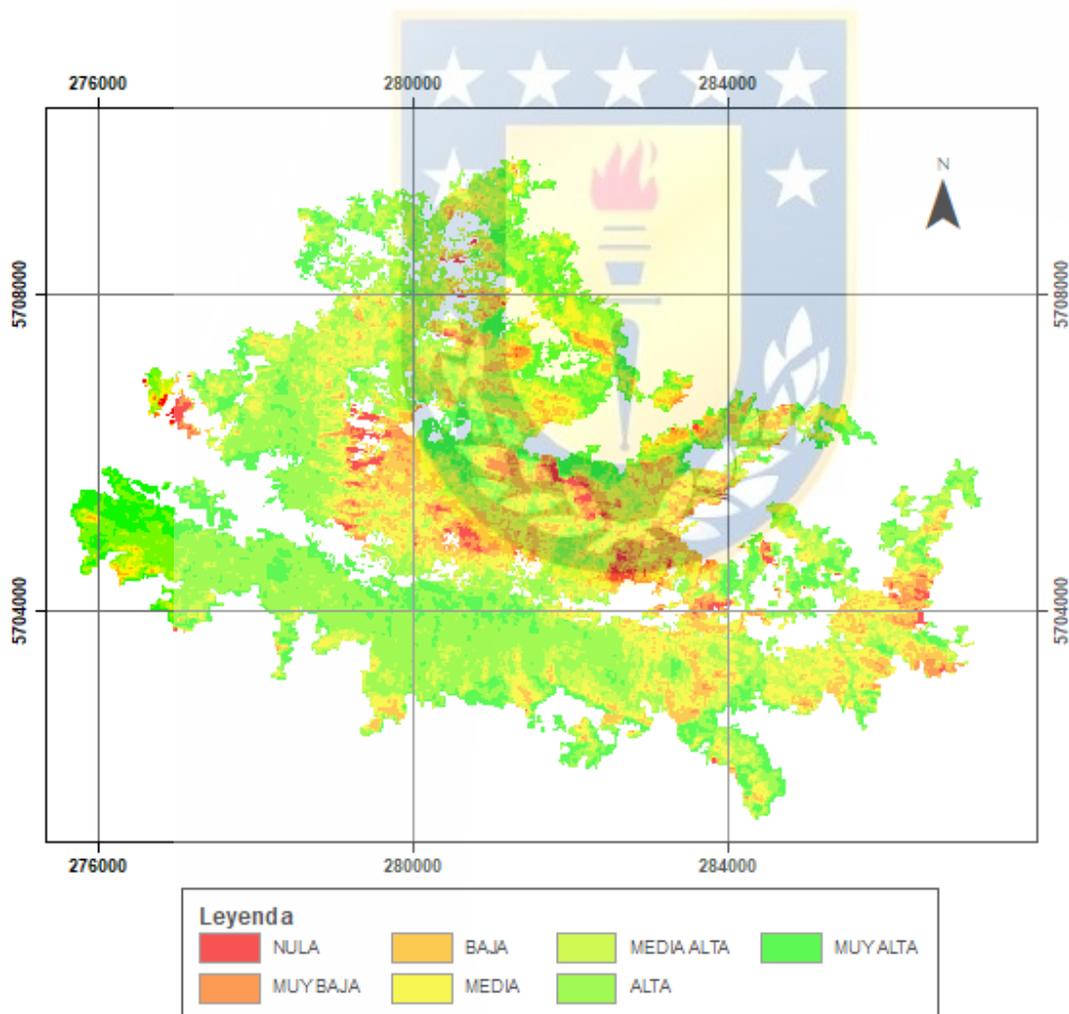


Figura 15 NDVI de la superficie afectada por el incendio año 2017.

Tabla 14 Actividad fotosintética (NDVI) año 2017 y año 2018.

Actividad fotosintética	Año 2017		Año 2018	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	47,52	1,26	37,17	0,98
Muy baja	123,66	3,28	92,43	2,45
Baja	427,23	11,32	258,48	6,85
Media	689,67	18,27	523,35	13,87
Media alta	678,51	17,98	694,8	18,41
Alta	1295,55	34,33	1434,51	38,01
Muy alta	512,1	13,57	733,5	19,43

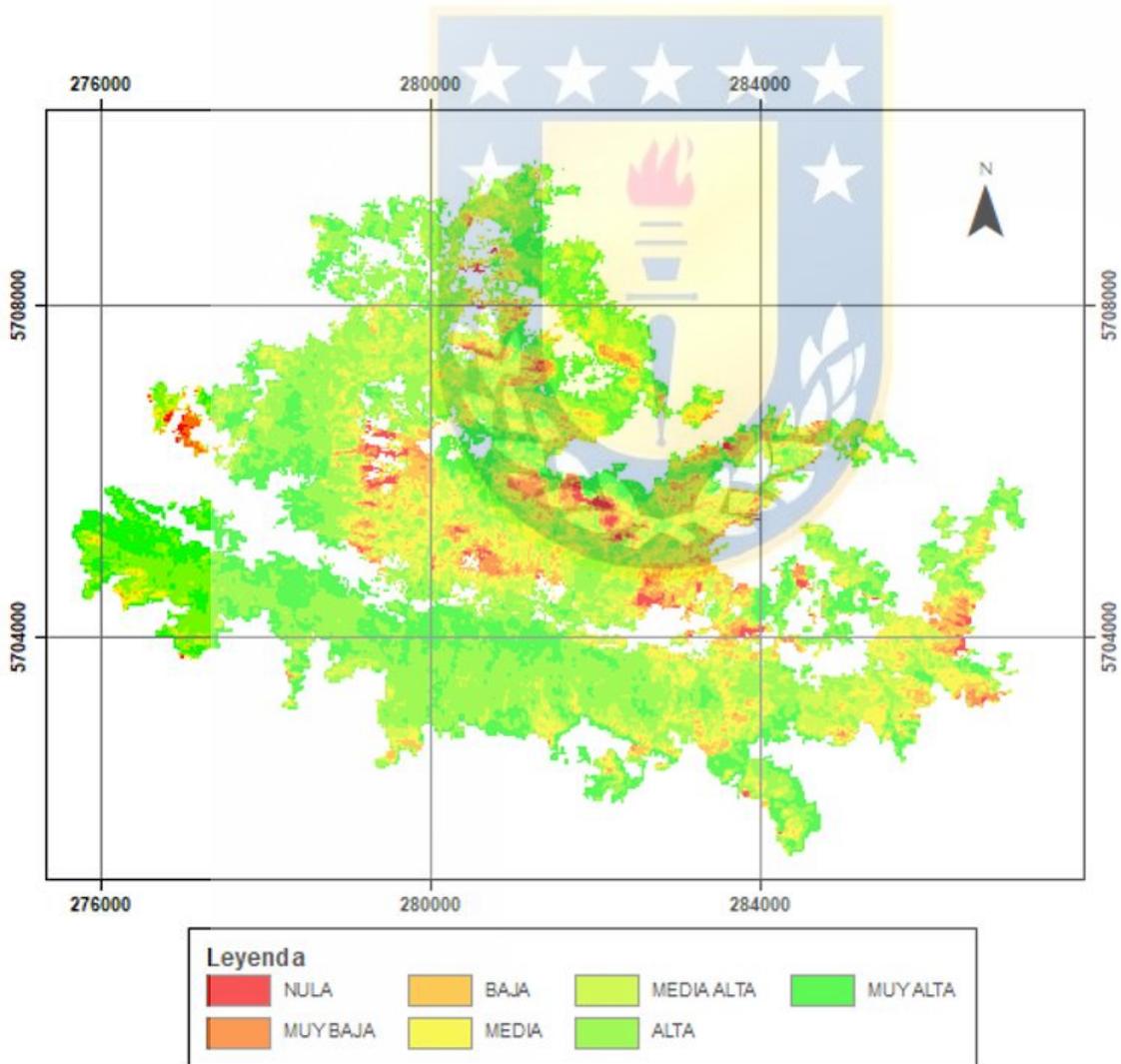


Figura 16 NDVI de la superficie afectada del incendio año 2018.

Tabla 15 Actividad fotosintética (NDVI) año 2018 y año 2019.

Actividad fotosintética	Año 2018		Año 2019	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	37,17	0,98	9,09	9,24
Muy baja	92,43	2,45	36,27	0,96
Baja	258,48	6,85	171,27	4,54
Media	523,35	13,87	432,72	11,47
Media alta	694,8	18,41	749,88	19,63
Alta	1434,51	38,01	1640,61	43,47
Muy alta	733,5	19,43	743,40	19,70

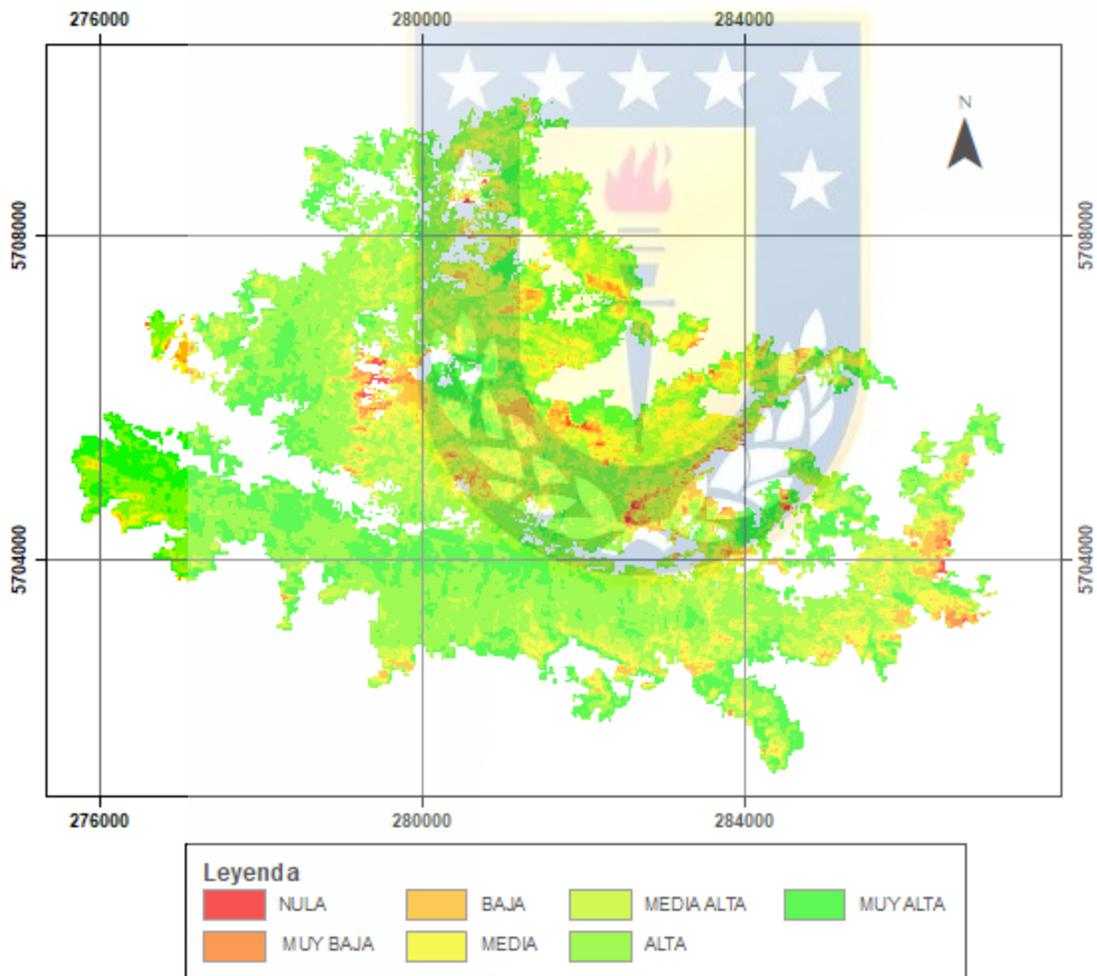


Figura 17 NDVI de la superficie afectada del incendio año 2019.

Finalmente, la recuperación de la vegetación muestra una tendencia positiva de recuperación relativamente baja, en comparación con el año anterior, pero, si se realiza con respecto al año en que se produjo el incendio, la recuperación se hace mas evidente (Figura 18).

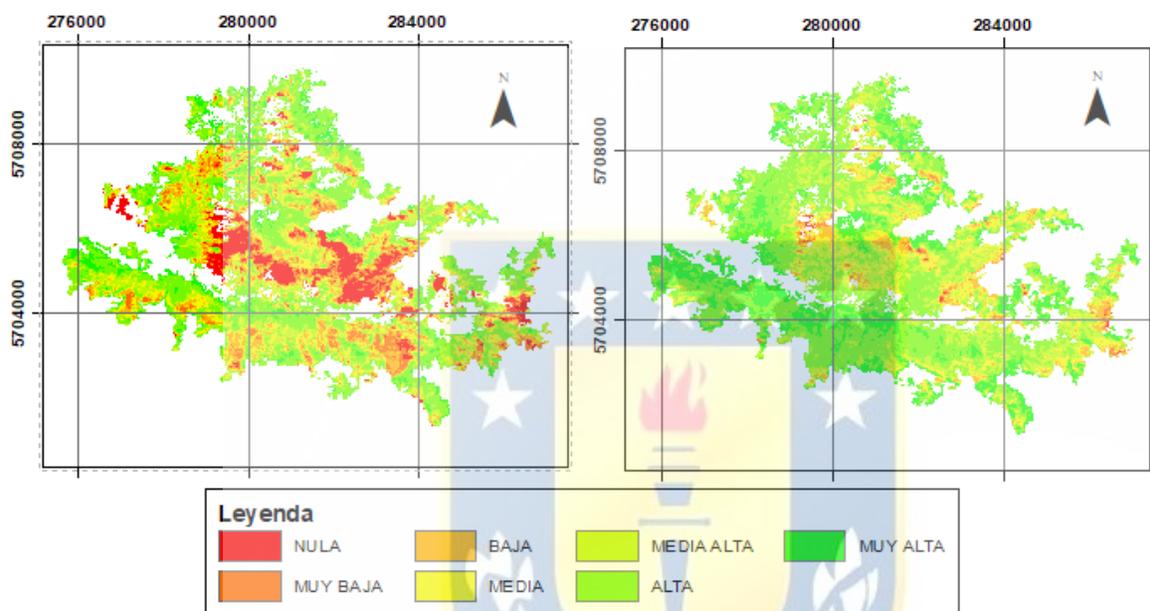


Figura 18 NDVI 2015 y NDVI 2019.

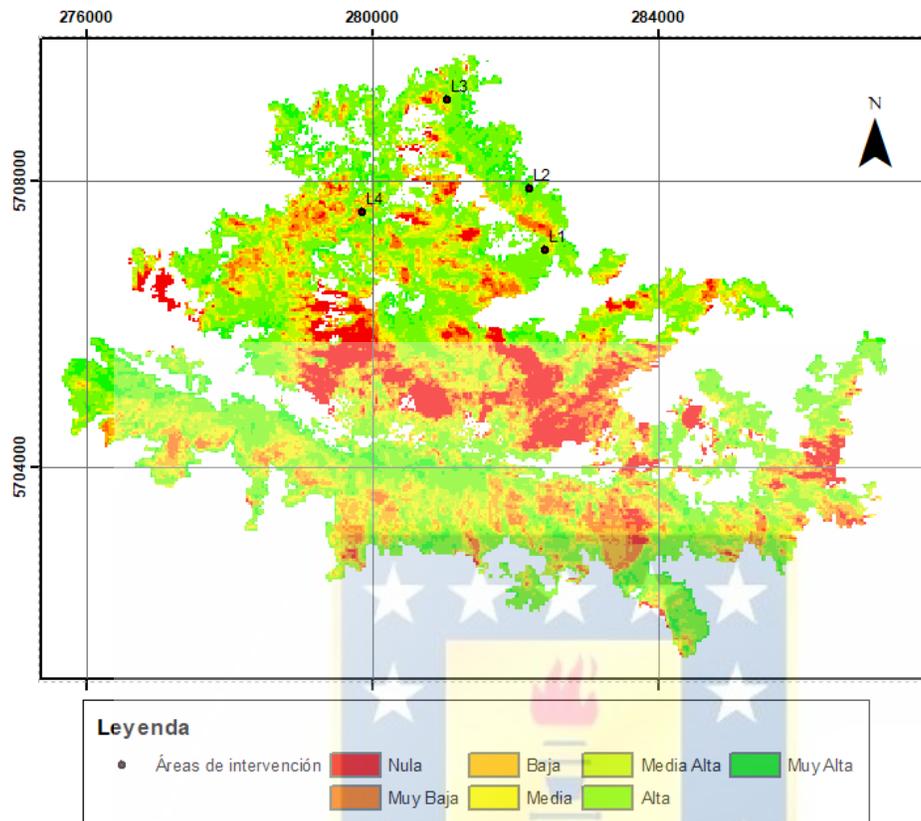
Tabla 16 Recuperación de la vegetación: año 2015 (cuando se produjo el siniestro) en comparación con el último año de este estudio 2019.

Actividad fotosintética	Año 2014		Año 2015		Año 2019	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Nula	0,81	0,02	325,44	8,68	9,09	9,24
Muy baja	8,1	0,22	275,76	7,35	36,27	0,96
Baja	11,43	26,19	405,99	10,83	171,27	4,54
Media	25,38	0,68	533,07	14,22	432,72	11,47
Media alta	43,65	1,16	670,14	17,87	749,88	19,63
Alta	316,89	8,45	1327,59	35,40	1640,61	43,47
Muy alta	3343,5	89,17	211,77	5,65	743,40	19,70

La reserva para el año 2014 presentaba un total de 3343 hectareas pertenecientes a la actividad fotosintetica alta, tras el incendio esta se redujo a un total de 212 hectareas. En este sentido, la vegetación afectada por el incendio ocurrido el año 2015 en la Reserva Nacional China Muerta, tras 5 años del siniestro, se ha recuperado en un 19,7% equivalente a solo 743 hectareas (Tabla 16).

CONAF inmediatamente despues de la extinción del fuego, realizó acciones principalmente relacionadas a obras de control de erosión y a la recolección de material genético para la producción de plantas con las que posteriormente se intervendria el territorio. A raiz de esto, elaboró un proceso participativo el año 2015 documento “Plan de Restauración de la Reserva Nacional China Muerta”, a partir del cual se realizaron acciones iniciales mencionadas en la Figura 19.





*Figura 19 Lugares de intervención realizados por CONAF en la imagen correspondiente al año 2015 (post-incendio). Sector L1: Siembra de núcleos de semilla de araucaria (10 ha). Sector L2: Siembra y plantación de semillas de araucaria (15ha). Sector L3: Siembra de núcleos de Araucaria (20 ha). Sector L4: Plantación mixta de núcleos (40 ha).*

## 6. Conclusiones y Discusiones

A través de este estudio de la zona quemada el verano de 2015 en el Parque Nacional China Muerta se observa que el incendio se propago rápidamente debido a que la zona contaba con gran continuidad de las masas forestales, además de estar altamente favorecido por las condiciones de ventosidad y por la humedad relativa que se encontraba muy baja debido a la época del año.

La perimetración oficial del incendio es más elevada que la obtenida con los índices espectrales desarrollados en este trabajo, debido a la falta de precisión al no tenerse en cuenta, por ejemplo, pequeñas zonas que no se quemaron como cultivos, prados o casas aisladas.

La resolución espacial de las imágenes, también pueden haber influido entre los perímetros (calculado y oficial), ya que en Landsat 8 es de 0,09 ha, pero para distinguir correctamente un objeto, este debe cubrir de 6 a 10 píxeles, por lo que no se tienen en cuenta superficies menores a 0,54 ha que realmente no están quemadas.

Esta diferencia también se puede deber ya que mediante percepción remota solo se tienen en cuenta las superficies realmente destruidas por el fuego, sin ser consideradas las zonas simplemente recorridas por las llamas, es decir, en índices como el NDVI si existen especies que previamente tenían poca actividad fotosintética, como los matorrales en verano, estos no producen grandes cambios antes y después del incendio (solo se comprobarían en meses posteriores, cuando en invierno estos matorrales tampoco presentan actividad fotosintética cuando si deberían tenerla).

Por otro lado, el grado de severidad tras un incendio es un conocimiento necesario para la planificación de las actuaciones posteriores, que permitió localizar y cuantificar el área afectada por el incendio de 2015.

Con el índice NDVI de las imágenes Landsat 8 se ha comprobado la evolución de la actividad vegetativa del área afectada por el incendio. Se observó que, paso de la categoría “Muy Alta” a la categoría “Media alta”, “Baja” y hasta “Nula” tras el incendio.

La actividad fotosintética previa correspondía a la categoría muy alta debida en parte a que la Reserva esta formada por bosques de tipo *Araucaria Araucana*. Son arboles de hoja caduca que en meses de verano mantienen actividad fotosintética alta y son resistentes a altas temperaturas (con hojas oscuras y duras).

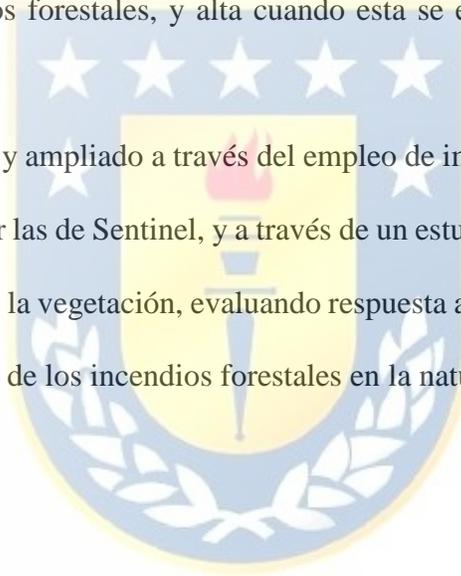
Con los índices de NDVI de las imágenes Landsat 8 se ha comprobado la evolución de la actividad vegetativa en las áreas afectadas por el incendio ha sido lenta, debido a la severidad que tuvo el incendio; también debido a que la principal especie afectada (*Araucaria Araucana*) presenta una regeneración natural de baja capacidad de competencia, de crecimiento lento y gran longevidad (crecimiento de 5 a 8 cm por año) deben pasar al menos 25 años antes de percibir efectos notables.

Anualmente, posterior al año 2015, se presentó una recuperación de los suelos de aproximadamente 130 hectáreas promedio por año, con respecto al año anterior. En vista de lo anterior a 5 años del incendio, no se encuentran bosques frondosos y árboles de gran altura, sino más bien se encuentran suelos que presentan mejoras con respecto al incendio ocurrido (en términos de composición de suelo y al material orgánico que posee).

Por lo tanto, la pérdida de la vegetación endémica de la Reserva Nacional China Muerta es inconmensurable, teniendo que pasar algunos cientos de años para recuperar lo que en marzo del año 2015 se perdió.

Finalmente, el estudio de la recuperación de la vegetación mediante la aplicación del índice Normalized Difference Vegetation Index, permite analizar la recuperación de cualquier tipo de vegetación, no solo a la aplicada en este estudio, pues como ya se mencionó anteriormente, este índice identifica la actividad fotosintética de toda la vegetación, que, suele ser baja cuando se ve expuesta a incendios forestales, y alta cuando esta se encuentra en perfecto estado de salud.

Este proyecto puede ser mejorado y ampliado a través del empleo de imágenes de satélite de mayor resolución como pueden ser las de Sentinel, y a través de un estudio a más largo plazo y exhaustivo de la regeneración de la vegetación, evaluando respuesta a través de NDVI, con el fin de cuantificar la repercusión de los incendios forestales en la naturaleza.



## 7. Referencias

- Aguilar, E. (2016). *Distribución de incendios y recuperación de matorrales en el noreste de Baja California*. (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Benoit, I., L. (Eds). (1989). *Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile (Primera Parte)*. Santiago de Chile, CONAF.
- Castillo, M., Pedernera, P. y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, vol (XIX/ N°3 y 4).
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Enviromental Approach*. New York: CRC Press.
- Cori, J. (2012). *Satelites y plataformas de adquisición de datos caracterizaciones, comparaciones, principales aplicaciones y dos ejemplos de aplicación (tesis de grado)*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolivia.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2006). Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales. Recuperado de [https://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1367248086manual\\_RMbaja.pdf](https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1367248086manual_RMbaja.pdf),
- Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2014). Plan de manejo Reserva Nacional China Muerta. Recuperado de [https://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1445457828PM\\_RNChinaMuerta.pdf](https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1445457828PM_RNChinaMuerta.pdf)

Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2016). *Documento Testimonial de Análisis Efectos en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado.*

Recuperado

de:

[https://www.conaf.cl/wpcontent/files\\_mf/1523367684cambioclimatico\\_SNASPEguar daparques.pdf](https://www.conaf.cl/wpcontent/files_mf/1523367684cambioclimatico_SNASPEguar daparques.pdf)

Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2018). *Documento Técnico N°210 Rol de los Bosques Chilenos en la Mitigación del Cambio Climático.* Recuperado de:

[https://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1373639255BTCambio\\_Climatico.pdf](https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1373639255BTCambio_Climatico.pdf)

Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2020). Incendios Forestales en Chile. Recuperado

de: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>

Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2020a). *Bosque Nativo.* Recuperado de:

<https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosque-nativo/>.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2019). Sistema de Información Territorial.

Recuperado de <http://sit.conaf.cl/>.

FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020- Key Findings.* Rome.

<https://doi.org/10.4060/ca8753en>

FAO. (2013). *Directrices sobre el cambio climático por los gestores forestales.* Estudio FAO

Montes N° 172. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fernández-Méndez, F., Velasco-Salcedo, V., Guerrero-Contecha, J., Galvis, M. & Viana, A.

(2016). Recuperación Ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca Tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*, 19(2), 143-160.

Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, j., Gómez, M., y Montenegro, G. (2010).

*Restauración ecológica par ecosistemas nativos afectados por incendios forestales.*

Santiago, Chile: Olivares, L., y Fernández, I.

Figuerola, N. y Vergara, F. (2018). Reserva Nacional China Muerta: Consideraciones en torno

a la conservación de biocultural de la naturaleza, los incendios forestales y la herida

colonial en territorios indígenas. Scientific Electronic Library Online. Cult.-hombre-

soc. vol.28 no.1.

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de

vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10).

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de

vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10).

Goldammer, J. (2001). Forest fires at a global level: an overview. En Mutch, R. W. (Eds).

Forest Resources Assessment, FAO, Roma. (Disponible en línea

<http://www.fao.org/3/ad653e/ad653e00.htm#TopOfPage>).

Gomez-Sanchez, E. de las Heras, J, Lucas\_Borja, M. & Moya, D. (2017). Ajuste de

metodologías para evaluar la severidad de quemado en zonas semiáridas (SE

peninsular): incendio Donceles 2012. *Revista de Teledetección*, 49, 103-113.

Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Miralles, V., Espinós-Morató, H. 2017.

Critical analysis of severity indices and affected surface by the wildland fire on Sierra

de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledetección*, 49, 63-77.

Hudak, A. y Brockett B. (2004). Mapping fire scars in a southern African Savannah using

Landsat imagery. *Internacional Journal of Remote Sensing*. 25:16, 3231-3243.

Landsat Science. Accedido el 5 de agosto, 2020, desde

[https://landsat.gsfc.nasa.gov/how\\_landsat\\_helps/fire/](https://landsat.gsfc.nasa.gov/how_landsat_helps/fire/)

Ley N°20.283. LEY SOBRE RECUPERACIÓN DE BOSQUE NATIVO Y FOMENTO FORESTAL. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 30 de julio de 2008.

López, M. & Caselles, V. (1991). Introducción a la Teledetección. *La Teledetección en los fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura*. Valencia, España: 19-51.

Lutes, D. C., Keane, R. E., Caratti, J. F., Key, C. H., Benson, N. C., Sutherland, S., Gangi, L. J. (2006). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Martínez, J. y Martín, M. (Eds). (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. España: CSIC.

Montenegro, G., Ginocchii, R., Segura, A., Keely, J. & Gómez, M., (2004). Fire régimen and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista Chilena de Historia Nacional*, vol(77): 455-464.

Navazo, G., Nieto, A. y Moreno, G. (2015). Análisis de incendios forestales mediante Sistemas de información Geográfica y Teledetección. Estudio de caso Sierra de la Gata. Nieto Masot, A. (Ed.). *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial*. (pp. 247-267) España: Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial de la Universidad de Extremadura.

Pausas, J. G. (2012). *Incendios Forestales una visión desde la ecología*. Madrid, España: Catarata.

Pérez, C. & Muñoz, A. (Eds). (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. España: Pérez & Muñoz.

- Ruiz, J., (2004). *Teledetección y SIG en la asistencia y actuación postincendio. Método de estimación de la prioridad de intervención forestal. Análisis de tres casos de estudios* (Tesis Doctoral), Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete
- Sánchez, E., Torres, M. Á., Fernández-Palacios, A., Aguilar, M., Pino, I. & Granado, L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. In *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible: Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativo, SIG y Teledetección (9º. 2000. Alcalá de Henares)*. Universidad de Alcalá.
- Sanhueza, P. I. (2001). Fire Situation in Chile. En Goldammer, J. G. & Mutch, R. W. (Eds). *Forest Resources Assessment*, FAO, Roma. (Disponible en línea <http://www.fao.org/3/ad653e/ad653e00.htm#TopOfPage>).
- Sobrino, J., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., El Kharraz, M., Cuenca, J., Dempere, L. (2000). *Teledetección*. Valencia, España: Sobrino, J. (Ed).
- Society for Ecological Restoration (SER) International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas, 2004. *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. [www.ser.org/](http://www.ser.org/) y Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- USGS science for a changing world. Accedido el 27 de junio, 2020, desde [https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat8?qtscience\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat8?qtscience_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con)