

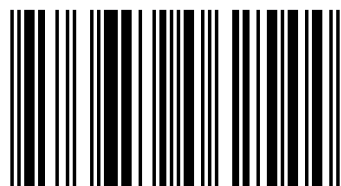
## Estudio de ecosistemas longevos de Araucaria en el Sur de Chile

Los bosques de Araucaria araucana y Nothofagus son ecológicamente importantes porque se desarrollan centenarios y milenarios. Son endémicos del Sur de América Latina, sin embargos, actualmente están relegados a la Cordillera de los Andes y de la Costa, en Parques y Reservas en el centro-sur de Chile. A pesar de su importancia ecológica, es incipiente aún el conocimiento acerca de su disposición espacial, como también su composición y estructura a lo largo de su distribución geográfica. En la presente investigación se clasifican los bosques del Parque Nacional Conguillío y se demuestra el aporte del satélite Landsat TM. Se aplican diversos métodos en el ámbito de la teledetección para estudiar el bosque nativo. A partir de ello, se obtiene una clasificación supervisada que contiene 33 categorías, cuya matriz de confusión entrega un índice  $\kappa$  de 0,75. Este resultado representa suelos con poca vegetación, vegetación de herbáceas, bosque, agua y depósitos volcánicos. Se concluye que la metodología basada en múltiples criterios de supervisión fue apropiada para clasificar estos bosques templados. Este libro está dirigido para aquellas personas que valoran la naturaleza.



**Nelson Hernán Ojeda Ojeda**

Ingeniero Forestal por la U. Austral de Chile; Doctor Ingeniero de Montes, Universidad de Córdoba, España; Postdoctorado, Universidad de Valladolid, España. Área de investigación, Teledetección aplicada en ecosistemas boscosos. Académico del Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de la Frontera, Chile.



978-3-659-06254-4

editorial académica española



Nelson Hernán Ojeda Ojeda (Ed.) · Marysol Alvear Zamora · Miguel A. Herrera M.

## Estudio de ecosistemas longevos de Araucaria en el Sur de Chile

Uso del satélite Landsat Thematic Mapper

**Nelson Hernán Ojeda Ojeda (Ed.)**  
**Marysol Alvear Zamora**  
**Miguel A. Herrera M.**

**Estudio de ecosistemas longevos de Araucaria en el Sur de Chile**



**Nelson Hernán Ojeda Ojeda (Ed.)  
Marysol Alvear Zamora  
Miguel A. Herrera M.**

# **Estudio de ecosistemas longevos de Araucaria en el Sur de Chile**

**Uso del satélite Landsat Thematic Mapper**

**Editorial Académica Española**

## **Impressum / Aviso legal**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Información bibliográfica de la Deutsche Nationalbibliothek: La Deutsche Nationalbibliothek clasifica esta publicación en la Deutsche Nationalbibliografie; los datos bibliográficos detallados están disponibles en internet en <http://dnb.d-nb.de>.

Todos los nombres de marcas y nombres de productos mencionados en este libro están sujetos a la protección de marca comercial, marca registrada o patentes y son marcas comerciales o marcas comerciales registradas de sus respectivos propietarios. La reproducción en esta obra de nombres de marcas, nombres de productos, nombres comunes, nombres comerciales, descripciones de productos, etc., incluso sin una indicación particular, de ninguna manera debe interpretarse como que estos nombres pueden ser considerados sin limitaciones en materia de marcas y legislación de protección de marcas y, por lo tanto, ser utilizados por cualquier persona.

Coverbild / Imagen de portada: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Verlag / Editorial:

Editorial Académica Española

ist ein Imprint der / es una marca de

AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Alemania

Email / Correo Electrónico: [info@eae-publishing.com](mailto:info@eae-publishing.com)

Herstellung: siehe letzte Seite /

Publicado en: consulte la última página

**ISBN: 978-3-659-06254-4**

Zugl. / Aprobado por: Córdoba, Universidad de Córdoba, Tesis Doctoral, 2001

Copyright / Propiedad literaria © 2012 AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Todos los derechos reservados. Saarbrücken 2012

**Contribución al estudio de ecosistemas longevos de *Araucaria  
araucana* en el Parque Nacional Conguillío, centro-sur de Chile: uso  
del satélite Landsat Thematic Mapper.**

**Autores:**

Nelson Ojeda Ojeda

Universidad de La Frontera, Departamento de Ciencias Forestales, Temuco, Chile

Miguel Herrera Machuca

Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería Forestal, Córdoba, España

Marysol Alvear Zamora

Alexis Lillo Mella

Francisco Reyes Carrasco

Universidad de La Frontera, Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales, Temuco,  
Chile

Hector Soto Vera.

Corporación Nacional Forestal, Provincial Huasco, Vallenar, Chile



<b>1. Introducción</b>	5
1.1 La importancia del P.N. Conguillío	5
1.2 Antecedentes acerca del P.N. Conguillío	5
1.3 Los bosques de <i>Araucaria araucana</i> (Mol.) K. Koch destacan por su endemismo	5
1.4 Distribución mundial de la especie <i>Araucaria araucana</i>	6
1.5 Estudios de vegetación desarrollados en <i>Araucaria araucana</i>	6
1.6 Especies dominantes que acompañan a la especie <i>Araucaria araucana</i> en el P.N. Conguillío	6
1.7 <i>Araucaria araucana</i> y efectos antropogénicos en la Novena Región de La Araucanía	6
1.8 Estudios desarrollados en el P.N. Conguillío y proximidades	7
1.9 Desarrollo de cartografía de la vegetación a escala amplia en Chile	7
1.10 Desarrollo de cartografía boscosa comprendida en el P.N. Conguillío	8
1.11 Experiencias con el uso de la percepción remota en el mundo	9
1.12 Percepción remota y estado de desarrollo de los bosques en el mundo	9
1.13 Percepción remota en Parques Nacionales en el mundo	10
1.14 Aplicación de diversos sensores remotos para estudios de la agricultura en Chile	10
1.15 Aplicaciones de percepción remota en bosque nativo en Chile	10
1.16 Percepción remota y estudios en <i>Araucaria araucana</i>	11
<b>2. Metodología</b>	11
2.1 Apoyo logístico	12
2.2 Apoyo en laboratorio	12
2.3 Cartografía de referencia utilizada	12
2.4 Antecedentes descriptivos e interpretativos de la vegetación	13
2.5 Incorporación de modelos topográficos	13
2.6 Corrección atmosférica	14
2.7 Corrección geométrica	15
2.8 Filtrado de imagen	15
2.9 Composición color	15
2.10 Cocientes e índices de vegetación	15
2.11 Análisis de componentes principales	16
2.12 Generación y selección de nuevas bandas	17
2.13 Definición de las categorías	17
2.14 Clasificación de la imagen	17
2.15 Clasificador de mínima distancia	18
2.16 Mediciones de terreno	18

2.17 Clasificación precisa	19
2.18 Análisis categórico multivariante	19
2.19 Los Sistemas de Información Geográfica	20
<b>3 Resultados y Discusión</b>	20
3.1 Análisis de las bandas	20
3.2 Corrección atmosférica	21
3.3 Mejoras y contrastes en la imagen	21
3.4 Análisis de componentes principales	22
3.5 Composición de bandas	24
3.6 Tamaño de la muestra, áreas de entrenamiento y categorías, derivado de TM1, 2 y 3 y la clasificación supervisada para 33 categorías	25
3.7 Índice de Vegetación	27
3.8 Firma espectral de bandas Landsat TM correspondientes a la imagen "volcán Llaima"	31
3.9 Firmas espectrales landsat TM obtenidas por la combinación de bandas y cocientes	34
3.10 Análisis de la matriz de error para TM1, 2 y 3, y 33 categorías	37
3.11 Fiabilidad usuario y productor derivado de la matriz de error	38
3.12 Descripción de las categorías en el P.N. Conguillío derivadas de la clasificación supervisada	42
3.13 Agrupación de categorías "tipo-bosque" según especies dominantes y origen geológico, derivado de TM1, 2 y 3	58
3.14 Relación entre las categorías tipo-bosque y altitud	59
3.15 Amplitud de la altitud para las comunidades tipo-bosque	60
3.16 Relación entre las comunidades tipo-bosque y NDVI	63
<b>4 Bibliografía</b>	66

## 1. Introducción

Los bosques longevos conformados por *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch poseen gran importancia, debido principalmente a que ésta conífera sobrepasa con relativa facilidad los 1000 años de edad, por su parte, los bosques de *Nothofagus* pasan varias centurias. Lo anterior adquiere mayor importancia porque parte de ellas se distribuyen endémicamente al interior de parques nacionales en Chile. Por ello, el interés del presente trabajo en estudiar los ecosistemas boscosos y volcánicos en el Parque Nacional Conguillío debido a que son únicos en el mundo, y cuya importancia es de valor mundial formando parte de Áreas Silvestres Protegidas. Del mismo modo, es una contribución puesto que permite valorar la utilidad del satélite Landsat Thematic Mapper para el estudio del bosque nativo en el centro-sur de Chile.

1.1 *La importancia del P.N. Conguillío.* El Parque Nacional Conguillío (en lo sucesivo, P.N. Conguillío), resguarda aún abundantes bosques autóctonos en el centro-sur de Chile de la Región de La Araucanía (IUCN, 2010).

1.2 *Antecedentes acerca del P.N. Conguillío.* La Unidad de Manejo Conguillío "Los Paraguas", fue creada en 1940 (P.N. Los Paraguas) y en 1970 se consolida el "P.N. Conguillío". Ambos Parques colindaban, y en 1987 se fusionan en uno denominándose P.N. Conguillío. El 30 de junio de 1983 la UNESCO en el marco del programa del Hombre y la Biosfera, a petición del Gobierno de Chile, pasa a integrar la Reserva de la Biosfera "Araucarias", que comprende el P.N. Conguillío y la Reserva Forestal Alto Bío-Bío. Esta área de estudio integra la Red Internacional de Reservas de la Biosfera en representación de la "Provincia Biogeográfica de los Bosques de Araucaria Chilenos", CONAF (1993) y CONAF (1994).

1.3 *Los bosques de Araucaria araucana (Mol.) K. Koch destacan por su endemismo.* Se desarrollan en el Sur de Chile y Argentina, los cuales conforman ecosistemas únicos en el mundo siendo una de las especies forestales más longevas del planeta, superando con facilidad los 1000 años de edad (Montaldo, 1974; Burns, 1993; Donoso, 1993). Sobre esta conífera milenaria, el gobierno de Chile ha mostrado gran interés clasificándola en la categoría vulnerable. En Chile, esta especie es declarada Monumento Natural (Benoit, 1989; República de Chile, 1990; Hechenleitner *et al.*, 2005; IUCN, 2010). Además, desde el año 2000 *A. araucana* es incluida en el Apéndice I de la Convención del Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna (CITES; Convention on International Trade in Endangered Species) (CITES, 2010).

1.4 *Distribución mundial de la especie Araucaria araucana.* Se distribuye en el centro-sur de Chile y Sudoeste de Argentina (Veblen, 1982). Respecto a la distribución de estos bosques, Lara *et al.* (1997) hacen referencia a que crecen únicamente en la Octava y Novena Regiones en Chile, y en la Provincia de Neuquén, en Argentina. Fuentes (1994) plantea que esta especie presenta una distribución amplia al interior del P.N. Conguillio.

1.5 *Estudios de vegetación desarrollados en Araucaria araucana.* Se tratan diversos aspectos acerca de la especie *A. araucana*, como su dendrocronología (Pollmann, 2003; González, 2005); dinámica (Burns, 1993; Veblen *et al.*, 1996; González *et al.*, 2005); regeneración (Donoso y Schmidt, 1991); conservación (Lara *et al.*, 1997); ecología (González y Veblen, 2007; Donoso *et al.*, 2008); variación genética (Bekessy *et al.*, 2004) y silvicultura (Drake *et al.*, 2005). El autor Castri (1976) desarrolla trabajos de ecología.

1.6 *Especies dominantes que acompañan a la especie Araucaria araucana en el P.N. Conguillio.* Destacan los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio* (P. et E.) Krasser), coigue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.), ñirre (*Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst. y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. & Endl.) Oerst.), roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) (Dollenz, 1981; Ramírez *et al.*, 1997; Pollmann, 2003). Donoso (1997a) plantea que los árboles de *N. antarctica* pertenecen a la familia fagáceae y son árboles que miden hasta 15-25m de altura. Es común encontrar árboles de esta especie en las partes más altas y en sectores muy fríos o muy húmedos en la Cordillera de los Andes. Por su parte, Hoffmann *et al.* (1998) mencionan que *N. dombeyi* son los árboles latifoliados más grandes del bosque chileno, llegando a 50m de altura y 4 o más de diámetro a la altura del pecho (Arroyo *et al.*, 1997). Por su parte, la especie latifoliada *N. pumilio* es un árbol de 15 a 30m de altura, según donde habite y hasta más de 1m de diámetro. En la Cordillera de los Andes forma masas achaparradas en el límite arbóreo de la vegetación (Hildebrand-Vogel *et al.*, 1990; Donoso, 1997b). Los bambúes no corresponden a especies arbóreas, pero su cobertura en este trabajo es muy importante ya que sus categorías en áreas abiertas también son captadas por el satélite landsat. Es posible agregar, por lo tanto, que periódicamente muchas de las poblaciones locales de *Chusquea tenuiflora* Phil (Tihuén) florecen y mueren sincronizadamente cada 2 o 3 año en áreas que cubren varios kilómetros cuadrados. También destaca *Chusquea quila* Kunth (Quila), especie que alcanza en estos ecosistemas alta cobertura (Schmidt, 1977).

1.7 *Araucaria araucana* y efectos antropogénicos en la Novena Región de La Araucanía. Esta especie ha sufrido el efecto humano, por ello San Martín *et al.* (1991) citan en un estudio sinecológico que las masas forestales del Valle y Precordillera se encuentran en comunidades antropizadas. Únicamente se salvan de este efecto en las regiones muy inaccesibles de la Cordillera de los Andes, donde se conservan parcialmente inexploradas, como ocurre en el P.N. Conguillío (Weinberger y Ramírez, 1999). El impacto sobre la vegetación regional ha sido histórica a través del uso del fuego. Los mapuches (o araucanos), población autóctona del área, usaban este elemento sobre la vegetación como táctica defensiva, frente a la llegada de los europeos, por lo que algunas áreas forestales han tenido considerables alteraciones. Junto a lo anterior, se debe mencionar que en la Novena Región de La Araucanía, los flujos de lava y depósitos de cenizas han destruido miles de hectáreas de bosques sobre los flancos de los volcanes Llaima y Sierra Nevada en el P.N. Conguillío (Veblen, 1985).

1.8 *Estudios desarrollados en el P.N. Conguillío y proximidades.* El autor Veblen (1982) realiza un estudio sobre dinámica regenerativa de bosques maduros localizado sobre el lado Norte del “volcán Llaima” (38°40'S, 71°39'O). Por su parte, Schmidt (1977) desarrolla un trabajo en bosques vírgenes de *A. araucana* hacia el Oriente del P.N. Conguillío pero localizados en la misma latitud, entre los 1.370m.s.n.m. y 1.800m.s.n.m. Quilquén, Lolca, Punta Negra y Chilpaco. Los antecedentes sobre crecimiento de *A. araucana* en los distintos bosques naturales permiten definirla como una especie vigorosa y de buenas características (Schmidt *et al.*, 1980).

1.9 *Desarrollo de cartografía de la vegetación a escala amplia en Chile.* La cartografía de Chile ha sido desarrollada por varios autores, entre ellos Fuentes (1994), CONAF/CONAMA/BIRF (1999) y Luebert y Pliscoff (2006). El investigador Quintanilla (1974), plantea que en la práctica fitogeográfica se dan mosaicos de bordes difusos con cambios continuos de la latitud y la altitud lo cual ha dificultado su análisis. De acuerdo al mapa de vegetación primitiva realizado para "Chile Templado", la fitogeografía-ecológica de Chile a escala 1:1.000.000, en el área de estudio se indican importantes superficies con bosques de *A. araucana*, *N. dombeyi*, y *N. obliqua*. Este autor sugiere denominar el área comprendida entre los paralelos 37° y 44° latitud Sur, (dentro del cual se localiza el P.N. Conguillío) como "Chile Templado" en atención a la fitogeografía de la zona. En relación a la cartografía y su aporte en el conocimiento de la vegetación, el mismo autor (Quintanilla, 1974) menciona que los trabajos realizados en la década de los 70 cuentan con material cartográfico cuya calidad es muy heterogénea. En estos lugares se ha recurrido a una cartografía fisionómica de la vegetación chilena agrupada bajo el concepto de "formación vegetal" y

que se asemeja mucho a aquella de "tipos de vegetación". Se ha referido, en un principio, a la presentación de las comunidades vegetales que poseen una cierta homogeneidad fisionómica y biológica sin referencia necesaria a su composición florística. En este sentido, las formaciones evolucionan por etapas sucesivas en unidades de vegetación normalmente denominadas "series de vegetación". Respecto a la incorporación de la vegetación a la cartografía, Benoit (1996) se refiere a la descripción de las categorías en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado "SNASPE", utilizando para ello la clasificación biogeográfica "Sistema básico de Clasificación de la Vegetación Nativa Chilena" realizada por Gajardo (1994). En este contexto, la categoría del P.N. Conguillío corresponde a la Región ecológica de bosque caducifolio, Sub-Región del Bosque Caducifolio Andino, y la Formación de Bosque Caducifolio Mixto de la Cordillera Andina. También la superficie boscosa del P.N. Conguillío tiene cabida en otra clasificación, ésta es la Región del Bosque Andino-Patagónico, Sub-Región de las Cordilleras de La Araucanía y la Formación de Bosque Caducifolio Alto-Andino con *A. araucana*. Más recientemente, Fuentes *et al.* (1996) citan que en Chile se han elaborado diversos documentos, con proposiciones de clasificación y mapas de la biota. Siendo Chile un país en que los gradientes latitudinales, altitudinales, térmicos, hídricos, edáficos y radiativos son evidentes y complejos, no es de extrañar que las clasificaciones no concuerden. Por lo tanto, el esquema propuesto en el presente estudio debe ser fisionómico-funcional, por cuanto las unidades deben ser fácilmente reconocibles en terreno y deben poder relacionarse con restricciones ecológicas conocidas y cartografiables.

1.10 *Desarrollo de cartografía boscosa comprendida en el P.N. Conguillío.* El Instituto Forestal de Chile preparó una clasificación preliminar del bosque nativo de Chile (Donoso, 1993). Para ello, se usaron los antecedentes entregados por los numerosos trabajos realizados previamente en relación con la clasificación de los bosques chilenos y considerando nuevos aportes entregados por investigaciones más específicas, se realizó una nueva clasificación tipológica de la vegetación forestal chilena. El documento de trabajo se denomina "Tipos forestales de los bosques nativos de Chile", el que está en ámbito nacional a una escala 1:2.500.000. El trabajo realizado significó una reclasificación del bosque nativo de Chile, la cual pasó a tener carácter oficial a través del Reglamento N°259 del Decreto Ley 701 (Donoso, 1981). Un esfuerzo para resolver aspectos de zonación bioclimática en la Novena Región de Chile y de mayor actualidad que comprende la latitud del Parque Conguillío en los Andes, lo realiza Amigo y Ramírez (1998), para ello se relacionó la distribución de comunidades boscosas con la temperatura de la zona. Como una manera de actualizar y mejorar la información sobre el suelo y el bosque nativo chileno, el gobierno elabora el "Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile", recientemente entre los años 1994 y 1997 (CONAF/CONAMA/BIRF, 1999). Mediante este trabajo se logra determinar

el uso del suelo para todo el territorio nacional. Este catastro de bosque nativo se realizó a una escala 1:50.000 para toda el área forestal del país. Para caracterizar la vegetación se utilizó en el presente estudio, la metodología conocida como "Carta de Ocupación de la Tierra" sugerida por Etienne y Contreras (1981). Para la confección de este catastro se utilizaron fotos aéreas pancromáticas (40.000 aproximadamente) e imágenes de satélite.

1.11 *Experiencias con el uso de Landsat TM en el mundo.* Existe la necesidad por conocer mejor los ecosistemas boscosos en el mundo, para ello se han utilizado metodologías como las basadas en sensores remotos (Wright y Gallant, 2007). Sin embargo, existe el imponderable que grandes extensiones se distribuyen en áreas con relieve abrupto; y parte de ella está dominado por varias especies arbóreas, dificultando su interpretación desde sensores remotos. A pesar de ello, la percepción remota ha demostrado ser una herramienta de utilidad para la clasificación de la vegetación (Apan, 1997; Sesnie *et al.*, 2008; Liberti *et al.*, 2009). En este mismo contexto, a nivel mundial se han realizado clasificaciones y mapeos muchos de ellos basados en la estructura de los bosques (Jakubauskas y Price, 1997; Hall *et al.*, 2006). Por otro lado, se han efectuado clasificaciones basadas en la composición de las especies (Mohammadi y Shataee, 2010). Al revisar la literatura del tema, se desprende que investigadores que recientemente aplican percepción remota se han centrado en las características de la cobertura de la vegetación. Las áreas boscosas pueden ser estratificadas en categorías de cobertura de copa: dispersa (<30%), moderada (30-70%) y densa (>70%) (Stenback y Congalton, 1990). De las características estructurales arbóreas, los dos rasgos observados en los niveles de copa son las diferencias en el tamaño de los huecos en la cobertura de copas y la heterogeneidad del tamaño de árboles. Las variables estructurales tradicionalmente monitoreadas son: densidad de árboles, distribución, cualidad, vegetación del sotobosque, rapidez de crecimiento de las plantas y composición de las parcelas. Para estudios estructurales, Franklin (1994) sugiere que se colecten datos Landsat TM sobre áreas boscosas en diferentes especies, densidad y altura. Por otro lado, en el P.N. Yellowstone se trabajó con los factores que relacionan la estructura física de la cobertura de bosques (altura, área basimétrica, biomasa e índice de área foliar), que han sido buenos predictores (Jakubauskas y Price, 1997; Kamaruzaman y Souza, 1997).

1.12 *Percepción remota y estado de desarrollo de los bosques en el mundo.* Se han usado imágenes obtenidas desde Landsat TM para confeccionar mapas de estados de desarrollo de bosques y para evaluar la diferencia espectral entre los bosques viejos y maduros en la Cascada Central Range de Oregón. Se observa que la incidencia relativa del sol mejora la incidencia de la precisión de la clasificación de bosques viejos, con coberturas cerradas de clases forestales, mejorando la precisión

global. El estado de desarrollo es identificado y descrito sobre la base de la edad y estructura de la vegetación, con la clase inicial, intermedia y avanzada. Otra manera de jerarquizar es la identificación de tipos boscosos basado en las especies dominantes.

1.13 *La utilización de Landsat TM en Parques Nacionales en el mundo.* Trabajos realizados en Idaho, han analizado la estructura forestal en el Parque Nacional Sequoia, usando datos TM (Stenback y Congalton, 1990). El conocimiento de la composición de las especies forestales es una parte integral de implementación de las políticas de manejo de los recursos naturales en un Parque. Con esta finalidad se efectuó el mapeo forestal del Parque Nacional Lassen en California con TM y Sistemas de Información Geográfica (SIG), de este modo, el manejo puede considerarse un método de costo efectivo de mapeo de vegetación ya que los datos de sensores remotos completados con datos geográficos digitalizados, ayudan a cumplir los objetivos de manejo. La confección de fitocartografía automatizada desde datos de sensores remotos, cumplirán con la información básica geográfica y pueden jugar un importante rol en la documentación de la distribución de plantas presentes en las áreas protegidas (Congalton *et al.*, 1993; Cohen *et al.*, 1995; White *et al.*, 1995).

1.14 *Aplicación de diversos sensores remotos a estudios de la vegetación agrícola y arbustiva en Chile.* La utilización de las imágenes Landsat TM en el visor multiespectral, ha contribuido a la confección de la carta geomorfológica regional, realizada a escalas 1:500.000 y 1:250.000 en áreas específicas del Altiplano de Tarapacá y Pampa del Tamarugal, en la I Región de Chile en el límite Norte del país (Ortiz, 1978). En Chile, landsat TM se ha usado para la confección de inventarios de cultivos próximo a la ciudad de Valparaíso (V Región). A partir de los satélite MSS, se han registrado curvas espectrales que corresponden a unidades geográficas definidas como bosques, áreas urbanas, cultivos, lagos y mar (Campos, 1978). Se ha logrado la caracterización de curvas de plantaciones de viñedos y parronales, a nivel de terreno, estudio que se llevó a cabo en sectores de los Andes y San Felipe (V Región), Rancagua (VI Región), Curicó (VII Región), Chillán, Concepción y Coelemu (VII Región) (Patillo *et al.*, 1988). Los autores Morales y Santibáñez (1995) proponen un método simple para estimar el valor medio de la emisividad de la superficie basado en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normal Difference Vegetation Index, NDVI); la radiancia medida por sensores remotos a bordo de satélites es transformada en temperaturas de brillo de superficie, suponiendo que son emitidas por un cuerpo negro.

1.15 *Aplicaciones de percepción remota en bosque nativo en Chile.* En la región de La Araucanía se han estudiado los incendios forestales con imágenes del satélite landsat TM en el Parque Nacional Huerquehue (Rodríguez, 1998). Algunos estudios tratan inventarios forestales determinando variables de terreno que se han centrado en bosques nativos de Chile en los cuales se han utilizado

sensores remotos (Poso *et al.*, 1990) e inventario forestal (Mery y Bahamondez, 1995). Con el objetivo principal de clasificar bosques nativos en Chile, siendo uno de ellos el catastro de la vegetación natural de Chile, de cobertura nacional (CONAF-CONAMA-BIRF, 1999); y la investigación propuesta por Segura y Trincado (2003) quienes aplican esta tecnología en la Reserva Nacional Valdivia. Se ha aplicado en deforestación y fragmentación (Echeverría *et al.*, 2006); paisajes de humedales (Peña-Cortés *et al.*, 2006); fragmentación y especies amenazadas (Altamirano *et al.*, 2007); determinación de variables de rodal y mortalidad (Navarro *et al.*, 2008).

1.16 *Percepción remota y estudios en Araucaria araucana*. Los estudios desarrollados en bosques de *A. araucana* mediante la aplicación de sensores remotos, sólo han caracterizado la vegetación existente (Ojeda y Herrera, 2000); su fisonomía (Soto, 2005), o bien consisten en el mapeo de un pequeño rodal de *A. araucana*- *N. antarctica* (Parada, 2006). Por su parte, los investigadores Salas *et al.*, (2010) estudiaron relaciones entre parámetros de inventario en bosques de *A. araucana*. Más recientemente Ojeda *et al.* (2011) discriminan bosques de *A. araucana* aunque el estudio no contempla una clasificación de toda la vegetación existente en el P.N.Conguillío, menos aún de las cubiertas volcánicas.

## 2. Metodología

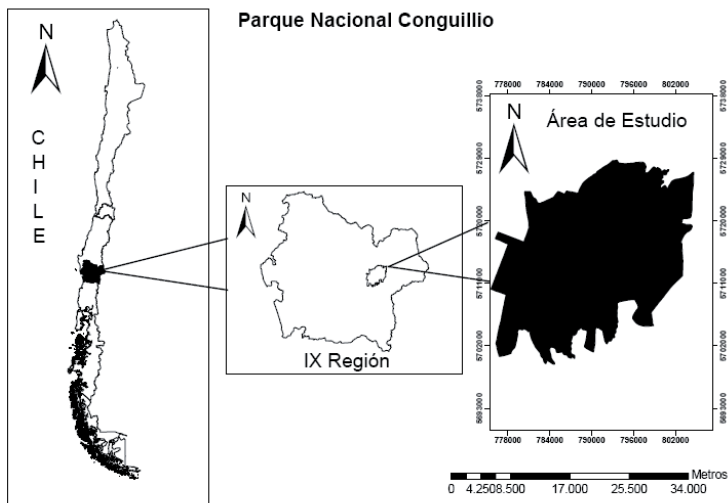


Figura 1. Área de estudio.

*2.1 Apoyo logístico.* La Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la Novena Región de La Araucanía, Chile, otorgó su apoyo para el alojamiento y toma de datos de terreno en el P.N. Conguillío (Fig. 1). Además, se tuvo el apoyo de guardaparques con preparación en áreas de geología y biología para el reconocimiento de sectores volcánicos y vegetales del Parque. Otros recursos de apoyo fueron embarcación y caballo, necesarios por la complejidad del relieve para poder llegar a los lugares más inaccesibles.

*2.2 Apoyo en laboratorio.* Para la identificación de especies vegetales, líquenes y musgos, se recurrió al laboratorio de botánica de la Universidad Austral de Chile (Décima Región de los Ríos), y a especialistas en la Universidad de Córdoba, España.

*2.3 Cartografía de referencia utilizada.* El material cartográfico utilizado fue el siguiente: carta geológica de las cuencas hidrográficas de los ríos Imperial y Tolten (1:250.000); mapa de límites del P.N. Conguillío, Ministerio de Agricultura, CONAF (1:50.000); mapa de distritos agroclimáticos, del Atlas agroclimático de Chile, Octava y Novena Regiones (1:500.000); mapa agroclimático de Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (1:1.000.000); mapa topográfico del Ministerio de Agricultura (1:50.000); fotografía aérea color de la Novena Región (1:100.000); vegetación según Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) (1:250.000); catastro y evaluación de recursos vegetacionales (1:250.000); carta Instituto Geográfico Militar-IGM (1:50.000). Las imágenes de satélite fueron procesadas mediante el programa computacional Idrisiw para Windows versión 2.0 y para la información vectorial se utilizó Arcgis versión 8.0 (ESRI, 2003; Eastman, 2004). Este programa se compone de un sistema computacional que une las capacidades de un Sistema de Información Geográfica con las del Procesamiento Digital de Imágenes en un solo software. Para georeferenciar la información se utilizaron Sistemas de Posicionamiento Global ("Global Positioning System", GPS), marca map 60CSx.

Para el desarrollo de la presente investigación, la CONAF aportó 19 escenas de imágenes de satélite Landsat TM, correspondientes a la Novena Región de Chile. Los criterios utilizados para la selección de la imagen fueron: a) que la imagen esté libre de nubes, b) que posea un gran contraste entre distintas cubiertas de la tierra, c) que tenga el mínimo impacto antrópico, y d) que posea vegetación en estado natural, poco estudiada y de interés científico. De lo anterior, resultó que la imagen "volcán Llaima" fue la que contuvo la mayor presencia de vegetación nativa bien

conservada, y además, coincide con el P.N. Conguillío. Posee una superficie de 66.830 ha, y está localizada en las provincias de Malleco-Cautín.

El sensor utilizado tiene una resolución de  $25 \times 25\text{m}$  y barrió el área de estudio en verano, el 15 de enero de 1987 en la Cordillera de los Andes. La imagen de satélite utilizada abarcó 1.069.280 píxeles. De acuerdo a la literatura revisada, se sugiere efectuar el trabajo de campo en la misma fecha mensual en que el satélite captura la información, por lo que los datos registraron en el mes de enero del 2000, 2003 y 2008. En este período el único evento significativo y de mayor escala, fue la erupción volcánica del volcán Llaima ocurrida en el mes de enero del año 2008. Sin embargo, esta catastrofe natural no afectó los datos analizados en la presente investigación.

Tabla 1. Espectro electromagnético de landsat TM.

Banda	Longitud de onda
TM 1 (AZUL)	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$
TM2 (VERDE)	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$
TM3 (ROJO)	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$
TM4 (INFRARROJO CERCANO (NIR)	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$
TM5 (INFRARROJO MEDIO (MIR-1)	1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$
TM7 (INFRARROJO MEDIO (MIR-2)	2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$

*2.4 Antecedentes descriptivos e interpretativos de la vegetación.* El presente estudio acogió en principio la metodología sugerida por Etienne y Contreras (1981) para la toma de datos en terreno. Esta se basó en aspectos descriptivos de la vegetación y en el análisis interpretativo por un diagnóstico fitoecológico. Consideró tres aspectos básicos: a) tipo de formación vegetal, b) especie dominante, y c) grado de artificialización. En el presente estudio el grado de artificialización no se consideró por el buen estado de conservación que presentan los bosques. Esta metodología permitió una descripción objetiva y completa del estado actual de la vegetación. En este caso, el criterio de formación vegetal constituye un enfoque fisionómico, el cual, basado en los conceptos de estratificación y cobertura, otorga una visión de la disposición vertical y horizontal de la vegetación de un lugar determinado. Las especies dominantes constituyen aquellas plantas cuyas características fisionómicas imprimen a la vegetación de la unidad un aspecto o característica dada.

*2.5 Incorporación de modelos topográficos.* Se estimó esencial su aplicación porque en la zona estudiada predomina un relieve abrupto. El modelo de iluminación se derivó de un modelo digital

de elevación (“Digital Elevation Model”, DEM), el cual se utilizó para calcular el ángulo de incidencia respecto del sol, con curvas de nivel separadas cada 30m (Riaño *et al.*, 2003; NASA/JPL, 2004) [1]:

$$IL = \cos \gamma_i = \cos \theta_p \times \cos \theta_i + \sin \theta_p \times \sin \theta_i \times \cos(\phi_a - \phi_o) \quad [1]$$

Donde:

$\theta_p$ : pendiente del terreno: la inclinación del terreno con respecto a la horizontal;

$\theta_i$ : ángulo cenital solar: el ángulo complementario de elevación solar;

$\phi_a$ : ángulo azimutal solar: la dirección del sol con respecto al Norte;

$\phi_o$ : ángulo de orientación: el ángulo existe entre el vector que señala el Norte y la proyección del plano horizontal del vector normal de la superficie en ese punto.

La reflectancia del plano normalizado de cada píxel se obtuvo utilizando el método empírico estadístico (Meyer *et al.*, 1993) [2]:

$$P_H = P_T \times \left( \frac{\cos \theta_i + C_k}{IL + C_k} \right) \quad [2]$$

Donde:

$P_H$ : reflectancia de la superficie horizontal;

$P_T$ : reflectancia de la superficie inclinada;

$\theta_i$ : ángulo cenital solar;

$C_k$ :  $b_k / m_k$ : cociente entre la pendiente y el termino independiente  $m_k$ .

**2.6 Corrección atmosférica.** Se utilizó el método propuesto por Chávez (1996) para reducir el incremento de la radiancia absorbida por el sensor. Los datos TM fueron convertidos a partir de valores (Niveles Digitales, ND) a unidades de radiancia (mW / cm 2/sr / # m) (Markham y Barrer, 1986). Partículas y moléculas son los causantes de efectos de dispersión sobre la transmisión de energía, preferentemente sobre longitudes de onda corta. La corrección atmosférica de las bandas se efectuó para evitar errores posteriores en la realización de cocientes, índices de vegetación y combinaciones lineales entre bandas, ya que el efecto de la dispersión por la atmósfera es distinto en función de la longitud de onda (Foody y Hill, 1995; Richter, 1997). Se asume que las áreas con materiales de fuerte absorción (agua, zonas de sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. Frecuentemente, ese valor mínimo es mayor en las bandas más cortas, disminuyendo hacia el infrarrojo cercano y medio. Por lo tanto, una aproximación a la corrección

atmosférica consiste en restar a todos los NDs de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero [3].

$$ND_{i,j,k}^{\Pi} = ND_{i,j,k} - ND_{\min,k} \quad [3]$$

Es decir, el ND del píxel (i, j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

**2.7 Corrección geométrica.** La imagen estudiada se encuentra georeferenciada, es decir los píxeles de la imagen calzan con las coordenadas geográficas y responden a las funciones  $f(x) = f_1(c, l)$  y  $f(y) = f_2(c, l)$ . Las coordenadas x, y de la imagen corregida son función de las coordenadas c, l (columna, línea) de la imagen de entrada. Con las coordenadas UTM se logra corregir errores derivados de la rotación terrestre o de la inclinación de la órbita (Domínguez, 1997). Los datos geográficos de la imagen de satélite corresponden, en este caso, al elipsoide de referencia internacional 1924, cuyo origen es el Datum Provisorio Sudamericano (La canoa, Venezuela) de 1956 (Eastman, 1997).

**2.8 Filtrado de la imagen.** El filtro se aplica en el análisis digital para aislar componentes de interés (Saleta *et al.*, 1993). Los filtros aplicados suavizan o refuerzan los contrastes espaciales presentes en los NDs que la componen, sin embargo, en el presente estudio no se aplicó filtro debido a que altera la información original de la imagen.

**2.9 Composición color.** Los autores Stenback y Congalton (1990) plantean que el intérprete percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0,4 y 0,7 $\mu$ m cuyo espectro comprende los tres componentes que son los denominados colores primarios: azul (B), verde (G) y rojo (R). De este modo, si el espectro recoge información sobre las bandas del espectro azul, verde y rojo, puede obtenerse una composición en color natural. A partir de la información entregada por los sensores espaciales es posible obtener distintas composiciones en color. Para el presente estudio, se elaboró la imagen a partir de las bandas originales TM1(B), TM2(G), TM3(R). Esta entregó información detallada y bien contrastada de la mayoría de los componentes del recurso natural. Permitió discriminar la vegetación en forma precisa y diferenciar comunidades tipo-bosque.

**2.10 Cocientes e índices de vegetación.** De acuerdo a Gilabert *et al.* (1997) un cociente o ratio implica efectuar una división de píxeles en dos o más bandas de la misma imagen. El uso de los cocientes para discriminar masas vegetales se derivó del comportamiento radiométrico de la vegetación. Se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda roja del

espectro y la del infrarrojo cercano, lo que permite separar con relativa claridad la vegetación sana de otras categorías. Se puede señalar que cuanto mayor sea el contraste entre las reflectividades de la banda infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la categoría observada.

El denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ha sido aplicado por varios autores (Shoshany *et al.*, 1994; Gilabert *et al.*, 1997; Jakubauskas y Price, 1997). [4]

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}} \quad [4]$$

donde:

$\rho_{i,IRC}$  y  $\rho_{i,R}$ , indican las reflectividades del píxel  $i$  en la banda del infrarrojo cercano y del rojo.

El NDVI se puede definir como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que extrae de los mismos la información relacionada con la vegetación, reduciendo la influencia de perturbaciones debidas al suelo y a la atmósfera. La diferencia normalizada de las dos bandas, y cuyo rango de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1 (Ihl y Romero, 1991). El NDVI es considerado como el parámetro menos afectado por la topografía y por diferencias temporal/espacial en distintas elevaciones de luz solar o condiciones atmosféricas (Shoshany *et al.*, 1994).

2.11 *Análisis de componentes principales.* Según lo planteado por Congalton *et al.* (1993), el manejo de imágenes en tramos adyacentes del espectro electromagnético, implica detectar información redundante, puesto que los tipos de categorías tienden a presentar un comportamiento similar en regiones próximas del espectro. El Análisis de Componentes Principales (ACP) permite sintetizar las bandas originales, creando nuevas bandas, los componentes principales de la imagen, que recojan la mayor parte de la información original. El ACP facilita la interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que se recogen en la mayor parte de las bandas y otros que son específicos. En términos generales, los componentes generales de una imagen se obtiene de acuerdo a lo propuesto por Conese y Maselli (1993): [5]

$$CP_j = \sum_{i=1, p} a_{i,j} ND_i + R_j \quad [5]$$

donde:

$CP_j$  = ND correspondiente al componente principal  $j$ ,

- $a_{i,j}$  = el coeficiente aplicado al ND de la banda  $i$  para generar el componente  $j$ , y
- $R$  = una constante que suele introducirse en cada componente para evitar valores negativos.

Hay tantos componentes ( $p$ ) como bandas, pero la forma de extraer esos componentes implica que sólo los primeros tienen información significativa, es decir, los que retengan mayor información original (Richards, 1993). Tal y como se obtienen los CP, el autovalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis.

**2.12 Generación y selección de nuevas bandas.** De acuerdo a San Miguel (1993), el análisis de los datos de satélite no está limitado a las bandas originales que el sensor provee, ya que se pueden generar. Estas nuevas bandas son creadas para extraer información que no es reflejada en las bandas originales, o para remover correlaciones interbandas que pueden distorsionar el proceso de clasificación. Un procedimiento probado para procesar imágenes digitales, para generar nuevas bandas, son los llamados índices de bandas. Esto se obtiene dividiendo los números digitales píxel a píxel. La selección de bandas se utiliza para discriminar la banda o combinación de bandas que mejor separen las clases de interés en el área de estudio. En este sentido, el número óptimo de bandas es usualmente determinado por la mejora en la clasificación precisa por la adición de éstas.

**2.13 Definición de las categorías.** El incremento en el número de clases espectrales, ha provocado en muchos casos un aumento en la fiabilidad de la clasificación final. Existen registros en los que se mejoran los resultados al fragmentar el continuo de variación de las condiciones de iluminación (Salvador *et al.*, 1996). Para el muestreo en la presente investigación, se escogieron píxeles puros de la imagen “volcán Llaima”, con lo cual se definió cada categoría.

**2.14 Clasificación de la imagen.** Se definen tres tipos a) clasificación supervisada, b) clasificación no supervisada, y c) clasificación combinada supervisada y no supervisada. En la presente investigación utilizamos el método denominado clasificación supervisada, ésta requiere un conocimiento previo de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo (Green *et al.*, 1993). Esta mayor familiaridad con la zona de estudio, permitió al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda. La probabilidad de obtener error cuando determinamos la precisión de la clasificación depende de la precisión actual de la clasificación y el tamaño de la muestra. Resulta más conveniente elegir varios campos de pequeño tamaño que uno sólo de mayores dimensiones, ya que tenderá a infravalorarse la variabilidad de la categoría. Otros autores recomiendan seleccionar

píxeles aislados de cada categoría, en número suficiente para estimar adecuadamente la variabilidad espectral de dicha clase. Este criterio puede ser recomendable cuando existe suficiente control del terreno. En zonas de difícil acceso resulta poco operativo (Richards, 1993). El conocimiento de áreas está referido a las de entrenamiento, que son espectralmente usadas y que definen todas las clases de interés. El entrenamiento supervisado usualmente envuelve la delineación de las áreas, de un grupo de píxeles o bloque representantes de una clase (Gong y Howarth, 1990). La información espectral contenida en las bandas originales y transformadas es usada para caracterizar cada clase original y para discriminar entre clases. En definitiva, se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus NDs definen convenientemente a esas clases. En cuanto al tamaño, se requiere seleccionar un mínimo de  $m+1$  píxeles por categoría, siendo  $m$  el número de bandas que integran el análisis. Conviene, no obstante, superar este límite mínimo. Se recomienda seleccionar un número de píxeles comprendido entre 10m y 100m por categoría. El número mínimo se relaciona estrechamente con el grado de asociación espacial entre los NDs de la imagen. Además, se establece que, cuando hacemos un muestreo para precisión global, los pequeños tamaños de la muestra en cada una de las clases pueden ser 20 o 30 píxeles para mapas, en los cuales el porcentaje admisible de error es 15% y 10% respectivamente. De este modo, tamaños de muestras de 20 píxeles para pequeñas categorías, y un incremento proporcional del tamaño de la categoría para el resto. En otras situaciones se utilizarán píxeles en áreas de entrenamiento para construir firmas espectrales, con un mínimo de 50 para cada clase (Langford y Bell, 1997). En muchos casos, la utilización del método supervisado permite una mejor separación entre clases de vegetación (Sá *et al.*, 1996). La clasificación supervisada se basa sobre el análisis de las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento.

**2.15 Clasificador de mínima distancia.** Los autores Franklin y Wilson (1992) plantean que un criterio sencillo es asignar un píxel a una de las categorías, incluyéndolo en la más cercana; es decir, en aquella que minimiza la distancia entre ese píxel y el centroide de clase. Es una distancia espectral que compara los NDs de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis (Eastman, 1997). Este clasificador se basa en los datos de sitios de entrenamiento, en la cual para cada clase existe una posición promedio sobre cada banda. El clasificador de Mínima Distancia media, se ha sugerido porque puede entregar resultados óptimos en sofisticadas decisiones, particularmente para diferenciar clases.

**2.16 Mediciones de terreno.** Para efectuar las mediciones en terreno se utilizó un diseño de muestreo estratificado aleatorio, ya que proporciona el mejor equilibrio entre la validez estadística y la aplicación práctica (Fitzpatrick-Lins, 1981; Congalton, 1988). De este modo, se obtuvo un

mínimo de muestras por categorías para asegurar la representatividad. Los criterios considerados en el muestreo fueron la variabilidad espacial, el tipo de bosque y su accesibilidad (Etienne y Contreras, 1981; Hansen *et al.*, 1996; Martin *et al.*, 1998).

2.17 *Clasificación precisa.* Para realizar la clasificación supervisada y definir las categorías, es factible aplicar el sistema de clasificación jerárquica propuesto por Beaubien *et al.* (1999), referido al uso y cobertura del suelo y de gran utilidad en sensores remotos; de este modo se complementa el método de terreno propuesto por Etienne y Contreras (1981). Con esta propuesta jerárquica, se clarificó el concepto de clasificación para estos bosques, por lo que se ordenó de acuerdo a la densidad de cobertura en: alta, media y baja. Es amplia la literatura de estudios de muestreos apropiados y tamaño de muestra para determinar la precisión de clasificaciones obtenidas desde datos de sensores remotos, sin embargo, los diversos autores no están completamente de acuerdo sobre este aspecto (Stehman, 1992). Por otro lado, diferentes autores proponen diferentes tamaños de muestras (San Miguel, 1993). La precisión se refiere a la correspondencia entre clases de nivel asignadas a un píxel y las clases de "verdad". Las clases de verdad pueden ser observadas directa o indirectamente en terreno desde mapas de referencia (Green *et al.*, 1993; Janssen y Van der Wel, 1994). La matriz de error es cuadrada en la cual las columnas expresan las categorías informacionales, y las filas muestran las clases en las cuales estas categorías informacionales han sido separadas (Keil *et al.*, 1990). El acuerdo global de la clasificación se expresa por la suma de las principales entradas diagonales (Sá *et al.*, 1996). La matriz de error y estadística asociada es una excelente herramienta para una clasificación precisa (Hammond y Verbyla, 1996). La precisión de los datos de la imagen clasificada se compara con datos de referencia y se expresa en "medidas de acuerdos" (Naesset, 1996). Esta medida global de fiabilidad del mapa se calcula, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados en la matriz de error. Un error de "omisión" ocurre cuando un grupo puede haber sido clasificado dentro de una categoría no informacional. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del "usuario" y del "productor".

2.18 *Análisis categórico multivariante.* Los autores Congalton *et al.* (1993) recomiendan la estadística Kappa como una adecuada medida de precisión en clasificaciones temáticas, porque esta toma en cuenta la matriz de error entera. La técnica de análisis categórico multivariante idónea para el estudio global de matrices de confusión. Se utiliza el índice estadístico de Kappa ( $\kappa$ ), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que se podría esperar por azar [6].

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1,n} X_{ii} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}} \quad [6]$$

donde:  $X_{ii}$ : indica el acuerdo observado, y

$X_{i+}$ ;  $X_{+i}$ : el producto de los marginales, el acuerdo esperado en cada categoría  $i$ .

La estimación de  $\kappa$  nos sirve para conocer el grado de significación de este estadístico, y, por lo tanto, si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado al azar. En definitiva, la prueba evalúa si la clasificación discrimina las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Naesset, 1996; Sá *et al.*, 1996).

2.19 *Los SIG*. De acuerdo a Franklin y Wilson (1992) la clasificación precisa a partir de imágenes de sensores remotos puede incrementarse usando información desde recursos auxiliares. Para reducir el efecto topográfico se usó el Modelo Digital de Elevación (DEM) (Apan y Peterson, 1994).

### 3 Resultados y discusión

3.1 *Análisis de las bandas*. De la Tabla 2 se deduce que de las bandas visibles, la TM1 presentó el mayor desplazamiento de sus valores mínimos, consecuencia de la dispersión atmosférica. Los valores medios son más altos para esa banda, junto con la TM4. Del mismo modo, ninguna de las bandas se encuentra totalmente saturada entre 0 y 255, además, las bandas con mayor heterogeneidad corresponden a la TM3 y TM1, con desviaciones estándar superiores a 46 ND, por lo tanto, estas serían las más sensibles a alteraciones de radiancia. Con contrastes menores se encuentran las bandas TM5 y TM6 y peores en este sentido la TM7 con una desviación estándar de 9,50.

Tabla 2. Medidas estadísticas sobre la imagen Landsat TM "volcán Llaima".

Banda	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	Muestra
1	48	255	78,23	46,41	1.069.280
2	14	255	34,73	39,74	1.069.280
3	2	255	37,37	47,95	1.069.280
4	3	255	65,17	35,24	1.069.280
5	0	210	42,11	23,19	1.069.280
6	82	230	144,19	24,44	1.069.280
7	0	131	15,81	9,50	1.069.280

De las bandas del espectro visible de la imagen “volcán Llama”, la banda roja ofreció el mejor contraste de la imagen con 253 clases y el menor está representado por la banda azul con 207 clases. La banda con la menor dispersión de la imagen fue la TM7, con 131 clases.

Tabla 3. Matriz de correlación de las bandas Landsat TM.

Banda	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
TM1	1,000000						
TM2	0,951897	1,000000					
TM3	0,976475	0,989268	1,000000				
TM4	0,538150	0,640492	0,606812	1,000000			
TM5	-0,288044	-0,263316	-0,251283	0,285121	1,000000		
TM6	-0,418454	-0,451287	-0,427290	-0,578556	0,164476	1,000000	
TM7	-0,136109	-0,160486	-0,121908	0,007001	-0,831220	0,454433	1,000000

En la Tabla 3 se observa que las bandas TM1 y TM2 se correlacionaron en 0,95. No ocurrió lo mismo con las bandas de la porción del espectro infrarrojo TM4, TM5, TM6 y TM7. Por lo tanto, la combinación entre las bandas del espectro infrarrojo, y éstas con las bandas del visible, resultaría una combinación de bandas efectivas.

**3.2 Corrección atmosférica.** El nivel digital mínimo para las bandas fue el siguiente: banda 1 (- 48), banda 2 (- 14), banda 3 (-2), banda 4 (-3), banda 5 (0), banda 6 (-82) y banda 7 (0). Este método se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión para el satélite TM. En el presente estudio la banda 1 resultó ser la más afectada.

**3.3 Mejoras y contrastes en la imagen.** La ecualización del histograma demostró un realce más equilibrado en el histograma, con un adecuado contraste entre las zonas de alta reflectividad y las de baja. A consecuencia de este realce, el histograma de la imagen ofreció la mejor distribución de los datos.

Tabla 4. Expansión del contraste de las bandas TM1, 2, 3, 4, 5 y 7.

Ajuste de banda	Desviación típica	Promedio
TM1 original	46,41	30,23
TM1 lineal	57,30	36,86
TM1 lineal con saturación	60,34	29,09
TM1 ecualización del histograma	71,86	133,06
TM2 original	39,74	20,76
TM2 lineal	42,20	21,53
TM2 lineal con saturación	60,34	29,09
TM2 ecualización del histograma	69,53	136,78
TM3 original	47,95	35,39
TM3 lineal	48,39	35,53
TM3 lineal con saturación	59,67	31,23
TM3 ecualización del histograma	71,25	133,25
TM4 original	35,24	62,18
TM4 lineal	35,78	62,73
TM4 lineal con saturación	71,15	116,57
TM4 ecualización del histograma	73,69	128,97
TM5 original	23,19	42,11
TM5 lineal	23,21	41,12
TM5 lineal con saturación	69,96	106,65
TM5 ecualización del histograma	73,61	129,19
TM7 original	9,50	15,81
TM7 lineal	9,49	14,81
TM7 lineal con saturación	65,38	93,09
TM7 ecualización del histograma	72,83	132,55

El contraste ecualización del histograma para la banda TM1, representó la mejor distribución del histograma para esa banda, ubicándose el promedio de las clases digitales en 133,06, con una desviación típica de 71,86 (Tabla 4). Esta mejor distribución del histograma se reflejó claramente en el análisis visual de la banda en tonos de grises, en ella se observó la imagen muy contrastada facilitando notablemente su interpretación. En cambio, el contraste lineal aplicado a la imagen mejoró parcialmente la distribución del histograma original modificándose el promedio de 30,23 a la contrastada linealmente 36,86, con una mayor desviación típica de 57,30. El contraste lineal con saturación aplicado mantuvo prácticamente el promedio de las clases en el tramo menor del histograma.

*3.4 Análisis de componentes principales.* Para mostrar el ACP en la interpretación digital de imágenes y la importancia que tiene su estadística, se presenta la tabla 5 y 6.

Tabla 5. Matriz de varianza-covarianza de la imagen "volcán Llama".

var/covar	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	2.154,18					
TM2	1.755,99	1.579,73				
TM3	2.173,59	1.885,74	2.300,13			
TM4	880,38	897,28	1.025,78	1.242,37		
TM5	-310,04	-242,71	-279,49	233,06	537,82	
TM7	-60,02	-60,61	-55,55	2,34	183,16	90,28

Sobre esta matriz se calcularon los autovalores de la imagen. Los autovalores extraídos fueron 6.460,89; 1.034,88; 315,47; 74,86; 10,36; 8,04. De acuerdo a la varianza original asociada con cada uno de los componentes puede calcularse como: 81,74 para el primer componente; 13,09 para el segundo; 3,99 para el tercero; 0,95 para el cuarto; 0,13 para el quinto; 0,10 para el sexto. De acuerdo a estos porcentajes, se seleccionaron los tres primeros componentes. Posteriormente, se analizaron independientemente los tres componentes seleccionados.

Tabla 6. Autovalores y componentes principales.

	CP1	CP2	CP3
autovalores	5.928,31	94,64	11,09
% varianza	98,25	1,57	0,18
%varianza acumulada	98,25	99,82	100,00

El sentido espectral de estos componentes se obtuvo a partir de la matriz de autovectores, en la cual se evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales.

Tabla 7. Matriz de autovectores de la imagen "volcán Llama".

Componente	Autovector 1	Autovector 2	Autovector 3	Autovector 4	Autovector5	Autovector 6
CP1	0,562763	0,488413	0,593939	0,295715	-0,065226	-0,016900
CP2	-0,189177	-0,062545	-0,088148	0,775375	0,577205	0,134749
CP3	0,228329	0,007691	0,121892	-0,515863	0,682632	0,448160

El CP1 presenta un importante contraste entre las bandas del espectro visible y el infrarrojo (Tabla 7). La asociación más importante se produce con las bandas TM3 y TM1, y un poco menores con la banda TM2 del espectro visible, en cambio su asociación es menor con la banda TM4 y

negativas con las bandas del infrarrojo medio TM5 y TM7. El primer componente de la imagen “volcán Llaima” muestra una valoración diferenciada en la mayor parte de la categorías, altos valores en la nieve, rocas, y vegetación; medio en escoria volcánica, suelo desnudo y agua. El CP2 muestra un contraste similar al componente 1, pero inverso, es decir, alto para las bandas TM4 y TM5 y menor para la banda TM7. En cambio, las bandas TM1, 2 y 3 tienen una valoración negativa respecto a este componente principal. Este componente 2 tiene una valoración diferenciadora sólo en algunos aspectos de la imagen. El análisis de autovectores para el CP1, muestra que de las bandas espectrales TM, la banda TM3 es la banda que provee la información más efectiva para el estudio de la imagen, con una distancia de 0,593939, le sigue la banda TM1 con 0,562763 y posteriormente la TM2, con 0,488413. A modo de discusión, los resultados obtenidos con los CP, aportaron información eficaz para los tres primeros componentes, y esto es coincidente con lo planteado por otros autores, como lo sugiere Congalton *et al.* (1993) quienes encontraron resultados óptimos con el CP basado en las bandas TM1, 2 y 3. Por su parte, Conese y Maselli (1993) valoran este procedimiento estadístico, ya que de este modo se consiguió el óptimo grupo de variables que retienen la mayor información original. Por su parte, San Miguel (1993) registró a la banda TM2 como la que aporta mayor información, a diferencia del presente estudio, en que la banda TM3 estadísticamente resultó la más positiva. Analizando los CP, las bandas TM1 y TM2 resultan efectivas. Y revisando la literatura, es factible añadir la TM3, es decir, la composición TM1, 2 y 3.

**3.5 Composición de bandas.** Numerosos autores utilizan la imagen composición color, y en términos generales es imprescindible para efectuar el análisis visual. Kamaruzaman y Souza (1997) mencionan la importancia de la imagen composición color basado en TM1, 2 y 3 para estudios forestales. En el presente estudio, esta imagen fue esencial, ya que permitió reconocer en terreno la mayoría de las cubiertas terrestres, tanto de origen volcánico como de bosques. Por otro lado, la escena falso color generada a partir de la combinación de las bandas TM3, 4 y 5, entrega importante información respecto de aquellas áreas donde se producen derrumbes naturales, deslizamientos y pérdida de la cubierta de suelo. Esta composición de bandas es de gran utilidad, pero no se aplicó en el presente estudio, debido a que no resultó la combinación estadísticamente más eficiente, y por otro lado, a que el objetivo no fue estudiar la deforestación del P.N. Conguillío.

3.6 *Tamaño de la muestra, áreas de entrenamiento y categorías, derivado de la clasificación supervisada para 33 categorías y TM1, 2 y 3.*

Tabla 8. Área, porcentaje del área total y descripción de las categorías.

Área (ha)	% total área	Etiqueta categoría	Tipo de categoría
83,50	0,12	24	Bosque-sombra
133,12	0,20	11	Laguna Verde
592,43	0,89	25	Bosque-sombra
780,80	1,17	1	Lago Conguillío
843,00	1,26	8	Escoria volcánica
848,31	1,27	33	Bosque
902,37	1,35	29	Bosque
908,50	1,36	32	Escoria volcánica
1.140,25	1,71	9	Escoria volcánica
1.181,25	1,77	16	Bosque
1.181,75	1,77	4	Escoria y musgo
1.381,40	2,07	5	Escoria volcánica
1.421,31	2,13	19	Bosque
1.578,12	2,36	21	Bosque
1.641,25	2,46	23	Bosque
1.695,25	2,54	7	Escoria volcánica
1.819,43	2,72	13	Vegetación herbácea
1.856,00	2,78	6	Escoria y líquen
1.878,10	2,81	31	Bosque
2.002,06	0,30	18	Bosque
2.189,25	3,28	10	Escoria y vegetación
2.308,81	3,45	27	Bosque
2.326,62	3,48	26	Vegetación herbácea
2.819,06	4,22	28	Bosque-sombra
2.868,50	4,29	15	Bosque
2.938,75	4,40	17	Bosque
3.034,87	4,54	22	Bosque-sombra
3.073,25	4,60	14	Bosque
3.129,62	4,68	30	Bosque
3.643,50	5,45	20	Bosque
3.990,30	5,97	2	Nieve
4.988,70	7,46	3	Escoria volcánica
5.650,18	8,45	12	Suelo
66.829,61	100,0	-	-

De la Tabla 8 se desprende que la menor categoría con una superficie de 83,5ha (bosque-sombra), equivalente a un 0,12% respecto del total, y la mayor 5.650,9ha (suelo) que es un 8,45%. Por otro lado, en la Tabla 9 se observa que la muestra mínima contiene 23 píxeles y la máxima 184.

Tabla 9. Muestra de píxeles por categoría.

Nº de píxeles	Superficie (ha)	Categoría
23	1.140,25	9
24	908,50	32
26	83,50	24
26	848,31	33
31	902,37	29
31	592,43	25
32	843,00	8
32	1.381,40	5
37	1.819,43	13
39	780,80	1
39	2.189,25	10
41	2.326,62	26
42	1.856,00	6
45	1.578,12	21
45	1.181,75	4
45	1.641,25	23
45	2.308,81	27
45	1.878,10	31
47	2.002,06	18
48	1.421,31	19
51	1.181,25	16
56	133,12	11
57	2.819,06	28
60	2.868,50	15
63	1.695,25	7
70	3.129,62	30
80	3.990,30	2
80	3.990,30	2
85	2.938,75	17
96	3.037,25	14
106	5.650,18	12
108	3.643,50	20
113	3.034,87	22
184	4.988,70	3
1.872	66.829,61	Total

Descripción categoría: 1: Lago Conguillío; 2: Nieve ; 3: Escoria volcánica ; 4: Escoria y musgo; 5: Escoria volcánica ; 6: Escoria y líquen; 7: Escoria volcánica escoriácea; 8: Lapilli fino y medio; 9: Lapilli fino homogéneo; 10: Escoria y vegetación; 11: Laguna Verde; 12: Suelo; 13: Vegetación herbácea; 14: Bosque; 15: Bosque; 16: Bosque; 17: Bosque; 18: Bosque; 19: Bosque; 20: Bosque; 21: Bosque; 22: Bosque-sombra; 23: Bosque; 24: Bosque-sombra; 25: Bosque-sombra; 26: Vegetación herbácea; 27: Bosque; 28: Bosque-sombra; 29: Bosque; 30: Bosque; 31: Bosque; 32: Escoria volcánica y 33: Bosque.

En terreno se relevaron 105 parcelas con un tamaño de 729 m<sup>2</sup> (27 × 27m), superficie que se aproxima al tamaño de un píxel en la imagen. De este modo, se relacionó la clase asignada a un píxel derivado del promedio de una ventana de 3 × 3 píxeles y la "verdadera clase" a la que pertenece dicho píxel en terreno (Congalton *et al.*, 1983; Hall *et al.*, 2006). En cada parcela se registró la especie, la altura total (*H*, en m), diámetro a la altura del pecho (*dap* en cm), cobertura de

copa (*cc*, en %); dichas mediciones se efectuaron sólo en árboles emergentes, dominantes y codominantes. También se registró la altitud (m.s.n.m.), exposición (°) y pendiente (%). La medición se efectuó sobre una muestra aleatoria entre 6-10 árboles por parcela, el resto de *H* se estimó mediante la confección de un modelo de regresión (Brokaw y Lent, 1999). Los rangos de cobertura del estrato arbóreo, expresados en densidad, fueron: muy alta densidad de copa (100%), alta densidad de copa (75-100%), mediana densidad de copa (50-75%), baja densidad de copa (25-50%) y muy baja densidad de copa (0-25%). El concepto de densidad corresponde a la expresión simplificada de la cobertura de copa del tipo biológico (Franklin, 1994), para su determinación en terreno se utilizó el método de apreciación visual aplicado en estudios de fitosociología propuesto por Knapp (1984).

3.7 *Índice de Vegetación*. Mediante el NDVI se registraron extensas superficies de líquenes sobre la cubierta de escoria volcánica, con valores de vigor localizados en el umbral crítico para niveles de vegetación. Destaca la vegetación vigoroso-denso, como también aquella constituida por textura homogénea. Ésta imagen entregó un valor total de categorías con vegetación de 35.409,1ha.

Tabla 10. Valores NDVI para las 33 categorías de la clasificación supervisada, derivada de TM1, 2 y 3.

Etiqueta	Categoría	NDVI	Etiqueta	NDVI	Categoría
1	Lag.Cong.	-0,27	13	0,3613	Veg.Herb.
11	Lag.Verde	-0,28	16	0,731	Bosque
2	Nieve	-0,26	33	0,4	Bosque
12	Suelo	0,230	20	0,60	Bosque
3	Escoria	-0,018	30	0,575	Bosque
10	Escoria	-0,116	17	0,61	Bosque
6	Escoria	-0,13	15	0,618	Veg. y Bos.
7	Escoria	-0,1219	28	0,585	Bosque
5	Escoria	-0,1666	18	0,609	Bosque
4	Escoria	-0,0526	21	0,62	Bosque
9	Escoria	-0,125	19	0,62	Bosque
32	Escoria	-0,049	29	0,557	Bosque
8	Escoria	-0,166	22	0,381	Bosque
14	Bosque	0,687	23	0,544	Bosque
26	Veg.Herb.	0,588	25	0,21	Bosque
27	Bosque	0,48	24	-0,04	Bosque
31	Bosque	0,616			

Las 18 categorías tipo-bosque obtenidas en el área de estudio (Tabla 10), tienen un NDVI que varía desde -0,04 como valor afectado por sombra, hasta 0,62 para aquellas áreas boscosas más densas de buen vigor. Se analizaron los pastos y matorrales con los NDVI más altos, y estos se caracterizaron por tener una cobertura densa y muy homogénea. Los pastos exóticos próximos al P.N. Conguillío tienen un NDVI alto (0,36), considerándose crítico próximo a 0,1. De las nueve categorías de escoria volcánica, la única categoría que entregó valores positivos de NDVI fue la compuesta por líquen (0,13), en cambio, la categoría con musgo resultó con valores bajo el umbral crítico de vigor para vegetales.

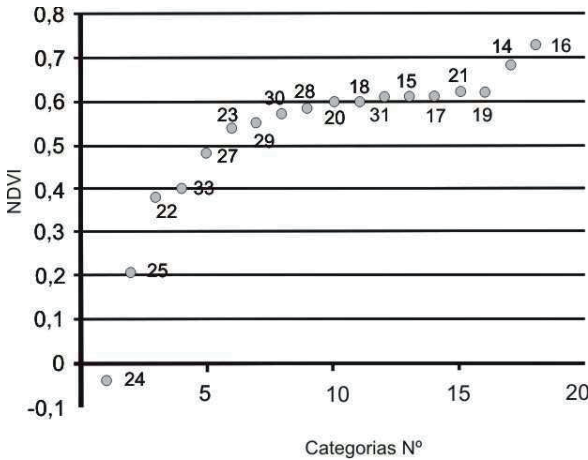


Figura 2. Relación entre las categorías tipo-bosque y NDVI.

Los valores de índice de vegetación se hacen más frecuentes sobre un vigor de 0,5, en este tramo se encuentran 13 categorías (Fig. 2). Bajo el umbral crítico de vigor se encuentran 5 categorías, de las cuales la 22, 24 y 25 están afectadas por efecto sombra y corresponden a sectores con árboles de *Nothofagus*, krummholz, *A. araucana* estresado-ralo y *N. dombeyi*. En cambio, las categorías 27 y 33 están bajo el umbral, es decir, son categorías estresado-ralo (0,40 y 0,48). La categoría 27 corresponde a comunidades tipo-bosque con krummholz, coirón y asociado *A. araucana* estresado-ralo, y la 33 *A. araucana* estresado-ralo, krummholz y coirón. El rango más frecuente de NDVI se registra entre los valores 0,54 y 0,62, abarcando distintas especies arbóreas dominantes en cobertura.

Tabla 11. Relación NDVI y categorías tipo-bosque.

Cat.	NDVI	Nombre de categorías tipo-bosque
16	0,73	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> , <i>N. antarctica</i> , <i>A. araucana</i> y matorrales
14	0,68	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> y/o asociado a <i>N. antarctica</i>
19	0,62	B. <i>A. araucana</i> – <i>N. pumilio</i> de altitud
21	0,62	B. <i>N. dombeyi</i> – <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> – Sombra
17	0,61	B. <i>A. araucana</i> – <i>N. dombeyi</i> , asociado <i>N. pumilio</i>
15	0,61	Veg. de alta montaña y lapilli fino, asociado <i>N. pumilio</i> y <i>A. araucana</i>
31	0,61	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado krummholz
18	0,60	B. <i>N. dombeyi</i> asociado <i>A. araucana</i>
20	0,60	B. <i>N. pumilio</i> asociado <i>N. dombeyi</i> – <i>A. araucana</i>
28	0,58	Renovales <i>N. alpina</i> asociado <i>N. obliqua</i>
30	0,57	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo con <i>N. pumilio</i> alto en altitud
29	0,55	Renovales <i>N. dombeyi</i> asociado árboles machos de <i>A. araucana</i>
23	0,54	B. <i>N. dombeyi</i> asociado <i>N. pumilio</i> – <i>A. araucana</i> - sombra
27	0,48	B. krummholz, coirón, asoc <i>A. araucana</i> estresado-ralo
33	0,40	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo, krummholz, coirón y escoria volcánica
22	0,38	Sombra – renovales <i>Nothofagus</i> asociado <i>A. araucana</i>
25	0,21	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado <i>N. dombeyi</i>
24	-0,04	Som – B. krummholz de <i>N. pumilio</i> asc. <i>A. araucana</i> en quebrada

De la Tabla 11 se infiere que los valores NDVI sin estar afectados por sombra, fluctúan entre 0,73 para la categoría 16 y 0,40 para la categoría 33. De todos los bosques analizados, *A. araucana* estresado-ralo, krummholz, coirón y escoria volcánica (33) y krummholz, coirón asociado *A. araucana* estresado-ralo (27), son los más estresado-ralo de acuerdo al NDVI. A modo de discusión, se puede agregar que los trabajos realizados en Chile con el NDVI, se han basado casi exclusivamente en el satélite NOAA-AVHRR, principalmente en la zona árida y semiárida. Utilizando el satélite NOAA-AVHRR en áreas con vegetación herbácea y pastizales, Ihl y Romero (1991) registraron valores bajos de NDVI (0,01 a 0,10), intermedios (0,10 a 0,20), y altos (0,20 a 0,30). En este sentido, el NDVI registrado para las categorías de herbáceas en el P.N. Conguillío (vegetación herbácea exótica y *Festuca sp*) de 0,36 puede ser considerado de alto vigor comparativamente. La otra categoría de vegetación herbácea y matorrales que registramos en el P.N. Conguillío corresponde a aquella localizada en altitud (vegetación herbácea vigorosa en cotas bajas y límite altitudinal; *azorella trifurcata*, *Pernettya pumila*, *Festuca sp.*, *Adesmia retusa* y *Maytenus distichya*), esta alcanzó un NDVI de 0,58, es decir, vigoroso-denso. Gran parte de las categorías arbóreas lograron valores sobre 0,5, lo que de acuerdo a Chuvieco (1997) pueden considerarse de alto vigor. Únicamente los tipo-bosque de *A. araucana* estresado-ralo, registraron

valores menores al límite de 0,5, considerándose muy bajos para bosque. De este modo, el índice de vegetación fue útil ya que a través de él se discriminaron “tipo-bosque” diferenciando bosques estresado-ralo, lo cual es útil para la generación de pautas de manejo y administración en el P.N. Conguillío.

Tabla 12. Estadística de los píxeles de las parcelas de entrenamiento para la clasificación TM1, 2 y 3, para 33 categorías.

Categoría	Nº de píxeles parcela de entrenamiento	Nº de píxeles categoría	Proporción (%)
11	353	2.151	16,41
14	668	49.172	13,59
4	829	18.908	4,38
1	460	12.492	3,68
8	278	13.488	2,06
22	838	48.557	1,73
24	23	1.336	1,72
12	1.320	90.402	1,46
2	892	63.844	1,40
33	188	13.572	1,39
7	286	27.124	1,05
10	357	35.028	1,02
13	290	29.110	0,99
17	427	47.020	0,91
32	126	14.536	0,87
26	297	37.225	0,79
19	177	22.740	0,78
15	347	45.896	0,76
3	598	79.819	0,75
20	400	58.296	0,69
30	343	50.073	0,68
5	147	22.102	0,66
31	191	30.049	0,64
27	231	36.940	0,63
16	116	18.900	0,61
9	86	18.244	0,47
23	109	26.260	0,42
25	38	9.478	0,40
29	55	14.437	0,38
6	106	29.696	0,35
18	113	32.032	0,35
28	76	45.104	0,17
21	35	25.249	0,14
Total	10.800	1.069.280	1,01

De la Tabla 12 se desprende que la proporción de píxeles muestreados por parcela de entrenamiento alcanza un 1,01%, valor que se encuentra sobre el mínimo recomendado por la literatura (Richards, 1993).

3.8 Firma espectral de bandas Landsat TM correspondientes a la imagen "volcán Llaima". En los gráficos que se muestra a continuación, en el eje X se exponen las bandas analizadas y en el eje Y la frecuencia de ND. La expresión gráfica responde a la firma espectral de cada categoría derivada de la composición TM1, 2 y 3.

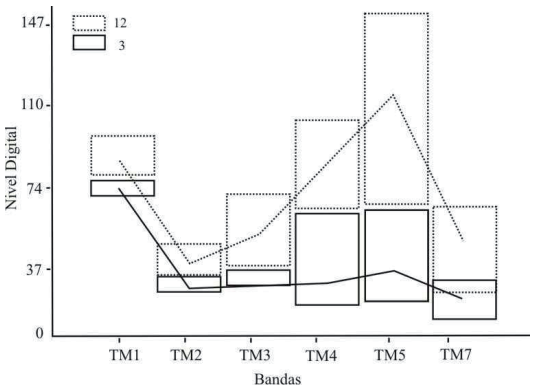


Figura 3. Suelo con poca vegetación y lapilli fino homogéneo.

La mayor distancia espectral entre ambas firmas se logra en la banda del infrarrojo TM5, en la cual los suelos con poca vegetación son más reflectivos. Además, se aprecia en el resto de las bandas que ambas categorías, la de suelo con poca vegetación (12) y lapilli fino homogéneo (3), a pesar de ser similares en el análisis visual, espectralmente son diferenciables en todas las porciones del espectro electromagnético considerado (Fig. 3).

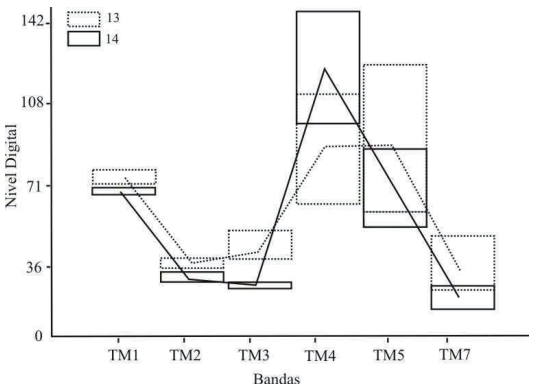


Figura 4. Categorías con vegetación de hierbas exótica y bosque de krummholz de *N. pumilio* y *N. antarctica*.

De la figura 4 se deduce que la mayor diferencia espectral se produce en la banda TM4. En esta banda, la categoría bosque de krummholz (14) presenta alta reflectividad debido a la homogeneidad de su cobertura y por la presencia de áreas desprovistas de vegetación. Del gráfico se desprende que la categoría con vegetación de hierbas y exóticas (13) tiene un comportamiento similar a la firma de los bosques de krummholz, constituidos éstos últimos por árboles de *N. pumilio* y *N. antarctica*.

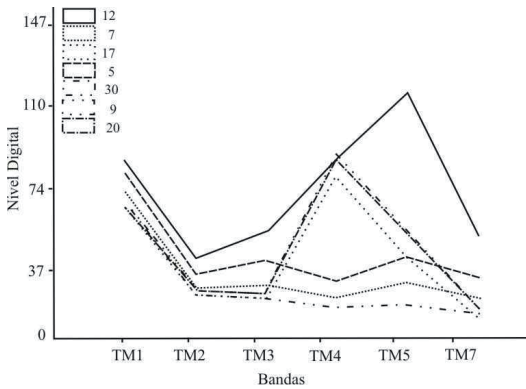


Figura 5. Categoría de bosques y volcánicas; 20, 30, 17, 9, 5, 7 y 12.

En la Fig. 5 se observan 3 grupos espectrales diferenciados. El primero de ellos es el constituido por categorías de origen volcánico. Estas son las 5, 7 y 9. Corresponden a lava basáltica-oxidación (5), lava basáltica escoriácea (7), y lapilli fino homogéneo oscuro (9). El segundo grupo lo constituyen las categorías de bosque 20, 30 y 17. Este último grupo de bosque se diferencia espectralmente del grupo de lavas volcánicas y lapilli, debido a que la banda del infrarrojo cercano aporta un ND más reflectivo, típico de estructura de bosque. El tercer tramo lo conforma la categoría de suelo con escasa vegetación (12), ésta posee la mayor reflectividad de los tres grupos, consecuencia de la superficie homogénea.

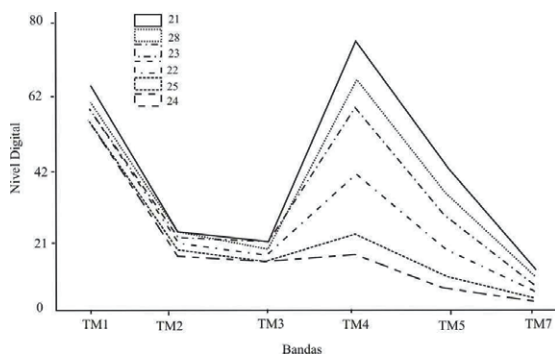


Figura 6. Categorías de bosque afectado por sombra.

La categoría 24 corresponde a bosques de krummholz de *N. pumilio* y/o asociado *N. antarctica* afectado por sombra (Fig. 6) Esta categoría corresponde al NDVI más bajo para las categorías boscosas del área de estudio (Tabla 11). La otra categoría que sigue afectada por sombra es la 25 (bosque de *A. araucana* afectado por sombra), cuyo NDVI es 0,21 (Tabla 11). Posteriormente, la categoría boscosa 22 (renovales de *N. dombeyi*-*N. obliqua*-*N. alpina* y *N. pumilio* afectado por sombra), con NDVI de 0,38 (Tabla 11). Las categorías con sombra Bosque *N. dombeyi* – *A. araucana* asociado *N. pumilio* (21), Renovales *N. alpina* asociado *N. obliqua* (28) y Bosque *N. dombeyi* asociado *N. pumilio* – *A. araucana* (23), se presentan más reflectivas. Se puede agregar que la diferencia espectral que alcanzan en algunos tramos las distintas categorías de bosque afectadas por sombra, permiten diferenciarlas entre sí, tanto en el espectro infrarrojo como en el visible.

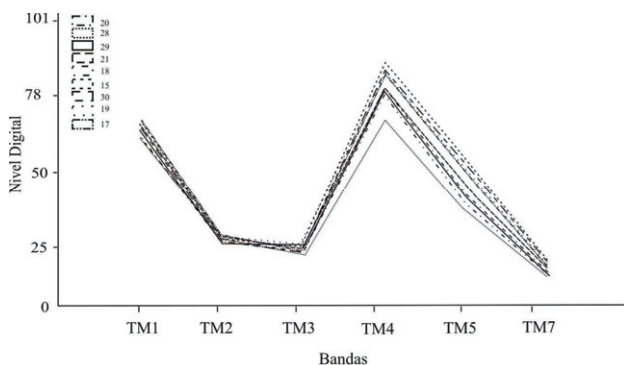


Figura 7. Categorías de bosque.

En la figura 7 se representan diferentes categorías de bosques. Estos poseen una firma espectral muy similar entre sí. En todas ellas destaca un gran contraste entre la banda TM3 y TM4, en este rango electromagnético 0,70-0,90μm se produce la mayor diferencia de reflectividad.

### 3.9 Firmas espectrales landsat TM obtenidas por la combinación de bandas.

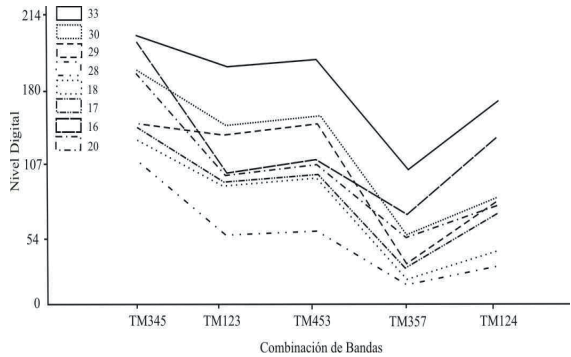


Figura 8. Firma espectral para las categorías tipo-bosque y relación con combinaciones de bandas.

La categoría mejor separada corresponde a la 33 (Fig. 8). Se trata de bosques de *A. araucana* krummholz, coirón y porciones de escoria volcánica. La otra categoría bien diferenciada corresponde a la 28, se trata de bosques jóvenes de *N. alpina* asociado *N. obliqua*.

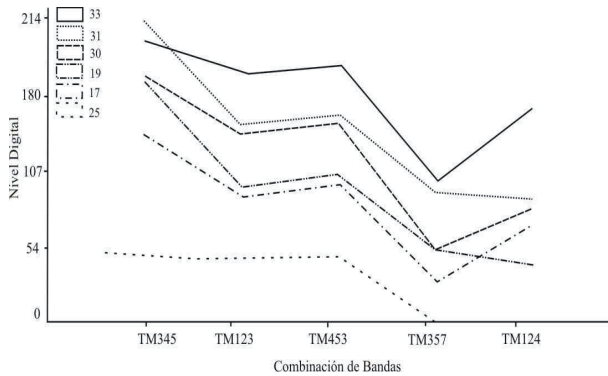


Figura 9. Categorías con la especie *A. araucana* y combinaciones de bandas.

En la Fig. 9 se observa que *A. araucana* en todas las combinaciones de bandas analizadas está espectralmente separada. De la figura 9 se infiere que las firmas espectrales de *A. araucana* vigoroso-denso (categoría 17, 19, y 25; esta última afectada por sombra), mantienen firmas en el tramo de mayor absorción. Por su parte, las categorías estresado-ralo de *A. araucana* se encuentran en el tramo de mayor reflectividad, en todas las combinaciones de bandas, como ocurre con la 30, 31, y 33.

Tabla 13. Matriz de confusión de la clasificación supervisada derivada de las bandas TM1, 2 y 3 para 33 categorías.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	T	FP	EO	
1	15											1	1			1		1	1			1		1	1									39	38.5	61.5	
2				3	4				17			2	1												1		33	19				5	1	80	78.8	21.2	
3	63																																				
4			101	8								1																							184	54.8	45.2
5																																					
6																																					
7																																					
8																																					
9																																					
10																																					
11																																					
12																																					
13																																					
14																																					
15																																					
16																																					
17																																					
18																																					
19																																					
20																																					
21																																					
22																																					
23																																					
24																																					
25																																					
26																																					
27																																					
28																																					
29																																					
30																																					
31																																					
32																																					
33																																					
T	28	66	102	42	48	52	69	27	40	47	37	80	62	74	58	51	65	43	54	106	64	70	55	43	38	74	63	76	40	68	63	40	27				
FP	54	96	99	74	50	71	90	74	38	75	100	73	57	91	79	78	88	81	74	91	64	87	64	56	61	54	68	70	70	88	71	50	93				
EC	46	4	1	26	50	29	10	26	62	25	0	27	43	9	21	22	12	19	26	9	36	13	36	44	39	46	32	30	30	12	29	50	7				

3.10 *Análisis de la matriz de error para TMI, 2 y 3 y 33 categorías.* La fiabilidad global del mapa obtenida con la clasificación supervisada a partir de las tres bandas del espectro visible del satélite Landsat TM y con 33 categorías es de 0,745, es decir un 74,5% (Tabla 13). La determinación de ES es de 0,995, por lo que puede aseverarse con un 95% de probabilidad, que la fiabilidad real se encuentra entre 73,45 y 77,35%. Estos serían los umbrales inferiores y superiores en los que se encuentra la fiabilidad real alcanzada por la clasificación. El coeficiente  $k = 0,745$ , es decir, que el resultado es un 74,5% mejor que lo esperable al azar. La matriz confeccionada a partir de 33 categorías puede considerarse con un  $k$  óptimo, al compararlo con otras investigaciones de bosques realizados en diversas partes del mundo. Sin embargo, las opiniones en este sentido son diversas. Los valores de fiabilidad presentados son óptimos si lo comparamos con otras clasificaciones, por ejemplo, en el Parque Nacional volcán Lassen en California, se logró una precisión similar a la del presente estudio, 73%. Por otra parte, White *et al.* (1995) en Minnesota registraron precisiones similares, es decir, de 63 a 67%, también en bosques mixtos con coníferas. Por su parte, Apan (1997) logró en bosques tropicales bien conservados, una fiabilidad de 66,7% para el usuario y para el productor 56,6%. Del mismo modo, Liberti *et al.* (2009) discriminan bosques con una precisión global de 53% a 72%. Es decir, los registros del presente estudio de hasta 77,3% resulta bastante óptimo si se tiene en consideración las condiciones de difícil accesibilidad, buen estado de conservación y variedad de especies vegetales en el P.N.Conguillío. Se puede aseverar, por lo tanto, que los resultados obtenidos son promisorios, y ello se debe, en parte, a que los bosques estudiados poseen una estructura y composición menos compleja, si lo comparamos con bosques tropicales, los cuales poseen mayor número de especies y son más estratificados. De este modo, se puede agregar que se obtuvo una valoración positiva respecto del uso de la imagen landsat TM para la clasificación de bosques templados en el centro-sur de Chile. Además, es necesario agregar que el presente estudio constituye una de las primeras aproximaciones en la cual la superficie de bosque nativo monitoreada es de una extensión importante (66.830 ha) (Ojeda *et al.*, 2011).

### 3.11 Fiabilidad usuario y productor derivado de la matriz de error.

Tabla 14. Fiabilidad usuario y productor para la clasificación supervisada, a partir de TM1, 2 y 3 para 33 categorías.

Nombre categoría	Etiqueta	Fiabilidad usuario (%)	Fiabilidad productor (%)	Fiabilidad promedio (%)	Superficie (ha).
Conguillío	1	53,6	38,5	46,05	780,80
Laguna Verde	11	100	66,1	83,05	133,12
Sub-total	-	-	-		913,92
Nieve					
Nieve	2	95,5	78,8	87,15	3.990,30
Sub-total	-	-	-		3.990,30
Suelo con poca vegetación					
Suelo SV	12	72,5	54,7	63,6	5.650,18
Subtotal					5.650,18
Escoria volcánica					
Lapilli	3	99,0	54,8	76,9	4.988,70
Lapilli	10	74,5	89,7	82,1	2.189,25
Lava basáltica	6	71,1	88,1	79,6	1.856,0
Lava basáltica	7	89,8	98,4	94,1	1.695,25
Lava basáltica	5	50	75	62,5	1.381,40
Lava basáltica	4	73,8	68,9	71,35	1.181,75
Lapilli	9	37,5	65,2	51,35	1.140,24
Lava basáltica	32	50	83,3	66,65	908,50
Lapilli	8	74,1	62,5	68,3	843,00
Subtotal	-	-	-		16.184,09
Hierba					
Hierba	26	54,1	97,6	75,85	2.326,62
Hierba	13	56,5	94,5	75,25	1.819,43
Subtotal					4.182,05
<i>N. pumilio</i> -krummholz					
Bosque	16	78,4	78,4	78,4	1.181,25
Bosque	27	68,3	95,6	81,95	2.308,81
Bosque	14	90,5	69,7	80,1	3.073,25
<i>N. pumilio</i> alto					
Bosque	20	90,5	88,8	89,65	3.643,50
Bosque	15	79,3	76,7	78	2.868,50
<i>A. araucana</i> vigoroso-denso					
Bosque	17	87,7	67	77,35	2.938,75
Bosque	19	74,1	83,3	78,7	1.421,31
<i>A. araucana</i> estresado-ralo					
Bosque	30	88,2	85,7	86,95	3.129,62
Bosque	31	71,4	100	85,7	1.878,10
Bosque	33	92,6	96,1	94,35	848,31
<i>N. dombeyi</i>					
Bosque	18	81,4	74,5	77,95	2.002,06
Bosque	21	64,1	91,1	77,6	1.578,12
Bosque	23	63,6	77,7	70,65	1.641,25
Renovales de <i>N. dombeyi</i>					
Bosque	29	70	90,3	80,15	902,37
Renovales de <i>N. obliqua</i> - <i>N. alpina</i>					
Bosque	28	69,7	92,9	81,3	2.819,06
Bosque afectado por sombra					
Sombra(B)	22	87,1	53,9	70,5	3.034,87
Sombra(B)	25	60,5	74,2	67,35	592,43
Sombra(B)	24	55,8	92,3	74,05	83,50
Subtotal					35.945,06
Total					66.865,60

De la Tabla 14 se deduce que la categoría de agua “lago Conguillío” posee una fiabilidad de 46,05%, a diferencia de “laguna Verde” que posee una fiabilidad más alta para el productor y consumidor, de 83,05%. Un valor más elevado presenta la nieve, que para el productor obtuvo un valor de 95,5% de fiabilidad. En términos generales, las categorías de escoria volcánica presentan menor valor de fiabilidad (65,28%), comparada con las categorías de pastos (75,55%), y menor aún que el promedio de las 18 categorías de bosques, las cuales presentan una fiabilidad de 79,48%.

Tabla 15. Relación entre fiabilidad usuario y productor con la superficie.

Categoría	Superficie	Fiabilidad usuario	Fiabilidad productor
24	83,5	55,8	92,3
11	133,12	100	66,1
25	592,43	60,5	74,2
1	780,80	53,6	38,5
8	843,00	74,1	62,5
33	848,31	92,6	96,1
29	902,37	70	90,3
32	908,50	50	83,3
9	1.140,24	37,5	65,2
16	1.181,25	78,4	78,4
4	1.181,75	73,8	68,9
5	1.381,40	50	75
19	1.421,31	74,1	83,3
21	1.578,12	64,1	91,1
23	1.641,25	63,6	77,7
7	1.695,25	89,8	98,4
6	1.856,0	71,1	88,1
31	1.878,10	71,4	100
13	1.819,43	56,5	94,5
18	2.002,06	81,4	74,5
10	2.189,25	74,5	89,7
27	2.308,81	68,3	95,6
26	2.326,62	54,1	97,6
28	2.819,06	69,7	92,9
15	2.868,50	79,3	76,7
17	2.938,75	87,7	67
22	3.034,87	87,1	53,9
14	3.073,25	90,5	69,7
30	3.129,62	88,2	85,7
20	3.643,50	90,5	88,8
2	3.990,3	95,5	78,8
3	4.988,70	99,0	54,8
12	5.650,18	72,5	54,7

De la Tabla 15 se infiere para la fiabilidad usuario, que el acierto de la clasificación supervisada no tiene relación con el tamaño de la superficie de cada categoría, ya que por ejemplo se registra una fiabilidad sobre 90% en aquellas superficies que son menores y mayores. Tampoco influye en este análisis el origen de la categoría. Para el caso del productor, la fiabilidad elevada sobre 90% se registra en superficies menores, es decir hasta 902,37ha, y también en el tramo de superficies intermedias entre 1.578,12ha y 2.819,06ha. De lo anterior se infiere que no se produce la mayor fiabilidad en las extensiones mayores. Una situación similar se produce también en las superficies de bosques.

Tabla 16. Categorías con alta fiabilidad usuario y productor para la clasificación supervisada con 33 categorías.

Nombre categoría	Etiqueta	Fiabilidad usuario (%)	Fiabilidad productor (%)	Fiabilidad promedio (%)	Superficie (ha)
Laguna Verde	11	100	66,1	83,0	133,1
Bosque	31	71,4	100	85,7	1.878,1
Bosque	30	88,2	85,7	86,9	3.129,6
Nieve	2	95,5	78,8	87,1	3.990,3
Lava Basáltica	7	89,8	98,4	94,1	1.695,2
Bosque	33	92,6	96,1	94,3	848,3

De la Tabla 16 se deduce que en el grupo de categorías con elevada fiabilidad se encuentran los bosques, en ellas figuran 3 categorías con valores elevados (85,7; 86,9 y 94,3), las que pertenecen al grupo *A. araucana* estresado-ralo. El grupo de escorias volcánicas está representada sólo por la categoría 7 (lava basáltica escoriácea). “Laguna Verde” obtuvo un elevado valor de fiabilidad para el usuario (100%). La categoría 33 corresponde al grupo de bosques de *A. araucana* estresado-ralo y posee la mayor fiabilidad de 94,3%.

Tabla 17. Categorías con baja fiabilidad para usuario y productor, para la clasificación supervisada con 33 categorías.

Nombre categoría	Etiqueta	Fiabilidad promedio (%)	Fiabilidad usuario (%)	Fiabilidad productor (%)	Superficie (ha)
Lago Conguillío	1	46,0	53,6	38,5	780,8
Lapilli	9	51,3	37,5	65,2	1.140,2
Lava basáltica	5	62,5	50	75	1.381,4
Suelo vegetación	12	63,6	72,5	54,7	5.650,1
Lava basáltica	32	66,6	50	83,3	908,5
Bosque-sombra	25	67,3	60,5	74,2	592,4
Lapilli	8	68,3	74,1	62,5	843,0

De la Tabla 17 se deduce que no se registran categorías de bosque entre las de menor fiabilidad, como tampoco vegetación herbácea, los cuales se presentan intermedios. El lago Conguillío presenta la menor fiabilidad 46,05%. En este grupo de baja fiabilidad destacan cuatro categorías de escoria volcánica (9, 5, 32, 8). Coincidentemente, las categorías de escoria volcánica se encuentran en los niveles más altos de reflectividad. Por otro lado, la categoría de suelo con poca vegetación, representa una importante superficie en el área de estudio, alcanzando 5.650,1ha, con una fiabilidad promedio de 63,6%, siendo más bajo la fiabilidad para el productor 54,7%. Para esta misma categoría se puede agregar que la fiabilidad del usuario es mejor con un 72,5%.

### 3.12 Descripción de las categorías en el P.N. Conguillío derivadas de la clasificación supervisada.

- 1.- Lago Conguillío. Del recurso hídrico del Parque, el lago Conguillío se encuentra entre los más importantes. De acuerdo a la cartografía existente posee 780ha de superficie, y de acuerdo a la clasificación obtenida en el presente estudio 780,8ha. El lago se originó como consecuencia del cierre del cauce de un río, producto de antiguas erupciones del volcán Llaima. Su drenaje es subterráneo, debido a que su fondo está constituido por material volcánico muy poroso (CONAF, 1992) (Fotografía 1).
- 2.- Nieve (Fotografía 2)
- 3.- Lapilli fino: entre 2-16mm, muy homogéneo (Fotografía 3).
- 4.- Flujo de bloques endurecidos por derrame de lava basáltica escoriácea, cubierta en parte por el musgo *Rhacomitrium lannginosun* (Fotografía 4).
- 5.- Escoria volcánica con oxidación, localizada aproximadamente a 1.700m.s.n.m. en el “volcán Llaima” (Fotografía 5)
- 6.-. Flujos de bloques endurecidos por derrames de lavas basálticas escoriáceas al Noreste del volcán, entre el lago Conguillío y laguna Verde. Cubiertos con el liquen a 1.300m.s.n.m. de altitud (Fotografía 6).
- 7.- Flujo de bloques endurecidos por derrames de lava basáltica escoriácea de tono oscuro. Presencia de lapilli fino de 2 a 16mm (Fotografía 7).
- 8.- Piroclastos constituyentes de lapilli fino de 2 a 6mm y medio de 16 a 32mm (Fotografía 8).
- 9.- Partículas piroclásticas de lapilli fino, oscuras y con textura muy homogéneas (Fotografía 9).
- 10.- Lapilli fino con vegetación de altura, abundante entre los 1.500 y 1.700m.s.n.m. y localizada al Noreste del “volcán Llaima” (Fotografía 10).
- 11.- Laguna Verde. Su represamiento es reciente, lo que se verifica por la ausencia de vegetación en los flujos de lava. De la laguna nace el río Quetralelfu, pero debido a la filtración de sus

aguas por las paredes de su fondo se seca en épocas estivales. Se localiza en el Sureste del P.N. Conguillío y tiene una superficie de 175ha (Fotografía 11).

- 12.- Suelo sin vegetación. Gran parte de esta categoría se encuentra fuera de los límites del P.N. Conguillío (Fotografía 12).
- 13.- Pastos exóticos y *Festuca sp*, en cotas menores a 850m.s.n.m. La mayor superficie la encontramos fuera del P.N. Conguillío, al Noroeste en áreas intensamente alteradas y próximo a los cursos de agua (Fotografía 13).
- 14.- Bosque de *N. pumilio* achaparrado en altura y *N. antarctica* (krummholz). Esta categoría está representada principalmente en el límite vegetacional y en zonas bajas (1.150m.s.n.m.) al Sur del lago Conguillío (Fotografía 14).
- 15.- Lapilli fino con vegetación de alta montaña – asociado *N. pumilio*. Alcanza 1.700m.s.n.m. y es abundante al Este de Sierra Nevada y al Sur de Sierra Santander en una extensa meseta que se localiza próximo a los 1.550m.s.n.m. Además, en la ladera Noreste del volcán Llaima (Fotografía 15).
- 16.- Krummholz de *N. pumilio*, *N. antarctica* y matorrales con *A. araucana*. Esta categoría es importante en la ribera del río que nace de Sierra Nevada en dirección Oeste (Fotografía 16).
- 17.- *A. araucana*, *N. dombeyi* y asociado con árboles de *N. pumilio*. Esta agrupación es importante en zonas de baja altitud, próximo al lago Conguillío. Un sector importante se localiza en la ladera Sur de Sierra Nevada, la cual se orienta hacia el lago Conguillío, y otro sector se localiza al Suroeste del mismo lago (Fotografía 17).
- 18.- Predominio de *N. dombeyi* y asociado *A. araucana*. Estos bosques son muy abundantes en el P.N. Conguillío, estableciéndose en ambientes diversos (Fotografía 18).
- 19.- *A. araucana* vigoroso-denso *N. pumilio* preferentemente a mayor altitud. La mayor representación de esta formación se produce en el bosque ubicado cerca de los 1.550m.s.n.m. en la meseta Este de Sierra Nevada y al Sur de Sierra Santander (Fotografía 19).
- 20.- Predominio de *N. pumilio* y asociado *N. dombeyi*- *A. araucana*. Esta formación boscosa es muy abundante al Sur de Sierra Santander (Fotografía 20).
- 21.- *N. dombeyi*- *A. araucana* con presencia de *N. pumilio* bajo efecto sombra. Esta categoría es muy escasa y está representada únicamente por los bosques desarrollados al Norte del lago Conguillío (Fotografía 21)
- 22.- Sectores con predominio de renovales de *N. dombeyi*-*N. obliqua*-*N. alpina*- *N. pumilio* y *A. araucana* bajo efecto sombra (Fotografía 22).
- 23.- Predominio de la especie *N. dombeyi*, asociada a *N. pumilio* y *A. araucana* bajo efecto de sombra. La ladera se expone hacia el Oeste (Fotografía 23).

- 24.- Bosque de *N. pumilio* achaparrado y *A. araucana* en áreas de quebradas con desprendimiento de rocas, y bajo efecto sombra. Preferentemente en la ladera de Sierra Nevada con exposición Suroeste, con caída hacia el lago Conguillío (Fotografía 24).
- 25.- Bosque de *A. araucana* estresado-ralo y *N. dombeyi* bajo efecto sombra. La ladera donde es frecuente se expone en posición Suroeste en el faldeo de Sierra Nevada (Fotografía 25).
- 26.- Pastos vigorosos en cotas bajas y en el límite altitudinal. Es una categoría con escasa representación próximo a los cursos de agua al Noroeste del P.N. Conguillío y también en el límite de la vegetación en Sierra Nevada (Fotografía 26).
- 27.- Krummholz de *N. pumilio*, coirón y *A. araucana* estresado-ralo. Muy abundante en distintos niveles de altitud (Fotografía 27).
- 28.- Renovales de *N. obliqua* asociado con *N. alpina*. Bosques poco representados en el P.N. Conguillío y sólo en cotas bajas. Estos se localizan en la ladera Sur de Sierra Nevada, próximo al lago Conguillío (Fotografía 28).
- 29.- Renovales de *N. dombeyi* e individuos machos de *A. araucana*. Categoría definida por la fenología de las especies. Por un lado, en el mes de Enero los individuos de *N. dombeyi* jóvenes poseen los extremos de las ramas "coloradas", a lo que se suman abundantes flores masculinas maduras de color naranja intenso de *A. araucana* (Fotografía 29).
- 30.- Bosque de *A. araucana* estresado-ralo con bosque de *N. pumilio* altos en zonas de altitud. Abundantes al Este de Sierra Nevada y al Sur de Sierra Santander a 1550m.s.n.m. (Fotografía 30).
- 31.- Bosque de *A. araucana* estresado-ralo con bosque de *N. pumilio* achaparrado. Esta categoría se presenta en las zonas de mayor altitud en Sierra Nevada y Sierra Santander (Fotografía 31).
- 32.- Escoria volcánica cubierta en parte por el musgo *Rhacomitrium lanuginosum* y erosión eólica. Es una categoría poco representada en los ecosistemas volcánicos y se desarrolla sobre rocas y escoria volcánica (Fotografía 32).
- 33.- Bosque de *A. araucana* estresado-ralo-*N. pumilio* achaparrada, coirón y escoria volcánica. Este grupo es abundante en diversos ambientes (Fotografía 33).



Categoría 1. Lago Conguillío (Fotografía 1)



Categoría 2. Cubierta de nieve (Fotografía 2)



Categoría 3. Lapilli fino homogéneo, faldeo oriental volcán Llaima (Fotografía 3)



Categoría 4. Lava basáltica escoriácea cubierta con el musgo *Rhacomitrium lanuginosum* (Fotografía 4)



Categoría 6. Lava basáltica escoriácea cubierto por liquen (Fotografía 5)



Categoría 7. Lava basáltica escoriácea (Fotografía 6)



Categoría 8. Lapilli fino y medio (Fotografía 7)



Categoría 9. Lapilli fino homogéneo oscuro (Fotografía 8)



Categoría 10. Lapilli fino con vegetación (*Senecio sp.*) (Fotografía 9)



Categoría 11. Laguna Verde (Fotografía 10)



Categoría 13. Vegetación herbácea exótica y coirón (Fotografía 11)



Categoría 14. Krummholz de *N. pumilio* y *N. antarctica* (Fotografía 12)



Categoría 15. Vegetación en altitud y lapilli fino, asociado *N. antarctica* y *A. araucana* (Fotografía 13)



Categoría 16. Krummholz de *N. pumilio*, *N. antarctica*, *A. araucana* y matorrales (Fotografía 14)



Categoría 17. Bosque de *A. araucana* - *N. dombeyi* y asociado *N. pumilio*. Sector Sierra Nevada (Fotografía 15)



Categoría 18. Bosque de *N. dombeyi* y asociado *A. araucana*. Ribera Occidental del Lago Conguillío (Fotografía 16)



Categoría 19. Bosque de *A. araucana* - *N. pumilio* (Fotografía 17)



Categoría 20. Bosque de *N. pumilio* y asociado *N. dombeyi* – *A. araucana* (Fotografía 18)



Categoría 22. Renovales de *N. dombeyi* – *N. oblicua* - *N. alpina* – *N. pumilio* y asociado *A. araucana*. Ladera occidental ascenso Sierra Nevada. Afectado por sombra (Fotografía 19)



Categoría 23. Bosque de *N. dombeyi* y asociado *N. pumilio* – *A. araucana* afectado por sombra (Fotografía 20)



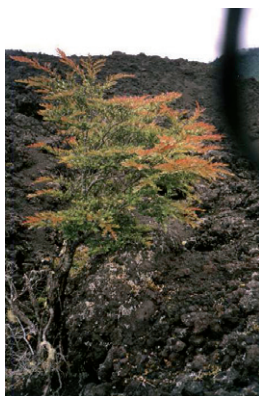
Categoría 24. Krummholz de *N. pumilio* y asociado araucaria en quebradas. Afectado por sombra (Fotografía 21)



Categoría 26. Vegetación herbácea en el límite altitudinal, de color verde más claro (Fotografía 22)



Categoría 28. Renovales de *N. alpina* y asociado *N. obliqua*. Faldeo volcán Llaima, próximo laguna Verde (Fotografía 23)



Categoría 29. Renovales de *N. dombeyi* asociado con árboles machos de *A. araucana*. Brotes nuevos de *N. dombeyi* junto con las flores masculinas de *A. araucana* definen esta categoría (Fotografía 24)



Categoría 29. Árboles de *A. araucana* con flores masculinas maduras (Fotografía 25)



Categoría 30. Bosque de *A. araucana* estresado-ralo, con *N. pumilio* altas en altitud. Parte superior de la fotografía (Fotografía 26)



Categoría 31. Bosque de *A. araucana* estresado-ralo y asociado krummholz (Fotografía 27)



Categoría 33. Bosque de *A. araucana* estresado-ralo, krummholz, coirón y escoria volcánica  
(Primer plano fotografía) (Fotografía 28)

Tabla 18. Clasificación ordenada según origen y derivado de la clasificación supervisada para 33 categorías.

CÓDIGO	CATEGORÍA	SUPERF.(ha)
<u>AGUA</u>		
1	Lago Conguillío	780,8
11	Laguna Verde	133,1
2	Nieve	3.990,3
<u>ESCORIA VOLCÁNICA</u>		
3	Lapilli fino homogéneo	4.988,7
8	Lapilli fino y medio	843,0
9	Lapilli fino homogéneo oscuro	1.140,2
5	Lava basáltica – oxidación	1.381,4
7	Lava basáltica escoriácea	1.695,2
32	Lava basáltica escoriácea, musgo, erosión	908,5
10	Lapilli fino con vegetación ( <i>Senecio sp.</i> )	2.189,2
4	Lava basáltica escoriácea - Musgo ( <i>Rhacomitrium lanuginosum</i> )	1.181,7
6	Lava basáltica escoriácea	1.856,0
(*)	– Liquen	
<u>SUELO CON POCA VEGETACIÓN</u>		
12	Suelo con poca vegetación	5.650,1
<u>VEGETACIÓN HERBÁCEA Y MATORRALES</u>		
13	Vegetación herbácea exótica y <i>Festuca sp.</i>	1.819,4
26	Vegetación herbácea vigorosa en cotas bajas y limite altitudinal ( <i>Azorella trifurcata</i> , <i>Pernettya pumila</i> , <i>Festuca sp.</i> , <i>Adesmia retusa</i> y <i>Maytenus distichya</i> )	2.326,6
<u>BOSQUES</u>		
<b>(Nothofagus pumilio)</b>		
(**)	<u>Bosques achaparrados y krummholz</u>	
16	Bosque krummholz de <i>N. pumilio</i> , <i>N. antarctica</i> , <i>A. araucana</i> y Matorrales	1.181,2
27	Bosque krummholz de <i>N. pumilio</i> , <i>Festuca sp.</i> , asociado <i>A. araucana</i> estresado-ralo	2.308,8
14	Bosque krummholz de <i>N. pumilio</i> y/o asociado a <i>N. antarctica</i>	3.073,2
24	Sombra – Bosque krummholz de <i>N. pumilio</i> asociado <i>A. araucana</i> en quebrada	83,5
<b><u>Bosque alto N. pumilio</u></b>		
20	Bosque <i>N. pumilio</i> asociado <i>N. dombeiyi</i> – <i>A. araucana</i>	3.643,5
15	Vegetación de alta montaña y lapilli fino asociado <i>N. pumilio</i> y <i>A. araucana</i>	2.868,5
<b>(Araucaria araucana)</b>		
<u>Bosque A. araucana vigoroso-denso</u>		
17	Bosque <i>A. araucana</i> – <i>N. dombeiyi</i> , asociado <i>N. pumilio</i>	2.938,7
19	Bosques <i>A. araucana</i> – <i>N. pumilio</i> de altitud	1.421,3
<u>Bosque A. araucana estresado-ralo</u>		
30	Bosques <i>A. araucana</i> estresado-ralo con <i>N. pumilio</i> alto en altitud	3.129,6

31	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado krummholz	1.878,1
33	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo, krummholz, <i>Festuca sp.</i> y escoria volcánica	848,3
25	Sombra – Bosque <i>A. araucaria</i> estresado-ralo asociado <i>N. dombeiyi</i>	592,4

(*Nothofagus dombeiyi*)

Bosque adulto de *N. dombeiyi*

18	Bosque <i>N. dombeiyi</i> asociado <i>A. araucana</i>	2.002,0
21	Bosque <i>N. dombeiyi</i> – <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> – con Sombra	1.578,1
23	Bosque <i>N. dombeiyi</i> asociado <i>N. pumilio</i> – <i>A. araucana</i> con sombra	1.641,2

Renovales de *N. dombeiyi*

29	Renovales <i>N. dombeiyi</i> asociado árboles machos de <i>A. araucana</i>	902,3
22	Sombra – renovales <i>N. dombeiyi</i> - <i>N. obliqua</i> - <i>N. alpina</i> - <i>N. pumilio</i> asociado <i>A. araucana</i>	3.034,8

(*Nothofagus alpina* – *Nothofagus obliqua*)

Renovales

28	Renovales <i>N. alpina</i> asociado <i>N. obliqua</i>	2.819,0
----	---	---------

(\*) Líquenes no identificados

(\*\*) Krummholz son bosques leñosos retorcidos.

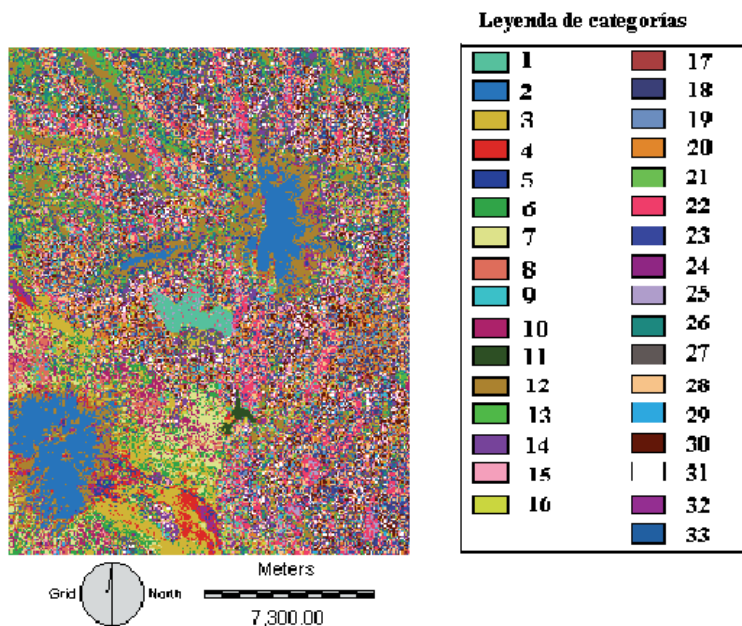


Figura 10. Clasificación supervisada para 33 categorías, a partir de TM1, 2 y 3.

El autor Walter (1981) basándose en trabajos de Whittaker (1975), hace una reflexión respecto al concepto de “formaciones vegetales” colocándolo al mismo nivel que el de bioma, y señala que la única diferencia consiste en que los primeros consideran sólo a las plantas. Además, menciona que este concepto clasifica de un modo fisionómico-ecológico, pero sólo basado en características formales morfológicas, de este modo, se exponen formaciones ecológicas muy diversas. Por este motivo, el presente estudio se inclina, en parte, por el concepto comunidad-tipo expuesto por Whittaker (1975), en lugar de formación vegetal. Este último autor establece, en este sentido, que la comunidad-tipo puede ser caracterizada por las especies dominantes y composición de ellas. También plantea este autor, que los límites entre las comunidades serán más o menos arbitrarias, ya que dependerá de las características escogidas para la clasificación. En la presente investigación y para la toma de datos de campo se modificó la metodología propuesta por Etienne y Contreras (1981) utilizada en zona árida y semiarida del Norte de Chile. La única variable que permanece en el modelo es “Especie Dominante”. No se considera la variable “Artificialización” por la condición de naturalidad del bosque y se incorpora “Factores del Medio Físico” (principalmente altitud), ya que las condiciones orográficas y topográficas, inciden en la fisionomía de las comunidades vegetales presentes en el P.N. Conguillío.

El autor Donoso (1981) utiliza el concepto expuesto por Whittaker (1975), y cita la tipología forestal para los bosques de Chile. En este sentido, y de acuerdo a la percepción que nos permite el satélite landsat TM, en el presente estudio se utilizó el concepto comunidad-tipo, ya que las categorías del presente estudio no se refieren sólo a estructuras forestales, sino que abarcan diferentes comunidades biológicas. Se utilizó, además, el sistema de clasificación jerárquica propuesto por Anderson *et al.* (1976), referido al uso y cobertura del suelo, el cual posee gran utilidad para sensores remotos. De acuerdo a Franklin (1986) su sistema puede aplicarse en diversos territorios. Con esta propuesta jerárquica, se clarificó el concepto de clasificación para una sola especie, por lo que se ordenó de acuerdo a la densidad de cobertura en: alta, media y baja (Beaubien *et al.*, 1999). Del mismo modo, se hace una reflexión acerca de la distribución de la vegetación, si es un "continuum" o son comunidades discretas. La escala de trabajo del satélite landsat TM, en este sentido, es versátil por el nivel de análisis geoespacial que se puede lograr. Whittaker (1975) plantea, que la escala de visión de las cubiertas terrestres influye en gran medida en la percepción que tengamos sobre su distribución espacial. De este modo, en nuestra clasificación lograda, se observa que sólo en algunos lugares se presentan continuos de especies arbóreas dominantes, pero lo más frecuente es una distribución de píxeles tendiente a lo discreto, situación que podría exponerse como una limitación de la cartografía obtenida con el satélite landsat TM, ya que en muchos casos se registran sólo en las especies arbóreas dominantes. Por lo tanto, en el presente trabajo se denominan a las distintas categorías como comunidad-tipo (tipo-bosque), con excepción

de las volcánicas, que se citan en la generalidad como “categoría”. Las macro categorías utilizadas (Tabla 18) son las siguientes: agua, escoria volcánica, suelo con poca vegetación, vegetación herbácea y bosques. De acuerdo a los índices de vegetación se analizaron los diferentes bosques que componen el P.N. Conguillío. Como respuesta, se observaron variaciones importantes en bosques localizados a distintas altitudes.

### 3.13 Agrupación de categorías “tipo-bosque” según especies dominantes y origen geológico, derivado de TM1, 2 y 3.

La Tabla 19. Categorías tipo-bosque y relación con geología y relieve desde TM1, 2 y 3.

Categoría	Exposición	Geología	Superficie (ha)
30	N/S/E/O	1,2,3*	3.129,6
14	N/S/E/O	1,2,3	3.073,2
22	N/S/E/O	1,2,3	3.034,8
17	N/S/E/O	1,2,3	2.938,7
15	N/S/E/O	1,2,3	2.868,5
18	N/S/E/O	1,2,3	2.002,0
23	N/S/E/O	1,2,3	1.641,2
25	N/S/E/O	1,2,3	1.218,0
28	N/S/E/O	2	2.819,0
16	N/S/N-O	1	1.181,2
31	N-E/N/O	1	1.878,1
27	N/N-E	1	2.308,8
33	N/N-E	1	848,3
29	N/E	1,2	902,3
19	S/E	1,2	1.421,3
20	S-E	1,2,3	3.643,5
21	S	2	1.578,1
24	O	2	83,5

- (\*)
1. Serie efusivo mático lavas andesíticas y basálticas continental
  2. Lavas básicas, principalmente basaltos
  3. Rocas graníticas

### 3.14 Relación entre las categorías tipo-bosque y altitud.

Tabla 20. Categorías tipo-bosque y rango de altitud.

Etiqueta	Altitud Media m.s.n.m.	Categoría tipo-bosque
16	664-1.218	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> , <i>N. antarctica</i> , <i>A. araucana</i> y matorrales
14	664-1.550	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> y/o asociado <i>N. antarctica</i>
17	886-1.439	B. <i>A. araucana</i> – <i>N. dombeyi</i> , asociado <i>N. pumilio</i>
20	886-1.550	Bosque <i>N. pumilio</i> asociado <i>N. dombeyi</i> – <i>A. araucana</i>
15	886-1.550	Veg. de alta montaña y lapilli fino, asociado <i>N. pumilio</i> y <i>A. araucana</i>
18	886-1.550	Bosque <i>N. dombeyi</i> asociado <i>A. araucana</i>
21	1.107-1.329	Bosque <i>N. dombeyi</i> – <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> – Sombra
25	1.218	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado <i>N. dombeyi</i>
23	1.107-1.439	Bosque <i>N. dombeyi</i> asociado <i>N. pumilio</i> – <i>A. araucana</i> sombra
28	1.107-1.550	Renovales <i>N. alpina</i> asociado <i>N. obliqua</i>
19	1.218-1.439	Bosques <i>A. araucana</i> – <i>N. pumilio</i> de altitud
22	1.107-1.550	Sombra – renovales <i>Nothofagus</i> asociado <i>A. araucana</i>
24	1.329	Som – Bosq. krummholz de <i>N. pumilio</i> asc. <i>A. araucana</i> en quebrada
29	1.218-1.550	Renovales <i>N. dombeyi</i> asociado árboles machos de <i>A. araucana</i>
31	1.329-1.660	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado krummholz
27	1.329-1.660	B. krummholz, coirón., asoc. <i>A. araucana</i> estresado-ralo
30	1.439-1.660	Bosques <i>A. araucana</i> estresado-ralo con <i>N. pumilio</i> alto en altitud
33	1.439-1.771	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo, krummholz, coirón y escoria volcánica

De acuerdo a la Tabla 20 las altitudes medias para las categorías tipo-bosque fluctúan entre 941m.s.n.m. y 1605m.s.n.m., siendo la altitud máxima del “volcán Llaima” de 3.125m.s.n.m. Las especies arbóreas que tienen mayor amplitud en altitud son *N. pumilio* y *A. araucana*. Menor es para *N. dombeyi* y menos aún para *N. antarctica*, *N. obliqua* y *N. alpina*. Las dos comunidades tipo-bosque ubicadas a menor altitud corresponden a krummholz de *N. pumilio*, *N. antarctica*, *A. araucana* y matorrales (1.181,2ha) y a los bosques de krummholz de *N. pumilio* y/o asociado *N. antarctica* (3.073,2ha). En este último caso, ambos *Nothofagus* adquieren cierta similitud en su estructura-morfología en condiciones ambientales extremas de clima y topografía y poseen en esta clasificación similar reflectividad. La categoría con mayor superficie de bosque corresponde a aquellos dominados por *N. pumilio*, acompañados por *N. dombeyi* y *A. araucana* (20). Estos alcanzan una superficie de 3.643,5ha y se localizan en el rango 886 y 1.550m.s.n.m. Las categorías localizadas en las altitudes mayores corresponden a los bosques constituidos por *A. araucana* estresado-ralo desarrollándose sobre 1.329m.s.n.m. y pudiendo elevarse hasta los 1.771m.s.n.m. Estos corresponden específicamente a las comunidades tipo *A. araucana* estresado-ralo asociado

krummholz; bosques de krummholz con coirón y asociado a éste *A. araucana* estresado-ralo; bosques de *A. araucana* estresado-ralo con *N. pumilio* alto en altitud; y bosques de *A. araucana* estresado-ralo con krummholz, coirón y escoria volcánica.

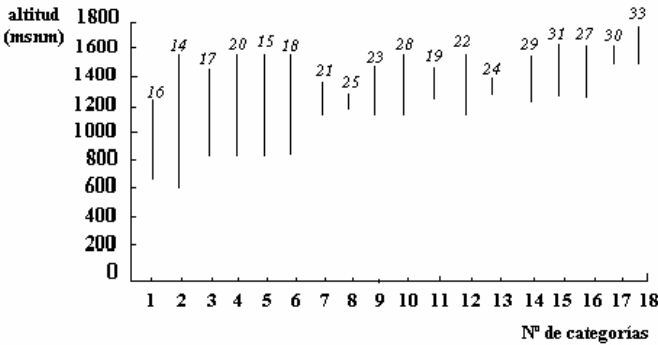


Figura 11. Amplitud de altitud de las categorías tipo-bosque en el P.N. Conguillío.

3.15 *Amplitud de la altitud para las comunidades tipo-bosque*”. Diversos autores se refieren a la importancia de la altitud en los bosques templados del centro-sur de Chile, entre ellos se pueden citar los autores Weinberger (1977), Schlegel *et al.* (1979), Schmidt *et al.* (1980), Veblen (1982), Lara (1985), Uriarte y Grosse (1991) y Armesto *et al.* (1997). Estos autores explican la influencia que tiene la altitud en la composición florística actual de las diversas comunidades vegetales, aspecto resaltado por la abrupta topografía que posee la Cordillera de los Andes. Estas investigaciones estudian los cambios que sufren especies forestales en relación a la altitud. Algunos autores que han indagado acerca de la morfoecología de algunas especies nativas forestales son: Donoso (1993), Armesto *et al.* (1997), Ramírez *et al.* (1997). En este contexto, las especies forestales presentes en el P.N. Conguillío y que han sido sujeto de investigaciones son *N. pumilio* y *N. antarctica*, en ellas se han caracterizado algunos morfotipos (la situación de krummholz). En este sentido, un aporte de la presente investigación se relaciona precisamente con los cambios que sufren estas especies respecto al gradiente altitudinal. Además, se aporta sustancialmente con la especie forestal *A. araucana*, ya que a ésta se le diferenció por su condición de estrés y densidad de individuos por superficie. En la Fig. 10 se observan los tramos que ocupan las 18 comunidades tipo-bosque en un gradiente altitudinal, generadas a partir de la combinación TM1, 2 y 3. En ella se observa que la altitud más frecuente donde conviven distintas comunidades tipo-bosque corresponde a la cota 1.329m.s.n.m., en este rango se presentan las categorías; 14, 17, 20, 15, 18,

21, 23, 28, 19, 22, 24, 29, 31 y 27. Fuera de él quedan 16, 25, 30 y 33. De la zona estudiada la formación de krummholz y/o asociado *N. antarctica*, constituyen la categoría con la mayor extensión en un gradiente altitudinal en Sierra Nevada, cubriendo una diferencial entre 664m.s.n.m. y 1.218m.s.n.m., es decir, 886m. Le siguen en amplitud con 664m de diferencial la comunidad de *N. pumilio* asociado *N. dombeyi*- *A. araucana* (20), vegetación de alta montaña y lapilli fino (asociado *N. pumilio* y *A. araucana*) (15) y los bosques de *N. dombeyi* asociado *A. araucana* (18), estableciéndose entre los 886m.s.n.m. y 1.550m.s.n.m. Del mismo modo, las comunidades tipo-bosque con el menor tramo de diferencia en altitud corresponden a los de *N. dombeyi*- *A. araucana* asociado *N. pumilio* -con sombra (21), bosques de *A. araucana*- *N. pumilio* de altitud (19), bosque de *A. araucana* estresado-ralo asociado *N. dombeyi*-sombra (25) y bosques con sombra de krummholz asociado *A. araucana* en quebradas (24). Cada uno de estos bosques posee una diferencial altitudinal de 222m, 221m, 100m y 100m respectivamente. La formación boscosa que alcanza la máxima altitud (1.771m.s.n.m.), corresponde a *A. araucana* estresado-ralo asociado a krummholz. Analizando la participación de la especie *A. araucana* en el gradiente altitudinal, encontramos que abarca todo el rango estudiado, es decir, desde los 664m.s.n.m. hasta los 1.771m.s.n.m. En este tramo *A. araucana* crece con alto vigor-denso y en los tramos superiores existen categorías estresado-ralo. Las comunidades de *A. araucana* con menor cobertura se localizan preferentemente en el tramo superior del faldeo de Sierra Nevada, entre los 1.329m.s.n.m. y 1.771m.s.n.m. con amplitud de 442m. (Fig. 10). De las 4 categorías que componen esta agrupación forestal en altura, en 3 de ellas la conífera *A. araucana* se presenta como la especie principal. La situación más frecuente en que se encuentra ésta, es acompañada por krummholz casi en el límite altitudinal (31), y acompañada por individuos de *N. pumilio* alto en la exposición Sureste de Sierra Nevada (30). A mayor altitud (1.771m.s.n.m.), en varias exposiciones de Sierra Nevada, destaca *A. araucana* como especie arbórea importante acompañada por *Festuca* sp. (33). Entre los 1.329m.s.n.m. hasta 1.660m.s.n.m. *A. araucana* permanece solo acompañando a los bosques achaparrados de krummholz y como individuos con menor densidad y cobertura (27). Para el caso de *N. pumilio*, la encontramos dominando y creciendo como individuos altos, en comunidades con *N. dombeyi* y *A. araucana* (20) en el tramo 886-1.550m.s.n.m., principalmente en la ladera Sureste de Sierra Nevada. Esta especie constituye bosques altos desde los 886m.s.n.m., donde se asocia con *N. dombeyi* y *A. araucana*, hasta los 1.660m.s.n.m., donde acompaña en altitud a ejemplares de *A. araucana* estresado-ralo y vigoroso-denso. Por otro lado, *N. pumilio* achaparrado, “krummholz”, la detectamos como especie principal y asociada en algunos casos a *N. antarctica*, desde los 664m.s.n.m. hasta los 1.550m.s.n.m. y posteriormente en altitud se asocia a *A. araucana* como dominante hasta los 1.660m.s.n.m. Esta situación se presenta en todas las orientaciones de Sierra Nevada. El otro *Nothofagus* presente corresponde a la especie *N. dombeyi* la

cual crece como especie dominante en un tramo intermedio de altitud, entre 886m.s.n.m. y 1.550m.s.n.m.

Tabla 21. Comunidad tipo-bosque y altitud máxima.

Categoría	Altitud (máx.) m.s.n.m.	Comunidad tipo-bosque
16	1.218	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> , <i>N. antarctica</i> , <i>A. araucana</i> y matorrales
25	1.218	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado <i>N. dombeiyi</i>
21	1.329	Bosque <i>N. dombeiyi</i> – <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> – con Sombra
24	1.329	Som – Bosq. krummholz de <i>N. pumilio</i> asc. <i>A. araucana</i> en quebrada
17	1.439	B. <i>A. araucana</i> – <i>N. dombeiyi</i> asociado <i>N. pumilio</i>
23	1.439	Bosque <i>N. dombeiyi</i> asociado <i>N. pumilio</i> – <i>A. araucana</i> con sombra
19	1.439	Bosques <i>A. araucana</i> – <i>N. pumilio</i> de altitud
14	1.550	B. krummholz de <i>N. pumilio</i> y/o asociado a <i>N. antarctica</i>
20	1.550	Bosque <i>N. pumilio</i> asociado <i>N. dombeiyi</i> – <i>A. araucana</i>
18	1.550	Bosque <i>N. dombeiyi</i> asociado <i>A. araucana</i>
28	1.550	Renovales <i>N. alpina</i> asociado <i>N. obliqua</i>
29	1.550	Renovales <i>N. dombeiyi</i> asociado árboles machos de <i>A. araucana</i>
22	1.550	Sombra – renovales <i>Nothofagus</i> asociado <i>A. araucana</i>
15	1.550	Veg. de alta montaña y lapilli fino, asociado <i>N. pumilio</i> y <i>A. araucana</i>
30	1.660	Bosques <i>A. araucana</i> estresado-ralo con <i>N. pumilio</i> alto en altitud
31	1.660	Bosque <i>A. araucana</i> estresado-ralo asociado krummholz
27	1.660	B. krummholz, coirón, asoc. <i>A. araucana</i> estresado-ralo
33	1.771	B. <i>A. araucana</i> estresado-ralo, krummholz, coirón. y escoria volcánica

En la Tabla 21 se observa que las altitudes máximas para las comunidades tipo-bosque se localizan entre 1.218m.s.n.m. y 1.771m.s.n.m. con una diferencial de 553m. Entre las comunidades que alcanzan menor altitud máxima se encuentran los bosques constituidos por *N. dombeiyi*, representado en las categorías 17, 21, 23 y 25. En el límite altitudinal 1.660 m.s.n.m. en Sierra Nevada, se localizan los bosques de *A. araucana* estresado-ralo con *N. pumilio* alto en altitud, la misma especie se asocia con krummholz.

### 3.16 Relación entre las comunidades tipo-bosque y NDVI.

Tabla 22. Altitud y NDVI por categoría tipo-bosque.

Etiqueta	Altitud (máx.) m.s.n.m.	NDVI
16	1.218	0,73
25	1.218	0,21
21	1.329	0,62
24	1.329	-0,04
17	1.439	0,61
23	1.439	0,54
19	1.439	0,62
14	1.550	0,68
20	1.550	0,60
18	1.550	0,60
28	1.550	0,58
29	1.550	0,55
22	1.550	0,38
15	1.550	0,61
30	1.660	0,57
31	1.660	0,61
27	1.660	0,48
33	1.771	0,40

De la Tabla 22 se desprende que para la especie *A. araucana* y acompañantes, a medida que aumenta la altitud tiende a disminuir el NDVI. De este modo, se deduce que para la categoría 17, a los 1.439m.s.n.m. (bosque de *A. araucana*- *N. dombeyi* asociado *N. pumilio*) el NDVI es de 0,61. La categoría 33 localizada a mayor altitud (1.771m.s.n.m.), obtiene un NDVI 0,4. Es decir, en una diferencia de altitud de 332m, disminuye significativamente el vigor-densidad. De acuerdo al NDVI todas las categorías con la especie *A. araucana* como dominante poseen un valor aceptable de vigor-densidad por sobre el umbral crítico, siendo el valor mayor 0,62 y el menor 0,57. Para el caso de *N. dombeyi*, en la Tabla 22 se observa que las categorías de bosque de *N. dombeyi* asociado *A. araucana*, y los bosques de *N. dombeyi*- *A. araucana* asociado con *N. pumilio*-sombra, poseen valores importantes de NDVI (0,60 y 0,62 respectivamente). De acuerdo al NDVI, la comunidad de krummholz, *N. antarctica*, matorrales y *A. araucana*, constituye la estructura de bosque con mayor vigor, con un valor de 0,73.

Descripción de las categorías por NDs.

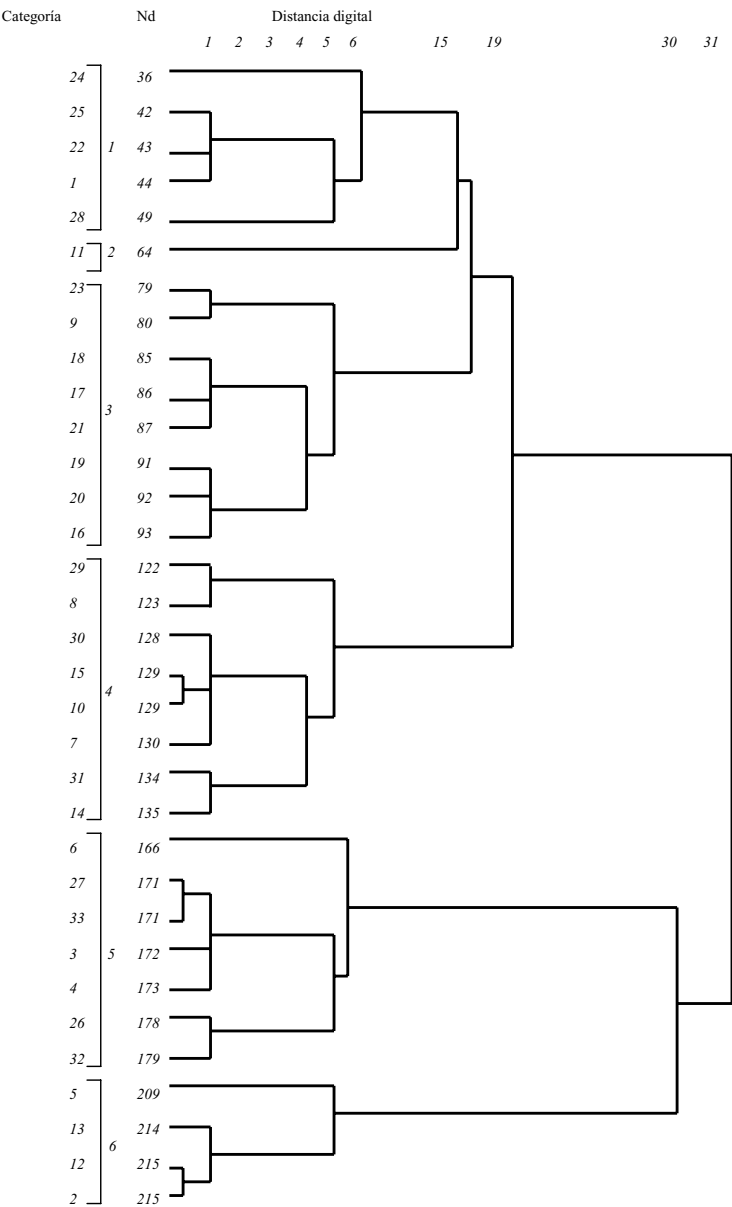


Figura 12. Dendrograma de categorías originales y ND, desde TM1, 2 y 3 con 33 categorías.

En el dendrograma de la Fig. 11, se observa que la extensión digital ocupada del espectro electromagnético es amplia, esta va desde el ND 36 para la comunidad tipo-bosque (24), al ND 215 correspondiente a nieve. La categoría con ND menor sin condiciones de sombra, corresponde al lago Conguillío (1), localizado en ND 44. En el otro extremo espectral, en el rango de mayor reflexión, se localiza la nieve y el suelo con escasa vegetación ND 215. Por lo tanto, la amplitud electromagnética máxima alcanzada es ND 171. Otra característica importante observada en el dendrograma, es que existen 25 categorías separadas sólo por un ND. Por lo tanto, se infiere que las categorías están espectralmente próximas. La ventaja de ello es que se cubre gran parte de la variabilidad espectral de la imagen "volcán Llaima". En el dendrograma se producen 6 conglomerados diferenciados por al menos 15 ND. El primero de ellos lo componen las categorías 24, 25, 22, 1, 28; segundo, 11; tercero, 23, 9, 18, 17, 21, 19, 20, 16; cuarto, 29, 8, 30, 15, 10, 7, 31, 14; quinto, 6, 27, 33, 3, 4, 26, 32 y sexto, 5, 13, 12, 2. Las categorías de bosque sin estar afectados por sombra se localizan en el tramo electromagnético ND 28 (renovales de *N. alpina* asociado *N. obliqua*), hasta el ND 171 (bosque de *A. araucana* estresado-ralo, krummholz, coirón y escoria volcánica). De los seis conglomerados diferenciados por su separación digital, las categorías de bosques ocupan cuatro. Para las categorías cuyo componente es escoria volcánica, las de lapilli ocupan tres conglomerados. A diferencia del conglomerado de lapilli, el de lava basáltica ocupa el tramo superior del espectro, con los tres conglomerados, es decir, desde el ND 122, hasta el superior ND 215. Las categorías de agua, ocupan los dos conglomerados inferiores, correspondiente a los de mayor absorción. Del espectro electromagnético se desprende que existen dos conglomerados que mantienen la mayor diversidad de categorías con origen diverso, estos son el 4 y 5.

#### 4. Bibliografía

- Altamirano, A., C. Echeverría y A. Lara. 2007. Efecto de la fragmentación forestal sobre la estructura vegetal de las poblaciones amenazadas de *Legrandia concinna* (Myrtaceae) del centro-sur de Chile. *Revista chilena historia natural*. 80:27-42.
- Amigo, J. and C. Ramírez. 1998. A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Plant Ecology*. 136:9-26.
- Anderson, J.R., E.E. Hardy, J.T. Roach and R.E. Witmer. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. Washington DC, USA. Geological Survey Professional Paper. 964 p.
- Apan, A. 1997. Land cover mapping forest rehabilitation planning using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 18:1029-1049.
- Apan, A. and J. Peterson. 1994. Land cover mapping for tropical reforestation planning using Landsat TM data: the case of Mindoro, Philippines. 7<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing Conference. 1-4 March. Melbourne, Australia. pp. 9-14.
- Armesto, J., P. León y K. Arroyo. 1997. Los bosques templados del sur de Chile y Argentina: Una isla biogeográfica. Monografías. En: Ecología de los bosques nativos de Chile. eds.: J. Armesto, C. Villagrán y M. Arroyo. Editorial Universitaria, Universidad de Chile, Santiago. pp. 23-28.
- Armesto, J., R. Roíz y P. León-Lobos. 1997. Ecología de los bosques Chilenos: Síntesis y Proyecciones. Monografías. En: Ecología de los bosques nativos de Chile. eds.: J. Armesto, C. Villagrán y M. Arroyo. Editorial Universitaria, Universidad de Chile, Santiago. pp. 405-421.
- Arroyo, T., L. Cavieres, A. Peñaloza, M. Riveros y A. Faggi. 1997. Relaciones fitogeográficas y patronales regionales de riqueza de especies en la flora del bosque lluvioso templado de sudamérica. En: Ecología de los bosques nativos de Chile. ed.: Editorial Universitaria, Universidad de Chile, Santiago. pp. 71-98.
- Beaubien, J., J. Cihlar, G. Simard and R. Latifovic. 1999. Land cover from multiple Thematic Mapper scenes using a new enhancement-classification methodology. *J. Geophys. Res.* 104(22):27909-27920.
- Bekessy, S., A. Lara, M. González, M. Cortés, L. Gallo, A. Premoli, y A. Newton. 2004. Variación genética en *Araucaria araucana*. En: Variación Intraespecífica en especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. eds.: Donoso C, A. Premoli, R. Ipinza Santiago, Chile. Editorial Universitaria. pp. 215-229.
- Benoit, I. 1989. Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 157 p.
- Benoit, I. 1996. Representatividad ecológica del sistema nacional de áreas silvestres protegidas del estado. En: Libro rojo de los sitios prioritarios para la conservación de la diversidad biológica en Chile. eds.: M. Muñoz, H. Núñez y J. Yañez. Ministerio de Agricultura, CONAF, Chile. pp. 149-153.
- Brokaw, N. and R. Lent. 1999. Vertical structure. En: Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems. ed.: Hunter. New York, USA. Cambridge University Press. pp. 373-424.
- Burns, B. 1993. Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana* - *Nothofagus antarctica* forest in the southern Andes. *Journal of Biogeography*. 20:669-685.
- Campos, J. 1978. Estudio de imágenes digitales Landsat para confección de inventarios. 1º Simposium Internacional sobre Percepción Remota. Instituto Geográfico Militar. pp. 265-269.
- Chávez, P. 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62:1025-1036.
- Chuvieco, E. 1997. Fundamentos de teledetección espacial. Tercera edición. Ediciones Rialp, S.A. Madrid. 568 p.

- CITES. 2010. Convention on International Trade in Endangered Species (CITES). Consultado 10 de ene. 2010. Disponible en <http://www.cites.org/eng/app/e-appendices.pdf>.
- Cohen, W.B., T.A. Spies and M. Fiorella. 1995. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*. 16:721-746.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 1992. Antecedentes relacionados con el tipo forestal Araucaria, comuna de Lonquimay. Ministerio de Agricultura. Comunicación Interna, Temuco-Chile. 5p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 1993. Parque Nacional Conguillío. Ministerio de Agricultura. Comunicación Interna, Temuco-Chile. 7p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 1994. Parque Nacional Conguillío-Chile. Ministerio de Agricultura. Comunicación Interna, Temuco-Chile. 7p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL), CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente, CL), BIRF (Banco Interamericano de Reconstrucción y Fomento). 1999. Catastro y evaluación de recursos Vegetacionales nativos de Chile. 86 p. (Informe Novena Región).
- Conese, C. and F. Maselli. 1993. Selection of optimum bands from TM scenes through mutual information analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48:2-11.
- Congalton, R.G., R.O. Oderwald and R.A. Mead. 1983. Assessing landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49(12):1671-1678.
- Congalton, R.G. 1988. A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(5):593-600.
- Congalton, R., K. Green and J. Tepley. 1993. Mapping Old Growth Forests on National Forest and Park Lands in the Pacific Northwest from Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59:529-535.
- Di Castri, F. 1976. Bioclimatología de Chile. Universidad Católica de Chile. Santiago-Chile. 127 p.
- Domínguez, F. 1997. Topografía abreviada. 12da. edición. Ediciones Mundi-Prensa. 390 p.
- Donoso, C. 1981. Los tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de Trabajo N°38. Investigación y desarrollo Forestal (CONAF, PNUD-FAO)) (Publicación FAO Chile).
- Donoso, S. y H. Schmidt. 1991. Crecimiento de la regeneración de *Araucaria araucana*. K. Koch con intervenciones silvícolas. *Ciencias Forestales*. 7(1-2):13-19.
- Donoso, C. 1993. Bosques Templados de Chile y Argentina. Variación, Estructura y Dinámica. Editorial Universitaria, S.A. Impreso en Chile. 483 p.
- Donoso, C. 1997a. Árboles nativos de Chile. Guía de Reconocimiento. Marisa Cúneo Ediciones, Valdivia, Chile. 115 p.
- Donoso, C. 1997b. Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente. Editorial Universitaria, Chile. 368 p.
- Donoso, C. M.E. González, M. Cortés, C. González, P. Donoso y M. Hernández. 2008. Población de araucaria enana (*Araucaria araucana*) en la Cordillera de Nahuelbuta, Chile. *Bosque*. 29(2):170-175.
- Drake, F., M. Herrera y E. Acuña. 2005. Propuesta de manejo sustentable de *Araucaria araucana* (Mol. C. Koch). *Bosque*. 26(1):23-32.
- Eastman, J.R. 1997. IDRISI. Versión 2.0. User,s Guide. Worcester, Ma., Clark University.
- Eastman, J.R. 2004. IDRISI Kilimanjaro, Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Worcester MA, USA. Labs Clark University. 351 p.
- Echeverría, C., D. Coomes, J. Salas, J. María, Rey-Benayas, A. Lara and A. Newton. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological conservation*. 130:481-494.
- ESRI. 2003. Arcview GIS. The Geographic Information System for Everyone. California, USA. Environmental Systems Research Institute. 350 p.

- Etienne, M. y D. Contreras. 1981. Cartografía de la vegetación y sus aplicaciones en Chile. Boletín Técnico N° 46. Facultad de Agronomía Universidad de Chile. Santiago. 26 p.
- Fitzpatrick-Lins, K. 1981. Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 47(3):343-351.
- Foody, G.M. and R.A. Hill. 1995. Classification of tropical forest classes from Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 17:2353-2367.
- Franklin, J. 1986. Thematic Mapper analysis of conifer forest structure and composition. *International Journal of Remote Sensing*. 7:1287-1301.
- Franklin, S.E. 1987. Terrain analysis from digital patterns in geomorphometry and LandsatMSS spectral response. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 53:59-65.
- Franklin, S. and B. Wilson. 1992. A Three-Stage Classifier for Remote Sensing of Mountain Environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58:449-454.
- Franklin, S. 1994. Discrimination of Subalpine Forest Species and Canopy Density Using Digital CASI, SPOT PLA, and Landsat TM Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60:1233-1241.
- Fuentes, Q. 1994. ¿Que futuro tienen nuestros bosques?. Hacia la gestión sustentable del paisaje del centro y sur de Chile. Ediciones Universidad Católica de Chile. 290 p.
- Fuentes, E., C. Prado, J. Artigas, A. Lara, J. Armesto, A. Hoffmann y A. Caviedes. 1996. Ecosistemas y paisajes de Chile: una invitación a elaborar un sistema de clasificación jerárquico basado en factores limitantes. En: Libro rojo de los sitios prioritarios para la conservación de la diversidad biológica en Chile. eds.: M. Muñoz, H. Núñez y J. Yañez. CONAF. Ministerio de Agricultura, Chile. pp. 179-185.
- Gajardo, R. 1994. La vegetación natural de Chile, Clasificación y Distribución geográfica. Santiago, Chile. Editorial Universitaria S.A. 30 p.
- Gilabert, M., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*. 8:35-45.
- Gong, P. and P. Howarth. 1990. The use of Structural Information for Improving Land-Cover Classification Accuracies at the Rural-Urban Fringe. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 56:67-73.
- González, M. 2005. Fire history data as reference information in ecological restoration. *Dendrochronología*. 22:149-154.
- González, M.E., T.T. Veblen and J. Sibold. 2005. Fire history of *Araucaria-Nothofagus* forests in Villarrica National Park, Chile. *Journal of Biogeography*. 32:1187-1202.
- González, M. y T.T. Veblen. 2007. Incendios en bosques de *Araucaria araucana* y consideraciones ecológicas al madereo de aprovechamiento en áreas recientemente quemadas. *Revista chilena historia natural*. 80(2):243-253.
- Green, E., W. Strawderman and T. Airola. 1993. Assessing Classification Probabilities for Thematic Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59:635-639.
- Hall, R.J., R.S. Skakum, E.J. Arsenault and B.S. Case. 2006. Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Forest Ecology and Management*. 225:378-390.
- Hammond, T. and D. Verbyla. 1996. Optimistic bias in classification accuracy assement. *International Journal of Remote Sensing*. 17:1261-1266.
- Hansen, M., R. Dubayah and R. DeFries. 1996. Classification trees: an alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing*. 17:1075-1081.
- Hechenleitner, P., M. Gardner, P. Thomas, C. Echeverría, B. Escobar, P. Brownless y C. Martínez. 2005. Plantas amenazadas del centro-sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Edimburgo, Inglaterra. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico. 188 p.
- Hildebrand-Vogel, R., R. Godoy and A. Vogel. 1990. Subantarctic-Andean Nothofagus pumilio forests. *Vegetatio*. 89:55-68.

- Hoffmann, A., M. Arroyo, F. Liberona, M. Muñoz y J. Watson. 1998. Plantas Altoandinas en la flora Silvestre de Chile. Ediciones Fundación Claudio Gay. 280 p.
- Ihl, M. y H. Romero. 1991. Variaciones espaciales y temporales de los climas locales del Norte Chico de Chile a través de las imágenes NOAA/AVHRR: Temperaturas superficiales, índices vegetacionales y albedo. *En: III Encuentro Nacional de Percepción Remota*. Instituto profesional de Santiago. eds.: Escuela de Cartografía Selper Chile. Santiago. pp. 146-178.
- IUCN. 2010. The IUCN Red List of Threatened Species. Consultado 20 de mar. 2010. Disponible en <http://www.iucnredlist.org>.
- Jakubauskas, M. and K. Price. 1997. Empirical Relationships between Structural and Spectral Factors of Yellowstone Longpole Pine Forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 63:1375-1381.
- Janssen, L. and F. van der Wel. 1994. Accuracy Assessment of Satellite Derived Land-Cover Data: A Review. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60:419-426.
- Kamaruzaman, J. and D. Souza. 1997. Use of satellite remote sensing in Malaysian forestry and its potential. *International Journal of Remote Sensing*. 18:57-70.
- Keil, M., M. Schardt, A. Schurek and R. Winter. 1990. Forest mapping using satellite imagery. The Regensburg map sheet 1:200.000 as example. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 45:33-46.
- Knapp, R. 1984. Sampling methods and taxon analysis in vegetation science. Boston, England. W. Junk Publishers. 370 p.
- Langford, M. and W. Bell. 1997. Land cover mapping in a tropical hillsides environment: a case study in the Cauca región of Colombia. *International Journal of Remote Sensing*. 18:1289-1306.
- Lara, A. 1985. Los ecosistemas forestales en el desarrollo de Chile. Comité Nacional pro Defensa de la Fauna y Flora. Ambiente y Desarrollo. 1: 81-99.
- Lara, A., C. Donoso y J. Aravena. 1997. La conservación del bosque nativo en Chile: Problemas y desafíos. Monografías. *En: Ecología de los bosques nativos de Chile*. eds.: J. Armesto, C. Villagrán y M. Arroyo. Editorial Universitaria, Universidad de Chile, Santiago. pp. 335-361.
- Liberti, M., T. Simoniello, M.T. Carone, R. Coppola, M. D'Emilio and M. Macchiato. 2009. Mapping badland areas using LANDSAT TM/ETM satellite imagery and morphological data. *Geomorphology*. 106(3-4):333-343.
- Luebert, F. y P. Pliscoff. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 316 p.
- Markham, B.L. and J.L. Barker. 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures, EOSAT Landsat. p. 3-8. (Technical Notes N° 1).
- Martín, M.E., S.D. Newman, J.D. Aber, and R.G. Congalton. 1998. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 65:249-254.
- Mery, G. and C. Bahamondez. 1995. A Remote Sensing-Based Forest Inventory In The Natural Forest of Malleco Chile. Helsinki, Finland. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. 43 p.
- Meyer, P., I. Klaus, T. Kellenberger and T. Sandmeier. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM in an Alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48(4):7-28.
- Mohammadi, J. and S. Shataee. 2010. Possibility investigation of tree diversity mapping using Landsat ETM+ data in the Hyrcanian forests of Iran. *Remote Sensing of Environment*. 114(7):1504-1512.
- Montaldo, B.P. 1974. La bio-ecología de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch. Instituto Forestal Latino-Americano de Investigación y Capacitación. 3-55 p. (Boletín técnico N° 46).
- Morales, L. y F. Santibáñez. 1995. Estimación de la emisividad de superficie usando datos de satélite. IBM International Foundation. Proyecto FONDECYT. Universidad de Chile.

- Naesset, E. 1996. Conditional tau coefficient for assessment of producer's accuracy of classified remotely sensed data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 51:91-98.
- NASA/JPL. 2004. Shuttle Radar Topography Misi3n (SRTM). National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Consultado 10 de Julio de 2004. Disponible en <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>.
- Navarro, R.M., R. Mauricio, J. P3rez-Aranda, E. Padr3n, J.R. Guzm3n, R. Hern3ndez y L. Gonz3lez. 2008. Evaluaci3n de la mortalidad de bosques de 3nirre (*Nothofagus antarctica*) en la Patagonia chilena mediante im3genes Landsat TM y ETM+. *Bosque* 29(1):65-73.
- Ojeda, N. y M.A. Herrera. 2000. Clasificaci3n de la vegetaci3n nativa del Parque Nacional Conguillio en la Cordillera de los Andes en el Centro-Sur de Chile, a trav3s de Landsat TM y sistemas de informaci3n geogr3fica. En: Remote Sensing and forest monitoring. eds.: Institute of Geodesy and Cartography in Warsaw. Varsovia, Polonia. Institute of Geodesy. p. 55-70.
- Ojeda, N., V. Sandoval, J-L. Casanova, M.A. Herrera, L. Morales, J. San Mart3n, A. Espinosa y H. Soto. 2011. Discriminaci3n de bosques de araucaria (*Araucaria araucana*) en el Parque Nacional Conguillio, centro-sur de Chile, mediante datos Landsat TM. *Bosque*. 32(2):19-31.
- Ortiz, A. 1978. Aplicaci3n de datos de im3genes Landsat en el inventario de recursos naturales Tarapaca y Antofagasta-Chile. 1º Simposium Internacional sobre Percepci3n Remota. Instituto Geogr3fico Militar. pp. 253-256.
- Parada, H. 2006. Caracterizaci3n florística y estructural de comunidades de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch., a trav3s de fitosociolog3a e im3genes derivadas del sat3lite Landsat 7 ETM+, en el Parque Nacional Conguillio, IX regi3n, Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera. 111 p.
- Patillo, C., M. Ihl. y R. Richardson. 1988. Identificaci3n de viñedos mediante im3genes del sensor thematic mapper. Simposio de fotogrametr3a y sensores remotos. Servicio Aerofotogram3trico Fuerza A3rea de Chile. pp. 3-26.
- Peña-Cort3s, F., G. Rebolledo, K. Hermosilla, E. Hauenstein, C. Bertr3n, R. Schlatter y J. Tapia. 2006. Din3mica del paisaje para el periodo 1980- 2004 en la cuenca ribereña del Lago Budi, Chile. Consideraciones para la conservaci3n de sus humedales. *Ecolog3a Austral*. 16:183-196.
- Pollmann, W. 2003. Stand structure and dendroecology of an old-growth *Nothofagus* forest in Conguillio National Park, South Chile. *Forest Ecology and Management*. 176:87-103.
- Poso, S., M. Karlsson, T. Pekkonen and P. H3rm3. 1990. A System for Combining Data from Remote Sensing, Maps and Field Measurements for Forest Planning Purposes. Helsinki, Finland. University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management. Research Notes. 40 p.
- Quintanilla, V. 1974. La representaci3n cartogr3fica preliminar de la vegetaci3n chilena. Un ensayo fitoecol3gico del Sur de Chile. Ediciones Universitarias de Valparaíso. Universidad Cat3lica de Valparaíso-Chile. 57 p.
- Ram3rez, C., C. San Mart3n, A. Oyarz3n and H. Figueroa. 1997. Morpho-ecological study on the South American species of the genus *Nothofagus*. *Plant Ecology*. 130:101-109.
- Rep3blica de Chile. 1990. Decreto Supremo 43. Declara Monumento Natural a la *Araucaria araucana*. Santiago, Chile. Rep3blica de Chile, Ministerio de Agricultura. 19 de Marzo.
- Riaño, D., E. Chuvieco, J. Salas and I. Aguado. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for Mappinh Vegetations Types. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 41(5):1056-1061.
- Richards, J.A. 1993. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction (2<sup>nd</sup> Ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Richter, R. 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 18:1099-1111.

- Rodríguez, J. 1998. Diseño de un índice de riesgo de incendio forestal mediante el análisis de imágenes Landsat-TM. Tesis Escuela de Ingeniería Forestal Universidad de Temuco. 52 p.
- Sá, I., R. de Antonio, J. Almorox y A. de Souza. 1996. Comparación de dos métodos de clasificación digital y aplicación al cartografiado de vegetación en el nordeste brasileño. *Revista de Teledetección*. 7:27-33.
- Salas, C., L. Ene, N. Ojeda, y H. Soto. 2010. Métodos estadísticos paramétricos y no-paramétricos para predecir variables de rodal basados en Landsat ETM+: una comparación en un bosque de *Araucaria araucana* en Chile. *Bosque*. 31(3):179-194.
- Saleta, J., J. Cuevas y F. Gonzalez. 1993. Una revisión sobre las aplicaciones forestales de las imágenes de radar y su integración con imágenes en el dominio visible-infrarrojo. *Invest. Agr. : Sist. Recur. For.* 2:229-235.
- Salvador, R., X. Pons y F. Diego. 1996. Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista de Teledetección*. 7:21-25.
- San Martín, C., C. Ramírez, H. Figueroa y N. Ojeda. 1991. Estudio sinecológico del bosque de roble-laurel-lingue del centro-sur de Chile. (Chile). *Bosque*. 12:11-27.
- San Miguel, J. 1993. Forest Type Mapping and Geographic Information Analysis of the Central Sierra of Spain from SPOT and Thematic Mapper Satellite Imageries. Ph. Doctoral thesis. University of California at Berkeley. 251 p.
- Schlegel, F.M., T.T. Veblen y B. Escobar. 1979. Estudio ecológico de la estructura, composición, semillación y regeneración del bosque de Lenga (*Nothofagus pumilio*) XI Región. Informe de Convenio N° 8. Proyecto Serplac/Conaf XI Región- Universidad Austral de Chile, Facultad de Ingeniería Forestal, Serie Técnica. Valdivia-Chile. 40 p.
- Schmidt, H. 1977. Dinámica de un bosque virgen de *Araucaria-Lenga* (Chile). *Bosque*. 2:3-11.
- Schmidt, H., M. Toral y P. Burgos. 1980. Aspectos de estructura y de regeneración natural para el manejo silvícola de los bosques de *Araucaria-Lenga* en Chile. *En: Problemas florestais do genero Araucaria. eds.: Encontro da IUFRO realizado em Curitiba, Parana. pp. 159-166.*
- Segura, R. y G. Trincado. 2003. Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. *Bosque*. 24(2):43-52.
- Sesnie, S.E., P.E. Gessler, B. Finegan and S. Thessler. 2008. Integrating Landsat TM and SRTM-DEM derived variables with decision trees for habitat classification and change detection in complex neotropical environments. *Remote Sensing of Environment*. 112(5):2145-2159.
- Shoshany, M., P. Kutiel, H. Lavee y M. Eichler. 1994. Remote Sensing of vegetation cover along a climatological gradient. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 49:2-10.
- Soto, H. 2005. Caracterización fisiográfica de comunidades de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch, mediante LANSAT TM en el Parque Nacional Conguillío de la IX Región. Tesis Ingeniero Forestal. Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de la Frontera. 70 p.
- Stehman, S. 1992. Comparison of Systematic and Random Sampling for Estimating the Accuracy of Maps Generated from Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58:1343-1350.
- Stenback, J. and R. Congalton. 1990. Using Thematic Mapper Imagery to Examine Forest Understory. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 56:1285-1290.
- Uriarte, A. y H. Grosee. 1991. Los bosques de lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. Et Endl. Krasser). Una orientación para su uso y manejo; recopilación bibliográfica. Informe Técnico 126. Concepción, Chile.
- Veblen, T.T. 1982. Regeneration patterns in *Araucaria araucana* forests in Chile. *Journal of Biogeography*. 9:11-28.
- Veblen, T.T. 1985. Stand dynamic in Chilean *Nothofagus* forests. *En: The ecology of natural disturbance and patch dynamics. eds.: S.T.A. Pickett & P.S. White. pp. 35-51.*
- Veblen, T.T., T. Kitzberger, B. Burns y A. Rebertus. 1996. Perturbaciones y dinámica de regeneración en bosques andinos del sur de Chile y Argentina. *En: Ecología de los bosques nativos de Chile. eds.: J. Armesto, C. Villagrán y M. Arroyo. Universidad de Chile, Santiago. pp. 169-197.*

- Walter, H. 1981. Los Sistemas Ecológicos de los Continentes. Ed. Omega S.A. Barcelona. 147 p.
- Weinberger, P. 1977. The regeneration of the Araucano-Patagonic *Nothofagus* species in relation to microclimatic conditions. *Rep. From Tuatara*. 22:245-265.
- Weinberger, P. y C. Ramirez. 1999. Sinecología de la regeneración natural del Raulí (*Nothofagus alpina*) Fagaceae, Magnoliopsida. *Revista chilena historia natural*. 72:337-351.
- White, J., G. Kroh and J. Pinder. 1995. Forest Mapping at Lassen Volcanic National Park, California, Using Landsat TM Data and a Geographical Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 61:299-305.
- Whittaker, R. 1975. Communities and Ecosystems. MacMillan , Publ. Co., Inc. New York. 385p.
- Wright, C. and A. Gallant. 2007. Improved wetland remote sensing in Yellowstone National Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data. *Remote Sensing of Environment*. 107(4):582-605.







MoreBooks!  
publishing



# yes **i want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.get-morebooks.com](http://www.get-morebooks.com)**

---

¡Compre sus libros rápido y directo en internet, en una de las librerías en línea con mayor crecimiento en el mundo! Producción que protege el medio ambiente a través de las tecnologías de impresión bajo demanda.

Compre sus libros online en  
**[www.morebooks.es](http://www.morebooks.es)**



VDM Verlagsservicegesellschaft mbH

Heinrich-Böcking-Str. 6-8  
D - 66121 Saarbrücken

Telefon: +49 681 3720 174  
Telefax: +49 681 3720 1749

[info@vdm-vsg.de](mailto:info@vdm-vsg.de)  
[www.vdm-vsg.de](http://www.vdm-vsg.de)

