



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Zonificación de la severidad de un incendio natural
y su descripción topográfica cuantitativa
en el Parque Nacional Tolhuaca,
IX Región, Chile**

Patrocinante: Sr. Mauro González C.

Trabajo de Titulación presentado
como parte de los requisitos para optar
al Título de **Ingeniero Forestal**.

RODRIGO ALFREDO PEÑALOZA RUBIO

VALDIVIA
2006

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		NOTA
Patrocinante:	Sr. Mauro González C.	6,2
Informante:	Sr. Cristian Echeverría	5,9
Informante:	Sr. Eduardo Neira F.	6,3

El patrocinante acredita que el presente Proyecto de Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Mauro González C.

AGRADECIMIENTOS

En el transcurso de esta etapa de la vida, muchas son las personas que han influenciado en la llegada de este momento. Un tiempo lleno de encuentros y desencuentros que me han llevado a lo que soy. Así es como recuerdo los días nerviosos de partir a Valdivia, la opción de la que nunca me arrepentiré.

La alegría por el inicio de la vida de mi sobrina Ignacia en mi familia, marcaron este nuevo desafío. Agradezco a mis padres por entender la decisión que me hizo crecer aún más. A pesar de estar lejos físicamente, puedo decir que los he conocido y entendido aún más.

Agradezco a mis amigos que dejé en Santiago y conservo, sobre todo a Guido Blanchette por apoyarme cuando el camino se hizo difícil. A Lety (Leticia Figueroa), la Vale (Valeska Vera), JuanK (Juan Carlos Ramírez), Jacque (Jacqueline Paredes) por poder contar con ellos.

A Inés Flores y Enrique Salinas por apoyarme cuando recién llegué a Valdivia y veía que muchas puertas se cerraban. A Angélica Aguilar por su apoyo y ánimo en los tiempos difíciles.

A Mauro González por darme las luces para iniciar este trabajo. A Eduardo Neira y Cristian Echeverría por sus valiosos aportes a este trabajo.

A los primeros amigos del sur. A la Myri (Myriam Velásquez), Gigi (Giselle Astorga) y Coy (Rodrigo Vega); gracias por acogerme.

A Carlos Bustos y el Huaso (Matías Calvo) por los tiempos en Niebla.

A los de la Casa Faro por esos excelentes tiempos: Rulo (Rodrigo Vargas), Mane (Marianela Rosas), Rik Sools, Gabo (Gabriel Riera), Michi (Michaela Spielmann), Gigí (Virginie Ponchon), Clau (Claudia Heindorf) y Franz Kringler. A Luna (Francisca Marticorena), Pe (Esperanza Alvarez), Doris Kramm y Joho (Johannes Horstmann).

Al Pelao (Guillermo Vera), Feña gerente (Fernando Aizman), Odo (Eduardo Silva), Claudita (Claudia Barría), Jani (Jeannette Werner), Ale (Alejandra Espina), Pancha (Francisca Morales), Jime (Jimena Hernández), Coni (Constanza Millán) y Rodrigo Puebla.

A la gente de IFSA por ser cómplices de la idea: Rulo, Jan Bannister, Rik, Mane, Juan(ito) Quezada, Pili (Pilar Cárcamo), Maripo (María Paz Hernández), Héctor Ulloa, Vicky Kauzlarich, Pame (Pamela Vargas), Noe (Noemí Almonacid) y Caro (Carolina Reyes).

A Jovy (Johana Villagra) por su gran apoyo y compañía en el proceso de este documento.

A mi familia.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Antecedentes generales	2
2.2 Clasificación de los incendios forestales	2
2.2.1 Relación fuego-ecosistema	3
2.2.2 Ubicación física del fuego y su propagación	3
2.3 Fotografía aérea y fotointerpretación	4
2.3.1 Obtención de información de fotografías aéreas	4
2.3.2 Elementos o factores de fotointerpretación	5
2.4 Severidades de incendios forestales	5
2.4.1 Relación entre intensidad del fuego y severidad de incendio	5
2.4.2 Estudios de severidad de incendio	7
2.5 Relación del terreno y vegetación con efectos del fuego	8
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	10
3.1 Área de estudio	10
3.2 Metodología	14
3.2.1 Recopilación de información	14
3.2.2 Zonificación de severidades	14
3.2.3 Corroboración en terreno	16
3.2.4 Validación de la fotointerpretación	16
3.2.5 Digitalización de la información	17
3.2.6 Modelo de elevación digital	17
3.2.7 Descripción cuantitativa	18
4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	19
4.1 Fotointerpretación y verificación	19
4.1.1 Caracterización de severidades en terreno	19
4.1.2 Matriz de confusión	20
4.2 Mapa de severidades	22
4.3 Vegetación afectada según severidad	24
4.4 Efecto de la topografía en la severidad de incendio	25
4.4.1 Altitud	25
4.4.2 Pendiente	27
4.4.3 Exposición	28
4.5 Severidad de incendio por tipo de vegetación y condición	29

	topográfica	
4.5.1	<i>Bosques de Araucaria araucana-Nothofagus spp.</i>	29
4.5.2	<i>Bosques de Nothofagus spp.</i>	31
4.5.3	<i>Festuca sp. y Nothofagus antarctica-Festuca sp.</i>	31
5.	DISCUSIÓN	37
6.	CONCLUSIONES	35
7.	BIBLIOGRAFÍA	39
	ANEXOS	
1	<i>Abstract and keywords</i>	
2	Transectos realizados para la corroboración de terreno	
3	Modelo de elevación digital	
4	Mapa de clases de pendiente	
5	Mapa de clases de exposición	
6	Fotografías de características por tipo de severidad de incendio	
7	Proporción de superficie por severidad según distancia a curso de agua	
8	Comportamiento estimado del fuego	

RESUMEN EJECUTIVO

Los tipos de asociaciones vegetales y diferentes situaciones topográficas condicionan la intensidad y el comportamiento del fuego, estos efectos varían según las características microambientales del sitio. En el Parque Nacional Tolhuaca, se estudió la severidad del incendio ocurrido en la temporada 2001-2002 en relación con las variables de elevación, exposición y pendiente y el tipo de vegetación pre-fuego. Se utilizaron fotografías aéreas 1:11.000 captadas un mes luego del incendio y un fotomosaico digital georreferenciado. El manejo de la información se llevó a cabo en SIG (Sistema de Información Geográfico), realizando un mapa de severidad que evidenció un efecto mosaico en el paisaje.

El fuego afectó a un 66,9% del Parque (4232,2 ha), mientras que la mortalidad en la vegetación alcanzó el 57%, representada por rodales quemados hasta en un 90% (severidad 3) o entre un 50 a 90%, siendo lo restante “chamuscados” por alta temperatura durante el incendio (severidad 2).

Las variables topográficas tuvieron amplia influencia en el fuego. La elevación se relacionó de forma positiva con la severidad, indicando que a mayor altitud mayor daño por el fuego. Por otra parte, debido a la mayor temperatura y radiación incidente junto a una menor humedad, el incendio afectó más a las áreas xéricas (N-NE-NO). La pendiente no condicionó el tipo de severidad existente, aunque sí fue posible observar en micro cuencas, que la mayor humedad y menor temperatura generadas por la cercanía a cursos de agua y a su vez a una mayor densidad de rodal, suponen la ocurrencia de incendios superficiales o de menor intensidad.

La vegetación más afectada tiene relación con la participación de *Festuca* sp., siendo esperable que esta gramínea en época estival y con bajas precipitaciones estuviera en un alto nivel de combustibilidad. Debido a esto el fuego afectó a las coberturas de *Festuca* sp. y *Nothofagus antarctica*-*Festuca* sp. en un 100 y 96,6%, respectivamente. Las siguieron *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp. (67,6%), *Nothofagus* spp. (64,6%) y *Nothofagus antarctica* (60,4%).

El análisis detallado combinando las variables topográficas y vegetación pre-incendio, mostró que bosques de *A. araucana*-*Nothofagus* spp. y *Nothofagus* spp. respondieron de manera distinta. A mayor altitud, se incrementó el daño por el fuego en *Nothofagus* spp., siendo inverso el efecto para *A. araucana*-*Nothofagus* spp. En cuanto a la exposición, persistió la tendencia de mayor daño en áreas más xéricas; no obstante bosques de *A. araucana*-*Nothofagus* spp. también presentaron bastante daño en terrenos planos del valle del Pichi-Malleco, ya que existieron rodales rodeados de *Festuca* sp., aumentando la intensidad del fuego. La pendiente no presentó tendencia al relacionarla con la vegetación según severidad.

Palabras clave: incendio natural, comportamiento del fuego, severidad, ecología del fuego, sistemas de información geográfico.

1. INTRODUCCIÓN

La relevancia de los incendios en diferentes escalas espacio-temporales fundamenta su investigación a manera de facilitar la comprensión de su comportamiento. En este sentido, se considera al estudio de los tipos de severidad de un incendio, como el primer paso para la generación de cartografía base a utilizar en la gestión post incendio en restauración de la vegetación y protección de suelo frente a la erosión. Seguidamente, la valiosa información otorgada por este análisis permite la construcción de modelos de severidad en función de variables ambientales. En este ámbito, los sistemas de información geográfico (SIG) son una herramienta importante para el procesamiento y análisis de información.

Debido a que la severidad con que el fuego afecta a los ecosistemas depende de múltiples factores bióticos y abióticos, es que ésta se distribuye en forma de mosaico en el terreno, siendo mayor la heterogeneidad espacial si el área afectada es más amplia. Estas distribuciones y sus consecuentes cambios al medio ambiente pueden ser detectados mediante técnicas de sensores remotos.

En la temporada de incendios 2001-2002 el fuego afectó aproximadamente 20.000 ha de bosques nativos en la Región de la Araucanía. Parte de ellas se ubican en el Parque Nacional Tolhuaca y Reserva Nacional Malleco, representando más del 50% del área afectada.

En este contexto, esta tesis intenta responder a partir de fotografías aéreas cuánto y cómo fueron afectados los bosques del Parque Nacional Tolhuaca en relación a la severidad del incendio de la temporada 2001-2002. Para resolver estas interrogantes, se ha planteado como objetivo general zonificar las distintas severidades producto del incendio ocurrido el año 2002 en el Parque Nacional Tolhuaca.

Los objetivos específicos de este estudio fueron:

- Determinar la superficie afectada por el incendio de acuerdo a las severidades definidas para el área de estudio.
- Caracterizar cuantitativamente la distribución de las distintas severidades con respecto a las variables topográficas de pendiente, elevación y exposición.

2. MARCO TEÓRICO

En el estudio de incendios las técnicas más utilizadas son los sensores remotos, debido a que aportan información espacio-temporal (Díaz-Delgado y Pons, 1999). En el caso de las fotografías aéreas, su análisis genera valiosa información base para determinar áreas de riesgo, programas de restauración de la vegetación, cambios en la estructura del bosque, prioridades en la protección del suelo, entre otros. En este sentido, la incorporación de herramientas tales como los Sistemas de Información Geográfico (SIG) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) facilitan la detección y propagación de incendios, identificar en corto tiempo los patrones del paisaje y condiciones que predisponen la severidad con que se afecta, para así llegar a elaborar modelos de simulación y predicción de fuegos (Micherner *et al.*, 1994).

2.1 Antecedentes generales

Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF) en la última década en Chile, los incendios han afectado en promedio más de 50.000 ha anuales (CONAF, 2002). Específicamente en la temporada 2001-2002 ocurrieron 6.701 siniestros a nivel país afectando 79.718 ha, de las cuales el 72,1% correspondió a bosque nativo. De esta cifra, la mayor superficie correspondió a la Región de la Araucanía con 22.519 ha, presentando un notable aumento desde la temporada 1998-1999 (INE, 2004).

La literatura señala que el ser humano actúa como principal causante de siniestros (Donoso, 1994; González *et al.*, 2005), con consecuencias ecológicas evidentes e implicancias en todas las funciones del bosque, de las cuales el mismo ser humano se beneficia (Donoso y Lara, 1999); sin embargo, causas naturales como por ejemplo los rayos, también son recurrentes y pueden causar catástrofes de gran superficie (Bruno y Martín, 1982; Veblen *et al.*, 1995). Un buen ejemplo de esta última causal, fue lo ocurrido en la Reserva Nacional Malleco, en donde el fuego fue provocado por una tormenta eléctrica seca (18 de enero de 2002) la que se mantuvo por varios días. Posteriormente el incendio se extendió hacia el Parque Nacional Tolhuaca, debido al viento caliente llamado “puelche” proveniente del Este, que se caracteriza por ser aire con mayor temperatura y capacidad secante, extrayendo humedad de la materia orgánica y propiciándola al ataque del fuego (Anton Huber, comunicación personal).

2.2 Clasificación de los incendios forestales

Básicamente existen dos clasificaciones en los incendios forestales. La primera trata la relación entre el fuego y el ecosistema forestal y la segunda su ubicación física en el bosque y propagación.

2.2.1 Relación fuego-ecosistema

Trabaud (1981) diferencia ecosistemas pirófilos y no pirófilos. Los pirófilos tienen al fuego incorporado en su dinámica y se dividen en activos y pasivos. Los primeros arden fácilmente y regeneran rápido, debido a que la germinación es estimulada por el fuego. Krebs (1986) ejemplifica lo anterior en *Pinus banksiana*, el cual se establece naturalmente post incendio debido a la capacidad de sus estróbilos masculinos de abrirse sobre los 60° C (ya que están sellados con resina), pudiendo conservar su viabilidad hasta los 250° C. De esta manera, el fuego en su rol de factor limitante y regulador mediante incendios medianamente leves a leves realizan una presión selectiva, favoreciendo la supervivencia y crecimiento de algunas especies a expensas de otras (Odum, 1978), siendo un importante componente del equilibrio ecológico en Australia, Sudáfrica y California (Ávila *et al.*, 1988).

Por otra parte, al incidir el fuego en los ecosistemas pirófilos pasivos, los individuos arbóreos resisten debido a adaptaciones como el espesor de corteza y la baja inflamabilidad del follaje (Trabaud, 1981). En este aspecto, *Araucaria araucana* inserta en una historia de incendios producto del volcanismo entre otros disturbios, ha desarrollado una corteza gruesa (alcanzando 14 cm en algunos individuos), que dependiendo de la intensidad del incendio, logra el rebrote de yemas y desde los mismos troncos (Donoso, 1993).

En el caso de los ecosistemas no pirófilos, el fuego no está integrado como un factor natural en su dinámica y generalmente son eventuales pero drásticos, lo que deriva en una baja regeneración debido a su inadaptación. Es así como producto del incendio que se facilita la llegada de especies colonizadoras ajenas al ecosistema (Trabaud, 1981).

2.2.2 Ubicación física del fuego y su propagación

Segun Cartwright (1968) existen tres categorías de incendio que podrían incluso presentarse de forma simultánea: subterráneo, superficial y de copas.

Incendios subterráneos. Comúnmente no presentan llamas, muy poco o nulo humo, haciendo su detección compleja y consumiendo la materia orgánica presente en el suelo, incluyendo el sistema radicular de los árboles, pudiendo sólo sobrevivir los individuos que tienen sus raíces más abajo que horizontes orgánicos superficiales (National Wildfire Coordinating Group, 2001). También pueden producirse por la oxidación de la materia orgánica que produce calor, generando combustión activa. Estos podrían prolongarse a veces por largo tiempo (Graham *et al.*, 2004).

Incendios superficiales. Consumen desechos superficiales y vegetación baja, ya que se producen sólo en el piso del bosque, propagándose rápidamente quemando pasto, hierbas, arbustos, parte del mantillo, árboles, ramas y estróbilos caídos, y carbonizando parte de la base de los fustes. Son comunes en bosques abiertos, en donde dependiendo de la humedad y grosor del mantillo, podrían también dañar las raíces.

Incendios de copas. Comunes de bosques densos, ya que existe contacto entre las copas de los árboles. Dependen principalmente del viento para propagarse más rápidamente entre individuos.

2.3 Fotografía aérea y fotointerpretación

Dentro de los tipos de sensores remotos, las fotografías aéreas son uno de los más utilizados en estudios realizados en ciencia geográfica, debido a que proporciona un registro permanente de información para un momento determinado. En este sentido dependiendo de la escala considerada, transfiere al usuario una gran cantidad de detalles claros y precisos; presenta la posición relativa correcta con respecto a la realidad en terreno y permite la obtención rápida de información, incluso en áreas remotas e inaccesibles (Sandoval y Real, 1993).

2.3.1 Obtención de información de fotografías aéreas

La técnica sistemática de reunir, analizar y ordenar información de una fotografía aérea se denomina fotointerpretación. En esta acción se examinan las imágenes de terreno de una fotografía aérea, con el fin de identificar los componentes del paisaje y deducir información (Sandoval y Real, 1993).

Sandoval y Real (1993) indican que el proceso de fotointerpretación se puede diagramar de la siguiente manera (figura 1).

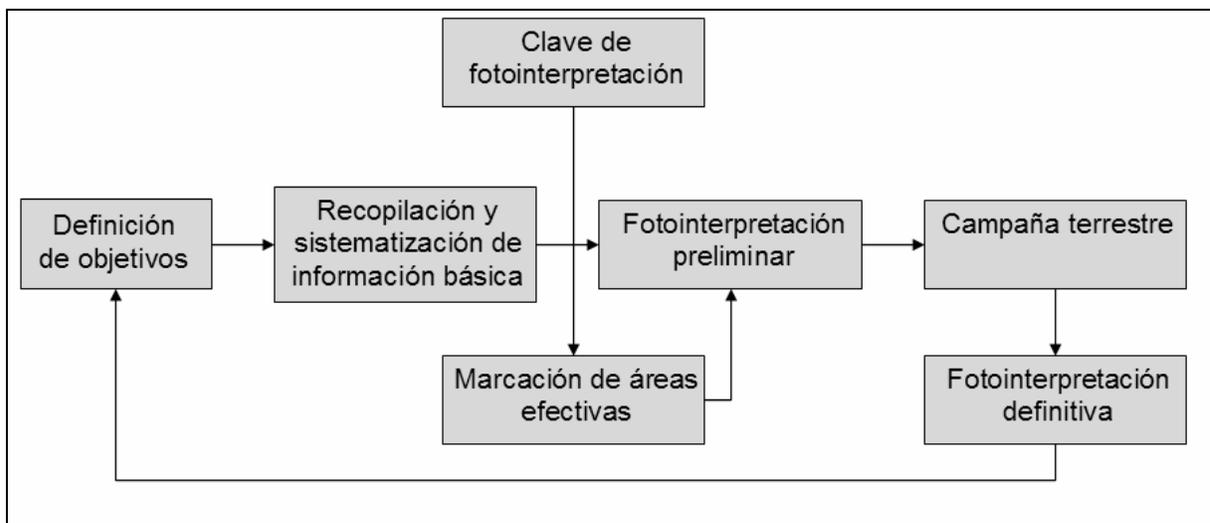


Figura 1. Diagrama simplificado de un proceso de fotointerpretación.

2.3.2 Elementos o factores de fotointerpretación

Se denominan factores de fotointerpretación a las características que hacen que un objeto aparezca de una manera específica en las fotografías, por lo que se le debe dar especial atención (Sandoval y Trincado, 2002). Los más utilizados son tamaño, forma, sombra, tono y/o color, textura (Carre, 1974).

Tamaño: Puede ser inferido a partir del tamaño de otros objetos conocidos presentes en la imagen estereoscópica, o estableciendo relaciones entre objetos que se observan en el paisaje.

Forma: Es quizás una de las mejores pistas. Se relaciona directamente con la configuración del objeto. Su importancia radica en la delimitación de la clase a que el objeto pertenece.

Sombra: Otorgan una representación, al menos parcial, del perfil de los objetos de interés. Son particularmente útiles si los objetos son muy pequeños o les falta contraste tonal en sus alrededores. Este factor está limitado ya que lo usual es realizar los vuelos de captación de fotografías aéreas en horas de mediodía, para evitar la presencia de sombras.

Tono y/o color: El color depende de la luz que los ilumina. Son sobre todo, las variaciones de colorido respecto al medio que les rodea lo que permite reconocerlos. En el caso de la luz monocromática, son las variaciones de tonos de los objetos las que permiten separarlos del medio que les rodea, mucho más que la intensidad absoluta de los tonos correspondientes.

Textura: Está creada por repeticiones tonales de grupos de objetos, los cuales son muy pequeños para ser distinguidos como individuos. El tamaño del objeto requerido para producir textura, varía con la escala de la fotografía. Por otra parte, al igual que el tono, la textura puede variar de un lugar a otro debido a la posición relativa del sol y de la cámara. Así, un mismo bosque visto en forma vertical aparecerá con una textura más fina en comparación a éste mismo visto en forma oblicua.

2.4 Severidad de incendios forestales

La severidad ha sido descrita de diversas formas y utilizando diferentes componentes bióticos y abióticos. Morgan *et al.* (2001) mencionan algunas de ellas, destacando: el grado de mortalidad de la masa arbórea, calor penetrable en el suelo, grado con que el fuego consume la biomasa orgánica sobre y dentro del suelo, cambio en el color de la ceniza y el suelo o la combinación de todos estos efectos (Turner *et al.*, 1994). En términos generales, se habla de la severidad de un incendio como un término descriptivo integrando los cambios físicos, químicos y biológicos ocurridos en un lugar como consecuencia del fuego (Díaz-Delgado y Pons, 1999), incorporándose a través de este concepto la alteración de la estructura vertical y de los patrones espaciales en la sobrevivencia de los bosques (Kushla y Ripple, 1997).

2.4.1 Relación entre intensidad del fuego y severidad de incendio

La severidad de un incendio junto a su intensidad, describen el comportamiento y efectos del mismo (National Wildfire Coordinating Group, 2001). De esta forma, las diferencias entre severidades están íntimamente relacionadas con el impacto causado por la cantidad de calor desprendida por el fuego, la que a su vez define su intensidad en un determinado sitio (Whelan, 1995; Díaz-Delgado y Pons, 1999).

Las diferentes intensidades del incendio tienen su explicación en la carga y características del combustible presente (e.g. humedad, componentes volátiles e inflamables), las condiciones meteorológicas al momento del incendio (con importante influencia de la velocidad del viento), y la variabilidad topográfica de la zona afectada (Whelan, 1995). Como consecuencia de estos múltiples factores, se tiene que la mayoría de los incendios revelan un mosaico de niveles de daño causados a la vegetación y al suelo, en función de la intensidad del fuego transcurrido en la zona (Díaz-Delgado y Pons, 1999). Además, Caetano *et al.* (1994) mencionan que cuanto mayor es la superficie afectada, mayores son las diferencias en los patrones de severidad.

Dependiendo del tipo de combustible, su distribución, las condiciones microclimáticas y condiciones de humedad al momento del fuego, la “Guía de efectos del fuego” (National Wildfire Coordinating Group, 2001) indica que pueden existir muchas combinaciones entre intensidad y severidad del fuego en cualquier sitio. Por ejemplo, dado un sitio con superficie continua de combustible y una profunda capa de mantillo, cualquiera de las siguientes combinaciones de intensidad y severidad de fuego podrían ocurrir (o bien combinaciones intermedias):

- a) Alta intensidad-Alta severidad: El combustible en pie y el mantillo se encuentran con un bajo contenido de humedad. El resultado es un fuego con alta intensidad y vigoroso comportamiento, carbonizando profusamente la materia orgánica. Las llamas son largas, lo que provoca una alta pérdida de biomasa, consumiendo también las capas orgánicas del suelo debido al alto y constante calor superficial generado.
- b) Alta intensidad-Baja severidad: El combustible en pie presenta un bajo contenido de humedad, mientras que el litter y mantillo está húmedo. Debido a esto último el calor subsuperficial es bajo, por lo que las capas en descomposición del mantillo potencialmente se conservan.
- c) Baja intensidad-Alta severidad. El combustible y el mantillo en su capa O está húmedo mientras que el mantillo subsuperficial en descomposición está seco. El resultado es un fuego de baja intensidad que podría escasamente cubrir el área, pero de alta severidad debido a que éstas capas subsuperficiales son consumidas, afectando en algunos casos al sistema radicular de la vegetación. Por otra parte, al consumir el material muerto en el suelo del bosque, podría afectar a los micrositos de regeneración y la conservación del agua, lo que depende de la profundidad de la capa orgánica y del contenido de humedad.

d) Baja intensidad-Baja severidad. El combustible y el mantillo están húmedos.

Las categorías de severidades tienen variantes en sus características, las que dependen de la metodología y material utilizado para su determinación, así como también del efecto que tienen en el sitio según el tipo de bosque en estudio. En este contexto, la “Guía de efectos del fuego” (National Wildfire Coordinating Group, 2001) entrega a nivel general una buena clasificación de severidades, sirviendo de base para este estudio.

2.4.2 Estudios de severidad de incendio

La determinación y generación de cartografía de severidades es de interés por dos motivos: 1) se transforma en plataforma de información para la gestión post incendio (e.g. repoblaciones, seguimiento de la regeneración, protección del suelo contra la erosión); y 2) entrega valiosa información para los modelos probabilísticos de simulación de fuegos en base a las relaciones existentes entre severidad y parámetros ambientales (Kushla y Ripple, 1997; Díaz-Delgado y Pons, 1999).

Las experiencias en la realización de mapas de severidades de incendio determinadas a partir de fotografías aéreas son escasas. Alvarado *et al.* (2000) y Sandberg *et al.* (2000) fotointerpretaron siniestros en base a la condición de copas post incendio en los bosques boreales de América del Norte, discriminando las severidades de la siguiente forma: 1) clase ennegrecida, copas consumidas en todo el parche, sólo el fuste en pie; 2) clase chamuscada, el follaje de color café aún pegado a las ramas; 3) clase mixta, entre copas chamuscadas color café y copas verdes vivas, más café que verdes; 4) clase mayoritariamente con copas verdes, con pocos o nulos individuos muertos dispersos.

Similar manera de representar tipos de severidad de incendio es la de Kafka *et al.* (2001), quienes utilizaron como lineamiento base un mapa de evaluación de daño digitalizado por el Ministère des Ressources Naturelles de Francia a partir de información recabada en un vuelo de reconocimiento dos semanas después de ocurrido el evento. Las categorías para los polígonos se basan en características del paisaje post fuego como sigue: 1) árboles y copas carbonizadas; 2) individuos con copas chamuscadas; 3) mezcla de las dos anteriores; 4) árboles con individuos vivos; 5) áreas taladas pre-incendio. Además se incorpora a estas categorías la característica de caída de árboles por viento ya que durante los días que ocurrió el incendio hubo vientos de hasta 35 km/hr.

Los rodales resultantes sin daño por el incendio presentan gran importancia dentro del escenario post incendio, debido a que son una potencial fuente de semilla para la restauración natural de área (Vázquez *et al.*, 1999; Kafka *et al.*, 2001).

Por su parte, Kushla y Ripple (1997) analizaron el incendio ocurrido el año 1991 en Willamette National Forest en Oregon, EE.UU., en bosques de *Pseudotsuga menziessi*, *Abies spp.* y *Tsuga mertensiana*. En dicho estudio utilizaron la variable “Tasa de Dosel Vivo” (Live Canopy Ratio, LCR su sigla en inglés) para determinar la

sobrevivencia del bosque asociada a la severidad del incendio. Esta tasa resulta de la relación entre la cobertura del dosel vivo antes y después del incendio. Los autores en base a fotografías aéreas captadas un año después del incendio, obtienen que la sobrevivencia del bosque fue de 30,7% de un total 3.669 ha en estudio con un LCR de 70 a 100%.

Díaz-Delgado y Pons (1999) a partir de imágenes satelitales determinaron niveles de severidad en bosques de *Pinus halepensis*, *P. sylvestris*, *P. nigra*, *P. pinea*, *Quercus* spp. y matorrales de la comarca del Valles Oriental, Barcelona. Mediante análisis de mezclas espectrales, se logró correlacionar las superficies afectadas por los diferentes grados de severidad del incendio, con un mapa de severidades realizado sobre el terreno después del paso del fuego. Como resultado principal se tuvo que la clase “árboles quemados con ramas finas en todo el tronco” abarcó un 57,4% del área de estudio, además de determinar en base al nivel de afectación de cada severidad, que el siniestro mayormente se trató de un incendio de copas.

En Chile las experiencias en levantamiento y análisis de severidad de incendios determinadas a partir de fotografías aéreas son muy escasas. González (2004) evalúa en bosques del tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa, la intensidad del daño provocado por el mismo incendio en la Reserva Nacional Malleco. El estudio se basó en la evaluación de variables *in situ* de individuos arbóreos, utilizando material fotográfico aéreo para determinar zonas a muestrear. Sus resultados indican que los más afectados por el fuego corresponden a los ubicados a mayor altitud, disminuyendo hacia sectores de menor altitud. Sin embargo, dentro de su metodología no se encontraron los pasos explícitos de la fotointerpretación ni el análisis realizado para obtener dichos resultados.

2.5 Relación del terreno y vegetación con efectos del fuego

La topografía incluye elevación sobre el nivel del mar, pendiente, exposición y como estos elementos están configurados. Estas variables son factores sustanciales que definen el comportamiento del fuego en un área específica (Kushla y Ripple, 1997), además de influir de variadas formas en la vegetación existente en distintos sitios de acuerdo a las condiciones microclimáticas que se generan (National Wildfire Coordinating Group, 2001; Epting, 2004).

De cierta forma y en términos generales, la topografía controla la radiación solar que llega a una cierta área, teniendo como resultante un abanico de microclimas, tipos de suelo y vegetación según exposición (Epting, 2004). Esta situación sucede sobre todo en terrenos escarpados modificando de la misma forma el comportamiento del fuego. Sin embargo, debe considerarse a la influencia de la variabilidad espacial de la humedad en el terreno y la canalización del viento por la misma topografía, la cual crea turbulencias y remolinos que afectan también al fuego (National Wildfire Coordinating Group, 2001). Además, se plantea que el fuego puede cambiar durante el día por movimientos del aire que se mueve pendiente arriba, o en la noche pendiente abajo (National Wildfire Coordinating Group, 2001).

Algunos estudios (Kushla y Ripple, 1997; Epting, 2004; Mermoz *et al.*, 2005) indican que la variable con mayor intervención en el comportamiento del fuego es la elevación, no obstante los resultados no son siempre idénticos. Epting (2004), plantea que a mayor elevación menor es la severidad. Por el contrario, Mermoz *et al.* (2005) indican que la existencia de cuerpos de agua como por ejemplo lagos a gran altitud, aumentarían la humedad y reduciría las temperaturas en verano, favoreciendo la sobrevivencia de la vegetación. Por otra parte Kushla y Ripple (1997) agregan que a pesar de que haya cursos de agua en estas áreas cercanas a líneas divisorias de aguas, la vegetación presente tiene una baja sobrevivencia ya que está más expuesta al viento. Por estas divergencias y siendo ésta la variable más correlacionada con la severidad del incendio, es que resulta necesario considerar las características ambientales del micrositio. Además, coincidiendo con Gray *et al.* (2002), a mayor elevación menor la temperatura, con mayor participación de precipitaciones en forma nieve, así como también de humedad.

En un segundo orden de influencia en cuanto al comportamiento se encuentra la exposición. En el hemisferio Norte, pendientes con orientación Norte a gran altitud reciben poca radiación solar, influyendo en el contenido de humedad del combustible de lo que resulta una baja sobrevivencia (Kushla y Ripple, 1997). Además, contienen suelos fríos con considerable escarcha (Epting, 2004). Este efecto se comporta de manera inversa en el hemisferio Sur.

La pendiente es un factor extremadamente importante en el comportamiento del fuego (National Wildfire Coordinating Group, 2001), debido a que si las llamas queman pendiente arriba están posicionadas más cerradamente a la vegetación; esto secaría y pre-quemaría el combustible antes de llegar el fuego más fuerte y de mayor proporción. Al mismo tiempo, pendientes más fuertes pueden expandir el fuego y contribuir a una mayor severidad (Kafka *et al.*, 2001). Sin embargo, esta variable resultó ser la que menos explica la ubicación de las severidades en estudios realizados por Kushla y Ripple (1997) y Epting (2004).

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Área de estudio

El Parque Nacional Tolhuaca se ubica en la Cordillera de los Andes entre los 38°10' y 38°15' S. y los 71°40' y 71°51' O., en la Provincia de Malleco, IX Región, Chile (figura 2), con una superficie total de 6.407,8 ha. El clima del área presenta cierta tendencia continental reflejada en marcadas oscilaciones térmicas, con un promedio anual de 8,6° C y una media en enero de 15,1° C y 1,9° C para julio (Hajek y Di Castri, 1976). Las precipitaciones anuales bordean los 2.000 mm concentrándose el 60% en invierno, con todos los meses húmedos y sin periodos de aridez.

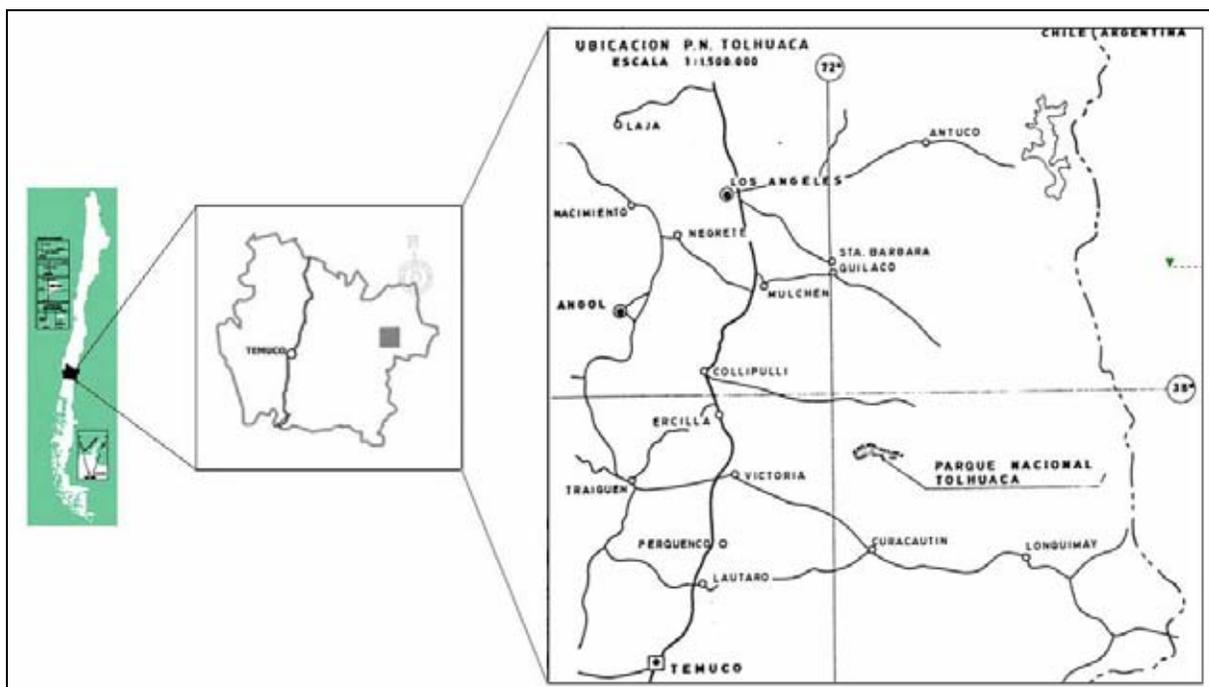


Figura 2. Ubicación del área de estudio.

La geomorfología actual se formó en el periodo Cuaternario, destacando el volcán Tolhuaca y el valle del río Malleco con rocas andesíticas, porfídicas y basaltos, producto de una intensa actividad volcánica (Johnson, 1970). De Este a Oeste los cordones montañosos alcanzan una altitud de 1.500 a 1.780 m s.n.m. Hacia el Sureste las geomorfias se presentan comprimidas y cortadas por cauces de agua que drenan en forma encajonada y sinuosa (Oltremari *et al.*, 1978).

En el Parque se encuentran las lagunas Malleco y Verde, las que en total abarcan una superficie de 82,97 ha. Además los principales son el Malleco y Pichi-Malleco. El primero conforma el límite Sur del Parque y alimenta a la laguna del mismo nombre; en cuanto al segundo, éste nace en lo alto de Loma Atravesada y cae al río Malleco en la Reserva Forestal Malleco (SAG, 1975).

Antes del incendio el Parque presentaba cinco asociaciones vegetales (CONAF *et al.*, 1997) como se observa en el cuadro 1 y figura 3.

Cuadro 1. Cobertura vegetal para el Parque Nacional Tolhuaca.

Vegetación	Superficie	
	ha	%
<i>Araucaria araucana</i> - <i>Nothofagus</i> spp.	2288,6	36,2
<i>Festuca</i> sp.	20,8	0,3
<i>Nothofagus antarctica</i>	46,7	0,7
<i>Nothofagus antarctica</i> - <i>Festuca</i> sp.	226,9	3,6
<i>Nothofagus</i> spp.	3741,9	59,2
Total general	6324,8	100,0

Oltremari *et al.* (1978) clasifica las asociaciones vegetales del Parque en función de la altitud y micro geografía, como sigue:

Formación higrófila (húmeda) de bosque valdiviano. Se encuentra especialmente en los márgenes de los ríos y en lugares con mucha humedad (hasta 950 m s.n.m). Las especies arbóreas más abundantes son *Nothofagus obliqua*, *Laureliopsis philippiana*, *Nothofagus dombeyi*, *Weinmannia trichosperma*, acompañadas en algunas situaciones por *Nothofagus alpina*, *Persea lingue*, *Aextoxicon punctatum*, *Gevuina avellana* entre otras.

Formación mesófila (sub húmeda) de *N. alpina*. Su distribución más común es entre los 700 y 1.800 m s.n.m. presentándose como bosque puro de raulí o en mezcla con *N. dombeyi*, *L. philippiana*, *W. trichosperma* y *Nothofagus pumilio* en los sectores de mayor altitud.

Formación higrófila (húmeda) de *N. dombeyi*. Corresponde a una formación de montaña, donde esta especie es la principal. En el Parque se encuentra generalmente asociada con *N. alpina*, aunque en algunas situaciones se da también en bosques puros.

Formación mesófila (sub húmeda) de *A. araucana*. Caracterizada por presentarse como bosques abiertos, cuya especie principal es poco exigente en agua. Puede desarrollarse en suelos secos, pedregosos y poco profundos debido a su poca exigencia hídrica. Se encuentra a una altitud variable entre los 1.400 a 1.700 m s.n.m. y es la formación más abundante en el Parque, cubriendo aproximadamente el 40% de la superficie. Principalmente crece asociada *N. dombeyi* y *N. pumilio*, pero en algunos sectores se le puede encontrar como bosques puros.

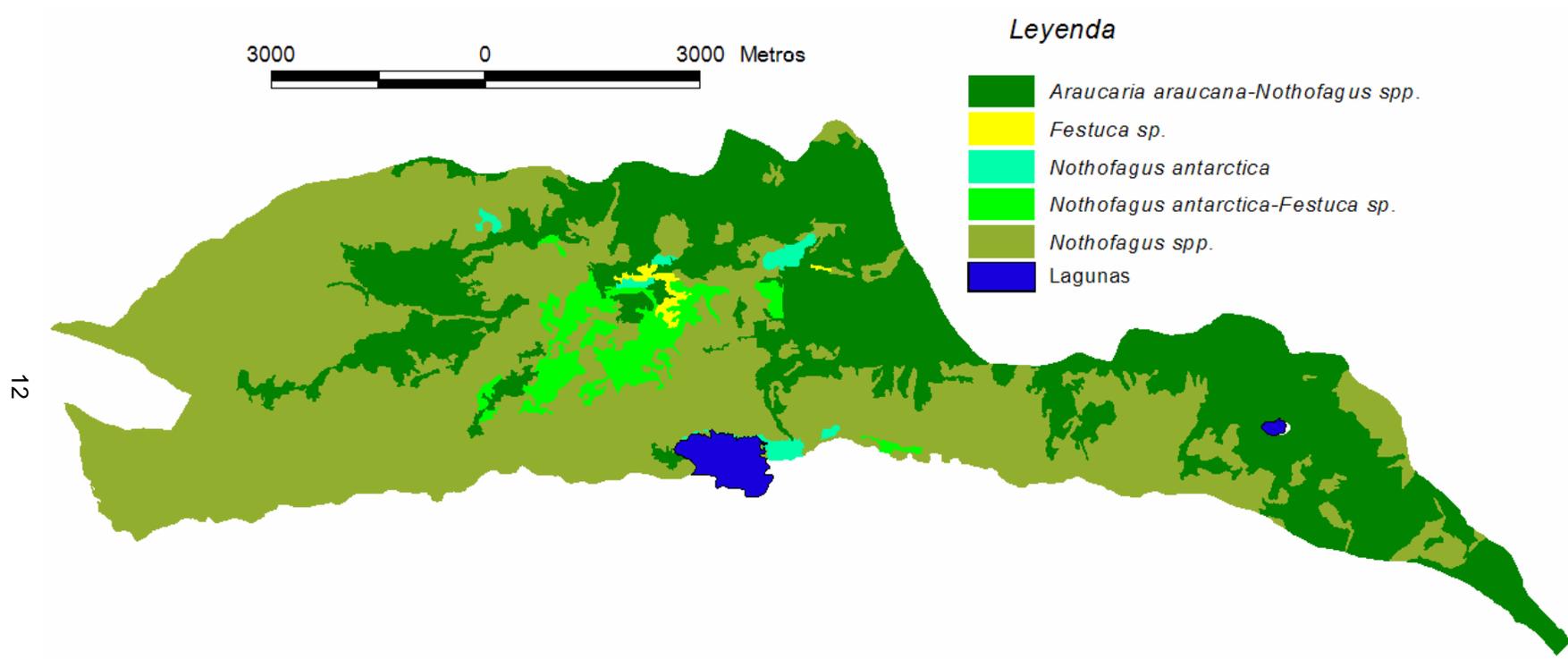


Figura 3. Asociaciones vegetales en el Parque Nacional Tolhuaca.

Formación andina de *N. antarctica*. Debido a las condiciones de temperatura, se encuentra en la zona altitudinal límite del crecimiento arbóreo. Sin embargo, aún en algunas zonas bajas se desarrolla como tal.

Por su parte, Ramírez (1978) clasifica y describe las siguientes formaciones vegetales:

Bosque de *N. dombeyi*: Vegetación abundante presente en pendientes expuestas al Sur alcanzando hasta los 1.300 m s.n.m., cambiando lentamente a un bosque de *A. araucana*. *N. dombeyi* ocupa todo el estrato arbóreo con una altura de hasta 40 m. El estrato inferior está conformado por *W. trichosperma*, *L. philippiana* y *Lomatia hirsuta*, entre otros, acompañadas por especies de arbustos como *Myrceogenia montana* y *Chusquea uliginosa*.

Bosque de *N. alpina*: Asociación vegetal más abundante del parque, sin embargo la más antiguamente intervenida. El estrato arbóreo es ampliamente dominado por esta especie, siendo acompañada por arbustos de abundante cobertura como *C. uliginosa*, *Adesmia* sp., *Gaultheria phillyreaefolia* y *Pernettya* sp., entre otros.

Bosque de *A. araucana*: Por sobre los 1.300 m s.n.m., se presentan abiertos y ubicados en suelos pedregosos. Sólo se presentan como bosques mixtos en los que predominan *N. dombeyi* y *A. araucana*. El estrato arbustivo inferior abunda la *N. pumilio*, mientras que en el arbustivo predomina *C. uliginosa*.

Matorral de *N. antarctica*: Se ubican por sobre los 1.000 m de altitud, en laderas con suelos arenosos y pedregosos, con bastante pendiente y exposición Norte. Son comunidades en ciertos lugares impenetrables, en los que domina ampliamente esta especie alcanzando hasta 4 m de altura. En un estrato más bajo se encuentra *C. uliginosa* y *Embothrium coccineum*. La cubierta herbácea no es muy abundante, predominando en ella la gramínea de hoja dura *Festuca* sp.

Coironal: Son comunidades que según el autor, se formaron por intervención antrópica (generalmente roces) del matorral de *N. antarctica*, de los cuales se encuentran aisladamente algunos individuos remanentes. En ellas dominan gramíneas de géneros *Festuca* y *Poa*. En época estival estos prados andinos alcanzan alturas considerables, los que antiguamente eran aprovechados como veranadas.

Vegetación de la laguna Malleco: Comunidad compuesta por flora acuática y palustre.

3.2 Metodología

3.2.1 Recopilación de información

Las fotografías aéreas a escala 1:11.000 capturadas en un vuelo realizado en marzo de 2002 y el fotomosaico georreferenciado del Parque Nacional Tolhuaca, fueron proporcionadas por la Dirección Regional de CONAF de Temuco, IX Región. De la misma forma se obtuvieron con escala 1:25.000, las coberturas de límite, elevación (con equidistancia altimétrica de 20 m), caminos e hidrografía. El límite digital del Parque fue utilizado como base, la cual arrojó una diferencia de 61,4 ha con la expuesta en la literatura, considerándose como irrelevante para el presente estudio. Es importante mencionar que tanto fotografías como el fotomosaico no fueron ortorrectificados, por lo que se asumió el error de 31 m obtenido georreferenciando puntos representativos de la geohidromorfología del área.

La cobertura digital de vegetación del Parque se obtuvo desde el catastro nacional realizado por CONAF *et al.* (1997), el cual fue proporcionado por el Centro de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos del Instituto de Silvicultura de la Universidad Austral de Chile.

Para el manejo, procesamiento y análisis de la información y derivación de los resultados esperados, se trabajó con el programa de sistema de información geográfico (SIG) Arc View 3.2 de la empresa ESRI. Por medio de esta herramienta y la extensión "*Projection utility*" se estandarizó el huso de todas las coberturas a 19S.

3.2.2 Zonificación de severidades

A través de la fotointerpretación del Parque se procedió a zonificar las distintas severidades del incendio. Para esto se utilizó una lámina transparente sobre cada fotografía, en donde se delimitó con lápiz indeleble cada área homogénea, etiquetándola con el número de severidad correspondiente. Como área efectiva del Parque se exceptuaron los cuerpos de agua presentes. El área mínima de fotointerpretación fue de 1,21 ha. La fotointerpretación se llevó a cabo siguiendo los factores de fotointerpretación y estereograma descritos en cuadro 2 y figura 4.

Cuadro 2. Características fotográficas para la fotointerpretación.

Severidad	Característica
3	Forma: punteada a globosa en el centro Sombra: lineal en el borde la fotografía Tono-color: gris oscuro a negro Textura: fina en la parte central de la fotografía y regular más hacia el borde
2	Forma: globosa circular Sombra: Redondeada Tono-color: café claro Textura: gruesa a mediana
1	Forma: globosa circular Sombra: Redondeada Tono-color: café rojizo (moteado) Textura: gruesa a mediana
0	Forma: globosa circular Sombra: Redondeada Tono-color: Verde Textura: gruesa a mediana

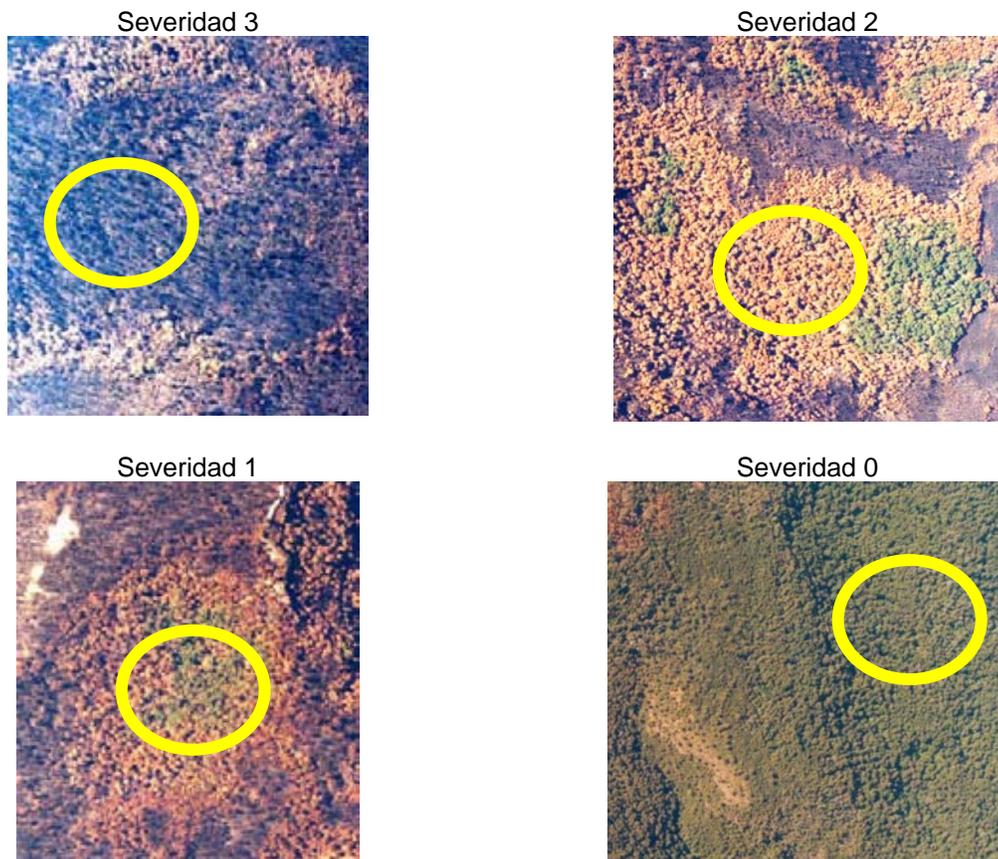


Figura 4. Visualización en la fotografía de las características descritas.

3.2.3 Corroboración en terreno

Debido a que el uso de fotografía aérea no es posible observar los daños eventuales bajo dosel (especialmente en severidades 1 y 0), una más precisa y completa observación del daño bajo las copas fue efectuada en el mes de noviembre del año 2005, permitiendo recabar información adicional sobre situaciones recurrentes en los polígonos pertenecientes a cada severidad.

Se estableció una proporción mínima de polígonos a visitar, correspondiendo al 25% de cada severidad, que de acuerdo con Resources Inventory Communitter (1998) son representativos para la superficie en estudio, la escala de las fotografías empleadas y del mapa de severidades resultante. Bajo este criterio, se establecieron transectos hacia los sitios con mayor duda en la asignación de severidades (anexo 2), incluyendo en cada uno de ellos polígonos de todos los tamaños y tipos de severidad. Lo anterior se sustenta en la accesibilidad posible para la verificación determinada por la pendiente, definiéndose el muestreo bajo un 30% correspondiente a un 43,9% del total de la superficie del Parque; no obstante, en situaciones escarpadas fue posible observar rodales/polígonos a mayor pendiente.

3.2.4 Validación de la fotointerpretación

A partir de una matriz de confusión (Chuvieco, 2000), se contrastó la información generada a partir de la fotointerpretación con la de terreno, la que reúne conflictos entre categorías de severidades y fiabilidad de la fotointerpretación (1). Se consideró la fotointerpretación aceptable o buena, al obtener una superficie acertada igual o mayor al 70% (medida de confiabilidad); el nivel de significación (α) utilizado para el error estándar fue de 95%.

Donde

$$F = \mathfrak{F} \pm zES$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}}$$

$$ES = \sqrt{\frac{pq}{n}}$$

F = fiabilidad estadística global
 \mathfrak{F} = fiabilidad estadística
 z = valor de la abscisa del área bajo la curva para (1- α)
 X = valor de celda
 i = número de fila
 j = número de columna
 n = número de celdas en fila o columna
 ES = error estándar
 p = porcentaje de aciertos
 q = porcentaje de fallos
 n = número de muestra

(1)

Posteriormente, se calcularon los errores de omisión (E.O.) y comisión (E.C.), los que respectivamente entregaron los errores del productor (E.P.) y usuario (E.U.) (2, 3, 4 y 5).

$$E.C_{.i} = \frac{(X_{i+}) - (X_{ii})}{X_{i+}} \quad \text{Donde} \quad (2)$$

$$E.O_{.j} = \frac{(X_{+j}) - (X_{jj})}{X_{+j}} \quad \begin{array}{l} \text{E.O. = error de omisión} \\ \text{E.C. = error de comisión} \end{array} \quad (3)$$

$$E.P. = 1 - E.O. \quad \text{Donde} \quad (4)$$

$$E.U. = 1 - E.C. \quad \begin{array}{l} \text{E.P. = error del productor} \\ \text{E.U. = error del usuario} \end{array} \quad (5)$$

Por último se realizó un análisis categórico multivariante, calculando el índice de Kappa (K). Dicho índice se resuelve por la diferencia entre la fotointerpretación y lo observado en terreno y lo que sería esperable si se asignara aleatoriamente su severidad (6).

Donde

$$K = \frac{N * \sum_{i=1}^n (X_{ii}) - \sum_{i=1}^n [(X_{i+}) * (X_{+i})]}{N^2 - \sum_{i=1}^n [(X_{i+}) * (X_{+i})]} \quad \begin{array}{l} K = \text{índice de Kappa} \\ X = \text{valor de celda} \\ i = \text{número de fila} \\ n = \text{número de celdas en fila o columna} \\ N = \text{número de muestras} \end{array} \quad (6)$$

3.2.5 Digitalización de la información

La zonificación de severidades corroborada se llevó a formato digital utilizando el fotomosaico, con una escala de salida de 1:11.000 para la zonificación y límite del incendio en el Parque. Cada severidad se representó con un color diferente: 3 Rojo (#FF0000); 2 Naranja (#FF9900); 1 Amarillo (#FFFF00); 0 Verde (#008000) y las zonas rocosas con Azul cielo (#00FFFF).

El mapa de severidades se sobrepuso a la cobertura vegetal definida por el catastro, pudiendo determinar la superficie afectada de cada tipo de vegetación bajo distinta severidad.

3.2.6 Modelo de elevación digital

Utilizando la extensión “3D Analyst” y a partir de la cobertura de curvas de nivel, se confeccionó un modelo de elevación digital (MED; anexo 3) con resolución de 400 m², definida por el tamaño de la grilla (20 x 20 m) y una escala de salida de 1:25.000. De éste, se derivaron coberturas de pendiente y exposición (anexo 4 y 5). La clasificación se realizó en:

Altitud: Desde 600 a 1.800 m s.n.m. cada 60 m (20 clases).

Pendiente: 0 a 15%; 15 a 30%; 30 a 45%; 45 a 60%; >60%.

Exposición: Plano; Noroeste; Norte; Noreste; Este; Sureste; Sur; Suroeste; Oeste.

Cabe mencionar que para definir la amplitud de las clases de altitud se probó con diferentes rangos hasta elegir 60 m, por resultar la más representativa de lo que acontece en esta variable.

3.2.7 Descripción cuantitativa

Para determinar alguna relación entre la existencia de cuerpos de agua y el tipo de severidad resultante en el área aledaña a éste, se crearon 50 anillos múltiples contiguos a los ríos permanentes y temporales del Parque, representando áreas buffer de 10 m de ancho cada uno.

Para cuantificar la superficie afectada por el fuego bajo distintas condiciones de altitud, pendiente y exposición se utilizó la extensión “GeoPreprocessing Wizard”, cruzando la cobertura digital de severidades con las coberturas de las variables topográficas.

Finalmente, las asociaciones vegetales se traslaparon con las variables topográficas, para establecer detalladamente su comportamiento con respecto al fuego en el Parque.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Fotointerpretación y verificación

La obtención de las fotografías inmediatamente después del evento, proporcionó valiosa información de los cambios inmediatos en la vegetación, permitiendo inferir a grandes rasgos como se comportó el incendio en cuanto a su intensidad y comportamiento.

El proceso de fotointerpretación se basó principalmente en el tono-color, sombra y textura, ya que fueron los cambios más representativos entre severidades. Las mayores dificultades se tuvieron en las severidades 1 y 2, debido al carácter mosaico que generalmente existió entre ellas, seguido por la mixtura de copas característica de la severidad 1. De acuerdo con Díaz-Delgado y Pons (1999), esto revelaría diferentes niveles de daño en el suelo, producto de la combustión del mantillo y la ocurrencia de precipitaciones post incendio favoreciendo la erosión (De Luis *et al.*, 2003).

La presencia de *Festuca* sp. quemados en parches bajo rodales de *Nothofagus* spp. muertos, indujeron al error en la fotointerpretación en cuanto al factor tono-color. Sin embargo, este error fue disminuido por las observaciones realizadas en terreno y por la alta calidad del material utilizado.

La corroboración de la fotointerpretación realizada abarcó el 48,4% del Parque (cuadro 3).

Cuadro 3. Polígonos muestreados según severidad.

Severidad	Nº polígonos		% del total de severidad
	Muestreo	Total	
3	4	13	31%
2	12	39	31%
1	13	51	25%
0	4	14	29%
Total	33	117	

4.1.1 Caracterización de severidades en terreno

La corroboración de severidades en terreno permitió registrar características recurrentes, estableciendo un estándar para cada una de ellas (anexo 6). La variabilidad encontrada en una misma severidad dependió en distintos grados de la composición florística, micro topografía y de la clase etárea del bosque. Las situaciones observadas fueron:

Severidad 3: Proporción de árboles muertos sobre el 90%, copa muerta, corteza altamente carbonizada y desprendida parcial o totalmente significando la muerte del cambium, infiriendo por ello la alta temperatura generada por el fuego. Debido a que el horizonte O del suelo fue carbonizado, se observaron raíces expuestas tipo zancos en individuos del género *Nothofagus*, sumado a una evidente erosión producto de la escorrentía superficial. Los árboles vivos presentaron un alto nivel de debilitamiento, debido a su baja copa remanente y a un fuerte daño en su fuste. Colonización de especies pioneras producto de la abertura de dosel y modificación de micrositios de germinación.

Severidad 2: Proporción de árboles muertos entre 50 y 90%, los cuales siguieron las características de la severidad 3. Los individuos vivos presentaron su corteza ennegrecida y/o algo carbonizada, pero con cambium no totalmente muerto, por lo que exhibían copas con brotes verdes. Particularmente, en *A. araucana* fue posible observar brotes epicórmicos basales y/o fustales. Horizonte O ausente, evidente erosión. Colonización de especies pioneras.

Severidad 1: La proporción de árboles muertos fue bajo el 50%, dándose una situación mosaico entre individuos muertos y vivos. Los primeros presentaron copa muerta y corteza ennegrecida pero no desprendida, mientras que los individuos vivos siempre presentaron la totalidad de copa viva y sin indicios de fuego en su fuste, siendo estos principalmente individuos de mayor diámetro. Existió horizonte O casi en la totalidad de los polígonos.

Severidad 0: Con nulo daño por fuego.

En términos cuantitativos, los tipos de severidad se resumen en el cuadro 4.

Cuadro 4. Superficie y número de polígonos por severidad.

Severidad	Superficie (ha)	Superficie (%) del total	Nº de Polígonos	Sup. promedio por polígono (ha)
3	1.802,8	28,5	13	138,7
2	1.800,1	28,5	39	46,2
1	628,3	9,9	51	12,3
0	2.093,6	33,1	14	149,5
Total	6324,8	100,0	117	

4.1.2 Matriz de confusión

Siguiendo a Chuvieco (2000), se construyó una matriz de confusión consecuente con la fase de muestreo en contraste a la clasificación establecida en gabinete, no registrándose grandes diferencias entre los resultados de estas dos etapas.

En la matriz de confusión (cuadro 5) se obtuvo una fiabilidad del 98,7% para un 95% de probabilidad y un nivel de significación de 0,05 (α). Además, los umbrales inferior y superior de la fiabilidad real fueron de 98,29 y 99,10%. Este alto porcentaje de

fiabilidad obtenida se debió al bajo número de clases de severidad, lo que disminuyó la existencia de límites extremadamente difusos, definidos por factores de fotointerpretación claros y una leyenda más simplificada. Además y a pesar de que existe un desfase entre la toma de fotografías y la corroboración en terreno, la fase de entrenamiento en la fotointerpretación y las visitas a terreno previas a ésta, permitieron coleccionar antecedentes cruciales para el trabajo de gabinete.

Cuadro 5. Matriz de confusión.

		Fotointerpretación						
	Severidad	3	2	1	0	Total	Ex. P.	E. O.
Terreno	3	1.754,2	39,3			1.793,5	97,8	2,2
	2	0,0	942,3	0,2	0,3	942,8	99,9	0,1
	1		0,2	288,5		288,6	99,9	0,1
	0				42,3	42,3	100,0	0,0
	Total	1.754,2	981,7	288,6	42,6	3.067,2		
	Ex. U.	100,0	96,0	99,9	99,2			
	E. C.	0,0	4,0	0,1	0,8			

Chuvieco (2000) entrega valores de fiabilidad para cuatro matrices estudiadas los que variaron entre 62 y 75% de fiabilidad, sin embargo en dicha investigación se trabajó con 9 clases, lo que infirió un mayor nivel de conflictos entre categorías.

En definitiva y considerando la fiabilidad resultante se tuvo una fotointerpretación calificada como buena. Esto se confirma con la obtención en todas las clases de una fiabilidad del productor no menor al 97%, lo que indica que las superficies fueron casi en su totalidad bien discriminadas en la clasificación. De la misma forma resulta la fiabilidad del usuario, entregando seguridad de que una severidad clasificada en gabinete como tal realmente lo sea. Dicho de otra manera, el error de omisión fue bajo debido a que muy poca superficie de cada clase dejó de identificarse como tal, al igual que el error de comisión que entrega la veracidad de la clasificación realizada. El principal conflicto se tuvo en la cubiertas de *N. antarctica*, las que mayormente se fotointerpretaron y corroboraron como severidad 2, pero algunas de estas zonas en terreno presentaron mayor daño en los individuos, trasladándose a severidad 3 y suponiendo un fuego de mayor intensidad.

Al analizar las relaciones múltiples entre las distintas severidades mediante el índice de Kappa (K), la clasificación fue un 95,9% mejor que la esperable al azar.

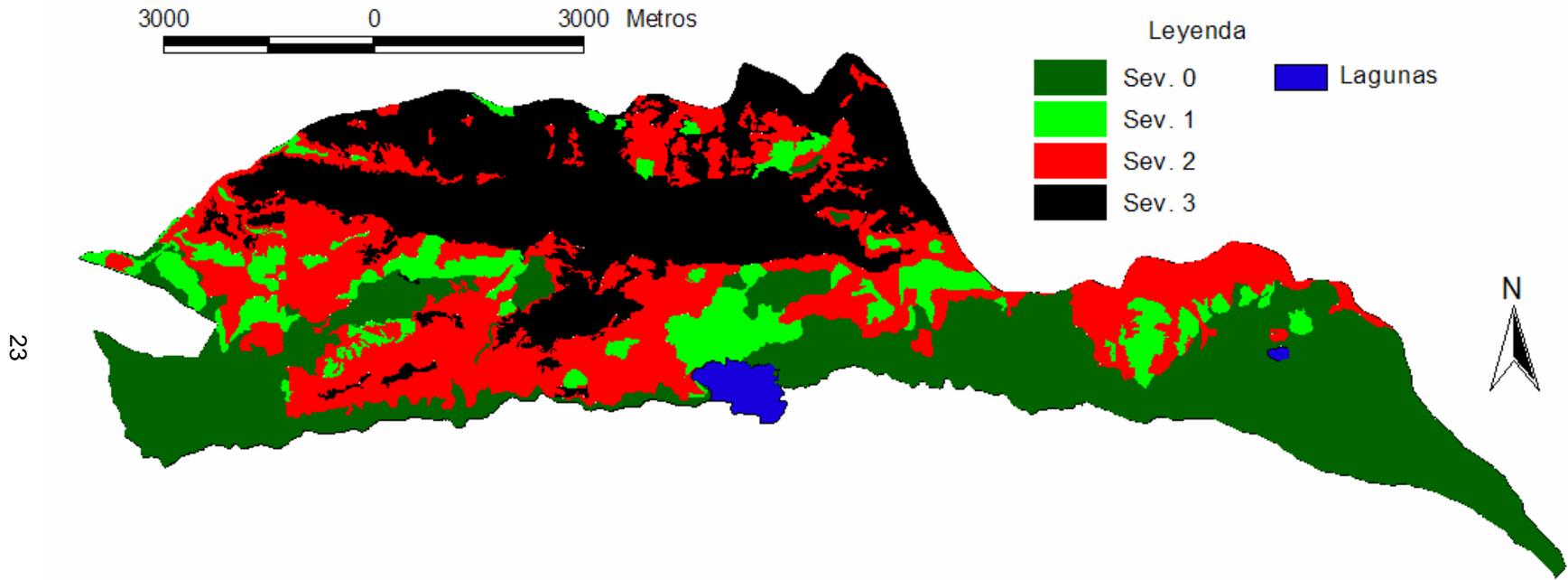
4.2 Mapa de severidades

El mapa de severidades (figura 5) evidencia situaciones mosaico explicadas por la diversidad de tipos de bosques, así como por el desarrollo y comportamiento del fuego. Este efecto mosaico se evidencia en que 109 polígonos (93% del total) no abarcaron superficies mayores a 68 ha, teniendo como promedio 9,9 ha. Los polígonos restantes del Parque, en conjunto concentran el 83% de la superficie, con un promedio de 656,1 ha.

La disposición de los diferentes tipos de severidad se vio ligada a que el fuego afectó también a la Reserva Malleco (ubicada inmediatamente al norte del Parque), lo que explicaría que la severidad 3 se ubique principalmente en dicha zona, en donde existe la mayor proporción de bosque de *A. araucana-Nothofagus* spp. Por su parte, el valle del Pichi-Malleco aparentemente sirvió de conexión para el avance del fuego desde el Norte al Sur, debido a un alto nivel de sequedad de *Festuca* sp. producto de la estación y las bajas precipitaciones.

La existencia de rodales con severidad 1 toma una relevancia mayor debido a que están entremezclados con bosques que tuvieron mayor daño, transformándose en una fuente de semilla potencial para la recuperación natural del área. Sin embargo, dicha severidad comprende polígonos que abarcan 12,3 ha en promedio, por lo cual habría que evaluar su efectividad en cuanto a este aspecto siguiendo los índices utilizados por Bucarey (2004). Finalmente, la superficie resultante con nulo daño o severidad 0 se ubicó en la parte Sureste del Parque, la que quedó mayormente protegida por corresponde a otra cuenca. En la zona Noreste y también laderas que dan al río Malleco con exposición Sur, el fuego sólo accedió descolgándose en lenguas por la ladera, es decir llamas que producen menor daño (National Wildfire Coordinating Group, 2001) generando severidad 2 y 1.

La quema total de los individuos (severidad 3) y la completa muerte de las copas debido a que el follaje quedó “chamuscado” o seco en otros (severidad 2), representan un alto nivel de mortalidad. El “chamuscamiento” fue observado por ejemplo en microcuencas con cursos de agua temporales o permanentes y/o en pequeños rodales de mayor densidad, en donde imperaba una mayor humedad relativa, resultando un fuego superficial o de baja intensidad. Lo observado coincide con Kushla y Ripple (1997) en cuanto a que la mayor sobrevivencia del bosque se presenta cerca de sitios que presentan condiciones ambientales más húmedas. En este contexto, el traslape de los ríos permanentes y temporales con la severidad indica una leve relación, al incrementar la superficie relativa en severidad 3 y 2 y disminuir la 1 y 0 en cuanto se aumenta la distancia desde un curso de agua (anexo 7).



23

Figura 5. Mapa de severidades de incendio en Parque Nacional Tolhuaca.

4.3 Vegetación afectada según severidad

El incendio afectó 4.232,2 ha del Parque Nacional Tolhuaca, representando un 66,9% de la superficie total. Las superficies con severidad 3 y 2 abarcan el 28,5% cada una, correspondiente en conjunto a 3.603,8 ha. Le siguen la severidad 1 con 628,3 ha (9,9%) y severidad 0 con 2.092,7 ha (33,1%).

El tipo de vegetación con más superficie afectada por el fuego correspondió a *Nothofagus spp.* con 2.416,3 ha (figura 6).

Todos los tipos de cobertura vegetal del Parque fueron afectados por el incendio en más de un 50%. Las comunidades más afectadas se relacionan con la participación de *Festuca sp.* (figura 7), básicamente debido a que la temporada en que ocurrió el incendio presentaba un alto nivel de combustibilidad sirviendo de puente para el fuego. En el caso de *N. antarctica*, el alto daño observado radica en que en su mayoría son renovales, donde el fuego afectó a todo el perímetro del fuste a nivel basal provocando la muerte del cambium, sumado a que por su altura existió una alta combustión de copas. Esto es similar a lo encontrado por Kushla y Ripple (1997) los cuales mencionan que bosques jóvenes de alta biomasa presentaron baja sobrevivencia post incendio. Sin embargo, en terreno se observó que la regeneración vegetativa de esta especie favorecía la restauración natural del área.

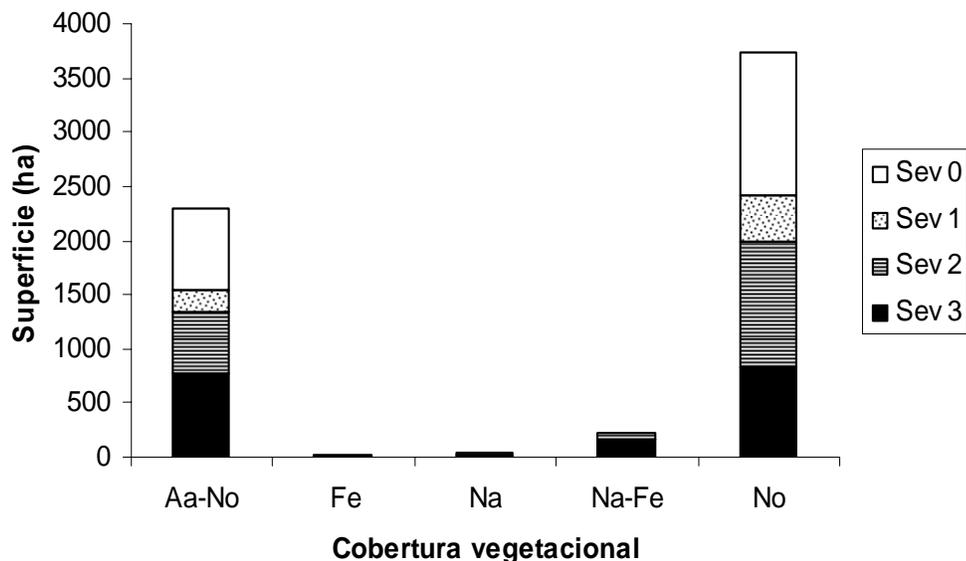


Figura 6. Superficie por cobertura vegetal según severidad.
Aa-No= *Araucaria araucana*-*Nothofagus spp.*; Fe=*Festuca sp.*; Na=*Nothofagus antarctica*;
Na-Fe=*N. antarctica*-*Festuca sp.*; No=*Nothofagus spp.*

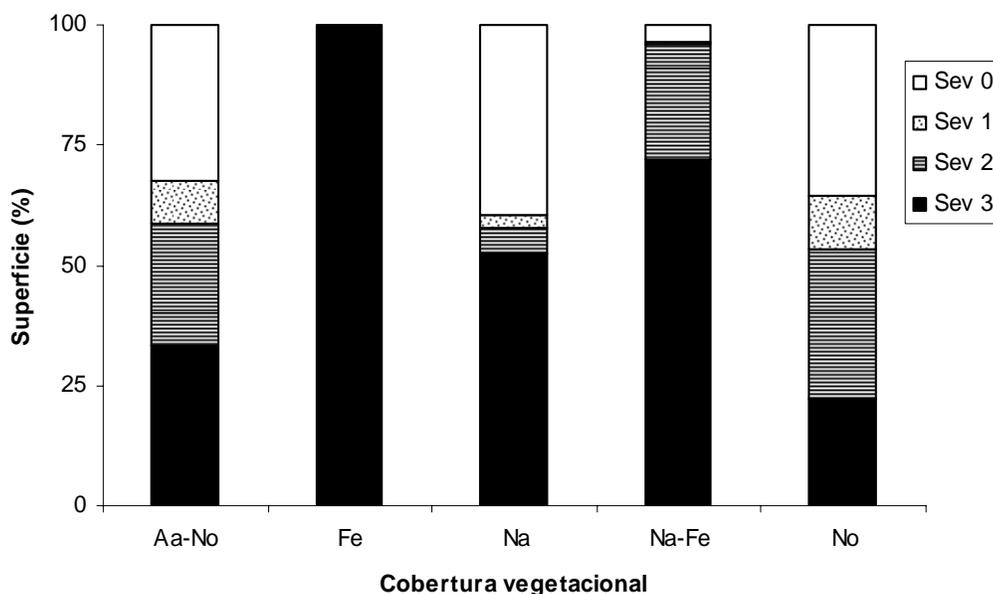


Figura 7. Proporción de superficie por cobertura vegetal según severidad. Aa-No= *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp.; Fe=*Festuca* sp.; Na=*Nothofagus antarctica*; Na-Fe=*N. antarctica*-*Festuca* sp.; No=*Nothofagus* spp.

En *A. araucana* fue posible observar la regeneración vegetativa ya sea de tocón o raíz y bajo diferentes severidades. Llamó la atención la presencia de algunos individuos en severidad 2 que presentaron corteza desprendida en todo su perímetro a una altura de un metro sobre el suelo, pero que aún tenían restos de copa viva. Otros incluso eran capaces de regenerar vegetativamente a nivel basal, siendo aparentemente éstos los últimos vestigios de vitalidad de individuos moribundos, por lo que sería importante evaluar en el tiempo su potencial sobrevivencia con este tipo de regeneración bajo distintas condiciones de sitio, lo que posteriormente estaría ayudando a la restauración natural a mediano-largo plazo del área en estudio.

Los bosques de *A. araucana*-*Nothofagus* spp. y de *Nothofagus* spp. fueron afectados en gran proporción dentro del Parque con un 67,6 y 64,6%, respectivamente. Cabe mencionar que específicamente en *A. araucana* fue posible observar (a pesar de que no fue una variable a medir), que el nivel de daño observado en individuos presentes en severidades 3 y 2 fue independiente de su clase diamétrica y espesor de su corteza.

4.4 Efecto de la topografía en la severidad de incendio

4.4.1 Altitud

El Parque se compone principalmente de un valle en dirección Oeste-Este circunscrito por cordones montañosos. De esta morfología, el 79,5% del total de la superficie se encontró en altitudes intermedias que van desde los 1.020 a 1.440 m s.n.m., resultando una curva normal casi perfecta (figura 8).

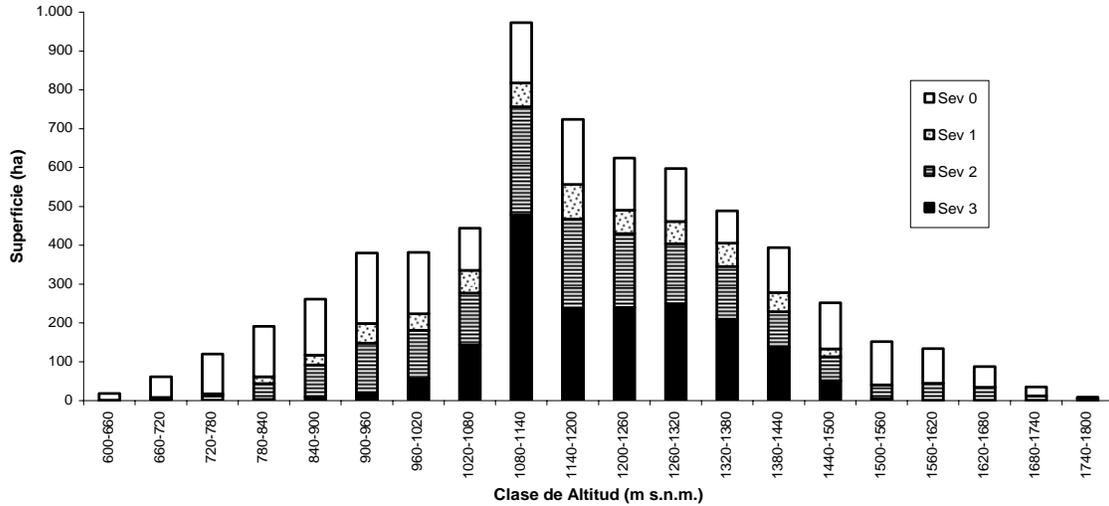


Figura 8. Distribución de superficies y severidades por clase de altitud.

En este rango (1020-1440 m s.n.m.) el incendio afectó en promedio a un 78% de su superficie. La incidencia del fuego fue más severa a mayor altitud (figura 9), hasta llegar a los 1.380 m s.n.m. Sobre los 1.500 y bajo los 1.020 m s.n.m. predominan las severidades 1 y 2, debido a que en estas altitudes el incendio solamente se descolgó sin tanta intensidad. En este sentido, el National Wildfire Coordinating Group (2001) indica que la topografía canaliza los vientos o masas de aire, influyendo en el comportamiento del fuego pudiendo crear turbulencias o remolinos, así como también encauzar las masas de aire en función de la noche o el día. De lo anterior se infiere que la severidad de la zona Este del área de estudio (zona de mayor altitud), fue generada por un fuego encajonado por los cordones más altos, incidiendo en que las masas de aire bajarán por las laderas con una menor intensidad, provocando severidades 2 y 1 además de influir en que las copas sólo se “chamuscaran” con la consecuente muerte de los tejidos.

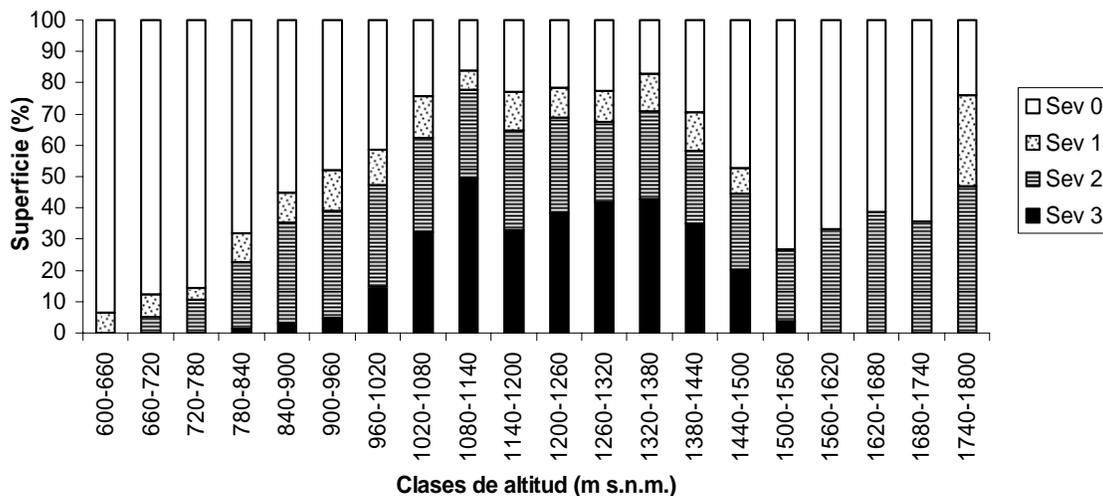


Figura 9. Proporción de superficies y severidades por clase de altitud.

El patrón de severidades en función de la altitud encontrado, corrobora lo indicado por Kushla y Ripple (1997) los autores quienes señalan que a mayor altitud menor sobrevivencia, esto sesgado a las clases entre los 960 y 1.440 m s.n.m. Las clases de altitud menores y mayores a este rango actúan como “efecto borde” del patrón indicado, resultante de la definición del área de estudio en función de los límites políticos del Parque, ya que las clases de altitud extremas pertenecen a otra cuenca. Por lo anterior, resulta necesario el levantamiento y análisis de toda la superficie comprendida por el incendio.

4.4.2 Pendiente

Las clases de pendiente resultaron relativamente similares en su superficie, excepto por la clase de 45 a 60% que tuvo un total de 909,5 ha (figura 10). La clase con mayor superficie en el Parque fue 15 a 30% con 1.440,3 ha.

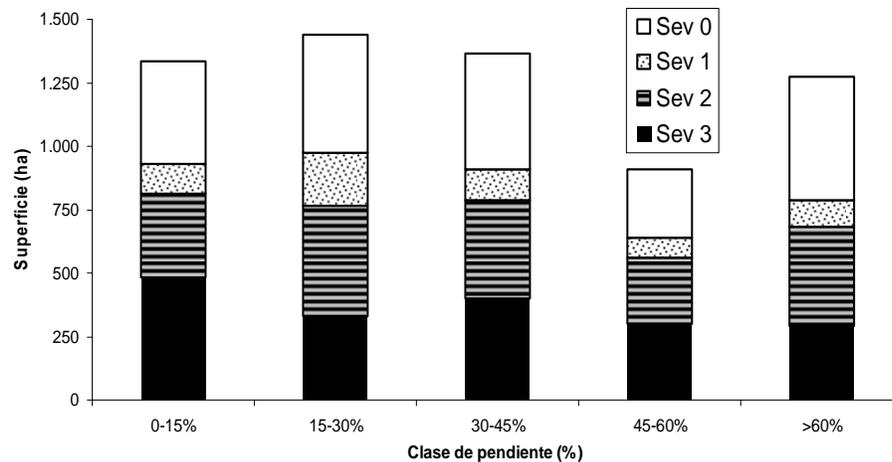


Figura 10. Distribución de superficies y severidades por clase de pendiente.

De acuerdo a los resultados, se aprecia que el tipo de severidad en cada una de las clases no fue condicionada por la pendiente, ya que las proporciones de severidades fueron relativamente similares entre clases (figura 11), coincidiendo de cierta forma con Epting (2004) y Kushla y Ripple (1997). Esto se explicaría en parte por la influencia del tipo de vegetación respecto a la severidad registrada, donde por ejemplo en el valle del Pichi-Malleco la presencia de renovales de *N. antarctica* combinados con *Festuca* sp. en pendientes de 0 a 15%, aumenta la superficie afectada con estas características en severidad 3 y 2, dado por la alta biomasa acompañada de una gramínea en alto nivel de combustibilidad. Otra situación tiene ubicación en las partes extremas del Oeste y Este del Parque, con pendientes fuertes y en severidad 0.

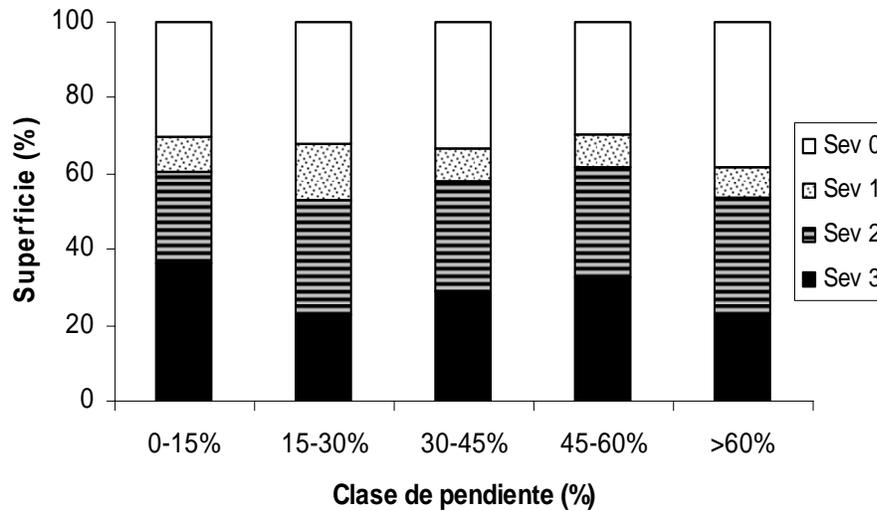


Figura 11. Proporción de superficies y severidades por clase de pendiente.

Un aspecto relevante a considerar es el efecto de la microtopografía sobre la severidad; en el proceso de fotointerpretación y corroboración en terreno fueron observados rodales ubicados en microcuencas, en donde el cambio de pendiente y las características particulares de humedad dadas en parte por una mayor densidad de individuos, impidieron que el fuego quemara el follaje, sino que sólo lo “chamuscara” generando la muerte de los tejidos.

4.4.3 Exposición

Las mayores superficies disponibles fueron las orientadas al Sur y Oeste, con 1.815,8 y 930,7 ha respectivamente. Las más afectadas se ubicaron en las exposiciones Sur (1.104,8 ha) y Norte (579,1 ha) (figura 12).

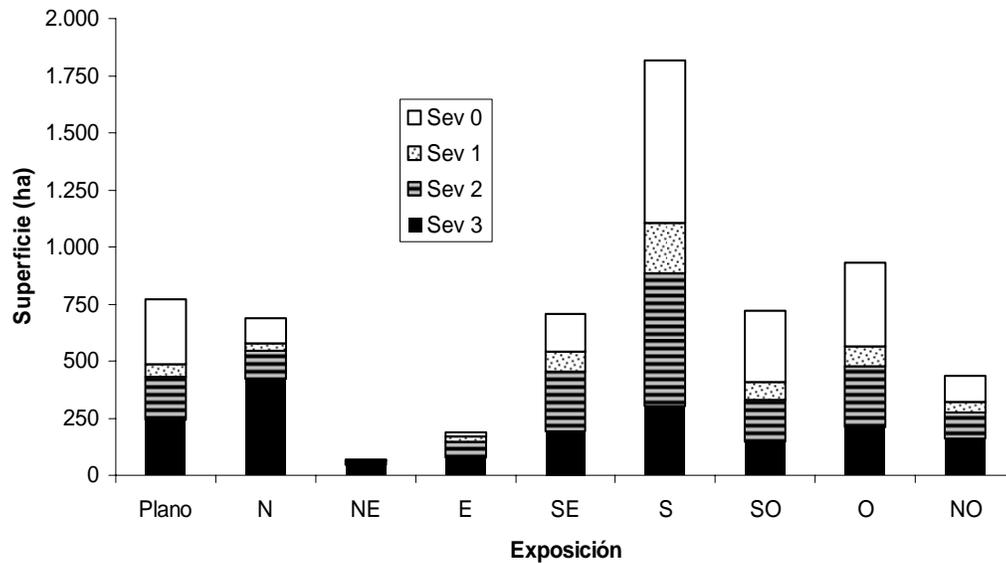


Figura 12. Distribución de superficies y severidades por exposición.

En general, exposiciones más cálidas (N, NE y NO) presentaron una mayor incidencia del incendio con severidad 3 y 2, en comparación con exposiciones más frías (S, SE y SO) (figura 13). Lo anterior concuerda con Kushla y Ripple (1997) quienes establecen que a mayor cantidad de radiación incidente en las primeras exposiciones mencionadas, predomina una mayor temperatura y una menor humedad favoreciendo la combustión del material orgánico, potenciándose aún más por la estación de verano en que sucedió el incendio.

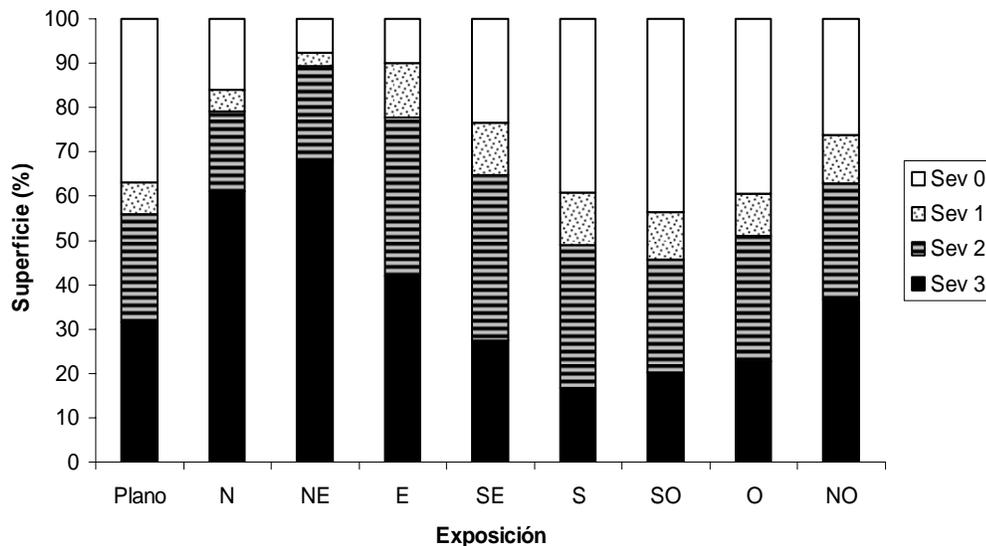


Figura 13. Proporción de superficies y severidades por exposición.

4.5 Severidad de incendio por tipo de vegetación y condición topográfica

Además de la topografía, la severidad resultante del fuego depende del tipo de vegetación existente en un área (Mermoz *et al.*, 2005). A grandes rasgos al segregar por tipo de cobertura vegetal en conjunto con la condición topográfica, no existen grandes diferencias con lo ya descrito en el punto 4.4; sin embargo, cabe mencionar ciertos aspectos adicionales en las relaciones previamente obtenidas.

4.5.1 Bosques de *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp.

A pesar de que la mayor superficie disponible (48,7%) se encontró en la exposición S-SE-SO, el fuego principalmente afectó a áreas planas y a la clase de exposición N-NE-NO, con un 75,3 y 74,3%, respectivamente. No obstante de esta última situación, la severidad 3 abarcó más superficie con un 57,3% de la clase, indicando una directa relación con el menor nivel de humedad esperado y una mayor incidencia de radiación solar (figura 14 a, d).

La pendiente en los bosques de *A. araucana*-*Nothofagus* spp. no presentó influencia sobre la severidad, existiendo similar superficie para cada una de las clases (figura 14 b, e).

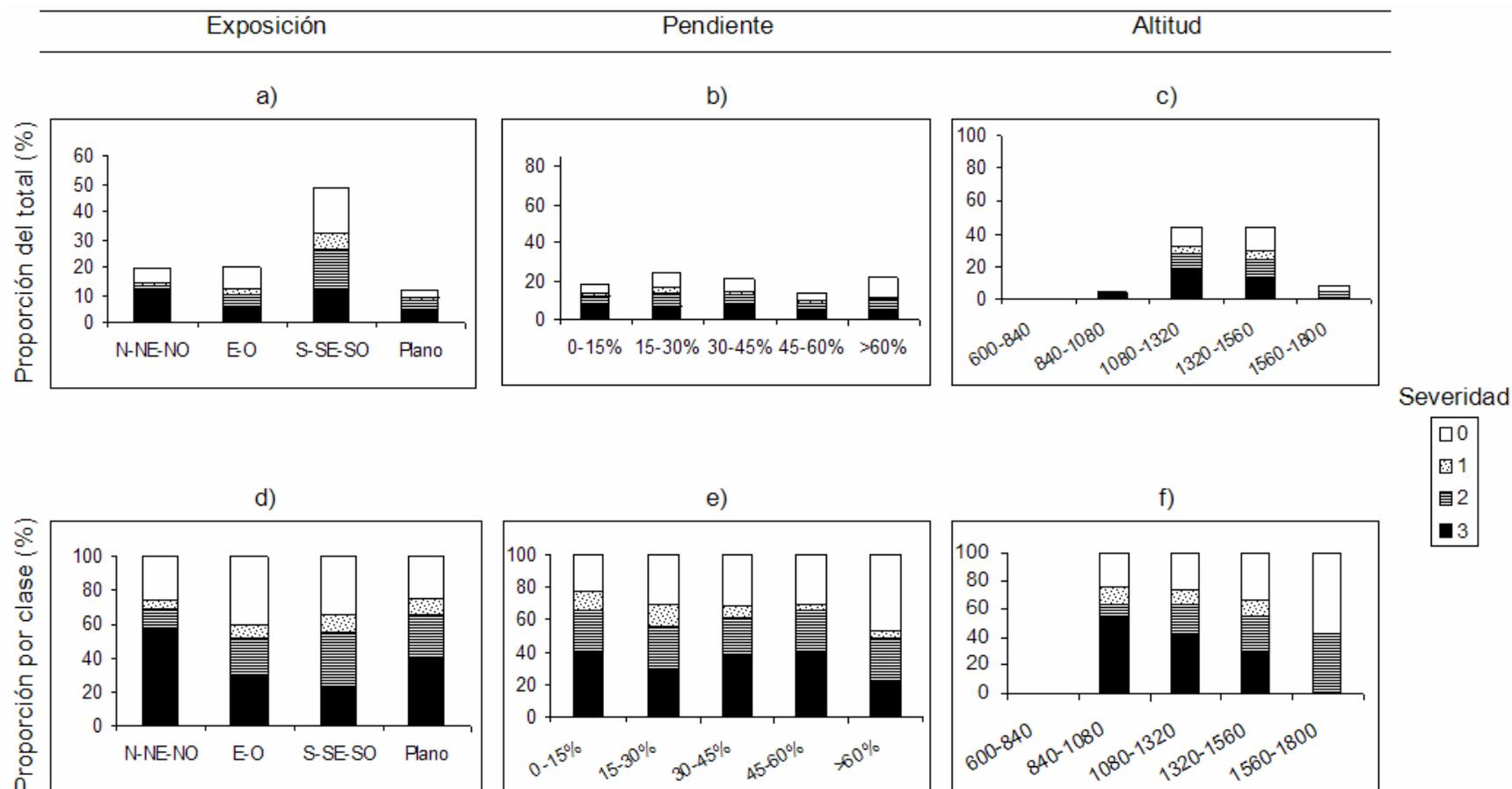


Figura 14. Proporción de severidad del total de la superficie (a, b, c) y por clase de condición topográfica (d, e, f) para bosques de *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp. (a-d) exposición; (b-e) pendiente; (c-f) altitud.

En cuanto a la altitud, se observa que a medida que ésta aumenta, el nivel de afectación por el fuego levemente disminuye, dado por la decreciente superficie afectada en severidad 3 y el total de superficie con daño en cada clase (figura 14 c, f). Esto tiene su explicación en que gran parte de la superficie disponible de esta asociación vegetal se ubicó en las zonas Este y Noreste del Parque y entre los 1.080 y 1.560 m s.n.m., sólo descolgándose en altitudes sobre las indicadas infiriendo que el incendio avanzó encajonado por el puelche debido a una correspondiente disminución de las temperaturas.

4.5.2 Bosques de *Nothofagus* spp.

La situación fue similar a la indicada en *A. araucana-Nothofagus* spp. en cuanto a pendiente y exposición. El fuego afectó principalmente a la clase de exposición N-NE-NO, llegando a un 81,7% de la superficie de bosques de *Nothofagus* spp. En esta misma clase, la severidad 3 se encuentra cercana al 50%, corroborando la relación entre severidad e incidencia de radiación y humedad. Por otra parte, en exposición S-SE-SO el fuego afectó un 61% de la superficie correspondiente a un 16% en severidad 3 (figura 15 a, d). Mermoz *et al.* (2005) observaron de igual forma que para condiciones de exposición méxicas, las áreas quemadas eran bastante menores que las xéricas.

El fuego en bosques de *Nothofagus* spp. aumentó su incidencia a mayor altitud, siendo más alta entre 1.080 y 1.320 m s.n.m. con un 80% de la clase, disminuyendo posterior a los 1.560 m s.n.m. La severidad 3 tuvo mayor alcance, entre los 1320 y 1560 m .s.n.m. (figura 15 c, f).

4.5.3 *Festuca* sp. y *Nothofagus antarctica-Festuca* sp.

La presencia de *Festuca* sp. en el área de estudio aumentó la posibilidad de que el fuego provocara una severidad 3, lo que se infirió a raíz de que por sí sola corresponde a la cobertura vegetal más afectada en el área, respondiendo de igual forma a cualquier variante topográfica (figura 16), seguido a que por la estación y bajas precipitaciones en el momento del incendio era esperable que presentara un alto nivel de combustibilidad.

En terreno fue posible observar que en áreas donde *Festuca* sp. no era abundante, la regeneración vegetativa de *N. antarctica* era más numerosa. Sin embargo, en las áreas donde existía una capa continua de esta herbácea, la severidad 3 alcanzó entre un 56 y 71% en las clases de exposición (figura 17a, d). Por lo demás, el nivel de daño por el fuego en *N. antarctica-Festuca* sp. fluctuó entre 76 y 100%, quedando sólo pequeñas áreas sin quemar que correspondieron a 5,4 ha de la clase de exposición S-SE-SO, seguido de 2,2 ha repartidas entre E-O y terrenos planos.

En cuanto a la pendiente, existieron pequeñas áreas en las que el fuego no tuvo alcance, sin embargo, éstas fueron mínimas respecto al área disponible. Dentro de esta superficie no se observó ninguna tendencia frente a la severidad (figura 17b, e).

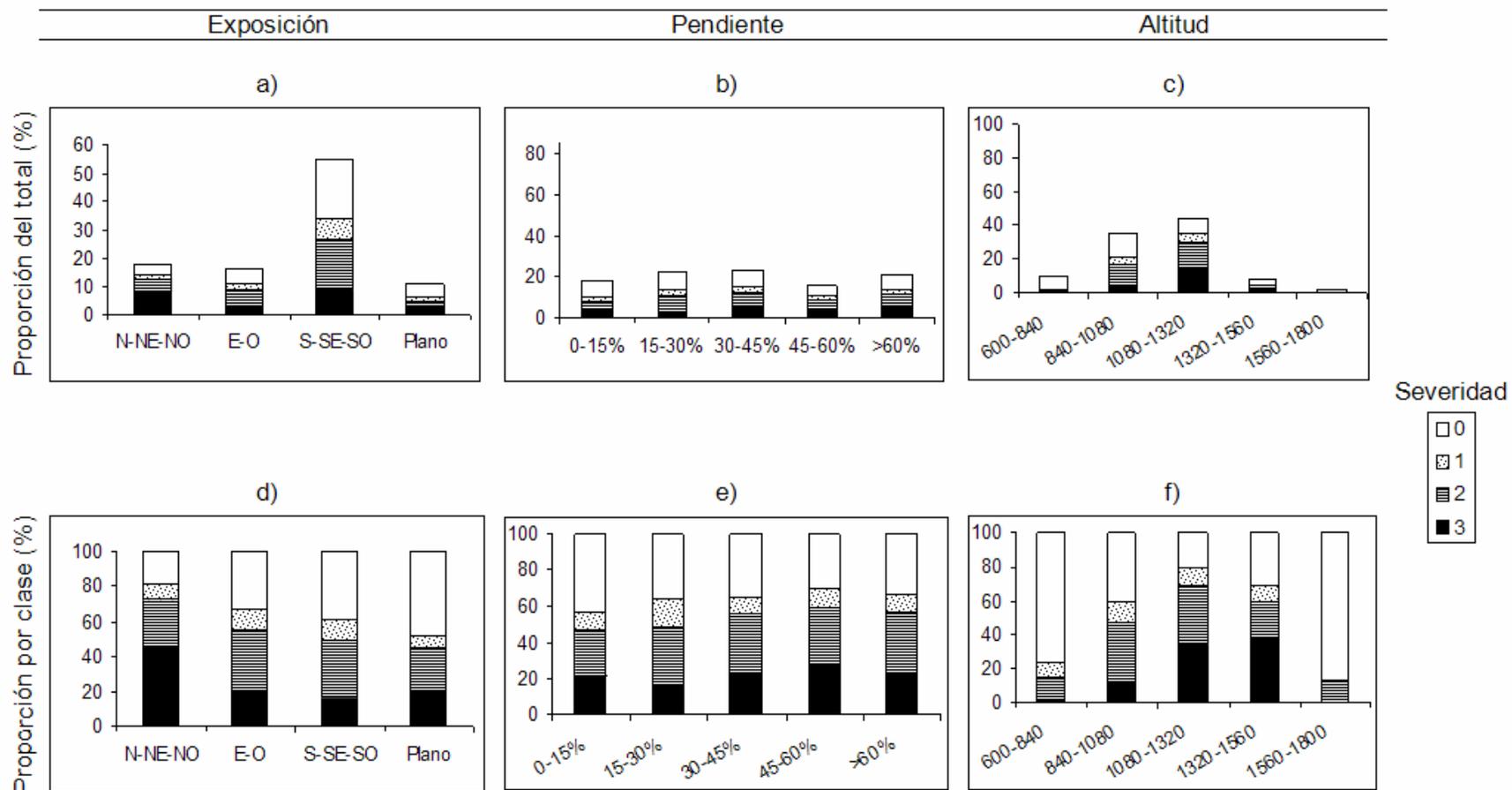


Figura 15. Proporción de severidad del total de la superficie (a, b, c) y por clase de condición topográfica (d, e, f) para bosques de *Nothofagus* spp. (a-d) exposición; (b-e) pendiente; (c-f) altitud.

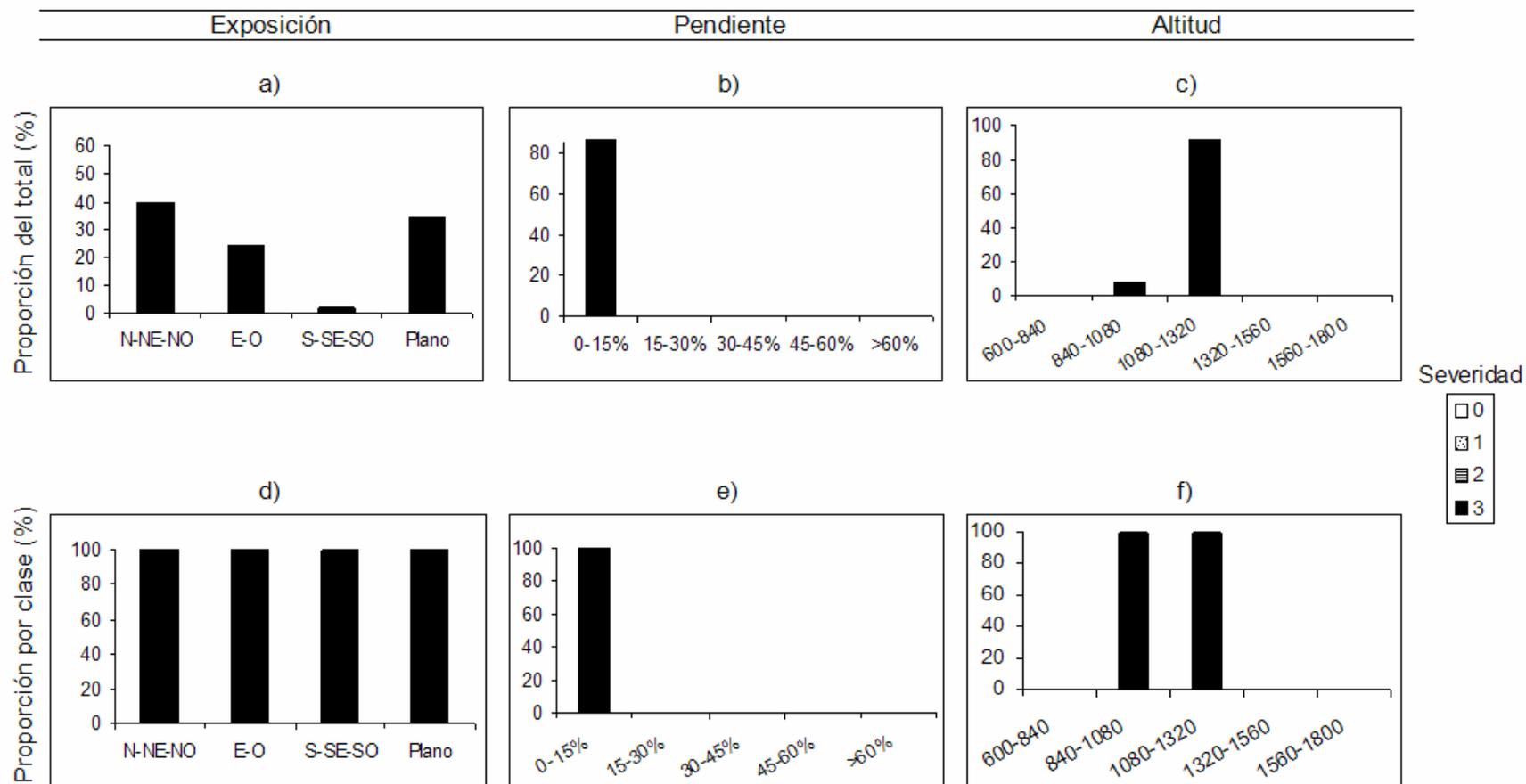


Figura 16. Proporción de severidad del total de la superficie (a, b, c) y por clase de condición topográfica (d, e, f) para coberturas de *Festuca* sp. (a-d) exposición; (b-e) pendiente; (c-f) altitud.

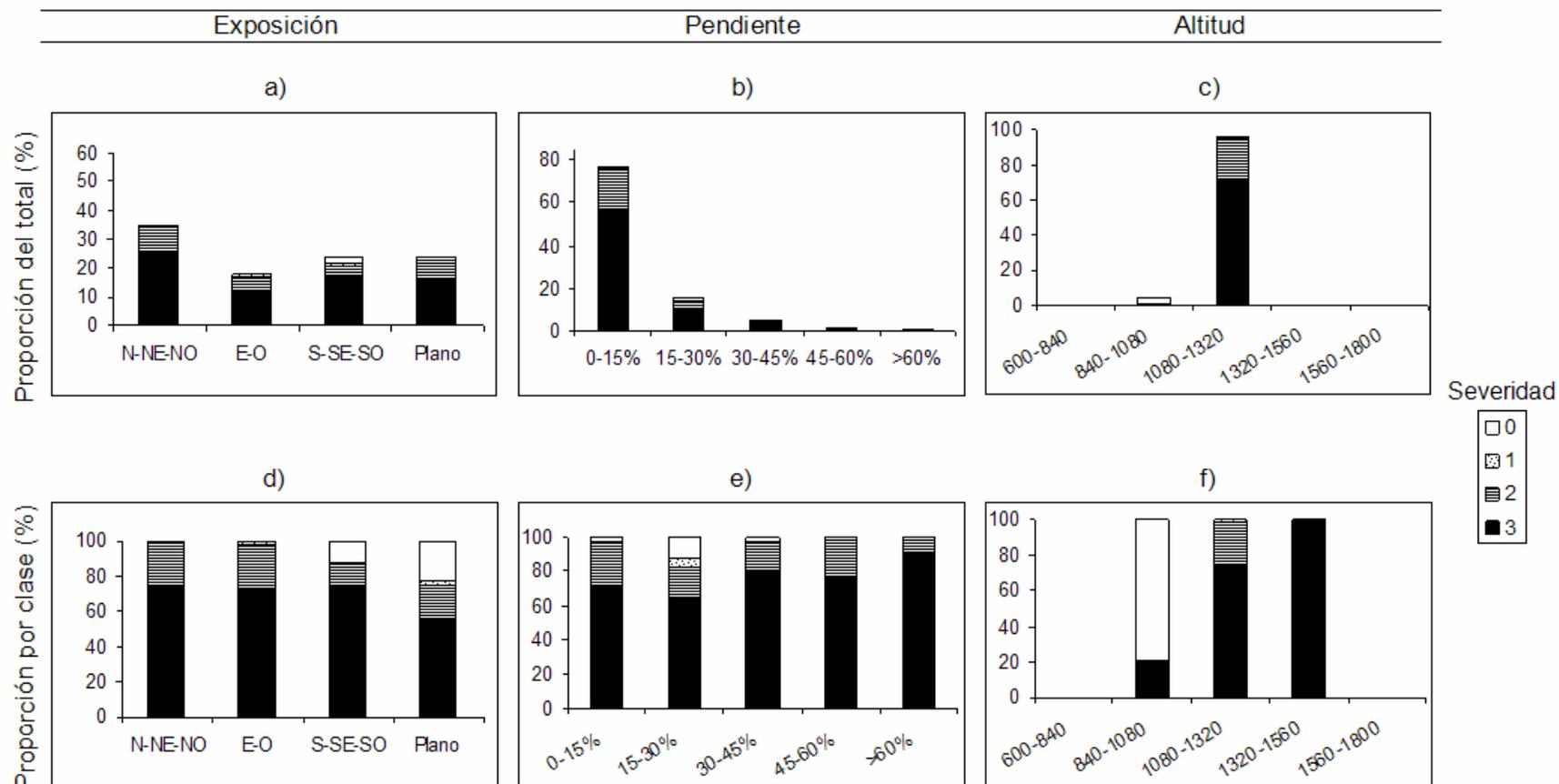


Figura 17. Proporción de severidad del total de la superficie (a, b, c) y por clase de condición topográfica (d, e, f) para coberturas de *Nothofagus antarctica-Festuca* sp. (a-d) exposición; (b-e) pendiente; (c-f) altitud.

Finalmente, las superficies cubiertas por *N. antarctica* acompañado de *Festuca* sp. se encuentran principalmente en altitudes intermedias del Parque. En estas clases aumentó notoriamente la gravedad del daño llegando al 100% entre los 1.320 y 1.560 m s.n.m. (figura 17c, f).

5. DISCUSIÓN

La calidad y toma oportuna de la información utilizada para el presente estudio, permitió obtener resultados respecto a la cuantificación y cualificación del incendio ocurrido en el Parque. Este tipo de estudios en Chile conforma una base para el entendimiento, prevención y gestión de los incendios en nuestros bosques. Consecuentemente, según la matriz de confusión realizada, el presente estudio provee al usuario la confiabilidad necesaria hacia el mapa de severidades del incendio del Parque. Dicho mapa representa la distribución mosaico de los tipos de severidad en el paisaje, que de acuerdo con Díaz-Delgado y Pons (1999) indican múltiples efectos en el ecosistema. Estos efectos se estiman por ejemplo, en la modificación de los micrositos para la regeneración, biomasa consumida por el fuego, perturbación de los hábitat de fauna y pérdida de materia orgánica en descomposición que afecta el ciclo de nutrientes (National Wildfire Coordinating Group, 2001). En este último punto, si bien en el Parque se han generado algunas iniciativas para minimizar el efecto de la erosión, sería necesario crear un plan mayor y eficiente.

La superficie que abarcaron la severidad 3 y 2 indica un alto nivel de mortalidad en la vegetación del Parque. El efecto del fuego en áreas clasificadas con severidad 2 pudo derivarse de que en algunos de estos polígonos se observó una mayor densidad de individuos y adyacentes a cursos de agua. En este sentido, se tuvo una leve correspondencia positiva entre el tipo de severidad existente y la distancia a cursos de agua, indicada por proporción relativa de superficie.

La vegetación pre-fuego influyó en la severidad del fuego. A pesar de no existir mayores antecedentes específicos de las especies en estudio respecto a su combustibilidad, se infirió que la existencia de *Festuca* sp. bajo renovales de *N. antarctica* aumentó la severidad del incendio, debido a la estación estival y consecuente nivel de sequedad y bajas precipitaciones existentes en aquella fecha, sirviendo de puente para la propagación del fuego, básicamente en el valle del Pichi-Malleco, zona mayoritariamente plana del área de estudio. Además, en áreas donde la participación de *Festuca* sp. no fue abundante, la regeneración vegetativa fue más abundante en *N. antarctica* debido a una menor intensidad del fuego. La efectividad de dicha regeneración es necesaria de evaluar en el tiempo, al igual que la regeneración de tocón o la sobrevivencia de individuos con copa viva mermada por el fuego en *A. araucana*.

Respecto a la topografía, ésta tuvo diferente influencia en la severidad respecto de la variable que se trate. De acuerdo con Kushla y Ripple (1997), la mayor relación la presentó claramente la elevación, estableciendo que a mayor altitud mayor severidad. Esto se observó entre los 1.020 y 1.500 m s.n.m., ya que las clases extremas del Parque crearon un efecto borde debido a que pertenecen a otra cuenca de la zona Sur del Parque. Por otra parte, la exposición en relación a la severidad, mostró que la vegetación en áreas más xéricas fue más afectada por el fuego, resultado de una radiación incidente mayor y más directa en comparación con las

mésicas, lo que a su vez genera diferencias de humedad y temperatura (Epting, 2004). La variable de menor relación fue la pendiente, aunque ésta se vio encubierta por el efecto de la vegetación, específicamente de *N. antarctica-Festuca* sp. en severidad 3 y en clases de pendiente baja. No obstante, cambios fuertes de esta variable permitían la existencia de pequeñas cuencas, donde algunas de ellas coincidían con rodales de mayor densidad, cercanos a cursos de agua y pertenecientes a la severidad 2, lo que supone un incendio superficial y de menor intensidad debido a la mayor humedad imperante.

Cabe mencionar, que la superficie disponible bajo una cierta condición topográfica también influyó en la severidad registrada, debido a que pequeñas superficies en una determinada clase se encuentran más predispuestas a ser afectadas en su totalidad por una cierta severidad.

El efecto resultante en bosques de *A. araucana-Nothofagus* spp. estableció que a mayor altitud la severidad fue menor, lo que resultó en forma inversa para cubiertas de *Nothofagus* spp. Por otra parte, la exposición mostró una relación positiva con las dos asociaciones vegetales. En situaciones xéricas, el nivel de daño por el fuego fue mayor; la excepción a esta tendencia fue en áreas planas de bosques de *A. araucana-Nothofagus* spp., dado porque parte de estos rodales se ubicaron en el valle del Pichi-Malleco con presencia de *Festuca* sp. alrededor o dentro del rodal. No obstante, algunos de los individuos en esta situación, fueron observados con regeneración vegetativa adjunta y/o con rastros de copa viva, lo que supone que el cambium no fue completamente dañado a pesar de su abundante corteza desprendida (estos rodales no fueron registrados en el mapa de severidades por no alcanzar el área mínima cartografiada). Finalmente, la pendiente no influyó el registro de severidad e indiferente de la clase que trate.

En cuanto al comportamiento del fuego, se estima que el viento puelche extendió el fuego de Este a Oeste de forma encajonada por el cordón montañoso del Cerro Mesacura y la Meseta de Las Lagunillas (anexo 8). Debido a esto, las severidades registradas en estas zonas fueron producto del “descolgamiento” del fuego con menor intensidad y en donde las llamas quemaron pendiente abajo. Con este viento, el fuego avanzó más de 12 km en una noche (Isaac Bolívar, comunicación personal), llegando al valle del Pichi-Malleco, en donde se estima que situaciones de cubierta de *N. antarctica-Festuca* sp. tienden a ser afectados de forma continua por el fuego, hasta encontrar un quiebre dado por condiciones húmedas. Aparentemente debido al encajonamiento y a la dirección del viento fue que el fuego no afectó a la cuenca Sur del Parque, quedando esta en su totalidad casi sin daño.

6. CONCLUSIONES

- El mapa de severidades evidenció situaciones mosaico en el paisaje dadas por la diversidad de tipos de bosques, así como por la condición topográfica.
- La fotointerpretación realizada entrega una buena fiabilidad al usuario. Esto se debió al bajo número de tipos de severidad disminuyendo los límites difusos, definidos por factores de fotointerpretación claros y una leyenda simplificada. Además, la fase de entrenamiento en la fotointerpretación y las visitas a terreno previas a ésta, permitieron coleccionar antecedentes de importancia para el trabajo de gabinete.
- La vegetación pre-incendio influyó en el registro de severidades. La participación de la especie *Festuca* sp. en la vegetación indujo a un mayor daño, debido a que esta gramínea en época estival y de bajas precipitaciones se espera haya tenido un nivel de desecación importante, por lo que sirvió de puente para el fuego. Este es el caso de los coironales de *Festuca* sp. y la asociación *N. antarctica-Festuca* sp.
- *Araucaria araucana-Nothofagus* spp. y *Nothofagus* spp. manifestaron de forma inversa el efecto de la elevación en cuanto a la severidad del fuego. *Nothofagus* spp. fue más afectada a mayor altitud; este efecto incorpora la influencia de pequeñas superficies en una determinada clase, las que se encuentran predispuestas a ser afectadas en su totalidad por una cierta severidad.
- Los cursos de agua permanentes y temporales disminuyeron levemente el daño por el fuego reduciendo su intensidad, debido a las condiciones ambientales de mayor humedad y menor temperatura.
- La elevación y exposición fueron las variables que más se relacionaron con las severidades y la vegetación. La severidad del fuego aumentó con la altitud; sin embargo las clases extremas no respondieron a esta tendencia debido a que actuaron como efecto borde dado por la cuenca Sur del Parque, que en su totalidad casi no tuvo daño. Por otra parte, las áreas xéricas (N-NE-NO) fueron las más afectadas debido a la mayor radiación incidente y más directa, con el consecuente aumento de temperaturas. La pendiente no estuvo asociada al tipo de registro de severidad indiferente de la clase que trate.
- El puelche trasladó al fuego encajonándolo en la topografía, básicamente hacia el valle del Pichi-Malleco. Esto conllevó a que en la zona Este del Parque el incendio sólo se “descolgara en lenguas”, generando severidad 2. Sin embargo, al estar el estudio sesgado a los límites del Parque esto puede mermar los resultados, debiéndose realizar el estudio del incendio completo para inferir el comportamiento del fuego.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, E.; Sandberg, D.; R. Ottmar. 2000. Mapping severity in Boreal Forest based in aerial photography and remote sensing. In: Fire 2000, Conference, special session on FrostFire. California, 2000. San Diego, Estados Unidos. University of Alaska Fairbanks
- Ávila, G; G. Montenegro; M. Aljaro. 1988. Incendios en la vegetación mediterránea. Capítulo 6. In: Ecología del paisaje en Chile Central, estudio sobre sus especies montañosas. Santiago de Chile, E. Fuentes y S. Prenafeta (eds). Ediciones Universidad Católica de Chile. Pp. 81-89
- Bruno, J; C. Martín. 1982. Los incendios forestales en los Parques Nacionales. Informe. Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires, Argentina. 158 p
- Bucarey, A. 2004. Análisis de la estructura espacial del bosque nativo, en el límite norte de la Región de Los Lagos. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 43 p.
- Caetano, M.; L. Mertes.; J. Pereira. 1994. Using spectral mixture análisis for fire severity mapping. Proceedings of the 2nd Conference on Forest fire research. 11: 667-677.
- Carre, J. 1974. Lectura de las fotografías aéreas. Trad. por José A. Puerta Navarro. París (Francia), Editorial Paraninfo. 247 p.
- Cartwright, D. 1968. Recopilación bibliográfica sobre protección contra incendios forestales. Tesis Ing. Forestal. Santiago (Chile), Universidad de Chile.
- Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. 3ª ed. Madrid, España, Ediciones Rialp S.A. 568 p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF); Corporación Nacional del Medio Ambiente (CONAMA); BIRF; Universidad Austral de Chile; Pontificia Universidad Católica de Chile; Universidad Católica de Temuco. 1997. Proyecto Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales. Valdivia, Chile. 89 p
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2002. Informe anual de Incendios Forestales temporada 2001-2002. Departamento de Estadística. Unidad de Gestión Manejo del Fuego, IX Región. Temuco, Chile.
- De Luis, M; J. González-Hidalgo; J. Raventós. 2003. Efectos erosivos de una lluvia torrencial en suelos afectados por quemas experimentales de diferente severidad. Revista Cuaternario y Geomorfología. 17 (3-4):57-67.

- Díaz-Delgado, R.; X. Pons. 1999. Empleo de imágenes de teledetección para el análisis de los niveles de severidad causados por el fuego. *Revista de Teledetección* 12: 1-5
- Donoso, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 483 p.
- Donoso, C. 1994. Ecología Forestal: El bosque y su medioambiente. 4º edición. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 369 p.
- Donoso, C; A. Lara. 1999. Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Santiago de Chile, Editorial Universitaria. 421 p.
- Epting, J. 2004. Remote sensing of burn severity and the interations between burn severity, topography and vegetation in interior Alaska. Tesis Master of Science. Fairbanks, University of Alaska Fairbanks. 103 p.
- González, A. 2004. Evaluación de la intensidad de daño provocado por el incendio de un bosque de CO-RA-TE en la Reserva Nacional Malleco, Provincia de Collipulli, Región de la Araucanía. Tesis Ing. For. Temuco, Universidad de la Frontera, Fac. de Cs. Forestales. 86 p.
- González, M.; T. Veblen; J. Sibold. 2005. Fire history of Araucaria-Nothofagus forests in Villarrica National Park, Chile. *Journal of Biogeography* 32: 1-15
- Graham, R; S. McCaffrey; T. Jain. 2004. Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. Reporte General Técnico RMRS-GTR-120. Colorado (EE.UU.), Rocky Mountain Research Station. 52 p.
- Gray, R.; B. Andrew; B. Blackwell; A. Needoba; F. Steele. 2002. The effect of physiography and topography on fire regimes and forest communities. *British Columbia, Canadá. Forest Investment Account (FIA)*. 88 p.
- Hajek, E; F. Di Castri. 1976. Bioclimatología de Chile. Dirección de Investigación Vicerrectoría Académica. Universidad Católica de Chile. 214 p.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2004. Compendio estadístico. 2º edición. Santiago (Chile). 297 pp
- Johnson, C. 1970. Parque Nacional Tolhuaca: un estudio de sus límites, vegetación y necesidades recreacionales. Servicio Agrícola y Ganadero. Santiago, Chile. 56 p.
- Kafka, V; S. Gauthier; Y. Bergeron. 2001. Fire impacts and crowning in the boreal forest: study of a large wildfire in western Quebec. *International Journal of Wildland Fire*. 10: 119-127

- Krebs, C. 1986. *Ecología. Análisis experimental de la distribución y la abundancia*. Madrid, Editorial Pirámide. 782 p.
- Kushla, J; W. Ripple. 1997. The role of terrain in a FIRE mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest ecology and management*. 95: 97-107
- Mermoz, M; T. Kitzberger; T. Veblen. 2005. Landscape influences on occurrence and spread of wildfires in patagonian forests and shrublands. *Ecology*. 86(10): 2705-2715
- Michener, W; J. Brunt; S. Staffor. 1994. *Environmental information management and analysis ecosystem to global scales*. Gran Bretaña. Taylor & Francis.
- Morgan, P.; C. Hardy; T. Swetnam; M. Rollins; D. Long. 2001. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire* 10: 329–342
- National Wildfire Coordinating Group. 2001. Fire effects guide. INTERNET: <http://www.fws.gov> (octubre 24, 2005)
- Odum, E. 1978. *Ecología. El vínculo entre las ciencias naturales y las sociales*. Ciudad de México, Compañía Editorial Continental. 195 p.
- Oltremari, J. V.; G. Elzo; P. Oettinger. 1978. Tolhuaca: un ejemplo en la problemática del manejo de Parques Nacionales. *Publicación Técnica N° 2*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 23 p.
- Ramírez, C. 1978. Estudio florístico y vegetacional del Parque Nacional Tolhuaca (Malleco-Chile). Museo Nacional de Historia Natural. *Publicación ocasional N° 24: 1-23*
- Resources Inventory Comunitter. 1998. Terrestrial ecosystem mapping. INTERNET: <http://ilmbwww.gov.bc.ca/risc/pubs/teecdo/tem/indextem.htm> (enero 18, 2006)
- SAG. 1975. Descripción tipológica de algunas unidades del patrimonio forestal del estado. Segunda Parte. Departamento de Patrimonio Forestal. 25 p.
- Sandberg, D; E. Alvarado; A. Bluhm; R. Morse. 2000. Severity map from aerial photography. The role of fire in the Boreal Forest and its impacts on climatic processes. California, marzo 2000. Estados Unidos. pp 34.
- Sandoval, V; P. Real. 1993. Fotografía aérea, fotointerpretación y sistemas de información geográficos aplicados a catastros forestales. *Publicación docente N° 39*. Valdivia (Chile), Facultad de Cs. Forestales, Universidad Austral de Chile. 42 p.

- Sandoval, V; G. Trincado. 2002. Fotogrametría y fotointerpretación forestal. Cuaderno del MEFO N° 6. Fac. de Cs. Forestales. Universidad Austral de Chile. 54 p
- Trabaud, L. 1981. Man and fire impacts on Mediterranean vegetation. *In*: Di Castri, F; D. Goodall; R. Specht. Mediterranean-Type shrub lands. New York (E.E.U.U.), Elsevier. pp. 523-537
- Turner M. G.; W. Hargrove; R. Gardner; W. Romme. 1994. Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science* 5: 731–742.
- Vásquez, A; M. Cuevas; F. González-Alonso. 1999. Evaluación de la superficie afectada por el gran incendio de Cataluña Central de 1998 a partir de imágenes LISS-III y WiFS. *Revista de Teledetección* 12: 1-4
- Veblen, T.; B. Burns; T. Kitzberger; A. Lara; R. Villalba. 1995. The Ecology of the Conifers of Southern South America. Pages 121-155. *In*: N. J. Enright and R. S. Hill (eds.) *Ecology of the Southern Conifers*. Melbourne Univ. Press.
- Whelan, R. 1995. *The ecology of fire*. United Kingdom, Cambridge University Press. 346 p.

ANEXOS

Anexo 1
Abstract and keywords

Zonification of the severity of a wildfire and its quantitative topographic description in the Park Nacional Tolhuaca, IX Region, Chile

Plant association types and different topographic conditions determine the occurrence and intensity of forest fires. In Tolhuaca National Park in Chile, the severity of the forest fire during the 2001-2002 fire season was subject to investigation, in relation to the variables elevation, aspect, slope and the pre-burning vegetation cover. The study utilized aerial photography (scale 1:11.000) taken one month before the fire, as well as a georeferenced aerial photography mosaic. Based on a geographical information system (GIS), a map of fire severity was created, revealing a mosaic pattern in the landscape, due to the diversity of forest types and micro site conditions.

The forest fire affected about 66,9 % of the Park's area (4232,2 ha). Approximately 57% of the Park's area was very strongly affected, represented by the mortality severity 2 and 3.

The topographic variables had a wide range of influence on the fire. A positive relationship finding that a was found between 'elevation' and forest fire severity, higher altitudes the impacts of the fire were stronger. Furthermore, due to higher temperatures and radiation incident combined with less humidity, the forest fire affected mostly xeric areas (N-NE-NW). The slope did not influence the forest fire severity, whereas it was possible to observe in some micro watershed that higher humidity and lower temperatures generated by the proximity of rivers and creeks and the higher stand density suppose the occurrence of superficial less severity ground fires.

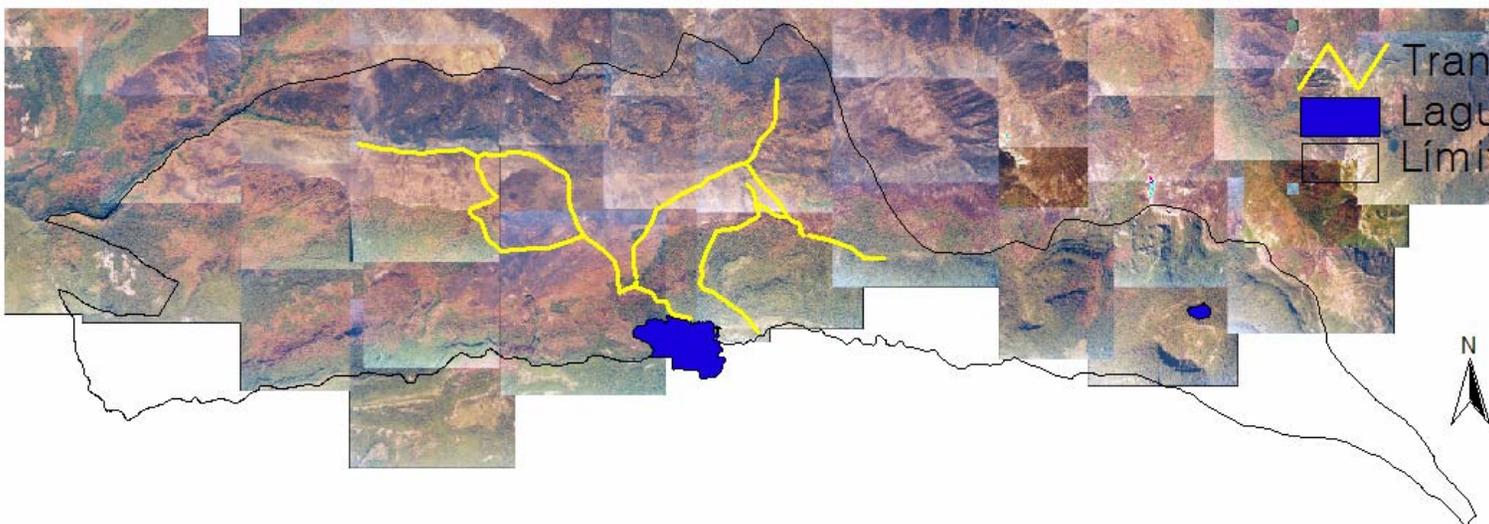
Most affected vegetation types include those plant associations with *Festuca* sp., assuming that this graminea is very (*prone to incineration*)/deflagrable in summer seasons with low precipitations. Due to this, the fire devastated areas covered purely with *Festuca* sp. and *Nothofagus antarctica*-*Festuca* sp. associations at 100% and 96,6%, respectively. The stands of *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp., *Nothofagus* spp. and *Nothofagus antarctica* were affected in 67,6%, 64,6% and 60,4%, respectively.

In the analysis of topographic variables and the pre-burning vegetation cover, showing the forest stands of *A. Araucana*-*Nothofagus* ssp. and *Nothofagus* ssp. responded distinctly: at higher altitudes, the damage caused by the fire in *Nothofagus* ssp. stands increased accordingly, whereas it decreased in mixed stands of *A. araucana*-*Nothofagus* spp. With regard to the aspect, most damage tends to be found in more xeric areas; nevertheless *A. araucana*-*Nothofagus* ssp. also showed strong damage in flat areas of the Pichi-Malleco valley, as there existed stands surrounded by *Festuca* sp., which increased the intensity of fire. In relation with vegetation cover, the slope did not appear to be a factor influencing the severity of fire and damage.

Keywords: natural wildfire, fire behaviour, severity, fire ecology, geographical information systems.

Anexo 2
Transectos realizados para la corroboración de terreno

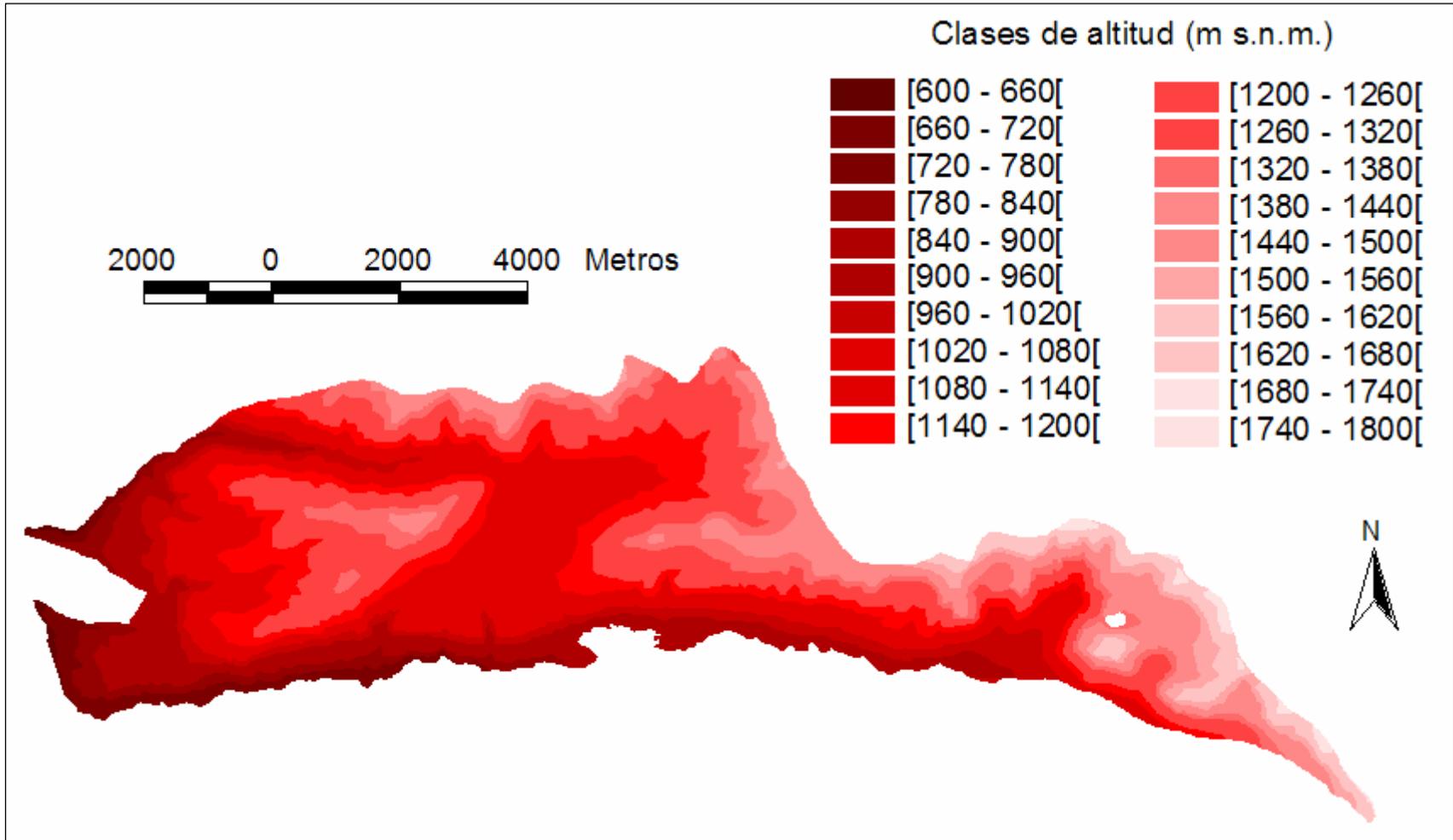
3000 0 3000 Metros



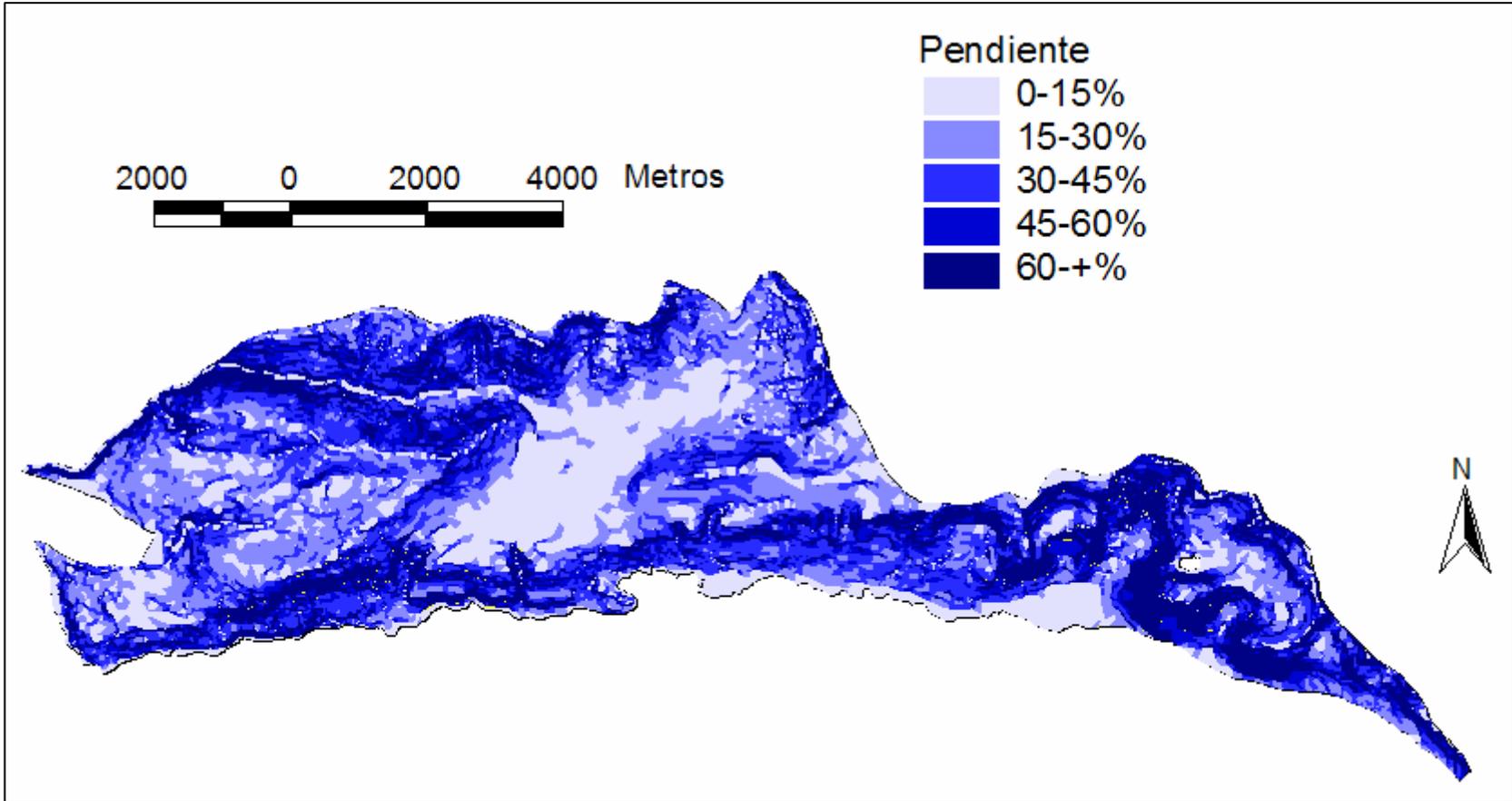
Transectos
Lagunas
Límite Parque



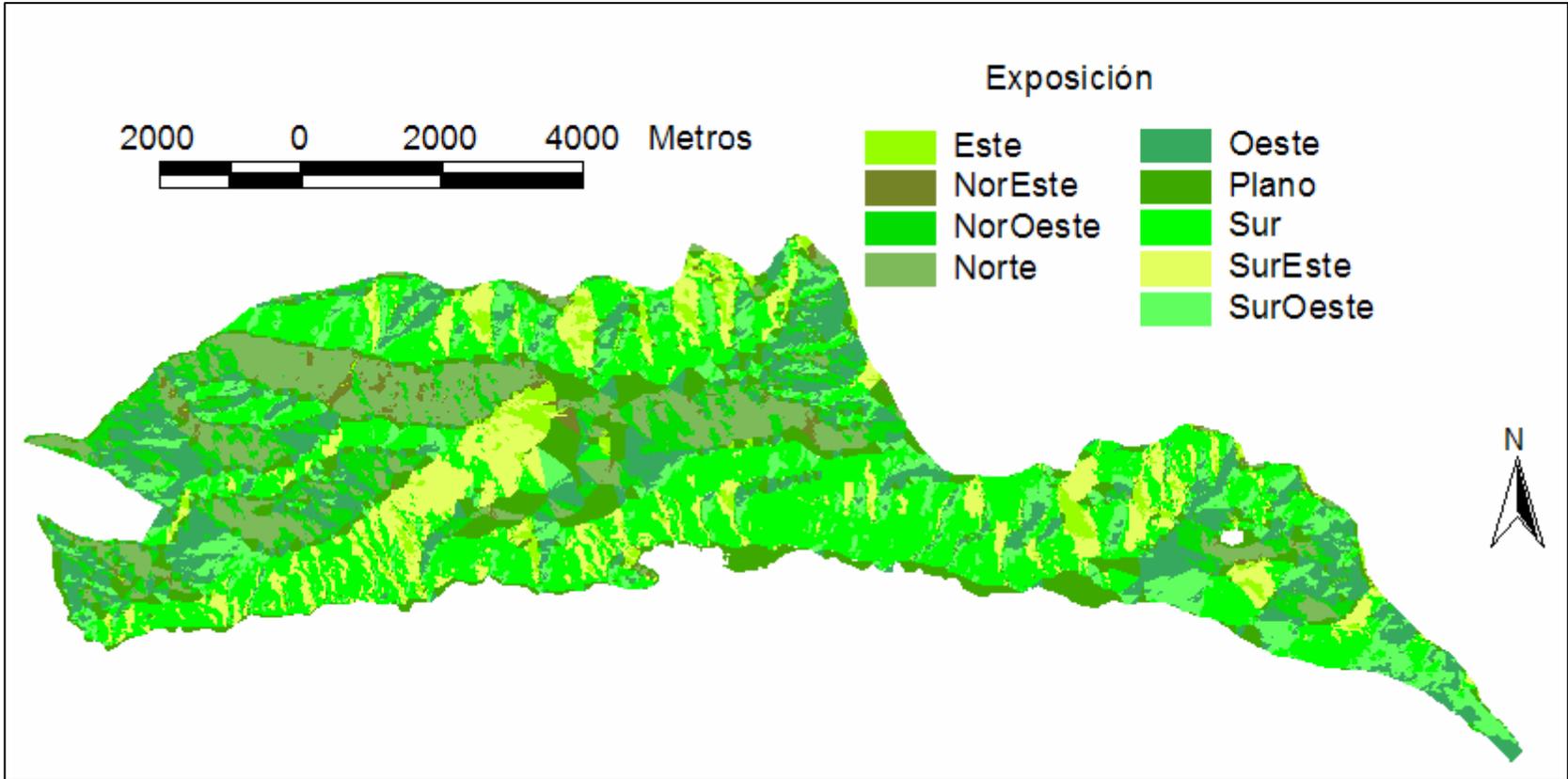
Anexo 3
Modelo de elevación digital



Anexo 4
Mapa de clases de pendiente



Anexo 5
Mapa de clases de exposición



Anexo 6
Fotografías de características por tipo de severidad de incendio



Foto 1 y 2. Aspecto desde la distancia del bosque afectado.



Foto 3. Raíces tipo zancos con evidente capa de mantillo consumido por el fuego.



Foto 4. Corteza desprendida por el fuego en individuo de *Nothofagus* spp.

Fotografías de Severidad 3.
NOTA: Todas las fotografías fueron captadas en noviembre 2005.



Foto 5. Aspecto desde la distancia del bosque afectado.



Foto 7. Corteza semi desprendida en individuo de *Nothofagus* spp.

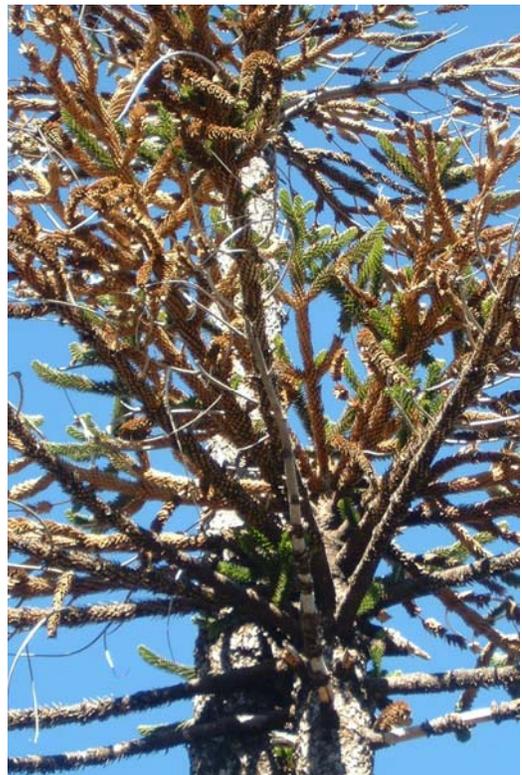


Foto 8. Copa de *Araucaria araucana* con brotes vivos.

Fotografías de Severidad 2.

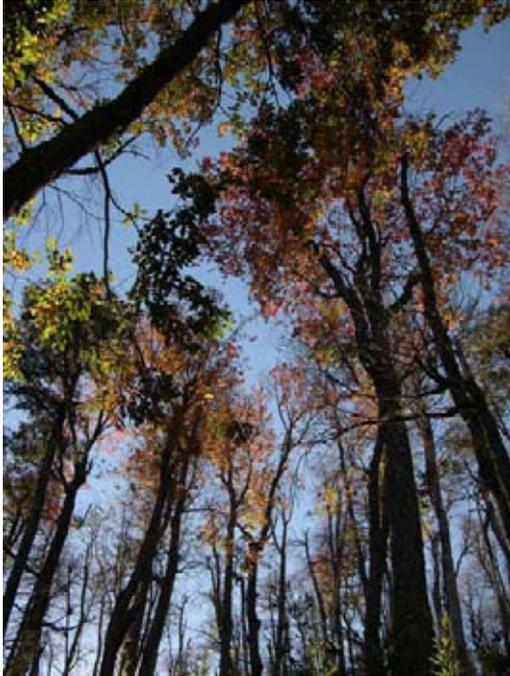


Foto 9. Aspecto desde la distancia del bosque afectado.



Foto 10. Regeneración vegetativa en *Nothofagus alpina*.

Fotografías de Severidad 1.



Foto 11. Cobertura de copas sin daño.

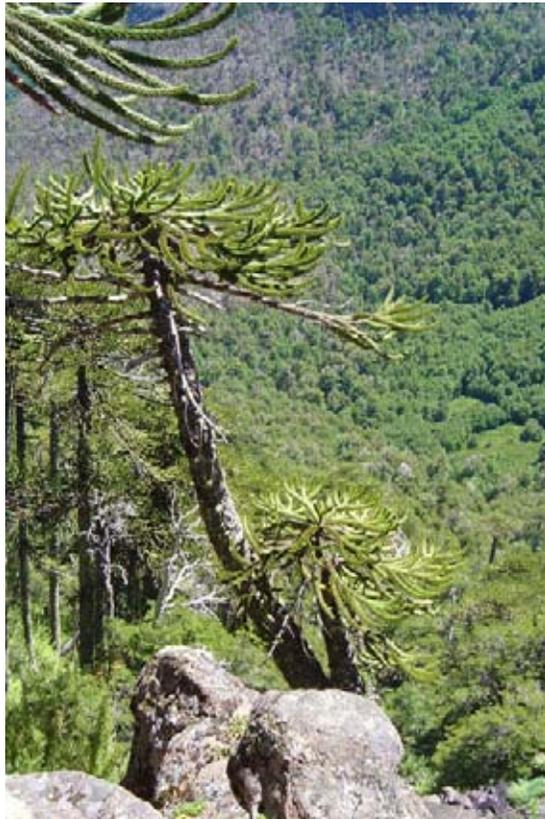
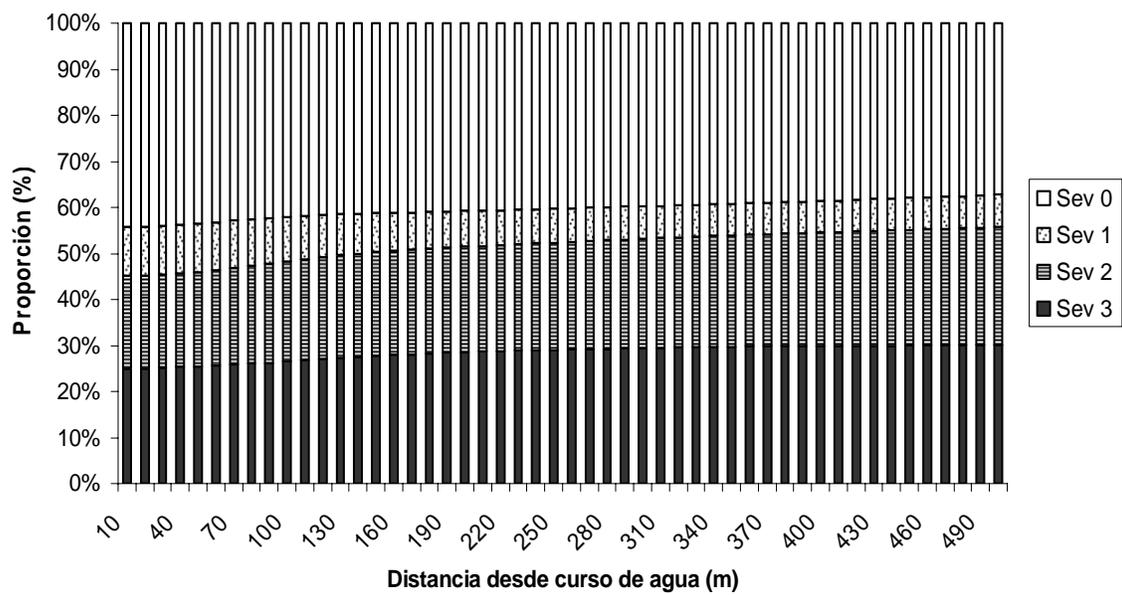


Foto 12. Vista general de bosque *Araucaria araucana*-*Nothofagus* spp. no afectado por el fuego.

Fotografías de Severidad 0.

Anexo 7

Proporción de superficie por severidad según distancia a curso de agua.



Anexo 8
Comportamiento estimado del fuego

