

**ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA REFORESTACIÓN EN EL PARQUE  
NACIONAL TORRES DEL PAINE POR MEDIO DE PERCEPCIÓN REMOTA**

Ítalo Márquez Melo

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

Dr. Ing. Guido Staub (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Aprobado por la comisión

Mg. Aharon Cuevas (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Ing. Francisco Contreras (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Los Ángeles

Diciembre, 2017

## Resumen

El Parque Nacional Torres del Paine (PNTP) es una de las áreas verdes más importantes del mundo y una de las principales fuentes de ingreso que genera el turismo en Chile. Sin embargo, este se ha visto en constante amenaza por la generación de incendios forestales. A finales de 2011, se originó un nuevo foco de incendio en el interior del parque y que, posterior a la contención del fuego, dio inicio a una serie de campañas de reforestación y recuperaciones de suelos siniestrados cuya cobertura y extensión no han sido analizados hasta el 2017. Por medio del índice *differenced Normalized Burn Ratio* derivado de imágenes provenientes del sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) en modo SLC-off (*Scan Line Corrector-off*) y de OLI-TIRS (*Operational Land Imager & Thermal Infrared Sensor*) a bordo de Landsat 7 y Landsat 8, respectivamente, se estudió el aumento de la cobertura vegetal por acción de la reforestación al interior del parque.

El área total afectada por el incendio de 2012 se estimó en 18.595 hectáreas. El proceso de reforestación, hasta el año 2017, ha conseguido recuperar un total de 13.067 hectáreas, que representa un 70% del total de la superficie afectada por el incendio. Anualmente, las campañas de reforestación lograron recuperar un 11% de la superficie que poseía algún grado de severidad con respecto al año anterior.

***Palabras Clave: Parque Nacional Torres del Paine, Chile, Reforestación, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI-TIRS.***

## Dedicatoria

*A mis padres Luis Márquez y Nancy Melo, por las palabras de aliento, por el cariño, por el apoyo que me han brindado desde el comienzo de mi carrera, porque a pesar de la distancia que nos separa, siempre he sentido que están aquí conmigo. Gracias por ayudarme a crecer como persona día a día, por hacerme la persona que soy, pero por sobre todas las cosas....*



*Gracias por creer en mí.*

## Agradecimientos

A mi profesor guía, por la constante ayuda y apoyo que brindó en la realización de este proyecto, por su rápida respuesta y disposición ante cualquier duda, por más insignificante que esta fuese.

A Rodrigo Fernández, Jefe de Sección Control de Incendios Forestales, y a Patricio Salinas, Profesional de apoyo del Departamento de Fomento y Desarrollo Forestal de CONAF, por la amabilidad ante consultas realizadas y por la inmediata respuesta a ellas.

A la profesora María Ester González, por la ayuda prestada, por los consejos y sugerencias que me entregó, porque a pesar de no estar directamente involucrada en este proyecto, siempre tuvo una excelente disposición para ayudar.

A mis amigos, mis compadres, los que estuvieron ahí todos estos años, por los buenos momentos, por las risas y por la compañía.

A ella, por hacer más alegres estos últimos meses en la universidad, por cada uno de los momentos que pasamos juntos, por todo el tiempo que me dio y, por supuesto, por estar ahí para mí.

Y en general a todos aquellos que, de alguna u otra manera, estuvieron ahí durante estos cinco años de carrera.

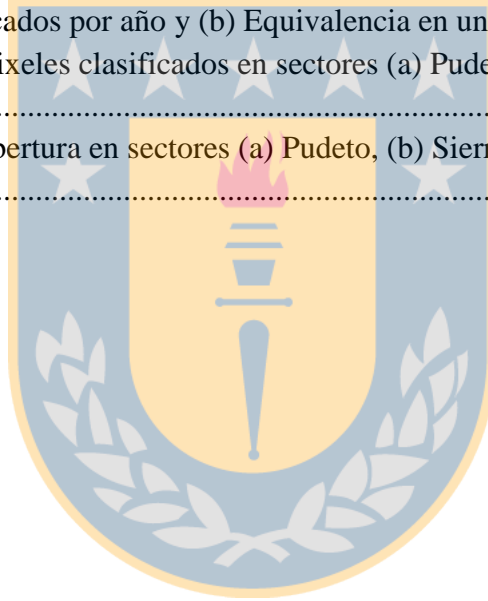
Muchas gracias.

# Índice de Contenidos

1. Introducción .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
2. Antecedentes Generales .....	4
2.1. Parque Nacional Torres del Paine.....	4
2.1.1. Incendios Forestales .....	6
2.1.2. Plan de Manejo .....	10
2.1.3. Reforestación.....	13
3. Marco Teórico .....	17
3.1. Percepción Remota .....	17
3.1.1. Firmas espectrales.....	21
3.1.2. Índices Espectrales .....	22
3.1.3. Utilización en Incendios Forestales .....	24
3.2. Programa Landsat .....	25
3.2.1. Landsat 7 .....	26
3.2.2. Landsat 8 .....	28
3.2.3. Preprocesamiento.....	30
4. Metodología .....	33
4.1. Imágenes utilizadas .....	33
4.2. Corrección Bandeo.....	34
4.3. Estimación Área Quemada .....	35
4.4. Caracterización del estado del suelo .....	37
4.5. Comparación de Progreso .....	37
5. Resultados .....	39
6. Conclusiones .....	49
7. Referencias .....	53

## Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de Incendios en PNTP. ....	8
Tabla 2. Objetivos de manejo por programa y resultados esperados, Etapa 3. ....	11
Tabla 3. Componentes y subcomponentes P. Mejoramiento 2012.....	12
Tabla 4. Bandas del sensor ETM+ de Landsat 7. ....	27
Tabla 5. Bandas sensores OLI y TIRS de Landsat 8. ....	28
Tabla 6. Irradiancia Solar Espectral para ETM+. ....	31
Tabla 7. Descripción de los archivos de imagen utilizados.....	33
Tabla 8. Indicador del estado del suelo. ....	37
Tabla 9. Resumen de áreas afectadas anualmente. ....	40
Tabla 10. (a) Píxeles clasificados por año y (b) Equivalencia en unidades de terreno. ....	41
Tabla 11. Equivalencia de píxeles clasificados en sectores (a) Pudeto, (b) Sierra del Toro y (c) Sarmiento. ....	42
Tabla 12. Porcentajes de cobertura en sectores (a) Pudeto, (b) Sierra del Toro y (c) Sarmiento.....	43



## Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Torres del Paine.....	5
Figura 2. Mapa de senderos del Parque Torres del Paine.....	8
Figura 3. Extensión de Incendios en PNTP.....	9
Figura 4. Número de visitantes y Número de incendios por año. ....	10
Figura 5. Diagrama esquemático de la aproximación de parches o islas de vegetación. ....	14
Figura 6. Invernaderos de Vivero Dorotea, Puerto Natales.....	15
Figura 7. Principales componentes asociados a las actividades de percepción remota.....	19
Figura 8. Principales bandas del espectro electromagnético. ....	20
Figura 9. Firmas espectrales de elementos presentes en la superficie terrestre.....	21
Figura 10. Cronología de lanzamientos Landsat. ....	25
Figura 11. Impacto del malfuncionamiento del SLC. ....	27
Figura 12. Cobertura de bandas Landsat 7 vs Landsat 8.....	29
Figura 13. Imagen ETM+ (path 230; row 096) del 12 de enero de 2012.....	35
Figura 14. Estimación del área quemada sobre una imagen falso color correspondiente al 24 de febrero de 2012 (a) y enero de 2005 (b). ....	36
Figura 15. Sectores seleccionados para comparación de progreso.....	38
Figura 16. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2012. ....	43
Figura 17. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2013. ....	44
Figura 18. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2014. ....	45
Figura 19. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2015. ....	46
Figura 20. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2016. ....	47
Figura 21. $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2017. ....	48

# 1. Introducción

## 1.1. Introducción

El Parque Nacional Torres del Paine (PNTP) ha sido afectado por una serie de incendios forestales en los últimos 30 años, cuyos orígenes de carácter antrópico han causado grandes daños, no solo a los suelos, sino también a la flora y fauna de la zona, afectando así la calidad del paisaje y poniendo en riesgo una de las principales fuentes de ingreso por concepto de turismo de la región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

En los últimos años, el PNTP ha tenido que afrontar una serie de incendios forestales producidos por actividad humana y que han consumido un total cercano a las 45.000 hectáreas de vegetación nativa (CONAF, 2007). En el más reciente evento, que inició el 27 de diciembre de 2011, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) informó de la aparición de un foco de incendio al interior del PNTP, desatando así un nuevo incendio forestal, siendo este, el más grande que ha combatido la zona y que, según Abumohor (2012), consumió un total de 17.600 hectáreas.

Como respuesta a la catástrofe de 2012 y como medida de acción de acuerdo a los componentes del Plan de Mejoramiento vigente a la fecha (2012), la CONAF en conjunto con Organizaciones No Gubernamentales (ONG), planificaron campañas de reforestación y recuperación de suelos afectados, buscando recuperar parte del patrimonio que se perdió en este siniestro.

En el año 2012 se dio inicio a los procesos de reforestación y que, según Alejandra Silva, directora regional de CONAF, se desarrollaron de manera irregular producto de los fuertes vientos, de las condiciones menos favorables del terreno y de la acción depredadora



de la fauna presente en el PNTP. Al término del primer periodo, comprendido entre los años 2012 y 2014, se plantaron 99.203 plantas de Lengua en los sectores de río Paine, lago Pehoé y sector Pudeto. La campaña más reciente del proceso de reforestación (2014 – 2015) sumó un total de aproximadamente 200.000 Lengas a las campañas de años anteriores. Informes posteriores de CONAF, indicaron que para fines del año 2016 se estimaban producir una plantación de 80.000 nuevas Lengas en los terrenos del PNTP.

El Plan de Mejoramiento, propone dentro de sus subcomponentes, diseñar y ejecutar un Programa de Monitoreo respecto al progreso de recuperación y reforestación de los suelos que se vieron afectados por el incendio de 2012. En este sentido, mediante el tratamiento digital de imágenes satelitales, se calcularon índices espectrales que permitieron caracterizar el estado de los suelos del parque posterior al incendio y de esta forma, estimar la superficie que ha presentado algún grado de recuperación en la vegetación por términos de reforestación o recuperación natural.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Estimar la evolución del proceso de reforestación en que se ha visto envuelto el Parque Nacional Torres del Paine en los últimos años, posterior al más reciente incendio forestal, a partir de imágenes satelitales de la zona en diferentes años (2012 – 2017).

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Cuantificar el área afectada por el incendio en 2012 en función de índices espectrales.
- Comparar las imágenes satelitales en los diferentes años posteriores al incendio.

- Estimar la superficie reforestada en el PNTP para los años (2012-2017).



## 2. Antecedentes Generales

### 2.1. Parque Nacional Torres del Paine

De acuerdo a Mattar *et al.* (2012), la Patagonia Chilena posee características bióticas, climáticas y geomorfológicas que la convierten en una de las principales reservas de vida silvestre en el planeta, contando con invaluable atractivos turísticos y científicos. Ubicada en la región de mayor extensión en el país, la Patagonia posee una amplia superficie de áreas silvestres protegidas, entre las que se encuentran el Parque Nacional Bernardo O'Higgins, el Parque Nacional Cabo de Hornos y el Parque Nacional Torres del Paine.

El Parque Nacional Torres del Paine está ubicado en la Provincia de Última Esperanza en la región de Magallanes y de la Antártica Chilena, entre los 50° 45' S y 51° 20' S de Latitud y entre 72° 31' O y 73° 22' O de Longitud (Figura 1). Los centros poblados más cercanos son los de Cerro Castillo, Puerto Natales y Punta Arenas, a 50, 112 y 310 kilómetros de distancia aproximados, respectivamente.

Fue creado el 13 de mayo de 1959, mediante el Decreto Supremo N° 383 del Ministerio de Agricultura con una superficie aproximada de 4.332 hectáreas bajo el nombre de Parque Nacional de Turismo Grey. En 1961 se le otorgó el nombre de Parque Nacional de Turismo Torres del Paine al expandir los límites e incluyendo terrenos donde se encuentran las Torres del Paine, abarcando una superficie de 24.532 hectáreas. En 1970 se definen nuevos límites y se le otorga el nombre por el que hoy en día se le conoce. Los límites actuales del parque fueron establecidos a mediados de la década del setenta y que, según CONAF (encargada de la administración del parque), posee una superficie de 242.242 hectáreas.

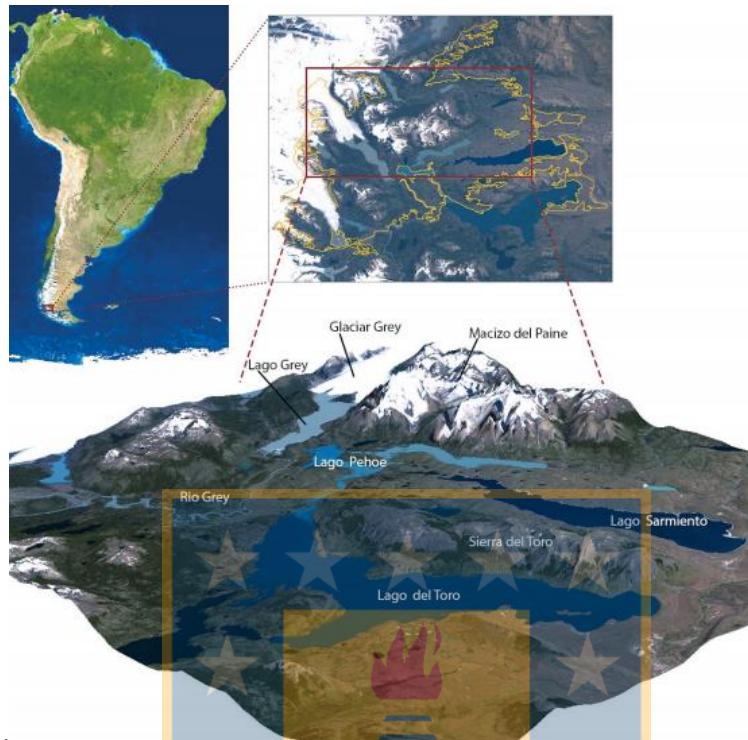


Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Torres del Paine.  
 Nota. Recuperado de Mattar et al. (2012)

Famoso por las formaciones verticales de granito (Torres), las estructuras de rocas sedimentarias (Cuernos), la amplia variedad de ecosistemas de vida silvestre más puros del planeta, y una gran diversidad de fauna en estado de protección, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 1978 le otorgó al PNTP la calidad de Reserva de la Biosfera, como parte del Programa Hombre y Biosfera (MAB).

En el parque, la fauna presenta una amplia diversidad. Entre los mamíferos que habitan el PNTP se encuentran Pumas (*Felis concolor*), Huemules (*Hipocamelus bisulcus*), Guanacos (*Lama guanicoe*), Zorros Chilla (*Canis griseus*), Zorro Culpeo (*Canis culpaeus*), el Chingue (*Conepactus chiga*) y especies un menos frecuentes como el Gato Montés (*Felis geoffroyi*). Entre las principales aves presentes en el parque, se encuentra el emblema del escudo nacional, el Cóndor (*Vultur gryphus*), Águilas (*Geronaectus melanoleucus*) y algunas

especies asociadas a las lagunas y pantanos de la zona como Caiquenes (*Chloephaga picta*), Cisnes de cuello negro (*Cygnus melanocoryphus*) y Pato anteojillo (*Anas specularis*).

La flora de la zona, según los estudios realizados por Pisano (1974) se agrupa en cuatro grandes grupos: Matorral Preandino, Bosque Magallánico, Estepa Patagónica y Desierto Andino. En general se caracteriza por la capacidad de adaptación en términos de almacenamiento de agua y de resistencia a los fuertes vientos que azotan las pampas durante la mayor parte del año.

### **2.1.1. Incendios Forestales**

Las visitas turísticas al área del PNTP se han incrementado con el paso de los años, lo que ha generado beneficios económicos a la población local, aunque también ha traído consigo una serie de episodios catastróficos. En los últimos 30 años se han registrado 44 incendios que han afectado, en total, unas 44.000 hectáreas (CONAF, 2007). Estos eventos, en gran parte, se originaron en zonas de *camping* y pudieron ser fácilmente controlados, en términos de accesibilidad y presencia de personal en áreas cercanas al foco inicial. Por otra parte, otros eventos se originaron en lugares no autorizados para *camping* donde la disponibilidad de material combustible y las condiciones climáticas propagaron las llamas en grandes extensiones de terreno. Los tres últimos incendios de gran magnitud (1985, 2005, 2011), han sido causados por descuidos de turistas que se encontraban visitando el parque.

El 10 de febrero de 1985, un turista japonés causó la primera gran catástrofe en el PNTP, al dejar mal apagada un cigarro y arrojarlo en los senderos del parque. Durante dos semanas aproximadamente, CONAF estuvo combatiendo e intentado impedir la expansión de las llamas, extinguiendo por completo el incendio el 25 de febrero de 1985. Como

resultado de este siniestro, se quemaron 12.983 hectáreas de vegetación nativa (CONAF, 2009).

El segundo mayor incendio en el parque, fue registrado por CONAF en el sector de Laguna Azul, el 17 de febrero de 2005, veinte años después de la primera catástrofe. Esta vez, una cocinilla volcada por un turista checo originó el foco del incendio que demoró aproximadamente tres semanas en ser contenido y otra semana para la completa extinción. Un total de 15.470 hectáreas fueron quemadas por las llamas, de las cuales 11.685 hectáreas pertenecían al PNTP y 3.785 hectáreas eran de propiedad privada según indicaron informes estadísticos de la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI, 2009).

El más reciente siniestro presenciado al interior del parque, tuvo su foco de origen en el sector de Olgún (al sur de Refugio Grey, véase Figura 2), el 27 de diciembre de 2011, en las cercanías del Lago Grey, en un sendero montañoso, de difícil acceso vehicular y muy poca conectividad marítima producto de las fuertes ráfagas de viento aquel día. Debido a los constantes vientos, el fuego se propagó por un período de tres semanas, siendo contenido el 20 de enero de 2012, y finalmente extinguido un mes más tarde, el 24 de febrero del mismo año. Esta catástrofe no solo fue la de mayor duración, sino que también, la de mayor magnitud presenciada en el PNTP, abrasando una superficie total de 17.603 hectáreas.



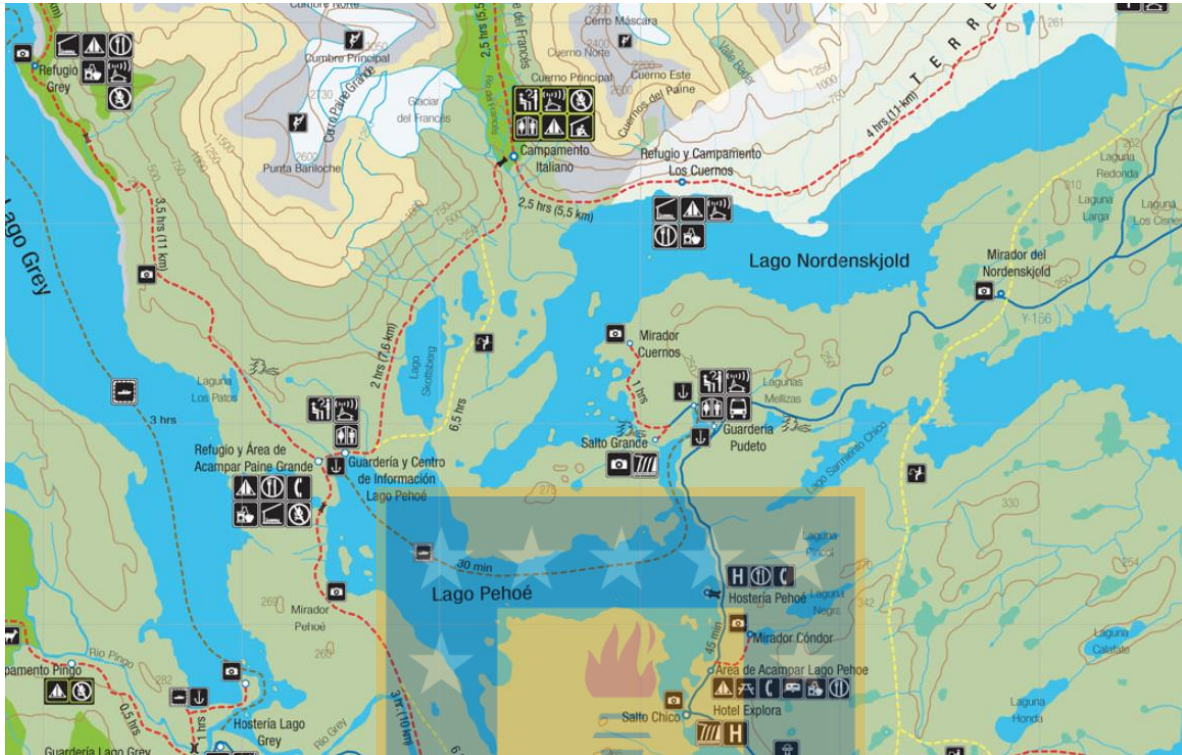


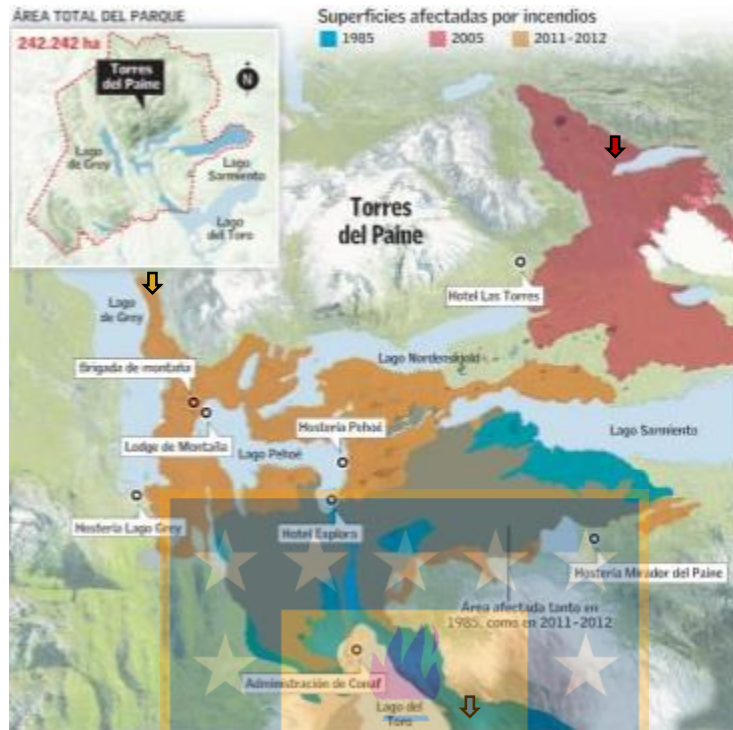
Figura 2. Mapa de senderos del Parque Torres del Paine.  
Fuente: CONAF<sup>1</sup>

Un breve resumen de los mayores incendios dentro del parque puede verse en la Tabla 1, en complemento con la Figura 3 donde puede apreciarse la extensión y el respectivo foco que dio inicio a estos mismos.

Tabla 1. Resumen de Incendios en PNTP.

Foco de Origen	Fecha de Inicio	Fecha de Contención	Fecha de Extinción	Superficie Afectada (ha)
Sector Lago Toro	10-02-1985		25-02-1985	12.983
Sector Laguna Azul	17-02-2005	04-03-2005	18-03-2005	15.470
Sector Olgúin	27-12-2011	20-01-2012	24-02-2012	17.603

<sup>1</sup> Mapa completo: <https://goo.gl/QhfuZK>.



*Figura 3. Extensión de Incendios en PNTP.*

Estos eventos han sido los de mayor envergadura, pero no han sido los únicos. Desde 1980 hasta el año 2012, se produjeron 62 incendios forestales en el interior del parque, cuyos orígenes han sido, en todos los casos, por actividad de caminantes y visitantes en la zona. Estos siniestros han mostrado un comportamiento relativamente constante, a pesar del incremento en los esfuerzos por mejorar las capacidades de manejo de estos eventos, además del significativo aumento en el número de visitantes anuales (Figura 4).



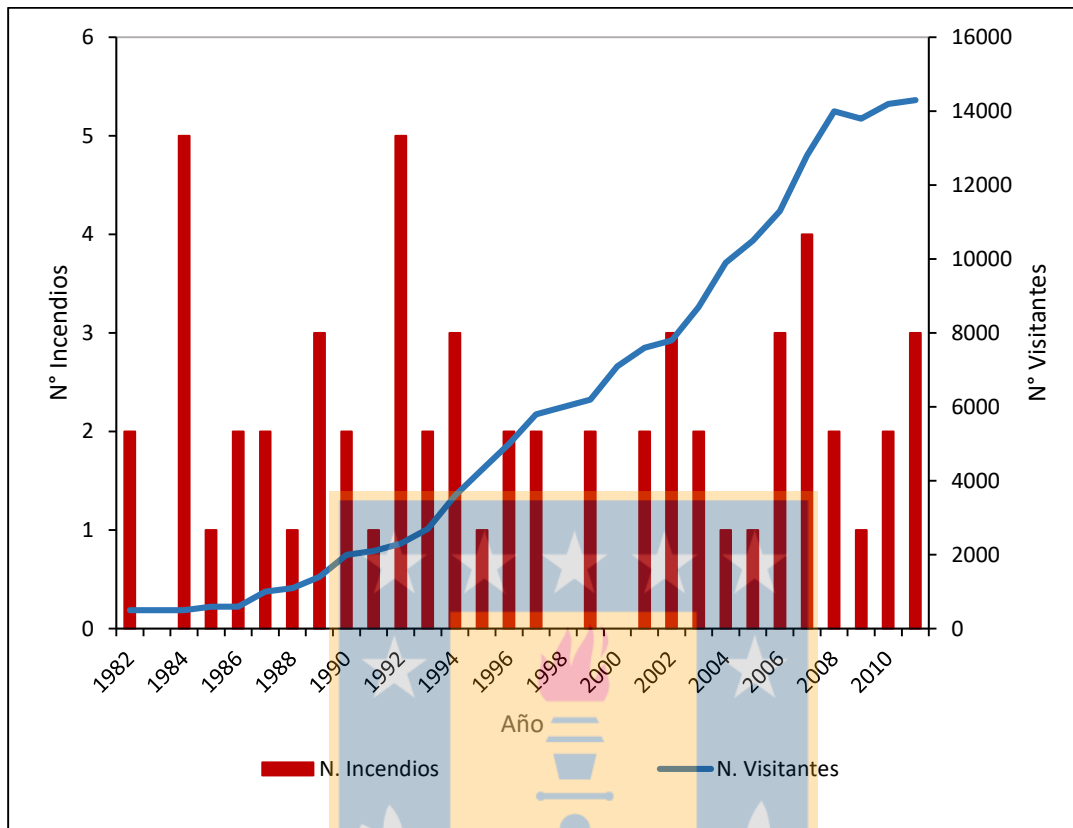


Figura 4. Número de visitantes y Número de incendios por año.

### 2.1.2. Plan de Manejo

Desde el año 1985, la creciente demanda de uso público del parque, que se expresa por un incremento en el número de visitantes anuales, ha transformado al parque en un doble icono nacional, en términos de conservación de recursos además del desarrollo social y económico que esto implica.

Producto de los incendios en los que el PNTP se ha visto envuelto, el Plan de Manejo (PM) del parque ha sido modificado en diversas ocasiones, buscando mejorar la gestión y las oportunidades de capacitación del personal del parque.

Desde el año 2007, el PM se ha desarrollado según la metodología elaborada por Núñez (2003). Los principios de este método se basan en la utilización de herramientas

modernas para el ordenamiento territorial, como lo son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y la planificación por objetivos, en conjunto con una activa participación ciudadana.

En el informe de elaboración del PM se mencionan las etapas y se establecen los programas, objetivos y resultados esperados por cada uno de ellos. De estas etapas, la que se relaciona directamente con el presente proyecto, se encuentran en la etapa tres, de Ordenación y Programación. En la Tabla 2 se puede apreciar un resumen de los programas relacionados con esta etapa.

Tabla 2. *Objetivos de manejo por programa y resultados esperados, Etapa 3.*

Programa de Manejo	Objetivo de Manejo	Resultados
1. Programa de Apoyo Administrativo, Finanzas e Infraestructura	1. Mejorar la capacidad de gestión administrativo financieras de las operaciones del parque	1. Medios humanos mejorados, tanto técnicos, como profesionales
		2. Medios materiales y de servicios suficientes para la gestión
		3. Disminución de la accidentabilidad laboral y de los visitantes
		4. Recursos económicos adicionales disponibles para la gestión
2. Programa de Uso Público	1. Satisfacer la demanda de los usuarios del parque respecto de la calidad y cantidad de los servicios entregados	1. Entrega de información ambiental suficiente
		2. Servicios e infraestructuras de acogida a los visitantes suficiente
		3. Contratos de concesión cumplidos
3. Programa de Conservación de Recursos Naturales y Culturales	1. Prevenir y mitigar el deterioro del medio natural y cultural del parque	1. Ocurrencia, magnitud e impacto de los incendios forestales disminuidos
		2. Impactos ambientales producto de actividades antrópicas, prevenidos y recuperados de sus efectos
	2. Mejoramiento permanente de la línea base de los recursos naturales y culturales del parque	3. Recursos culturales y paleontológicos protegidos
		1. Recursos naturales y culturales suficientemente conocidos
4. Programa de Extensión Comunitaria	1. Mejorar el posicionamiento del parque ante la comunidad, los visitantes y las autoridades	1. Gestión participativa mejorada
		2. Oportunidades que genera la implementación de la Reserva de la Biosfera Torres del Paine conocidas internamente y por la comunidad local
		3. Gestión del parque reconocida por la comunidad en general y sus autoridades

*Fuente: Recuperado de CONAF 2007.*

Debido al incremento en el número de visitantes, CONAF hace hincapié en que resulta fundamental que el manejo y uso público del parque se proyecte y se desarrolle con una logística que integre y compatibilice los objetivos de conservación que justifican la creación de este, con un uso sustentable y regulado de sus atractivos turísticos. En conjunto

con esto, se menciona la difícil tarea de realizar estas acciones cuando se cuenta con un apoyo monetario que solo permite mantener un estado de desarrollo básico del manejo del parque.

En la actualización más reciente (abril de 2012), el Programa de Mejoramiento, hace notar que el comportamiento de los incendios forestales presenta una dinámica que no se correlaciona con el número de visitantes por año (véase Figura 4) sino más bien, con el cambio de personal y la capacitación que estos poseen frente al combate de incendios forestales.

Este Programa de Mejoramiento se estructura en cuatro componentes originados a partir de los programas mencionados en el PM de 2007, agregando un cuarto programa que revela la necesidad de desarrollar una nueva y potencial estructura organizacional.

*Tabla 3. Componentes y subcomponentes P. Mejoramiento 2012*

<b>Componente</b>	<b>Subcomponente</b>
Programa de Uso Público	- Nuevo procedimiento y logística para la atención y control de visitantes.
	- Mejoramiento de las medidas de prevención de riesgos de accidentes de visitantes del Parque.
	- Actualización y reforzamiento del programa de Inversión de Infraestructura de Uso Público.
	- Reforzamiento del manejo de visitantes y normativa de uso del PNTP.
	- Mejoramiento de sistemas de información para la toma de decisiones de manejo.
Programa de Conservación de Recursos Naturales y Culturales	- Reforzamiento de las medidas de protección de los recursos naturales y culturales del Parque.
	- Diseño y aplicación del Programa de Restauración Natural del Parque
	- Diseño y ejecución del Programa de monitoreo respecto al progreso de recuperación de las áreas incendiadas.
Programa de Extensión Comunitaria	- Nuevo sistema de organización y coordinación con Guías Locales y concesionarios.
	- Implementación de un Programa de voluntariado y prácticas estudiantiles.
	- Reforzamiento de la gestión del consejo consultivo del parque nacional.
	- Establecer mesa de coordinación operativa con vecinos que tienen actividad turística dentro del parque, con el fin de enfrentar en conjunto problemáticas comunes.
Nueva Estructura Organizacional para el Parque	- Ampliación de la dotación de guardaparques transitorios y dotarlos de medios adecuados.
	- Programa de reclutamiento y capacitación de guardaparques transitorios.
	- Sistema de control de gestión y supervisión.

*Nota: Recuperado de CONAF 2012.*

En el segundo componente, de “Conservación de Recursos Naturales y Culturales”, se encuentran los subcomponentes y las acciones a realizar, que guardan relación con la

prevención y mitigación de incendios forestales. Entre las medidas a tomar, el plan propone aumentar el número de combatientes de incendios forestales y redistribuir las cuadrillas en zonas de montañas dentro del parque. Contempla, además, la contratación de helicópteros para transporte de brigadistas y lanzamiento de agua durante las temporadas de mayor exposición al riesgo de incendios (90 días, época estival).

En otras medidas, se plantea el diseño y la aplicación de un Programa de Monitoreo del Progreso de Recuperación de Áreas Incendiadas y un Programa de Restauración. Este último tiene como principales acciones, aumentar la capacidad productiva del vivero Dorotea en Puerto Natales (capacidad de producción de 100.000 plantas de Lengua) y reforestación de 50 hectáreas anuales, en áreas priorizadas.

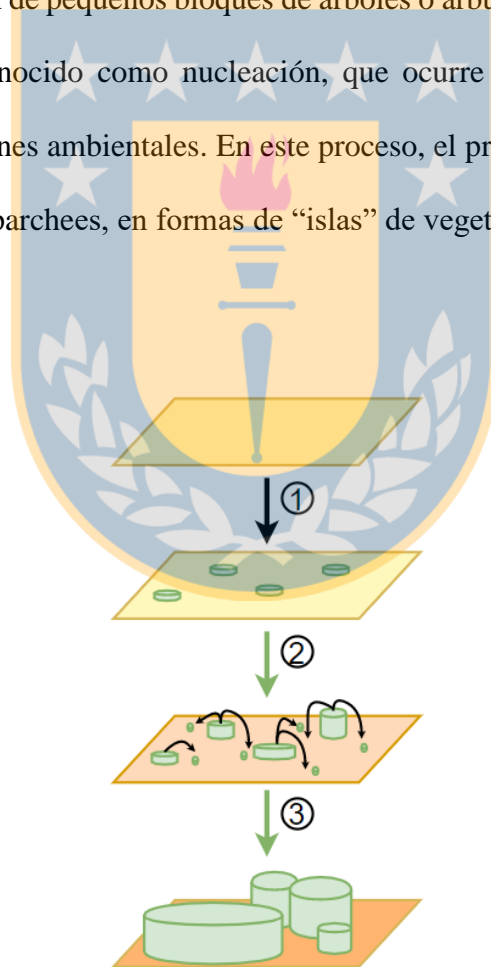
### **2.1.3. Reforestación**

Dentro de los subcomponentes del plan de 2012, se menciona que acciones extras de restauración del parque debían ser definidas por una comisión de expertos, por lo que el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), delegó la tarea de la elaboración del plan de restauración ecológica, al Comité Técnico del Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB) de Chile.

El plan de restauración elaborado por el comité, contempla un periodo de cinco años (2012-2016) proponiendo medidas de restauración pasiva y activa, considerando los diferentes ecosistemas involucrados. Es necesario realizar la reconstrucción de los ecosistemas originales para conservar la biodiversidad del parque. Para este propósito, se consideró el estudio realizado por Pisano (1974) y la cartografía que definía el parque antes del incendio de 1985. A partir de esta información, en conjunto con la actualización de las

coberturas de suelo, mediante imágenes aéreas (posteriores al incendio de 2012), estudios de geología (suelos, pendiente, erosividad, etc.), se confeccionaron planos de degradación del suelo asociados a la pérdida de cobertura vegetal por efecto de incendio y zonificación del sector identificando potencial real de restauración.

La plantación de especies leñosas sobre áreas extensas, es una técnica de restauración muy poco efectiva y altamente costosa (Parrota & Engel 2001, Benayas *et al.* 2008), por lo que se propuso la plantación de pequeños bloques de árboles o arbustos, que imita el proceso de regeneración natural conocido como nucleación, que ocurre frecuentemente en áreas abiertas de fuertes limitaciones ambientales. En este proceso, el primer grupo de vegetación logra establecerse, pero en parchees, en formas de “islas” de vegetación que coalescen en el tiempo.



*Figura 5. Diagrama esquemático de la aproximación de parches o islas de vegetación.*

La Figura 5 muestra las diferentes etapas del proceso de plantación en pequeños parches de vegetación. En un terreno sin vegetación, se plantan núcleos aislados (1) que con

el pasar del tiempo, acelerarán el proceso de generación de nuevos y pequeños núcleos en los alrededores de los originales (2) y finalmente, producto de estos eventos, los núcleos terminarán combinándose y creando un único conjunto de vegetación, mejorando la calidad de los suelos.

En cuanto a las semillas, o las plantas, que serán insertadas en el parque, la región dispone de tres viveros forestales operativos: uno perteneciente a la Minera Isla Riesco y dos a CONAF, que se encuentran ubicados en Punta Arenas y Puerto Natales (Figura 6). Este último se caracteriza por tener una producción estimada en 150.000 plantas anuales, buena accesibilidad y superficie disponible para eventual ampliación.



*Figura 6. Invernaderos de Vivero Dorotea, Puerto Natales.*

*Nota: Cada invernadero cuenta con una superficie de 320m<sup>2</sup>, con producción de 50.000 plantas cada uno.*

*Nota 2: Recuperado de MMA (2012)*

El proceso de restauración, en lo que a la plantación de las semillas se refiere, no requiere de personal altamente especializado. Es por esta razón, que año tras año, se organizaban campañas de participación voluntaria con énfasis en la población estudiantil de la región.

Una de las campañas más recientes (2015) fue considerado como uno de los mejores proyectos socio-ambientales de Latinoamérica, según los premios Latinoamérica Verde. Bajo el nombre de “20 mil lengas para el Paine”, la ONG Agrupación Medio Ambiental (AMA) Torres del Paine, buscaba financiamiento necesario para reforestar con más de 20.000 árboles nativos en áreas que se vieron afectadas por el incendio el año 2012. La propuesta reunió 32 millones de pesos, lo que equivale a 16.015 plantas de Lenga y que contó con la participación de seis mil estudiantes de la región de Magallanes.



### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Percepción Remota

La teledetección o percepción remota (del inglés *Remote Sensing*) es una técnica de adquisición y confección de información de un objeto y/o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por plataformas espaciales.

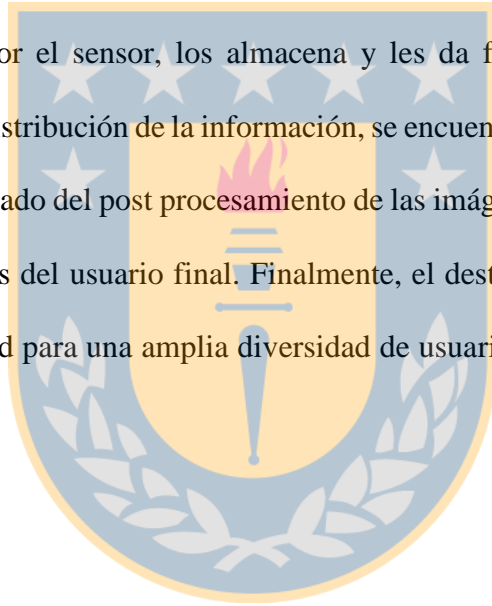
Tal y como su nombre lo indica, la observación realizada por la percepción remota supone la adquisición de información de la condición, o el estado de un objeto a través de sensores, sin tocarlo (Chuvieco, 2016). Para que esto se pueda realizar, debe existir un medio físico de interacción o energía, entre el sensor y el objeto en estudio, por el cual se transmite la información. El sensor detecta una señal que puede ser emitida por el sol y reflejada por la superficie terrestre, o bien puede ser emitida por la superficie misma. Por otra parte, existen también sensores capaces de emitir pulsos de energía propios, para que sean reflejados por la superficie terrestre independientemente de las condiciones climáticas. En este sentido los sensores utilizados pueden ser clasificados como sensores pasivos y sensores activos, siendo los primeros aquellos que captan la energía solar reflejada por la superficie, y los últimos, aquellos que emiten los pulsos de energía.

Chuvieco (2016), describe la estructura del proceso de adquisición de datos mediante seis componentes (Figura 7).

Un primer componente es la fuente de energía que produce la radiación electromagnética, la cual posteriormente interactúa entre el sensor y la superficie. Un segundo componente, es la superficie terrestre, que consiste en una cubierta de elementos diferentes (vegetación, rocas, agua, hielo, estructuras humanas, etc.). Esta superficie es la que



recibe la energía incidente emitida desde la fuente y como resultado de interacciones físico-químicas refleja parte de esta energía de regreso al sensor. El sensor, tercer componente descrito por Chuvieco (2016), se encuentra a bordo de una plataforma y es el instrumento que mide y almacena los valores de energía reflejados por la superficie terrestre. Sobre la misma plataforma se encuentran una variedad de sensores que permiten el control de órbita y transmisión de datos hacia estaciones terrestres. Dentro de los componentes terrestres, se encuentran las estaciones, o sistemas receptores de la información que reciben los datos digitales crudos medidos por el sensor, los almacena y les da formato para la posterior distribución. Posterior a la distribución de la información, se encuentra el quinto componente, el Analista. Este es el encargado del post procesamiento de las imágenes, y de darles un valor temático según sea el interés del usuario final. Finalmente, el destino de las imágenes post procesadas, es ser de utilidad para una amplia diversidad de usuarios según los intereses de cada individuo.



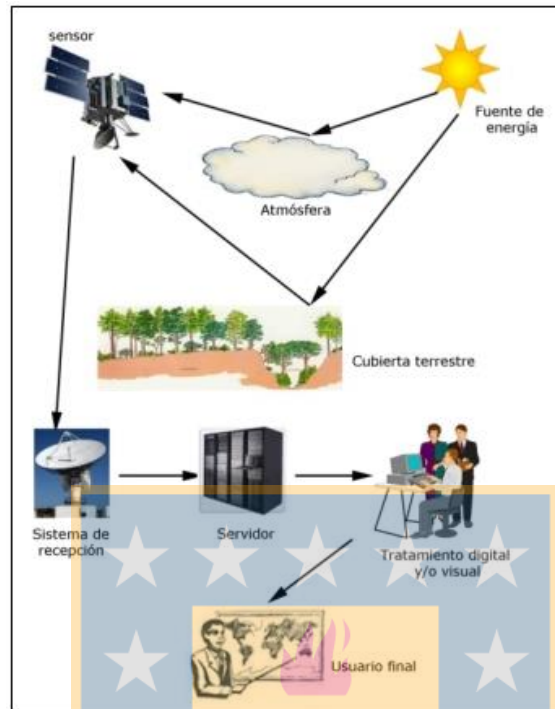


Figura 7. Principales componentes asociados a las actividades de percepción remota.

Fuente: <https://goo.gl/zZfoyp>.

Haciendo una analogía con una situación cotidiana, el ojo humano es el principal sensor receptor de energía electromagnética reflejada por los objetos sobre la superficie terrestre, que posteriormente es transmitida al cerebro para la interpretación de la situación frente a la que se encuentra el individuo.

A pesar de lo sofisticado que es el sistema humano para la percepción de imágenes, este cuenta con ciertas limitaciones que la percepción remota logra superar. Los sensores remotos logran captar rangos del espectro electromagnético que el ojo humano no es capaz de percibir, es el caso de radiaciones infrarrojas, ultravioletas, micro ondas y otras.

En este sentido, las principales divisiones del espectro electromagnético (Figura 8) se encuentran definidas de manera arbitraria. En el espectro completo, no existen líneas de quiebre entre las divisiones que son estudiadas por la percepción remota y otras disciplinas.

Estas divisiones son definidas por convención entre las diferentes disciplinas, por lo que, dependiendo de la bibliografía, pueden presentar ligeras diferencias en la limitación de estas.

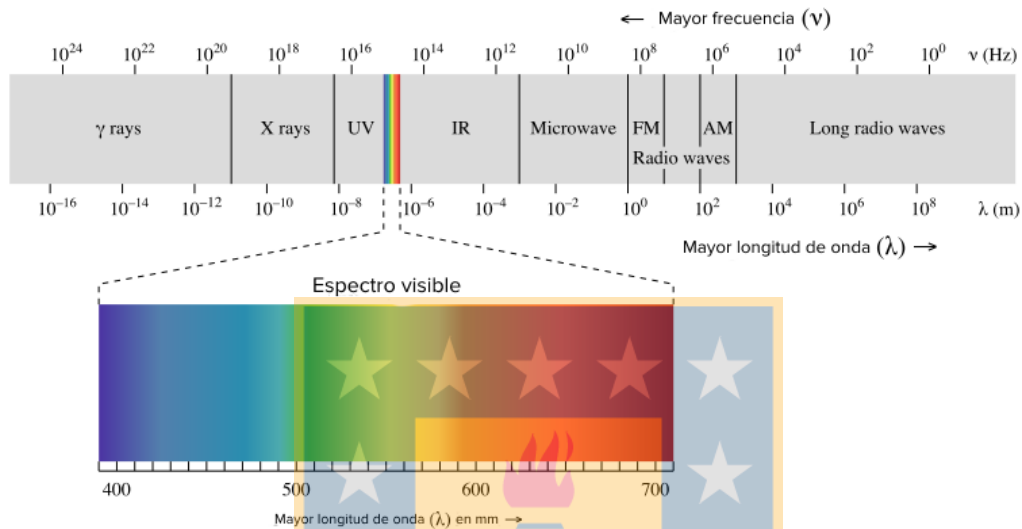


Figura 8. Principales bandas del espectro electromagnético.  
Fuente: <https://goo.gl/6L5XH2>.

La ventaja de la percepción remota con respecto a la adquisición de datos en otros rangos del espectro electromagnético permite realizar una amplia diversidad de estudios. La radiación ultra violeta (UV), el infrarrojo térmico (THIR), el infrarrojo cercano (NIR), el infrarrojo de onda corta (SWIR), las microondas (MW) y por supuesto la porción visible del espectro (VIS), proveen información muy valiosa a la hora de realizar estudios de monitoreo en variables ambientales. Por ejemplo, la porción NIR es utilizada en estudios ambientales, debido a la alta sensibilidad de percibir el estado de salud en la vegetación; el THIR es comúnmente usado para mapear las temperaturas sobre la superficie terrestre y con amplia utilización en estudios para detectar procesos de evapotranspiración vegetal, propiedades de cuerpos gaseosos y de hielo, efectos de calor urbano, etc.; las MW tienen la principal ventaja de poseer una longitud de onda mayor y con una baja absorción atmosférica, por lo que es usada para ver a través de la cobertura nubosa, además puede penetrar bosques

frondosos en diferentes profundidades, y de ser de gran utilidad al momento de estudiar la humedad y rugosidad de los suelos.

### 3.1.1. Firmas espectrales

La proporción de energía que es reflejada, absorbida y transmitida son una función de las características únicas de la superficie, y estas proporciones varían según la longitud de la onda de la señal emitida/recibida. Por ejemplo, una hoja se verá verde si es que presenta una mayor reflectancia en las longitudes de onda del verde, que en las porciones correspondientes al azul o el rojo. Un elemento se verá azul si es que refleja mayor cantidad de energía en las porciones de ondas de azul que en cualquier otro rango del espectro visible.

Así, el comportamiento de un objeto sobre varias longitudes de onda del espectro electromagnético se conoce como firma espectral o en inglés *Spectral Signature*. En la Figura 9 pueden apreciar diferentes elementos que cubren la superficie terrestre y el porcentaje de energía que estos reflejan.

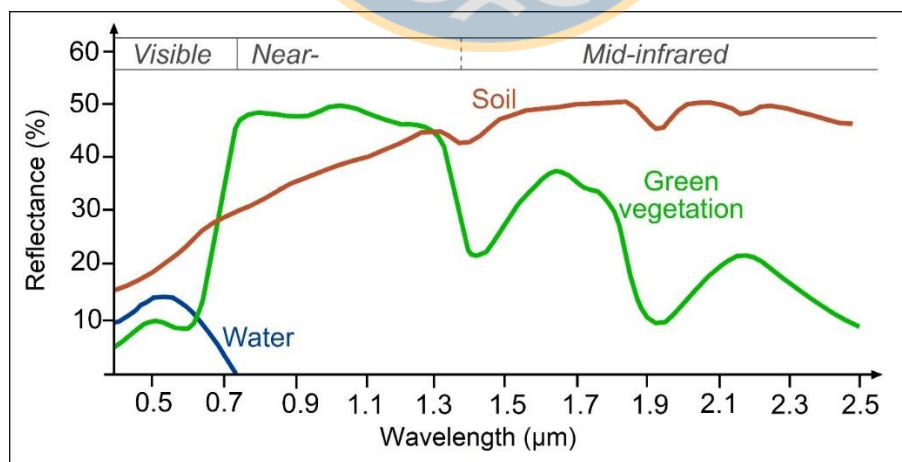


Figura 9. Firmas espectrales de elementos presentes en la superficie terrestre.

Fuente: <https://goo.gl/XkXvff>.

Los cuerpos de agua, presentan una baja reflectancia en el espectro visible y va disminuyendo a medida que se acerca a las porciones de NIR y SWHIR. La concentración

de sedimentos, fitoplancton, y la contaminación, son factores modificadores de la firma espectral de esta cobertura.

La vegetación posee una firma espectral única, con baja reflectancia en el rango VIS, alta en NIR y baja en SWIR. La firma espectral de la vegetación se ve alterada por el tipo y morfología de la hoja, contenido de clorofila y vejez. Los Suelos, por otra parte, presentan una reflectancia ascendente a medida que se acercan a longitudes de onda mayor (NIR, MIR, SWIR), que se ve afectada por la composición en términos de materia orgánica, concentración de hierro, agua y contenido de sales. Además, la firma espectral de los suelos, se verá modificada por las propiedades estructurales de la superficie, así como también por los desechos y la etapa de descomposición de estos.

### **3.1.2. Índices Espectrales**

En las primeras décadas de los satélites de observación de la tierra, la información obtenida por los satélites estaba limitada a la generación de mapas temáticos usando diferentes técnicas de clasificación. Aunque hoy en día, este es un enfoque ampliamente utilizado, no permite utilizar todo el potencial cuantitativo con el que cuentan los sensores de observación de la tierra.

Para la extracción de información de una imagen satelital pre procesada, esta debe ser categorizada y agrupada, de forma de permitir la discriminación de un área determinada que presenta características particulares. En este sentido, una de las técnicas, o procesos por los cuales se puede obtener información derivada de imágenes satelitales, es el cálculo de índices espectrales.

Los índices espectrales son una combinación de dos o más bandas de reflectancia de la superficie terrestre, en una operación algebraica aplicada sobre los valores numéricos de cada pixel, cuyo resultado indica abundancia de elementos de interés. Los índices espectrales de vegetación son los más utilizados, pero existen otros índices disponibles, aplicables para áreas quemadas, estructuras humanas, agua y otros aspectos geológicos de la superficie terrestre.

## **NBR**

El índice Normalizado de Áreas Quemadas (NBR) fue definido para detectar y delimitar grandes áreas afectadas por incendios, con una superficie necesariamente mayor a 500 acres (aproximadamente 200 hectáreas). La ecuación utilizada en el cálculo es muy similar a la de *Normalized Difference Vegetation Index*, excepto que utiliza las bandas NIR y SWIR.


$$\text{NBR} = \frac{\varphi_{\text{NIR}} - \varphi_{\text{SWIR}}}{\varphi_{\text{NIR}} + \varphi_{\text{SWIR}}} \quad (1)$$

Donde  $\varphi_{\text{NIR}}$  es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y  $\varphi_{\text{SWIR}}$  es la reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR).

El NBR fue desarrollado originalmente para ser usado con las bandas 4 y 7 de los sensores TM y ETM+, pero puede ser utilizado con cualquier sensor multi espectral que tenga bandas en NIR (0.79 – 0.9  $\mu\text{m}$ ) y SWIR (2.08 – 2.35  $\mu\text{m}$ ). Para el caso particular de los satélites utilizados en el estudio, las bandas necesarias para el cálculo son las bandas 7, en ambos casos (véase Figura 12).

### 3.1.3. Utilización en Incendios Forestales

Los incendios forestales son un fenómeno que afecta biomas terrestres. El desarrollo o restablecimiento de la biomasa sobre la superficie, posterior a estos eventos, se conoce como recuperación vegetacional.

El monitoreo de la recuperación de vegetación, espacial y temporalmente, mediante muestras de terreno puede ser un desafío, debido al tiempo que debe ser empleado en ello. Los sensores remotos adquieren datos en grandes superficies y con periodos regulares, aportando potencialmente a la tarea de monitorear la recuperación de vegetación posterior a un incendio.

Datos adquiridos por una amplia gama de plataformas satelitales han sido utilizados como una aproximación para monitorear regeneración de vegetación post-incendios en diferentes sectores del mundo; en Sudáfrica (Lhermitte et al. 2011), California (Hope et al. 2007), bosques de pino en España (Vicente-Serrano et al. 2011), bosque tropical en Brasil (Numata et al. 2011).

Chu *et al.* (2015) comparó los resultados obtenidos en base a diferentes índices espectrales (*Forest Recovery Index* y *Fractional Vegetation Cover*) de la regeneración de bosques posterior a un incendio en bosques Siberianos. Walz *et al.* (2007) analizó el desarrollo temporal de un bosque de Eucaliptos en base a índice NBR derivado de productos MODIS (del inglés *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), en los dos primeros meses posteriores a un incendio en el este de Australia. Por otra parte, Cocke *et al.* (2005) utiliza el índice NBR y muestras de terreno para comparar los resultados de la caracterización de los suelos en un incendio al interior de un parque nacional en Arizona.

### 3.2. Programa Landsat

El éxito en la captura de imágenes de la tierra desde plataformas espaciales, como lo fue el caso de la primera imagen multispectral desde el Apolo 9 en 1969, dio lugar al desarrollo de tecnologías y programas para el monitoreo de recursos terrestres.

La NASA (del inglés *National Aeronautics and Space Administration*), en conjunto con el *United States Geological Survey* (USGS) desarrollaron un programa de observación satelital de los recursos terrestres, que en un inicio fue denominado *Earth Resources Technology Satellites Program* y posteriormente, en 1975 se le dio el nombre de Landsat, con el que se conoce hasta hoy en día.

El programa Landsat ha puesto en órbita una serie de satélites con diferentes sensores a bordo, siendo cada miembro de la serie un poco más sofisticado que su antecesor. En la Figura 10 se puede apreciar la línea de tiempo con los lanzamientos de cada uno de los satélites miembros del programa Landsat.

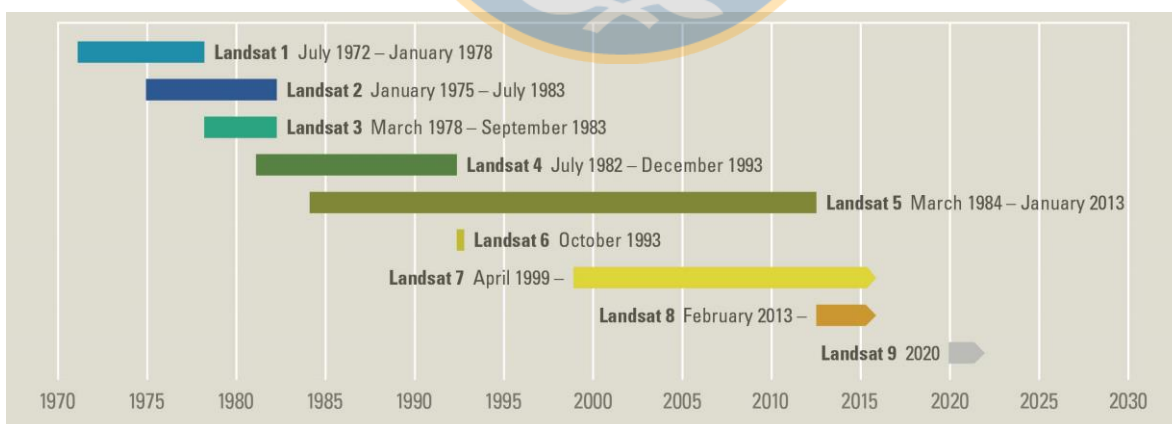


Figura 10. Cronología de lanzamientos Landsat.  
Fuente: <https://goo.gl/mujYKf>.

Durante las primeras misiones Landsat, los sensores guardaban las imágenes capturadas en las plataformas y luego eran transmitidas a las estaciones receptoras en tierra,



mientras que en las últimas cinco, las imágenes eran transmitidas directamente a las antenas receptoras. Eso permitía que existiese acceso a las imágenes prácticamente desde cualquier antena receptora sobre la superficie terrestre. Sin embargo, las políticas de administración y distribución de las imágenes sufrieron una serie de cambios que aumentó el precio de estas, por lo que estos productos solo fueron usados con fines de Investigación y Desarrollo (I+D).

Los archivos históricos de las plataformas Landsat fueron puestas a libre disposición del público en octubre de 2008 (Landsat 7) y en enero de 2009 (Todas las plataformas). Esto dio lugar a una inmensa variedad de usos para las imágenes Landsat, potencialmente en el estudio de fenómenos variables en el tiempo y monitoreo de los cambios en la superficie terrestre en los últimos 30 años. Además, producto de esta política, muchas otras agencias espaciales han publicado las imágenes para ser descargadas de manera gratuita para aumentar las probabilidades en el análisis de tendencias en variables ambientales.

A fecha de hoy, solo dos de los ocho históricos satélites se encuentra en órbita capturando imágenes de todo el planeta cada ocho días.

### **3.2.1. Landsat 7**

El séptimo satélite de la serie Landsat, lanzado en abril de 1999, lleva a bordo una versión mejorada del sensor que llevaba su antecesor Landsat 6, el *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+). Este sensor tiene características muy similares a la de su antecesor, el *Thematic Mapper* (TM), pero con una banda pancromática de 15m de resolución espacial y una mejora en la resolución espacial de la banda térmica, de 120m a 60m.

Con una órbita compuesta por 233 ciclos, y una cobertura global cada 16 días, Landsat 7 entrega imágenes en ocho bandas dentro del espectro electromagnético (Tabla 4).

Tabla 4. Bandas del sensor ETM+ de Landsat 7.

Banda	Rango ( $\mu\text{m}$ )	Resolución
B1-Visible ( <i>Blue</i> )	0.45 – 0.52	30 m
B2-Visible ( <i>Green</i> )	0.52 – 0.60	30 m
B3-Visible ( <i>Red</i> )	0.63 – 0.69	30 m
B4-Near-Infrared	0.77 – 0.90	30 m
B5-Near-Infrared	1.55 – 1.75	30 m
B6-Thermal	10.40 – 12.50	60 m
B7-Mid-Infrared	2.08 – 2.35	30 m
B8-Panchromatic	0.52 – 0.90	15 m

El ETM+ es uno de los sensores con mayor potencial en la observación terrestre, en especial en la determinación de áreas afectadas por incendios (Mattar *et al.* 2012). Sin embargo, a partir de 2003, todas las imágenes de este sensor presentan un problema de bandeo (*stiping*) debido a que el *Scan Line Corrector* (SLC) dejó de funcionar. La función del SLC era compensar el movimiento *along-track* de la plataforma para que los escaneos simultáneos resulten paralelos. El resultado de esta falla es la generación de líneas semi horizontales en la imagen, producto del efecto “zig-zag” que existe entre los escaneos realizados por el ETM+ y que causan una pérdida de información cercana al 22% según indica la USGS. Esta falla es aún más notoria a medida que se aleja del centro de la imagen (Figura 11).

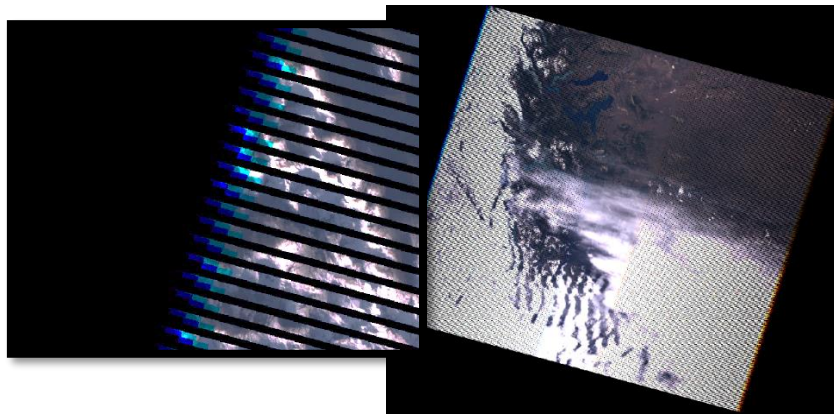


Figura 11. Impacto del malfuncionamiento del SLC.  
 Nota: Se muestra la imagen ETM+ (path 230; row 96) del 12 de enero del 2012.

### 3.2.2. Landsat 8

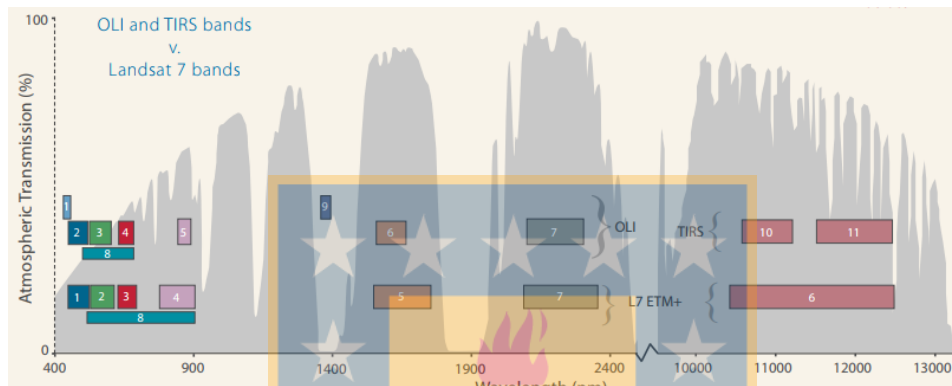
El séptimo satélite puesto en órbita y el octavo de la serie Landsat, originalmente denominado *Landsat Data Continuity Mission*, fue lanzado en febrero del 2013 con el objetivo de mantener dos satélites en órbita para proporcionar imágenes continuas de la tierra en conjunto con Landsat 7.

El sucesor de Landsat 7 cuenta con dos nuevos sensores, el *Operational Land Mapper* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). OLI captura imágenes en nueve bandas, siete de las cuales son consistentes con los sensores TM/ETM+ equipados en los antecesores de Landsat 8 y además, agrega dos nuevas bandas: una banda azul costero (*Deep blue coastal/aerosol*) y una banda infrarrojo de onda corta “*Cirrus*” (*Shortwave-Infrared Cirrus*), que permiten monitorear la calidad de las costas y mejorar la detección de la concentración de gases en las nubes, respectivamente. Por otra parte, TIRS captura imágenes en dos bandas del infrarrojo termal, dando continuidad a la banda infrarroja única de Landsat 7. La distribución de las bandas puede verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Bandas sensores OLI y TIRS de Landsat 8.

<b>Banda</b>	<b>Rango (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución</b>
B1- <i>Coastal/Aerosol</i>	0.43 – 0.45	30 m
B2- <i>Blue</i>	0.45 – 0.51	30 m
B3- <i>Green</i>	0.53 – 0.59	30 m
B4- <i>Red</i>	0.64 – 0.67	30 m
B5- <i>Near Infrared</i>	0.85 – 0.88	30 m
B6- <i>Shortwave Infrared 1</i>	1.57 – 1.65	30 m
B7- <i>Shortwave Infrared 2</i>	2.11 – 2.29	30 m
B8- <i>Panchromatic</i>	0.50 – 0.68	15 m
B9- <i>Cirrus</i>	1.36 – 1.38	30 m
B10- <i>Thermal Infrared 1</i>	10.6 – 11.19	100 m
B11- <i>Thermal Infrared 2</i>	11.5 – 12.51	100 m

A pesar de las pequeñas variaciones entre la asignación de las bandas en Landsat 7 y Landsat 8, estas presentan compatibilidad al momento de realizar el procesamiento y tratamiento con imágenes combinadas. Un mayor detalle de cómo cada una de las bandas cubre parte del espectro electromagnético puede verse en la Figura 12.



*Figura 12. Cobertura de bandas Landsat 7 vs Landsat 8.  
Nota: Recuperado de USGS 2013.*

### 3.2.3. Preprocesamiento

El cálculo de índices sobre imágenes, requiere de un previo procesamiento de estas, en el que los valores de *pixel* (también conocidos como *Digital Number DN*), deben ser transformados y calibrados a fin de tener unidades físicamente representativas.

Para el caso de las imágenes provenientes de Landsat, esta transformación tiene una forma particular de realizarse que es descrita a continuación.

#### Landsat 7

El sensor ETM+ captura la energía solar reflejada por la superficie, convierte estos valores a radiancia y luego los re-escala en un DN con un rango de 0 a 255. El procedimiento de calibración de las imágenes adquiridas por Landsat 7 puede ser realizado en dos pasos.

El primero de ellos es la conversión de los DNs a valores de radiancia, utilizando los *bias* y *gain* (especificados en el archivo “\_MTL.txt” de metadatos) para cada una de las escenas y bandas con las que se va a trabajar. Para ello se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_{\lambda} = Grescale * Q_{CAL} + Brescale \quad (2)$$

Donde  $L_{\lambda}$  es el nuevo valor del *pixel* en términos de radiancia,  $Q_{CAL}$  son los valores de *pixel* a convertir,  $Grescale$  y  $Brescale$  son los valores de *gain* y *bias* re-escalados, respectivamente, especificados en el archivo de metadatos de la imagen correspondiente.

O utilizando la fórmula equivalente:

$$L_{\lambda} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} * (Q_{CAL} - Q_{CALMIN}) + LMIN_{\lambda} \quad (3)$$

Donde  $L_{\lambda}$  es el valor del *pixel* como radiancia,  $LMAX_{\lambda}$  y  $LMIN_{\lambda}$  son los valores radiancia espectral máximos y mínimos respectivamente,  $Q_{CALMAX}$  y  $Q_{CALMIN}$  son los valores máximos y mínimos registrados como DN.

El segundo paso es la conversión de estos valores de radiancia hacia reflectancia ToA (*Top of Atmosphere*). Esto se lleva a cabo mediante la siguiente formula:

$$\rho = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{SUN} * \cos \theta_s} \quad [4]$$

Donde  $\rho$  es la reflectancia atmosférica,  $\pi$  es la constante euclidiana (suele emplearse un valor de 3.141592),  $L_{\lambda}$  es la radiancia espectral calculada previamente,  $d$  es la distancia entre el sol y la tierra en unidades astronómicas (AU),  $E_{SUN}$  es la irradiancia solar exoatmosferica media (véase Tabla 6),  $\theta_s$  es el ángulo solar sobre el zenit en grados sexagesimales.

Tabla 6. Irradiancia Solar Espectral para ETM+.

Banda	watts/ (metros cuadrados * $\mu\text{m}$ )
1	1970
2	1842
3	1547
4	1044
5	225,7
7	82,06
8	1369

Nota. Recuperado de NASA (2013).

## Landsat 8

El sensor a bordo de Landsat 8, OLI, también captura la energía solar reflejada por la superficie y los convierte, pero este los re-escala en valores de DN de 16 bit, de 0 a 65536. Por otra parte, los valores son convertidos a reflectancia, en lugar de radiancia como su antecesor, lo que hace que el proceso de corrección se pueda realizar en solo un paso.

La corrección entonces, constaría de la transformación de los DN hacia valores de reflectancia ToA. Utilizando la siguiente formula:

$$\rho\lambda' = M_\rho Q_{CAL} + A_\rho \quad (5)$$

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

Ahora bien, si se requiere convertir los valores de DN hacia reflectancia considerando la corrección para el ángulo solar, se tiene:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos \theta_{SZ}} = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta_{SE}} \quad (6)$$

Donde  $\rho\lambda$  es la reflectancia ToA,  $\theta_{SE}$  es el ángulo de elevación solar en la escena (proporcionado en el archivo de metadatos),  $\theta_{SZ}$  es el ángulo solar sobre el zenit ( $\theta_{SZ} = 90^\circ - \theta_{SE}$ ).

## 4. Metodología

### 4.1. Imágenes utilizadas

Para la realización del proyecto se utilizaron imágenes satelitales provenientes de Landsat 7 y Landsat 8 adquiridas entre los años 2011 y 2017. Se escogieron aquellas imágenes en la que la nubosidad sobre el parque fuese la más baja posible (dentro de lo disponible) de la escena correspondiente al *Path* 230 y *Row* 096, en la que se aprecia íntegramente la zona de estudio. Cabe destacar que la nubosidad especificada en los metadatos de cada imagen, corresponden a la cobertura global de la escena y no necesariamente al área de estudio.

Las imágenes de Landsat 7 y Landsat 8 fueron descargadas utilizando la interfaz de búsqueda online desarrollada por la USGS<sup>2</sup>.

En la Tabla 7 se presentan los principales atributos de cada una de las imágenes utilizadas en el tratamiento.

Tabla 7. Descripción de los archivos de imagen utilizados.

	Satélite	Sensor	Formato	Adquisición	Nubosidad
2005	Landsat 7	ETM+	GEOTIFF	03-01-2005	20,0%
2012	Landsat 7	ETM+	GEOTIFF	12-01-2012	22,0%
2013	Landsat 8	OLI-TIRS	GEOTIFF	23-04-2013	9,1%
2014	Landsat 8	OLI-TIRS	GEOTIFF	19-12-2013	6,4%
2015	Landsat 8	OLI-TIRS	GEOTIFF	23-01-2015	5,9%
2016	Landsat 8	OLI-TIRS	GEOTIFF	01-05-2016	11,5%
2017	Landsat 8	OLI-TIRS	GEOTIFF	17-03-2017	30,0%

<sup>2</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>



## 4.2. Corrección Bandedado

Como se mencionó anteriormente, las imágenes capturadas por Landsat 7 presentan una pérdida de información cercana al 22% producto de la falla en el SLC a bordo de la plataforma, que debe ser corregida antes de poder utilizar dichas imágenes en cualquier tipo de estudio. Desde el fallo en el SLC, diversas metodologías han sido desarrolladas e implementadas (Pringle *et al* 2009; Chen *et al.* 2011; Scaramuzza *et al.* 2004b) con el objetivo de recuperar la información que se perdió producto del fallo y así, darle uso a las imágenes que sigue capturando el sensor.

En este trabajo, cada una de las escenas fue interpolada a partir de triangulaciones, utilizando el algoritmo “SLC-off Gap-Filled Products” desarrollado por Scaramuzza (2004), que ha sido implementado para su utilización en ENVI (del inglés *Environment for Visualizing Images*).

Una muestra del efecto de las triangulaciones puede verse en la Figura 13. Sin embargo, es necesario mencionar que, los valores resultantes de esta interpolación no necesariamente corresponderán a valores con significancia física. Este método de interpolación fue aplicado a todas las bandas espectrales de las escenas ETM+ para las dos fechas utilizadas en el estudio (2005-2012).

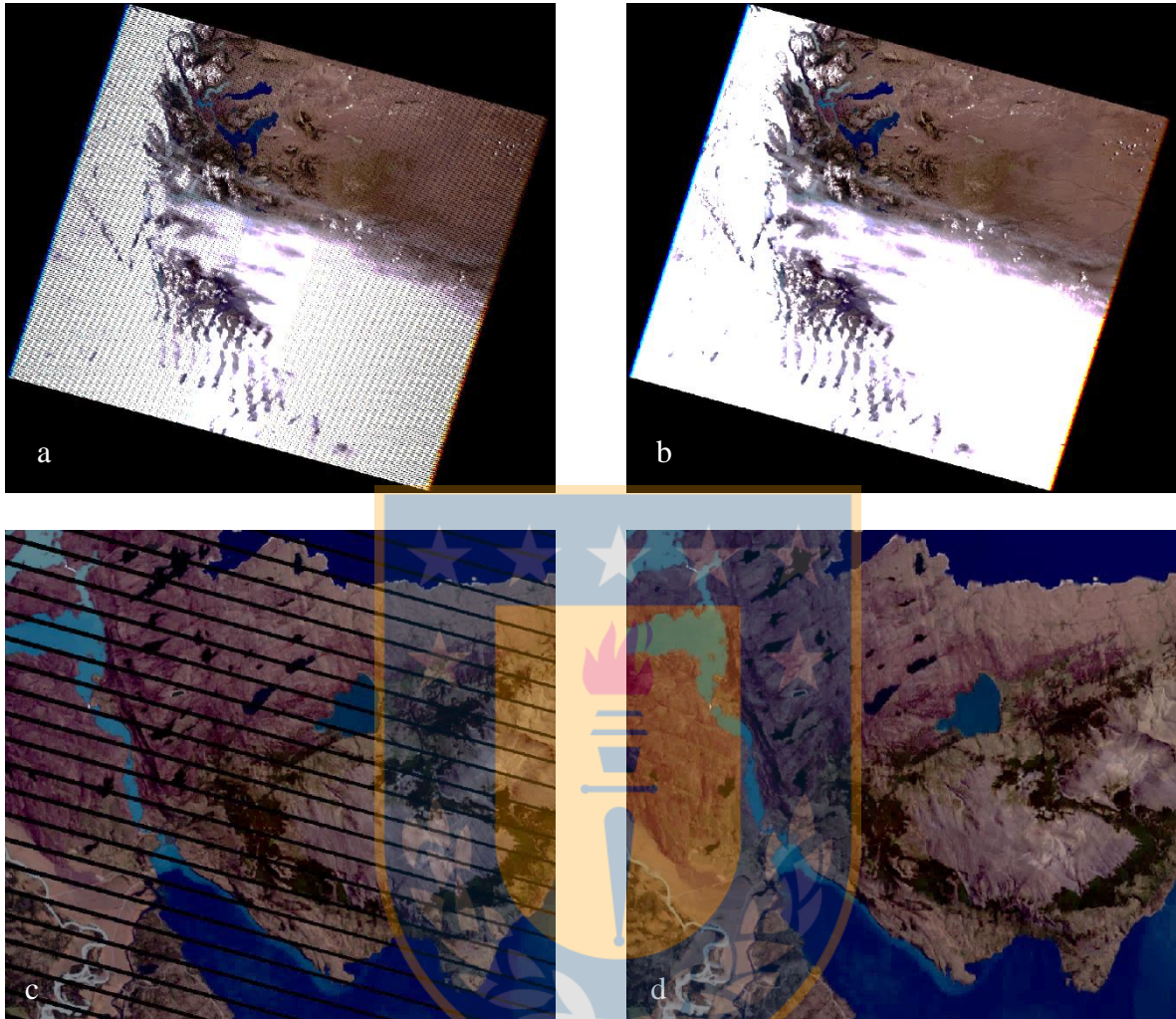


Figura 13. Imagen ETM+ (path 230; row 096) del 12 de enero de 2012. En las imágenes a y c se muestra la los efectos de bandeo producto del fallo del SLC, y en las imágenes b y d se muestran los resultados post interpolación.

### 4.3. Estimación Área Quemada

Con el objetivo de poder realizar la comparación de las zonas quemadas en 2012 y la evolución de estas a lo largo de los años, fue necesario delimitar la zona afectada inicialmente. Esto se realizó mediante una digitalización manual de la zona quemada, en base a la imagen ETM+ en falso color correspondiente al 24 de febrero del 2012. Posteriormente, como producto de la digitalización, una capa vectorial fue importada y sobrepuesta en una imagen de 2005 (Figura 14).



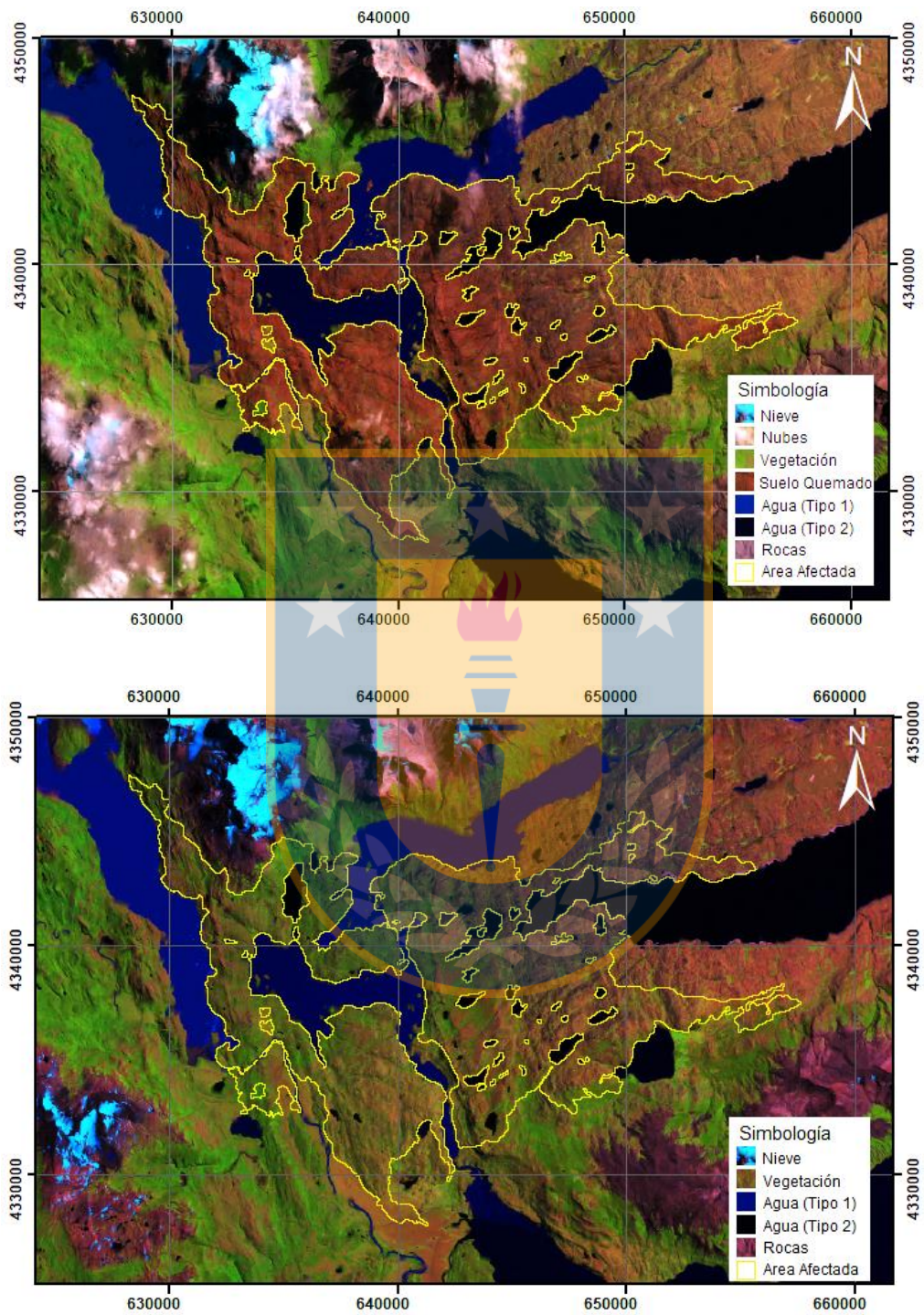


Figura 14. Estimación del área quemada sobre una imagen falso color correspondiente al 24 de febrero de 2012 (a) y enero de 2005 (b).

#### 4.4. Caracterización del estado del suelo

Aplicando la fórmula (1) de cálculo de NBR sobre una imagen anterior al incendio (2005) y sobre cada una de las imágenes correspondientes al periodo de tiempo en estudio, se realizó la diferencia entre estos resultados, obteniendo el *Differenced Normalized Burned Ratio*, que puede ser asimilado como un patrón de severidad. La clasificación utilizada por el *Fire Effects Monitoring and Inventory Protocol*, se presenta en la Tabla 8 y muestra una clasificación en relación a los valores de  $\Delta\text{NBR}$ .

Tabla 8. Indicador del estado del suelo.

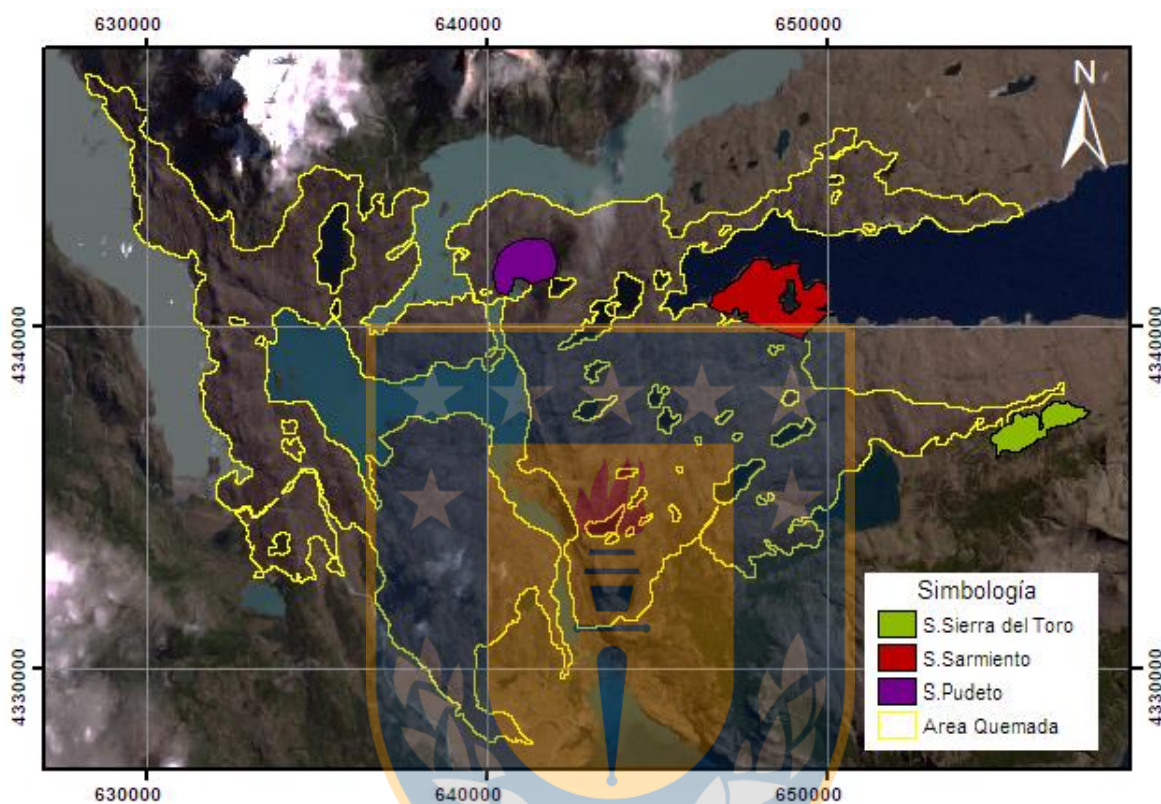
$\Delta\text{NBR}$	Estado de suelo afectado
< -0.25	Alto crecimiento post-incendio
-2.5 - -0.1	Bajo crecimiento post-incendio
-0.1 - 0.1	No quemado
0.1 - 0.27	Quemado de baja severidad
0.27 - 0.44	Quemado de severidad media
0.44 - 0.66	Quemado de severidad media-alta
> 0.66	Quemado de severidad alta

Reclasificando las imágenes según el estado que presenta el área, se obtuvieron seis resultados que muestran la caracterización de los suelos en función de la clasificación recién mencionada (véase Figuras Figura 16 a Figura 21).

#### 4.5. Comparación de Progreso

La intervención e inserción de plantas de Lengua, se realizó en terrenos priorizados por CONAF, por lo que no todo el crecimiento vegetal que presenta el parque representa la acción realizada por ellos y por AMA. Teniendo esto presente, se comparó la mejora que presentaron los suelos en los que CONAF y AMA intervinieron con la plantación de Lengas (Sector Pudeto y Sector Gray) con sectores en los que solo se ha presentado recuperación natural de los suelos, como los sectores de Sierra del Toro y Sector Sarmiento. Estos últimos,

se escogieron por ser un sector de difícil acceso y por haberse visto menos afectado por el incendio de 2012, respectivamente (Figura 15).



*Figura 15. Sectores seleccionados para comparación de progreso.*

Se crearon nuevas capas vectoriales delimitando dichos sectores. Producto de que estas zonas se nombran según la cercanía a elementos naturales que ya poseen nombres conocidos (lagunas, ríos, cerros, etc.), los límites no se encuentran materializados físicamente, por lo que las capas creadas pueden o no, coincidir con los límites que CONAF considera “oficiales”.

Por lo anteriormente mencionado, los sectores seleccionados no cuentan con valores similares de superficie. Los sectores Pudeto, Sarmiento y Sierra del Toro, poseen superficie de 210, 450 y 200 hectáreas aproximadas, respectivamente.



## 5. Resultados

El área afectada por el fuego se muestra en la Figura 14, donde se evidencia el área quemada a partir de la comparación entre las imágenes antes y después del incendio, correspondientes al 3 de enero del 2005 y al 24 de febrero del 2012 respectivamente. La superficie afectada por el incendio se estimó, por medio de digitalización manual, en 18.595 hectáreas, obteniendo un error de 900 hectáreas con respecto a los valores oficiales entregados por CONAF (17.603 hectáreas).

Con el objetivo de comparar el grado de severidad con que el incendio afectó la zona, las Figuras 16 a la 21 muestran los  $\Delta$ NBR estimados para toda el área afectada. En estas imágenes se aprecia que el índice presenta una categorización sobre el tipo de cobertura dañada, en la que se diferencian aquellas que no fueron quemadas y que presentaron algún grado de regeneración post incendio. Hacia el borde de la Figura 16, se pueden apreciar zonas que no fueron quemadas, mientras que en el centro de esta área se encuentran las zonas con un mayor índice de siniestralidad.

Del total de la superficie afectada, 17.761 hectáreas presentaron algún grado de severidad, de las cuales un 28% presentó un grado alto de severidad. Por otra parte, 833 hectáreas presentaron un grado de recuperación posterior al incendio o no fueron quemadas.

Un año después del incendio, en base a los resultados obtenidos, se obtuvo que la superficie que presentó algún grado de recuperación fue de 12.745 hectáreas, de las cuales 2.956 hectáreas presentaron un bajo crecimiento posterior al incendio.

Para el año 2014, se obtuvo una superficie de 9.095 hectáreas quemadas con algún grado de severidad, dejando 9.499 hectáreas que presentaron algún grado de recuperación.

Si bien los números no muestran una tendencia positiva hacia la recuperación (véase Tabla 9), en comparación al año anterior (2013), si lo hacen con respecto al año en el que se produjo el incendio.

*Tabla 9. Resumen de áreas afectadas anualmente.*

<b>Clasificación</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
No Quemado / Recuperación	4,48%	68,54%	51,09%	56,82%	62,13%	70,27%
Quemado con algún grado de severidad	95,52%	31,46%	48,91%	43,18%	37,87%	29,73%

Para el año 2015, se obtuvo que la superficie que presentó un grado de recuperación fue de 331 hectáreas, de las que un 92% se encuentran en la categoría con bajo crecimiento post incendio. Considerando los suelos clasificados como No quemado, la superficie se estimó en 10.565 hectáreas, dejando así un total de 8.029 hectáreas que siguen presentando algún grado severidad.

En 2016, la superficie estimada y clasificada, con baja y alta regeneración, fue de 596 hectáreas, un 140% más con respecto al año anterior, dejando una superficie de 11.553 hectáreas que han presentado algún grado de mejora posterior al incendio.

Finalmente, se obtuvo que la superficie que presentó regeneración o es clasificada como no quemada, para el año 2017 fue de 13.067 hectáreas, de las que un 10% presentan un grado alto de regeneración.

Hasta el año 2017, se han recuperado un total de 13.067 hectáreas, que representa un 70% del total de la superficie afectada por el incendio. Anualmente, las campañas de reforestación lograron recuperar un 11% de la superficie que poseía algún grado de severidad con respecto al año anterior.

En la Tabla 10 se muestra la cantidad de *pixeles* que fueron clasificados anualmente, en las diferentes categorías propuestas y la correspondiente equivalencia en hectáreas.

Tabla 10. (a) *Pixeles clasificados por año* y (b) *Equivalencia en unidades de terreno*.

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto crecimiento post incendio	198	9.021	347	296	2.293	14.676
Bajo Crecimiento post incendio	539	32.851	4.651	3.382	4.337	25.546
No quemado	8.527	99.745	100.555	113.715	121.746	104.967
Área quemada de baja severidad	25.460	39.689	58.189	66.896	60.028	47.714
Área quemada de severidad media	45.414	18.192	29.931	18.522	15.659	11.670
Área quemada de severidad media-alta	71.187	6.673	11.443	3.602	2.523	2.029
Área quemada de severidad alta	55.290	444	1.499	202	29	13

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto crecimiento post incendio	17,82	811,89	31,23	26,64	206,37	1.320,84
Bajo Crecimiento post incendio	48,51	2.956,59	418,59	304,38	390,33	2.299,14
No quemado	767,43	8.977,05	9.049,95	10.234,35	10.957,14	9.447,03
Área quemada de baja severidad	2.291,40	3.572,01	5.237,01	6.020,64	5.402,52	4.294,26
Área quemada de severidad media	4.087,26	1.637,28	2.693,79	1.666,98	1.409,31	1.050,30
Área quemada de severidad media-alta	6.406,83	600,57	1.029,87	324,18	227,07	182,61
Área quemada de severidad alta	4.976,10	39,96	134,91	18,18	2,61	1,17

Nota: La equivalencia se calculó considerando la resolución de las imágenes Landsat 7 y Landsat 8 (30m).

Con respecto a las acciones realizadas por CONAF y AMA, los suelos intervenidos en Sector Pudeto presentaron un aumento en los *pixeles* clasificados con bajo y alto crecimiento posterior al incendio, representando un 25% y un 12% del total de superficie de este sector, respectivamente. Por otra parte, el sector de Sierra del Toro, presentó un ligero aumento en los *pixeles* clasificados en la categoría de bajo crecimiento, manteniendo la baja tendencia en las demás categorías (Tabla 11). El sector Sarmiento, que inicialmente no se vio afectado de gran manera, presentó una mejor recuperación, en términos de aumento de *pixeles* clasificados en las categorías de baja recuperación, presentando un 24% del total de la superficie en esta categoría, manteniendo relativamente constante (75% - 85%) las superficies que no presentaron efectos negativos posterior al incendio.



Por otra parte, en base a los resultados de la clasificación, puede verse que la mejora de suelos presenta un sentido de avance que va desde las orillas del Lago Sarmiento hacia el interior, hasta llegar a la orilla este del Lago Pehoé. Este avance puede justificarse, de cierta forma, por las bajas variaciones de pendiente que existen en estos sectores. No así en los sectores montañosos en los alrededores de Laguna Negra y Laguna Margarita. Si bien, las acciones de reforestación de CONAF están centradas en los sectores de mayor tránsito turístico (Pehoé, Sarmiento, Grey, entre otros), la recuperación en sectores diferentes, se presenta de manera natural.

Tabla 11. Equivalencia de pixeles clasificados en sectores (a) Pudeto, (b) Sierra del Toro y (c) Sarmiento.

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto crecimiento post incendio	0	15,84	0	0,09	0,9	25,65
Bajo Crecimiento post incendio	0,63	38,97	2,07	2,34	3,87	52,83
No quemado	6,3	121,14	116,46	109,35	99,99	101,61
Área quemada de baja severidad	21,51	28,8	71,91	90,9	94,59	27,81
Área quemada de severidad media	39,96	4,14	17,46	5,49	9,72	1,44
Área quemada de severidad media-alta	104,4	0,54	1,53	1,26	0,36	0,09
Área quemada de severidad alta	36,63	0	0	0	0	0

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto crecimiento post incendio	0	0	0	0	0	0
Bajo Crecimiento post incendio	0	13,95	0,99	1,53	2,34	6,75
No quemado	5,04	78,39	106,11	115,11	112,32	95,49
Área quemada de baja severidad	24,3	58,95	53,82	48,42	57,24	69,21
Área quemada de severidad media	40,86	27,81	27,63	23,85	23,58	24,84
Área quemada de severidad media-alta	76,77	18,36	9,18	8,82	2,25	1,44
Área quemada de severidad alta	50,76	0,27	0	0	0	0

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto crecimiento post incendio	0,72	5,31	2,7	0,18	1,08	20,43
Bajo Crecimiento post incendio	4,86	84,96	39,15	7,83	12,42	109,17
No quemado	171,54	339,57	385,83	363,06	394,92	294,66
Área quemada de baja severidad	215,55	24,3	23,13	78,48	41,85	25,02
Área quemada de severidad media	46,98	1,17	3,87	5,13	4,86	4,05
Área quemada de severidad media-alta	15,12	0,54	0,81	0,9	0,45	2,52
Área quemada de severidad alta	1,17	0,09	0,45	0,36	0,36	0,09

Tabla 12. Porcentajes de cobertura en sectores (a) Pudeto, (b) Sierra del Toro y (c) Sarmiento.

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Regenerado	0,30	26,17	0,99	1,16	2,28	37,47
No Quemado	3,01	57,84	55,61	52,21	47,74	48,52
Quemada con algún grado de severidad	96,69	15,99	43,40	46,63	49,98	14,01

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Regenerado	0,00	7,06	0,50	0,77	1,18	3,41
No Quemado	2,55	39,64	53,66	58,22	56,80	48,29
Quemada con algún grado de severidad	97,45	53,30	45,84	41,01	42,01	48,29

Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Recuperación	1,22	19,80	9,18	1,76	2,96	28,42
No Quemado	37,62	74,48	84,62	79,63	86,62	64,63
Quemada con algún grado de severidad	61,15	5,72	6,20	18,61	10,42	6,95

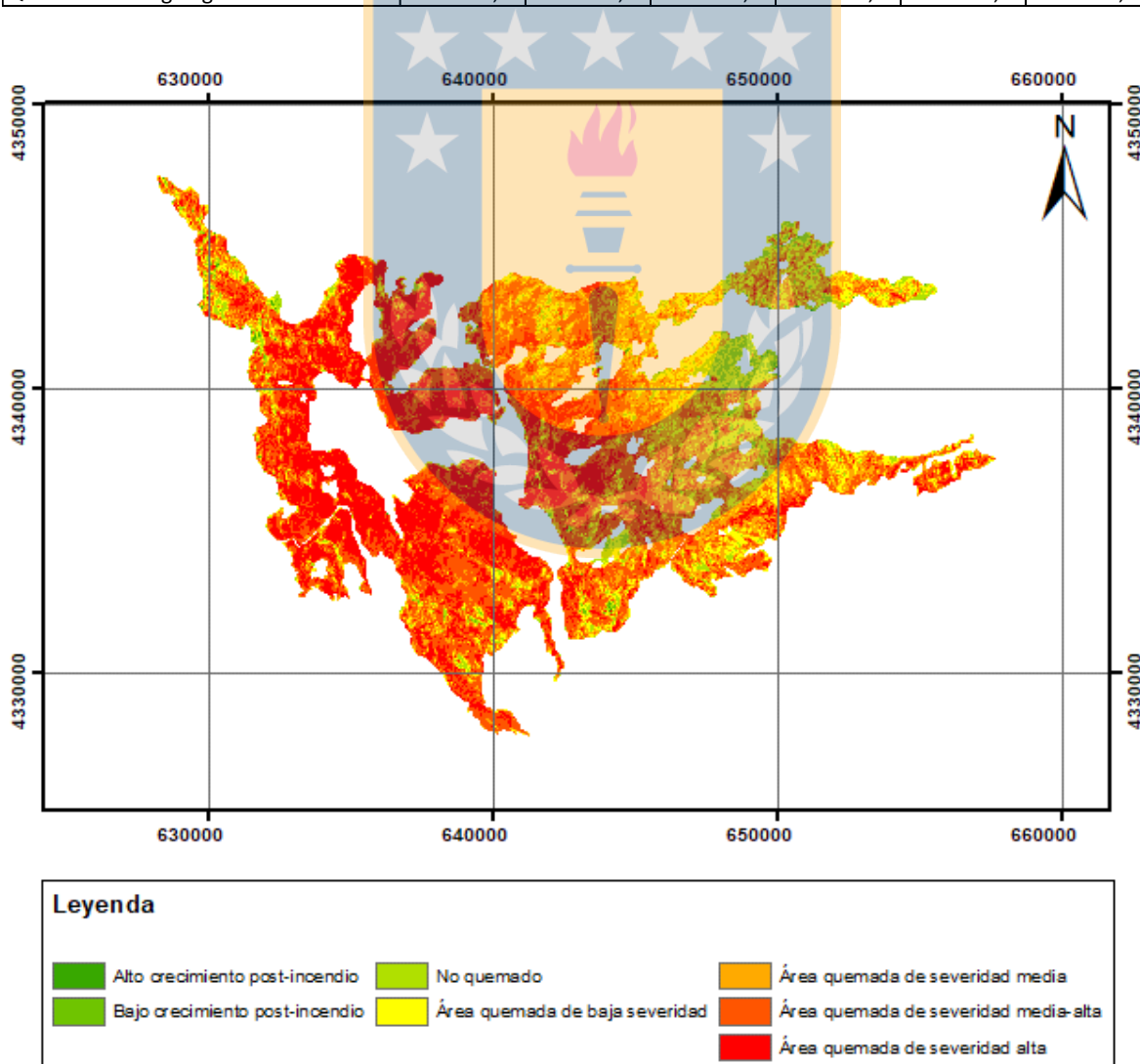


Figura 16.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2012.

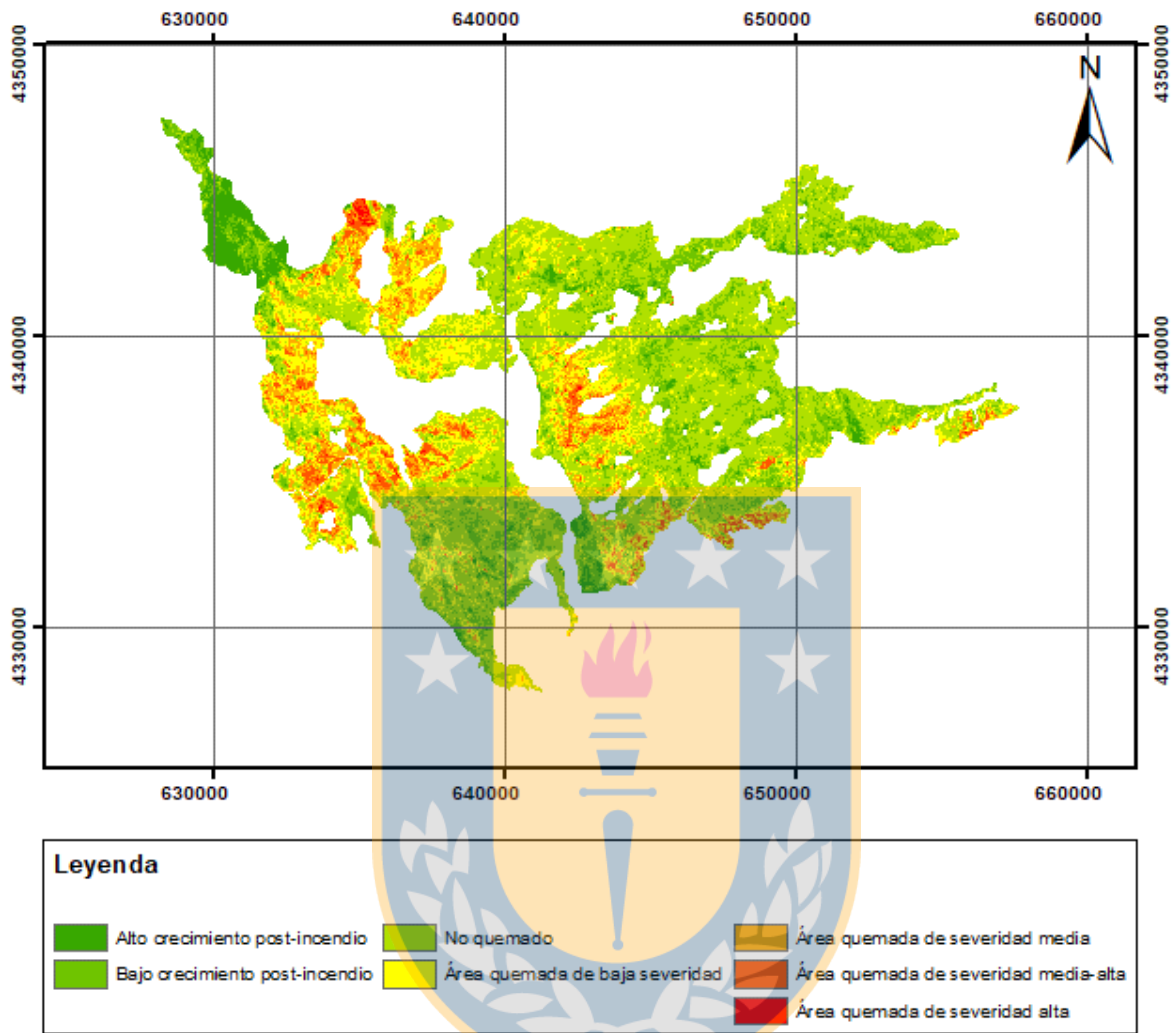


Figura 17.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2013.

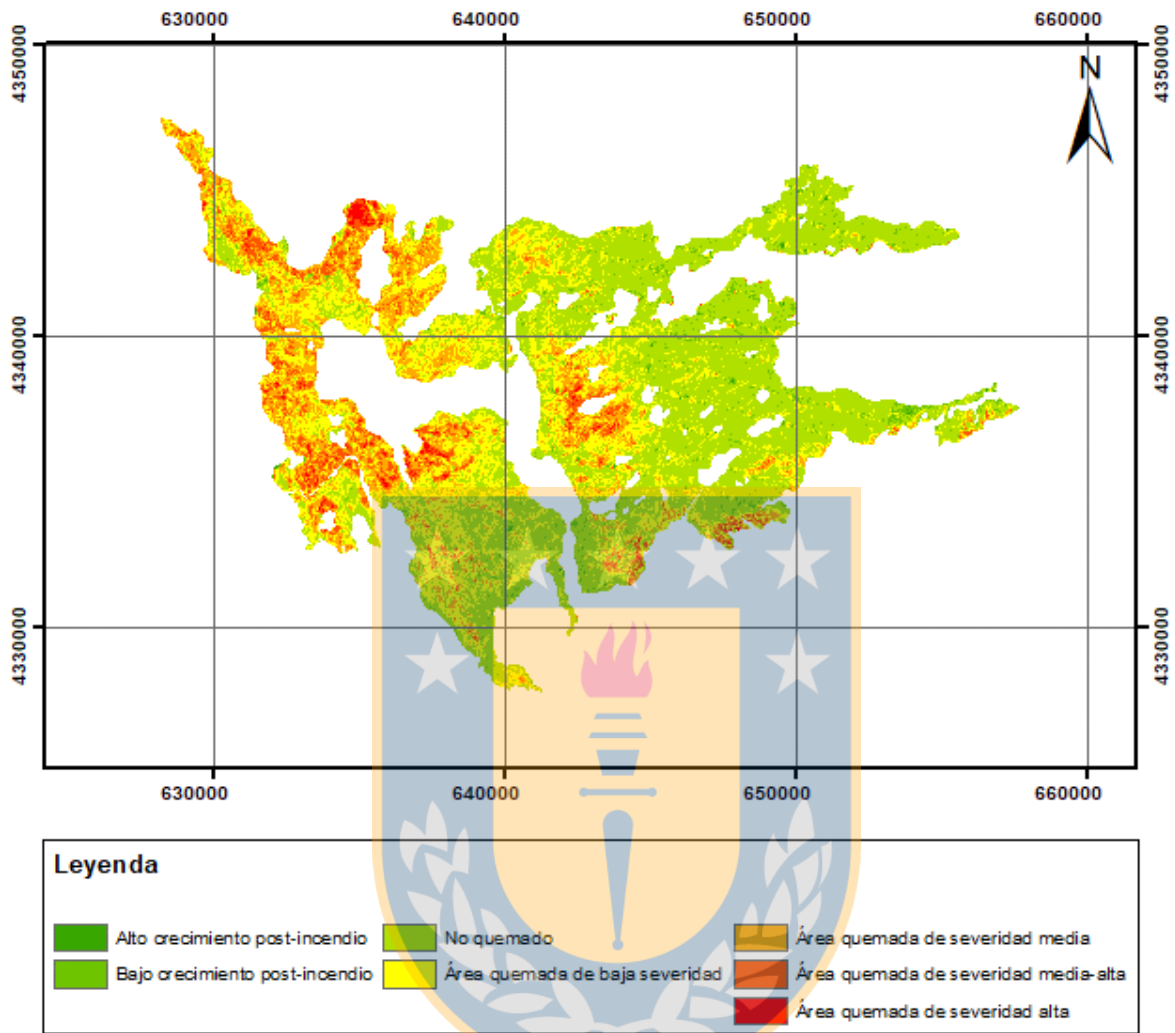


Figura 18.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2014.

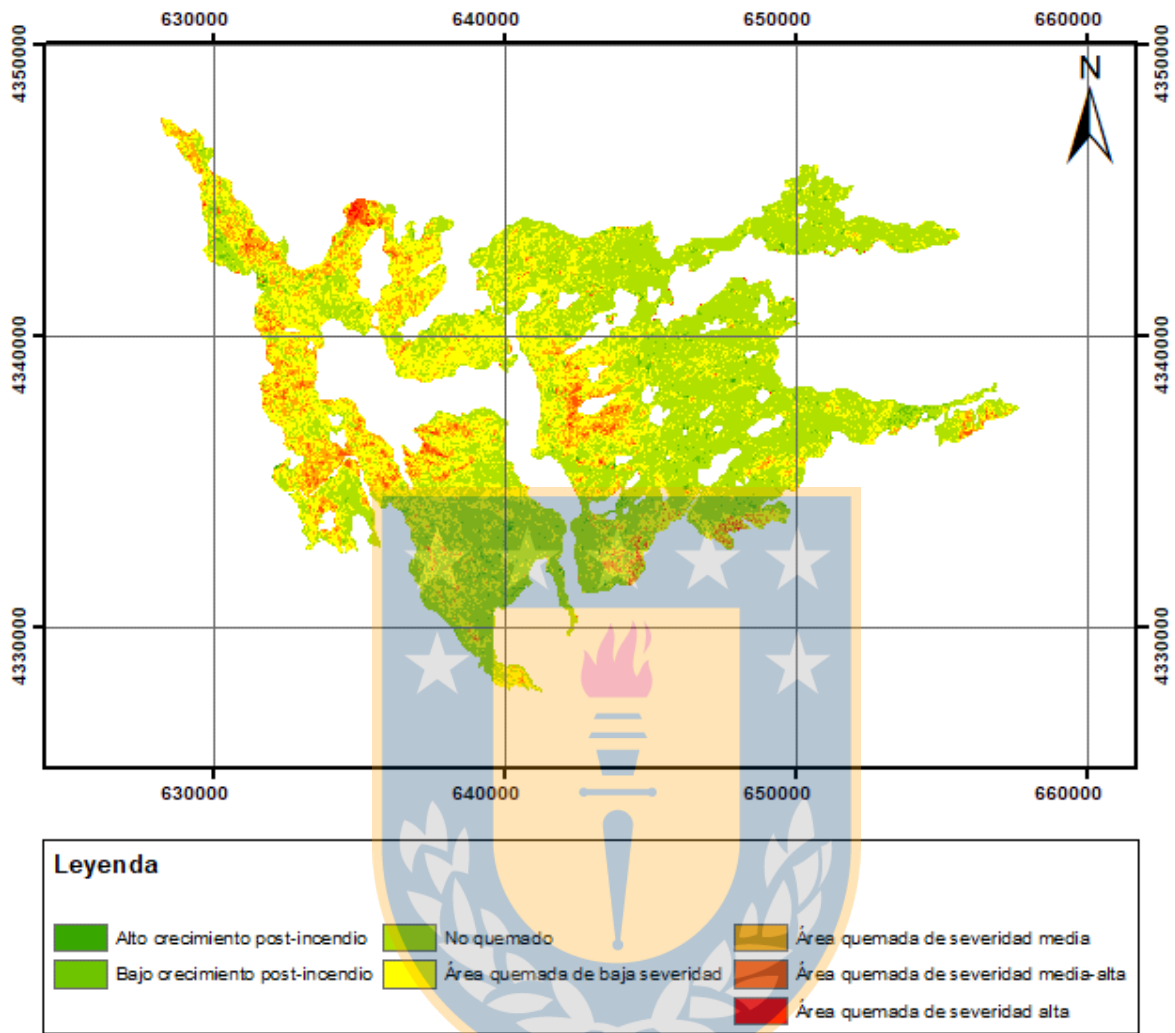


Figura 19.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2015.

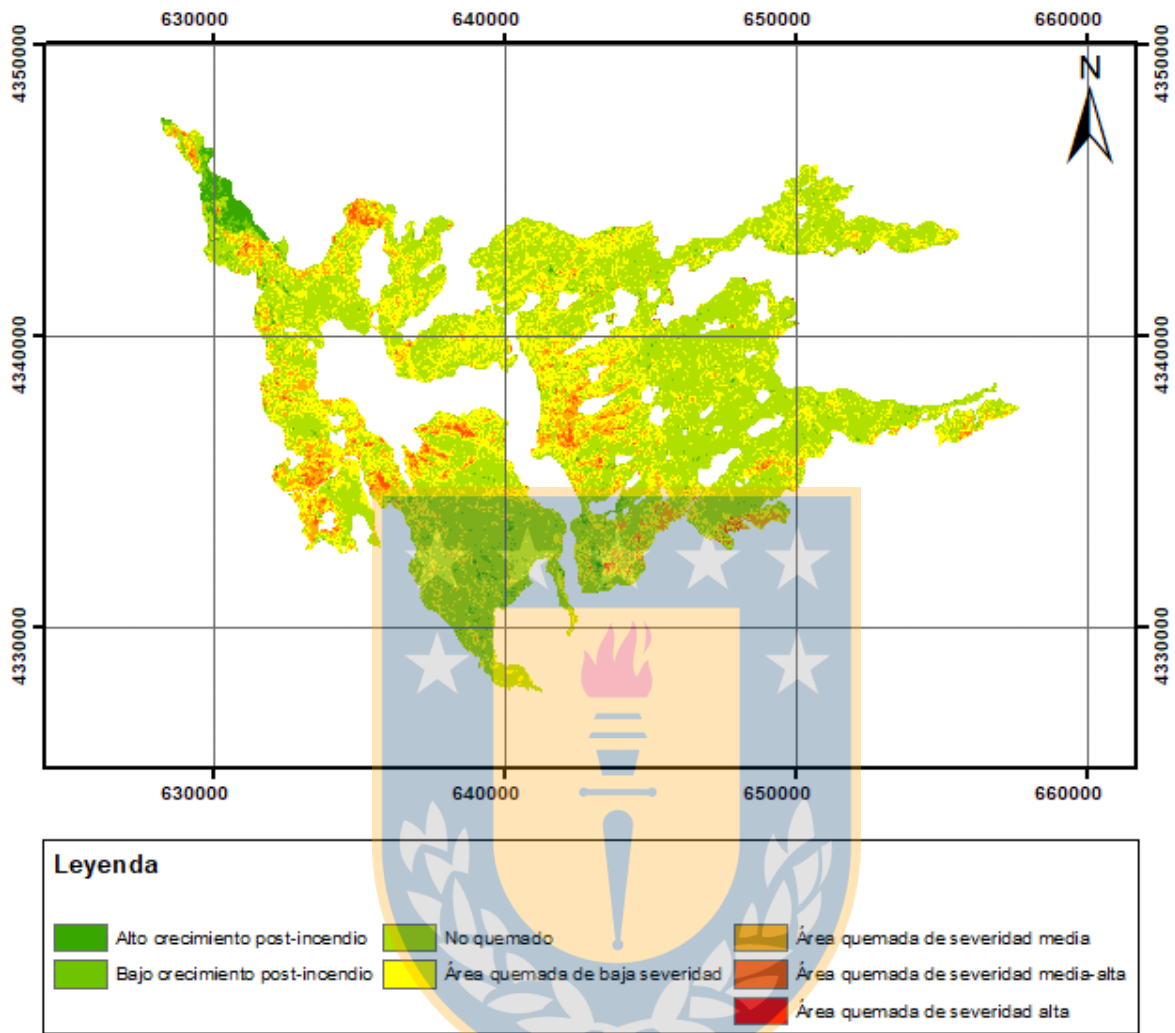


Figura 20.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2016.

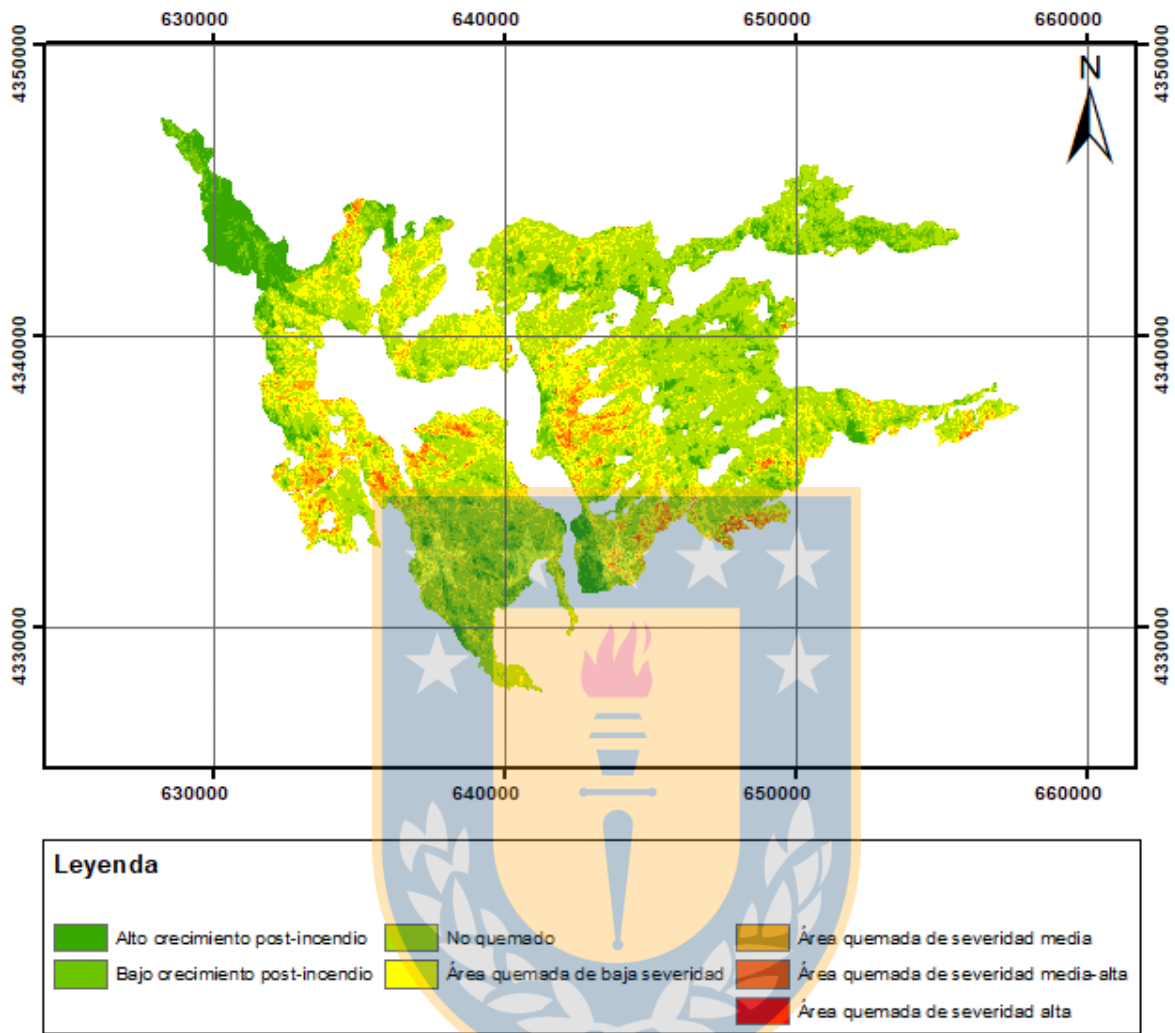


Figura 21.  $\Delta$ NBR de la superficie afectada por el incendio año 2017.

## 6. Conclusiones

Desde 1985, en el que el PNTP se vio afectado por el primer incendio de gran magnitud, se están realizando esfuerzos por recuperar lo que de alguna forma se perdió en esta catástrofe. Lamentablemente, veinte años después, una nueva catástrofe impide continuar con el proceso de recuperación de suelos, obligando a las instituciones a volver a comenzar estas campañas de recuperación. Sin embargo, en 2012 se produce el incendio forestal de mayor magnitud en la historia del parque. Esto puso en marcha las campañas anuales de reforestación al interior del parque, en los sectores de Lago Pehoé, Laguna Calafate y Laguna Honda (véase Figura 2), que por un lado buscan ayudar en el proceso de restauración ecológica de los ecosistemas afectados, así como también, recuperar la belleza del entorno y de este modo, no perjudicar los ingresos monetarios por términos de turismo en la región. Estas campañas se llevaron a cabo anualmente, generando núcleos de plantación, intentando imitar estructuras que no fueron afectadas por el incendio y que estaban compuestas por 120 plantas de Lengua aproximadamente, plantadas en diferentes suelos afectados, buscando estudiar cuales de estos presentan mayor capacidad de supervivencia, según indicó Osvaldo J. Vidal, Dr. en Recursos Naturales de la Universidad Albert-Ludwigs, Alemania, en las capacitaciones a los jóvenes que participaron en las campañas<sup>3</sup>.

Las labores de reforestación, realizadas por CONAF en conjunto con ONG, son esencial para que el proceso de restauración ecológica se pueda llevar a cabo. La plantación de semillas o plantas en áreas afectadas, es solo un paso de este proceso, ya que como se mencionó en los antecedentes relacionados a las campañas de reforestación, estas consideran

---

<sup>3</sup> Video de Campaña AMA Torres del Paine: <https://goo.gl/hiY3cw>.



la plantación de sólo una especie (Lenga) y no del ecosistema con toda la diversidad y complejidad que contaba antes de verse afectado por el incendio. Es por esto que el proceso de restauración requiere de mucho más tiempo y trabajo, que no necesariamente depende del personal de CONAF u otros, sino de la capacidad de recuperación del suelo, de la capacidad de supervivencia de la especie plantada y del entorno en el que estas se encuentren.

Anualmente, posterior a 2012, se presentó un avance en recuperación de suelos de un 11% con respecto al año anterior, lo que equivale a un total de 1.100 hectáreas de suelo regenerado por año. Esto no quiere decir que en estos sectores se encuentren bosques frondosos y árboles de gran altura, sino más bien a suelos que presentan mejoras con respecto a la fecha del incendio. La Lenga tiene un crecimiento muy lento, por lo que deben pasar al menos 15 años, antes de percibir efectos notables, pero las mejoras se ven en términos de composición del suelo, al material orgánico que este posee y a la presencia de vegetación, que a pesar de ser baja, presenta “legados biológicos”, es decir, un grupo de vegetación que logró sobrevivir a las condiciones del clima en los sectores en los que fueron plantados. Este aumento de material orgánico en la composición del suelo, se debe principalmente a la acción de reforestación que se encuentra llevando a cabo CONAF, al control y cuidado que se realiza sobre estos núcleos de vegetación

Las acciones de reforestación en sitios priorizados por CONAF, presentaron mejores resultados que los que se obtuvieron en los sitios aislados, o que no se vieron involucrados en las campañas de reforestación (Sierra del Toro y Sarmiento). Si bien Pudeto presentó un aumento considerable en la cobertura de vegetación con respecto a Sierra del Toro, no es de la misma manera con respecto a Sarmiento (véase Tabla 11). De esto, se puede decir que la recuperación natural, va a presentar diferentes avances según el sector en el que la vegetación

se encuentre. En el caso de Sierra del Toro, este es un sector montañoso de elevaciones entre los 500 y 700 metros, con pendientes superiores a las que presenta el sector Sarmiento, siendo este último un sector de pequeñas colinas y planicies, ubicado en las orillas de Lago Sarmiento. En este sentido, la vegetación presente en sectores de mayor exposición al viento y de pendientes más pronunciadas, debe presentar una mayor resistencia y capacidad de supervivencia aquella existente en planicies cercanas a cuerpos de agua. Esto es corroborado por el Dr. Vidal, quien dice que los “legados biológicos” presentaran un desarrollo variable, según la cercanía a vegetación sana y la fauna que se encuentre en el sector. Además, se puede deducir que la recuperación de los suelos y la vegetación, se presentará de mejor forma en suelos que no presentan efectos posteriores al incendio, con una vegetación más sana y sin dañar, como lo es el caso de Sector Sarmiento.

A diferencia de una plantación forestal de especies exóticas (Pino o Eucalipto), las campañas de reforestación realizan la plantación de semillas con patrones irregulares, generando núcleos aislados de vegetación, que por una parte busca crear un campo de vegetación heterogéneo, al momento en que estos mezclen, como lo sería sin intervención humana y, por otra parte, intenta evitar una sobre carga en la absorción de nutrientes del suelo por parte de las plantas insertadas en el ecosistema.

Si bien los incendios forestales han sido iniciados por actividad humana por parte de los visitantes del parque y la ocurrencia de estos, no depende en un 100% del personal de las brigadas de control, o del personal de CONAF, si lo es el hecho de controlar estos focos y de extinguirlos lo antes posible a fin de evitar catástrofes mayores. Para esto, se hace imprescindible contar un con presupuesto que les permita contar con la infraestructura, el personal y la capacitación necesaria ante estas situaciones.

Por otra parte, creo que es necesario concientizar a la población, sobre las precauciones que se deben tener al momento de iniciar fuego en áreas protegidas y de la importancia de los procesos de restauración ecológica sobre ecosistemas dañados por incendios forestales. Los eventos en los que se ha visto envuelto el PNTP, han sido iniciados por actividad antrópica, y si bien las características de la zona facilitan la propagación del fuego, esto no ocurriría si existiese ese pensamiento de cuidado y responsabilidad por cuidar el medio en el que nos desarrollamos.



## 7. Referencias

- Abumohor, J. (2012). Incendio forestal Parque Nacional Torres del Paine. Recuperado de: [http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1613/ConsolidadoIncendioForestalTdelPaine2011\\_2012.pdf](http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1613/ConsolidadoIncendioForestalTdelPaine2011_2012.pdf)
- Arnett, J., Coops, N., Daniels, L., Falls, R. (2015). Detecting forest damage after a low-severity fire using remote sensing at multiple scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 239-246, doi: 10.1016/j.jag.2014.09.013.
- Benayas, J., Bullock, K., Newton A. (2008). Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation and agricultural land use. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 329-336.
- De Santis, A., Chuvieco, E., (2008). Análisis comparativo de sensores espaciales para la cartografía de la severidad en el incendio de Riba de Saelices (Guadalajara). *Revista Española de Teledetección*, 29, 35-37.
- Caccamo, G., Bradstock, R., Colling, L., Penman, T., Watson P. (2014). Using MODIS data to analyse post-fire vegetation recovery in Australian eucalypt forest. *Journal of Spatial Science*, 60 (2), 341-352, doi: 10.1080/14498596.2015.974227.
- Campbell, J., Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. New York: The Guilford Press.
- Chen, J., Zhu, X., Vogelmann, J., Gao, F., Jin, S. (2011). A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1053-1064, doi: 10.1016/j.rse.2010.12.010.
- Chu, T., Guo, X., Takeda, K. (2015). Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest. *Ecological Indicators*, 62, 32-46, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.11.026.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. New York: CRC Press.
- Cocke, A., Fulé, P., Crouse, J. (2005). Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 189-198, doi: 10.1071/WF04010.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2007). Plan de manejo Parque Nacional Torres del Paine. Recuperado de: [http://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/PNTorresdelPaine.PDF](http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/PNTorresdelPaine.PDF).

- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2009). Los grandes incendios forestales en Chile 1985-2009. Recuperado de [http://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1397681623GrandesIncendios2009.pdf](http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1397681623GrandesIncendios2009.pdf).
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2012). Programa Integral de Mejoramiento de la Gestión del Parque Nacional Torres del Paine. Recuperado de: <http://www.parquetorresdelpaine.cl/upload/files/plan-mejoramiento-pntop-conaf.pdf>.
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, G., Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Santiago: Gráfica Lom.
- Hope, A., Tague, C., Clark, R. (2007), Characterizing post-fire vegetation recovery of California chaparral using TM/ETM+ time series data. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 1339-1354.
- Jackson, R., Huete, A., (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185-200, doi: 10.1016/S0167-5877(05)80004-2.
- Lhermitte, S., Verbesselt, J., Verstraeten, W., Veraverbeke, S., Coppin, P. (2011). Assessing intra-annual vegetation regrowth after fire using the pixel based regeneration index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 6, 12-27.
- López, M., Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6, 31-37, doi: 10.1080/10106049109354290.
- Mattar, C., Satamaría-Artigas, A., Durán-Alarcon, C. (2012). Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. *Revista de Teledetección*, 38, 36-50.
- Miller, D., Thode, A. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with relative version of delta Normalized Burn Ratio. *Remote Sensing of Environment*, 109, 66-80, doi: 10.1016/j.rse.2006.12.006.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2012). Plan de restauración ecológica del Parque Nacional Torres del Paine afectado por incendio 2011-2012. Recuperado de: <http://www.parquetorresdelpaine.cl/upload/files/descargas/Plan de Restauracion TD P2012.pdf>.
- Navarro, R., Hayas, A., García, A., Hernandez, R., Duhalde, P., González, L. (2008). Caracterización de la situación posincendio en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multiespectrales. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81, 95-110.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Landsat 7 Science Data Users Handbook. Recuperado de [https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7\\_Handbook.pdf](https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf).

Numata, I., Cochrane, M. Galvao, L. (2011). Analyzing the impacts of frequency and severity of forest fire on the recovery of disturbed forest using Landsat time series and Eo-1 Hyperion in the Southern Brazilian Amazon. *Earth Interactions*, 15, 1-17.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). (2009). Incendio Forestal Torres del Paine año 2005. Recuperado de <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/406/Incendio%20Foresta%20Torres%20del%20Paine%202005%20-%20Magallanes.pdf>.

Parrota, J., Engel, V. (2001). An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. *Forest, Ecology and Management*, 152, 169-181, doi: 10.1016/S0378-1127(00)00600-9.

Pisano E. (1974). Estudio ecológico de la región continental sur del área andino patagónica II. Contribución a la fitogeografía de la zona del Parque Nacional "Torres del Paine". *Anales del Instituto de la Patagonia* 5: 59-104.

Pringle, M., Schmidt, M., Muir, J. (2009). Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 654-664, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.001.

Rivera, D. (2008). Sucesiones antropogénicas, post incendios en bosques de lenga, en el Parque Nacional Torres del Paine, Chile (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.

Scaramuzza, P., Micijevic, E., Chander, G. (2004a) SLC Gap-Filled Products: Phase One Methodology. Recuperado de: [http://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC\\_Gap\\_Fill\\_Methodology.pdf](http://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf)

Scaramuzza, P., Micijevic, E., Chander, G. (2004b). SLC-off Gap-Filled Products: Gap-Fill Algorithm Methodology. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/L7SLCGapFilledMethod.pdf>.

United States Geological Survey (USGS). (2012). Landsat: Continuig to Improve Everyday Life. Recuperado de [https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat\\_Improve\\_Life.pdf](https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat_Improve_Life.pdf).