

# **Cartografía local de áreas quemadas empleando teledetección**

Gajardo, J.(1), Mena, C.(1), Ormazábal, Y.(1) y Morales, Y.(1)

(1) Centro de Geomática. Universidad de Talca. Casilla 747, Talca. Chile. jgajardo@utalca.cl

## **INTRODUCCIÓN**

Los incendios forestales son una de las mayores causas de problemas en ambientales y ecológicos en muchas partes del mundo (Morgan et al, 2001). La ocurrencia de incendios forestales, su gestión e implicancia de su investigación abarca un amplio rango de puntos de vista y disciplinas científicas, en este contexto, aunque la problemática de los incendios forestales es abordada desde diversas perspectivas dependiendo del país donde se estudia, varios autores (Chuvieco, 2002; Holden et al, 2005; Key y Benson, 1999; Miller y Yool, 2002) concuerdan en un punto en común, la necesidad de contar con estadísticas válidas y precisas que permitan evaluar las pérdidas económicas, los efectos ecológicos y el monitoreo de los cambios en los usos de la tierra y los efectos e impactos que produce en el clima el fenómeno.

En el mundo los incendios forestales provocan la destrucción de millones de hectáreas de bosques y otros tipos de vegetación, los incendios consumen valiosos recursos e infraestructuras generando un inmenso daño económico, produciendo también graves alteraciones al ecosistema, siendo una de las principales causas de transformación de la cubierta terrestre (Opazo, 2007; Navarro Cerrillo et al, 2008). Por otra parte, los incendios forestales además de daños económicos causan la pérdida de numerosas vidas humanas y la disminución de la biodiversidad (FAO, 2007).

En Chile se declaran en promedio 5.400 incendios que afectan una superficie media anual de 52.000 hectáreas y producen daños a diversas formaciones vegetacionales entre las que se encuentran matorrales, bosques nativos y pastizales. De los casos declarados, sólo unos 40 incendios anuales exceden las 200 hectáreas y pueden alcanzar superficies cercanas a las 10.000 hectáreas, siendo estos últimos los que causan los mayores daños (Navarro Cerrillo et al, 2008).

Tradicionalmente, los métodos empleados para cartografiar los incendios forestales y confeccionar las estadísticas del área afectada, consistían en levantamientos de terreno, los que presentaban los inconvenientes de ser demasiados costosos y poco precisos para grandes incendios. No obstante, en los últimos años el uso de receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) montados sobre helicópteros, han sido una buena alternativa para paliar esta dificultad. Sin embargo, esta técnica no permite dar cuenta sobre los parches de vegetación no quemada que se encuentran al interior del perímetro afectado, además de ser imposible realizar evaluaciones del nivel de severidad del incendio (García y Chuvieco, 2004).

La Teledetección permite una observación sistémica de toda la superficie de la tierra, en diversas bandas del espectro electromagnético, algunas de las cuales son sensibles a la discriminación de la señal de la vegetación quemada (Chuvieco, 2002). En este ámbito, las imágenes de satélite han sido usadas para mapear áreas quemadas en diversas locaciones geográficas con distintos tipos de vegetación, incluyendo matorrales y monte bajo (Holden et al, 2005), bosques mediterráneos (García y Chuvieco, 2004), bosques

australes (Navarro Cerrillo et al, 2008) y vegetación típica de la sabana africana (Smith et al, 2007). Por otra parte, el uso de esta disciplina se ha probado tanto a una escala de nivel regional como local. En el primer caso la mayoría de estas experiencias han sido llevadas a cabo empleando sensores de baja resolución como el National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR) (Martín y Chuvieco, 1995); SPOT-VEGETATION (Stroppiana et al, 2002) y ahora más recientemente el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Loboda et al, 2007). A nivel local, los sensores de resolución media como TM y ETM+ han sido sin duda los más ampliamente utilizados por los investigadores (Smith et al, 2007; Navarro Cerrillo et al, 2008; Miller y Yool, 2002), sin embargo, en el último tiempo se registran trabajos en otros satélites más recientes como SAC-C/MMRS (García y Chuvieco, 2004), CBERS-CCD (Cots et al, 2007) y TERRA-ASTER (Nikolakopoulos, 2003) que han mostrado resultados satisfactorios.

El uso de imágenes de satélite en la estimación de áreas quemada requiere comprender la caracterización espectral de las áreas afectadas por el fuego, no sólo por la adecuada valoración de las áreas cartografiadas, sino también por las confusiones que puedan ocasionarse con otras cubiertas. En este sentido, el conocimiento de las propiedades de la reflectancia de zonas quemadas se ha incrementado dramáticamente en los últimos años y ahora se está comenzando a entender los factores que controlan su respuesta espectral (Smith et al, 2007). Para Pereira et al (1999) el espectro visible (VIS 0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ) es una de las regiones más ampliamente conocidas y utilizadas en la cartografía de áreas quemadas, ya que las superficies que se encuentran recientemente quemadas tienden a presentarse con un color oscuro y con una baja respuesta espectral por sobre otras cubiertas. Lo anterior no está exento de problemas puesto que estas zonas se pueden confundir con cubiertas de bajas respuesta espectral comúnmente encontradas como cuerpos de agua, pantanos, bosques densos de coníferas e incluso sombras (Chuvieco, 2002). Otros espacios espectrales como el IRC (Infrarrojo cercano 0.7-1.3  $\mu\text{m}$ ) han mostrado mayor capacidad de discriminación entre zonas quemadas y no quemadas, valiéndose del contraste que se genera entre una alta respuesta en el IRC para la vegetación verde y decremento significativo que muestra en esa misma zona del espectro la vegetación afectada por el fuego. En este sentido, las zonas quemadas presentan una respuesta sistemáticamente más baja que la vegetación verde o seca, las que presentan una reflectancia sustancialmente más alta (Pereira et al, 1999). Los cambios espectrales que se producen en la zona del Infrarrojo medio (IRM 1.3-8.0  $\mu\text{m}$ ) son muy similares a los producidos en la zona del VIS, sin embargo, en esa zona el cambio fisiológico relevante es inducido por una pérdida en la cantidad de clorofila, mientras que en la zona del IRM el cambio es consecuencia de la pérdida de agua en los tejidos de la planta, por esta razón en algunos estudios (Chuvieco y Congalton, 1998; Pereira et al, 1999; Trigg y Flasse, 2001) se ha determinado que el espacio IRC/IRM es más apropiado para la discriminación de áreas quemadas que el tradicional espacio VIS/IRC utilizado en sensoramiento remoto de la vegetación.

Durante las últimas décadas se ha desarrollado un amplio número de métodos para detección y discriminación de incendios basados en el uso de índices de vegetación, los que se potencian de las capacidades de discriminación que se encuentran en los diversos rangos del espectro (Barbosa et al, 1999; Smith et al, 2007; Holden et al, 2005; Pereira, 1999b). En este contexto, aunque los índices de vegetación fueron diseñados para estimar los parámetros biofísicos de la planta y no la señal espectral de las cubiertas quemadas, han sido ampliamente usados para la detección de y cuantificación de

incendios (García y Chuvieco, 2004). Sin embargo, algunos autores (Chuvieco et al, 2002; Martín, 1998; Trigg and Flasse, 2000) han propuesto índices específicos para la discriminación de área quemada. Por otra parte se han desarrollado también métodos para la cartografía de áreas quemadas llamados multipaso, los cuales están compuestos de varias fases, generalmente en la primera de ellas se busca discriminar claramente las zonas afectadas por el incendio y en la segunda fase se emplean pixeles semillas rescatados de la primera etapa como entradas para algoritmos de crecimientos de regiones (García y Chuvieco, 2004; Bastarrika y Chuvieco, 2006; Loboda et al, 2007; Chuvieco et al, 2006).

El objetivo del presente trabajo fue realizar una estimación y cartografía del área quemada empleando índices espectrales en conjunto con un algoritmo de crecimiento regiones aplicados sobre una imagen Landsat TM para un incendio ocurrido en el año 2004 en el sector de Santa María de Mingre en la Comuna de San Javier Región del Maule.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área seleccionada para la investigación se encuentra distante a 2 kilómetros de la localidad de Nirivilo, ubicada en la Comuna de San Javier, Región del Maule (Figura 1). La zona posee un clima templado – cálido con una estación seca que se prolonga por sobre los 6 meses; temperatura media de 13.8 °C., con una precipitación anual de 940 mm. (Ulriksen et al, 1979). La topografía es abrupta y presenta diferencias de alturas van desde los 170 a 480 m.s.n.m. Con respecto a la vegetación, predominan los bosques artificiales de *Pinus radiata* y se aprecian sólo relictos de bosque nativo del tipo Roble-Hualo creciendo como renovales que brotan desde los tocones o bosquetes asociados a quebradas (Donoso, 1995).

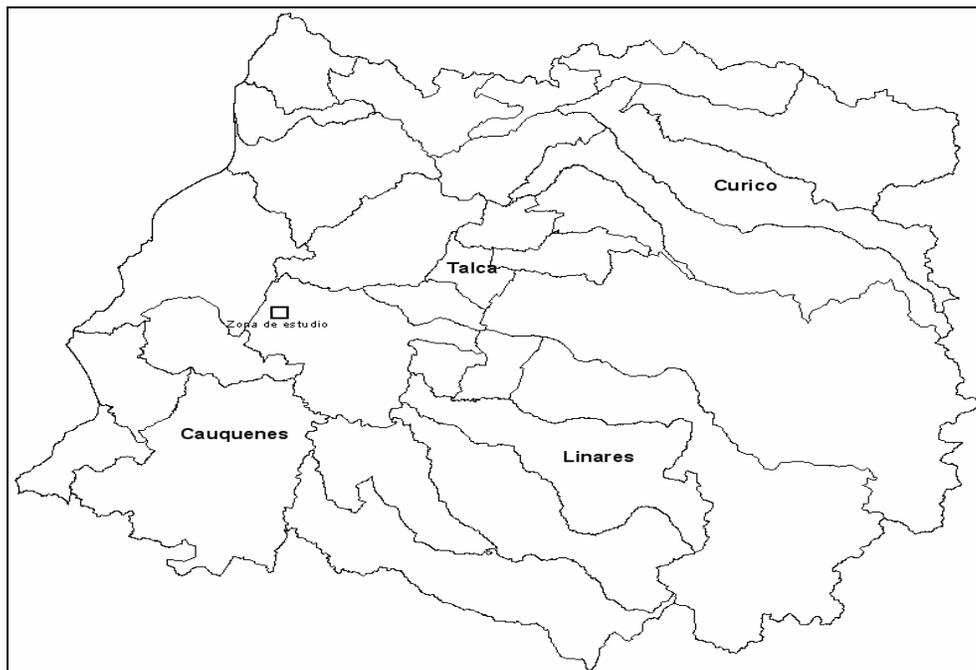


Figura 1. Región del Maule y zona de estudio.

El incendio forestal se ubicó en las coordenadas 35°.54 de latitud sur y 72°.03 de longitud oeste. El siniestro ocurrió el día 29 de Enero del año 2004 y afectó una extensión de 425 hectáreas cubiertas mayoritariamente por vegetación arbórea compuesta por plantaciones comerciales de *Pinus radiata* y cubiertas herbáceas de pastizales.

### Preprocesamiento de la imagen

La imagen Landsat 5 TM fue recibida de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) localizada en Córdoba, Argentina (<http://www.conae.gov.ar/principal.html>). La información venía separada por bandas espectrales (1 a 7) en formato Fast-format con estructura BSQ (bandas secuenciales) y con un archivo de cabecera. La fecha de la imagen correspondió al 18 de Marzo de 2004, aproximadamente 7 semanas después de ocurrido el incendio en estudio. La imagen fue recibida con un nivel de procesamiento 4 Orbit Oriented (orientación según la órbita) sin ningún sistema de proyección cartográfica asociado, por lo que fue necesario realizar una corrección geométrica para primero eliminar las distorsiones espaciales registradas durante la adquisición de la imagen y segundo para referenciar esta imagen al sistema de proyección UTM, a fin de permitir la integración y compatibilidad con una base de datos existente. La corrección geométrica de la imagen se basó en el uso de puntos de control extraídos de cartografía vectorial de la zona de estudio. Se seleccionaron 30 puntos de control, 6 de los cuales fueron empleados como puntos para la verificación de la corrección, alcanzando un error cuadrático medio (RMSE) de 0.8 pixel. Se usó un polinomio de segundo grado como función de transformación de coordenadas por tratarse de una zona con relieve moderado (Chuvienco, 2002). Con la intención de preservar al máximo las características de la imagen original, se empleó un remuestreo con la función del vecino más próximo para transferir los niveles digitales de la imagen inicial a la nuevas posiciones generadas en el proceso de corrección (García y Chuvienco, 2004). El paso próximo consistió en obtener una subescena de 314x 318 pixeles de la imagen para aislar la zona de estudio y agilizar los procesos que se realizaron sobre el área seleccionada.

### Cálculo de radiancia espectral

El satélite Landsat 5, lanzado en 1984 lleva más de 24 años entregando imágenes de la superficie de la tierra. La operación del satélite y su sistema de procesamiento ha evolucionado a través de los años. Desde el 2001 el satélite es operado por el U.S. Geological Service (USGS) y en el año 2003 y en el año 2007, el USGS ha aplicado modelos de correcciones para representar la respuesta radiométrica de cada banda y mantener dentro de lo posible las condiciones de calibración con las cuales se contaba antes de su lanzamiento (Chander et al, 2007). En este contexto, se debe poner especial atención al trabajo con las imágenes, pues dependiendo de la fecha de procesamiento se debe aplicar uno u otros procedimientos para realizar las calibraciones radiométricas respectivas (Chander, et al, 2007). Así es posible encontrar dos situaciones en las cabeceras de las imágenes Landsat 5 de CONAE: la primera donde las ganancias y sesgos vengan expresadas como tal y se encuentren en unidades de  $\text{Watts}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \mu\text{m})$  y la segunda, que las ganancias y sesgos vengan expresados como  $L_{\text{max}}$  (radiancia espectral máxima escalada) y  $L_{\text{min}}$  (radiancia espectral mínima escalada) en unidades de  $\text{mWatts}/(\text{cm}^2 \times \text{sr} \times \mu\text{m})$ . Cuando en la cabecera de los datos se presenta esta última

alternativa se deben transformar las unidades de mWatts a Watts y a partir de esos valores obtener las ganancias y los sesgos correspondientes (SIB, 2005).

Chander et al, (2007) indica la siguiente formula (1) para obtener las coeficientes de calibración de las bandas correspondientes.

$$Grescale = \frac{LMAX \lambda - LMIN \lambda}{255} \quad (1)$$

$$Brescale = LMIX \lambda$$

donde:

Grescale = factor de rescalamiento de ganancia.

Brescale = factor de rescalamiento de sesgo.

Lmin $\lambda$  = radiancia espectral mínima reescalada.

Lmax $\lambda$  = radiancia espectral máxima reescalada.

A partir de estos coeficientes es posible calcular la radiancia espectral de cada banda a empleando los niveles digitales (ND) de la imagen. Para esto Chander et al, (2007) propone la siguiente fórmula (2)

$$L\lambda = Grescale * NDBrescale + Brescale \quad (2)$$

donde:

L $\lambda$  = radiancia espectral de la banda  $\lambda$ .

ND = nivel digital o valor del pixel.

#### Corrección atmosférica

La corrección atmosférica fue llevado a cabo empleando el método del objeto oscuro (Chávez, 1996) ya que no se contaba con información sobre los perfiles atmosféricos de la zona de estudio. Aunque este método constituye una aproximación al cálculo de la reflectancia de la superficie, no considera completamente los efectos de absorción causados por los aerosoles, sin embargo, los resultados obtenidos usando este método han sido comparados con aquellos obtenidos por modelos que han usado información atmosférica in-situ, alcanzando una buena aproximación (Chuvieco, 2002). En consecuencia la reflectancia fue calculada (3) como:

$$\rho\lambda = \frac{Ke^{-s * \pi * (L\lambda - L\lambda, m)}}{E0, \lambda * Cos\theta * \tau\lambda} \quad (3)$$

donde:

$\rho_\lambda$  = reflectancia en la superficie de la tierra para la banda  $\lambda$ .  
 $K_{e-s}$  = es un factor que representa la distancia tierra-sol a través del año.  
 $L_\lambda$  = radiancia espectral de la banda  $\lambda$ .  
 $L_{\lambda,m}$  = mínima radiancia espectral de la banda  $\lambda$ .  
 $E_{0,\lambda}$  = irradiancia solar espectral para la banda  $\lambda$ .  
 $T_\lambda$  = transmitancia atmosférica para la banda  $\lambda$ .  
 $\theta$  = ángulo cenital solar

### Índices espectrales

Los índices de vegetación han sido ampliamente usados para el mapeo de área quemada, debido a los importantes cambios espectrales que causa el fuego sobre la cubierta de la vegetación. La mayoría de los índices basan su funcionamiento en el contraste espectral que se produce entre las bandas del rojo (R) donde la energía es absorbida por los pigmentos de la planta y la banda del infrarrojo cercano (IRC), donde la radiación es fuertemente reflejada por la estructura celular de la hoja (Chuvienco et al, 2002). Para la discriminación del área quemada se utilizó (4) el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), propuesto por Rouse et al., (1974) que ha mostrado un severo decrecimiento después de un incendio y que ha sido extensamente empleado para la discriminación y aislamiento de áreas quemadas (Fernández et al, 1997).

$$NDVI = \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + \rho_R)} \quad (4)$$

donde:

$\rho_{IRC}$  = reflectancia en el infrarrojo cercano

$\rho_R$  = reflectancia en el rojo

Otro índice (5) probado fue el Burn Area Index (BAI), definido por Martín (1998). Específicamente formulado para la discriminación de área quemada por sobre otras cubiertas. Su funcionamiento se basa en el cálculo de distancias espectrales de cada píxel a un valor de convergencia que suelen presentar las áreas quemadas, entregando un mayor realce de las zonas carbonizadas por sobre las respuestas de otras cubiertas (Chuvienco et al, 2002).

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{cR} - \rho_R)^2 + (\rho_{cIRC} - \rho_{IRC})^2} \quad (5)$$

donde:

$\rho_{IRC}$  = reflectancia en el infrarrojo cercano

$\rho_R$  = reflectancia en el rojo

$\rho_{cR}$  y  $\rho_{cIRC}$  = valores de convergencia que adoptan los pixeles quemados sobre las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Se definen como 0.1 y 0.06 respectivamente.

Se probó también el desempeño del ratio TM7/TM4 (6) apoyándose en la afirmación de que los ratios entre bandas reducen los efectos topográficos, ya que los tipos de cubiertas parecidas pueden variar enormemente debido a los cambios de pendiente e iluminación del terreno (Bastarrika y Chuvieco, 2006). Asimismo, Miller y Yool (2002) lo emplearon sobre imágenes TM y ETM+ para estimar diversos tipos de daños producidos por incendios en varios tipos de dosel, logrando el mejor contraste de la señal quemada en comparación con otros índices (MSAVI, NDVI) y bandas probadas (TM, PCA).

$$RATIO = \frac{\rho_{TM7}}{\rho_{TM4}} \quad (6)$$

donde:

Ratio = cociente entre la reflectancia de la banda TM7 y TM4.

$\rho_{TM7}$  = reflectancia de la banda número 7 (2.08-2.35  $\mu\text{m}$ ) del sensor Landsat TM.

$\rho_{TM4}$  = reflectancia de la banda número 4 (0.76-0.90  $\mu\text{m}$ ) del sensor Landsat TM.

### Análisis lineal de mezclas espectrales

El análisis lineal de mezclas espectrales (ALME) es una técnica que permite obtener las proporciones de varias cubiertas en función de la superficie que ocupan en cada píxel (Chuvieco, 2002). Las proporciones subpíxel de cada componente básico (endmember) considerado pueden representarse mediante la ecuación (7) (Quintano et al, 2006). En este sentido, la técnica ha mostrado buenos resultados en estudios con sensores de baja resolución AVHRR (Quintano et al, 2005) y con sensores de resolución media ETM+ (Smith et al, 2007). El análisis de mezclas espectrales fue llevado a cabo empleando el algoritmo contenido en el software ENVI/IDL 4.2, aplicando la opción de restricción “sumatoria a 1”. Los endmembers considerados fueron área quemada, vegetación sana y sombras, componentes usualmente empleados en estudios de cartografía de áreas quemadas (Chuvieco, 2002). Para extraer los miembros puros de la imagen original se realizó primero la aplicación de la transformada *Minimum Noise Fraction* (MNF), con el fin de reducir el ruido y determinar las bandas que aportan mayor información, posteriormente se aplicó la técnica del *Pixel Purity Index* (PPI) sobre la transformada que permitió identificar los píxeles más puros en la imagen.

$$ND_{pixel} = \sum (f_i ND_i) + epixel \quad (7)$$

donde:

$ND_{pixel}$  = nivel digital de la imagen que se está descomponiendo espectralmente.

$epixel$  = diferencia entre el valor ND del píxel considerado y el modelado.

$f_i$  = coeficientes que minimizan el error y representan la proporción de píxel ocupada por el componente básico considerado

$ND_i$  = son los niveles digitales de cada componente básico considerado.

## Segmentaciones de las imágenes

Debido a la falta de una imagen con fecha anterior al incendio, el estudio se abordó con un enfoque metodológico unitemporal, asumiendo las posibles confusiones espectrales que pueden encontrarse zonas de sombras o en cubiertas con tendencia estacional (Pereira et al, 1999). Para lograr una separación entre el área quemada y el resto de las cubiertas consideradas se planteó la utilización de umbrales simples (Barbosa et al, 1999; Smith et al, 2007). Así una vez que los índices fueron calculados una media de 100 puntos muestrales fue tomada al interior de la zona quemada y 400 puntos en las zonas consideradas como no quemadas, sus valores fueron registrados y se calcularon las estadísticas básicas de media y desviación estándar, los que fueron empleadas para confeccionar los umbrales que permitieron segmentar las imágenes en dos clases: (1) quemado y (0) no quemado.

### Métodos multipaso

Los métodos multipaso permiten realizar la integración de diversas técnicas que aumentan la precisión y fiabilidad de los sistemas de cartografía quemada. Entre estas técnicas es posible incluir algoritmos multitemporales, multiumbrales y de contexto espacial. El enfoque tradicional de estas técnicas radica en una metodología que se divide en dos fases, en la primera de ellas se discriminan claramente las áreas que se encuentran quemadas con el objeto de obtener los píxeles semillas y en un segundo lugar se emplean dichos píxeles como semillas para algoritmos de crecimiento de regiones (García y Chuvieco, 2004). Los métodos de crecimiento de regiones en semillas (CRBS) han sido ampliamente usados en segmentación de imágenes médicas y en los últimos años se han propuesto para su aplicación en la cartografía de áreas quemadas (García y Chuvieco, 2004; Martín et al, 2002; Bastarrika y Chuvieco, 2006).

### Separabilidad espectral

La primera fase del método pasó por seleccionar la o las bandas más sensibles para la discriminación entre las cubiertas de quemado y no quemado. Para esto se utilizó las distancias normalizadas ( $M$ ) como una medida de estadística simple de separabilidad espectral (7) (Swain y Davis, 1978).

$$M = \frac{|\mu_{quemado} - \mu_{noquemado}|}{\sigma_{quemado} + \sigma_{noquemado}} \quad (8)$$

donde:

$\mu_{quemado}$  = valor medio de las áreas quemadas.

$\mu_{noquemado}$  = valor medio de las áreas no quemadas.

$\sigma_{quemado}$  = desviación estándar de las áreas quemadas.

$\sigma_{noquemado}$  = desviación estándar de las áreas no quemadas.

En términos generales los valores más altos de  $M$ , indican una mayor separabilidad espectral entre las cubiertas consideradas. De esta forma si  $M > 1$ , indicará una buena separabilidad entre las categorías quemado y no quemado, por el contrario si  $M < 1$ , indicará una pobre separabilidad entre las cubiertas (García y Chuvieco, 2004).

## Segmentación mediante el crecimiento de regiones

La segunda fase del método multipaso, consistió en cartografiar el área quemada. Para esto se escogen los píxeles semillas, que corresponden a muestras que se encuentran cierta y efectivamente en el área quemada. Los píxeles semillas pueden establecerse visualmente por el usuario si este posee un conocimiento acabado de la zona, tipo de incendio, información contextual y espacial, etc., o por otra parte es posible seleccionarlos a través de la aplicación de umbrales sobre el índice BAI (Chuvienco et al, 2006). En este sentido un píxel se identificó como semilla siempre y cuando se encontraba entre los percentiles 98-99 del índice que presentaba una mayor separabilidad espectral (Bastarrika y Chuvienco, 2006). A continuación los píxeles más afectados por el incendio, fueron empleados como semillas para iniciar el crecimiento de un algoritmo de regiones. Estos algoritmos apoyan su funcionamiento en las relaciones contextuales encontradas en la vecindad de los píxeles marcados como semillas, así la inclusión de píxeles vecinos dentro de una región definida por una semilla se basa en una distancia espacial y espectral, siguiendo un criterio de homogeneidad (Adams y Bischof, 1994). De esta forma las regiones de píxeles quemados seguirán creciendo mientras el criterio de homogeneidad sea satisfecho. Esta segunda fase fue diseñada con el objeto de refinar y aproximar dentro lo posible, la similitud de forma entre los resultados entregados por el algoritmo y la verdadera figura del incendio, reduciendo así los errores de omisión (García y Chuvienco, 2004). El crecimiento de las regiones fue llevado a cabo sobre la banda del BAI que presentaba la mayor separabilidad espectral y empleando una utilidad del paquete PCI Geomatics 9.1. Los parámetros de entrada para el algoritmo fueron 207 como valor de tolerancia para el ingreso de un nuevo píxel vecino en el grupo de quemado y se consideró una conectividad de 4 píxeles en el tamaño de la ventana.

## Contraste de mediciones

Para realizar la validación de las mediciones obtenidas con los índices espectrales y el algoritmo de crecimiento, se dispuso de información sobre el verdadero perímetro del incendio, el cual fue obtenido a través de un levantamiento en terreno usando un equipo de navegación GPS. La información obtenida en levantamientos en terreno suele ser un poco más precisa que la tomada desde receptores adosados a helicópteros, sin embargo, ninguna de las dos métodos puede dar cuenta de las islas internas de vegetación que no se encuentran quemadas al interior del perímetro afectado (García y Chuvienco, 2004). Esta información fue proporcionada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la Región del Maule.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los diversos resultados obtenidos tras la aplicación de los índices y técnicas comentadas. La tabla 1 muestra los valores de (M) calculados para evaluar la separabilidad espectral entre las bandas al considerar las categorías de área quemada y no quemada en la imagen post-incendio. Según el índice las bandas que presentarían una mejor separabilidad en la imagen serían las bandas del cociente  $TM4/TM7$  y BAI, coincidiendo esta última con la tendencia obtenida por estudios (Bastarrika y Chuvienco, 2006; Chuvienco, et al, 2002; García y Chuvienco, 2004; Pereira, 1999b) donde los índices basados en el infrarrojo de onda corta han presentado

habitualmente los mejores desempeños con en trabajos realizados con sensores de pequeña y mediana resolución espacial. Los resultados obtenidos anteriormente, permitieron establecer al BAI como la banda sobre la cual se seleccionaron los pixeles semillas y sobre la que se aplicó el algoritmo de crecimiento.

Tabla 1. Valores de separabilidad (M) imagen Landsat post-incendio

NDVI	RATIO 7/4	BAI
1.126	1.577	1.913

Respecto a la aplicación de los diversos índices (NDVI, BAI) y ratio (7/4). La figura 2 muestra la imagen NDVI y la segmentación en las categorías de quemado y no quemado. La segmentación de la imagen fue llevada a cabo usando un umbral simple formado por el intervalo comprendido entre la media (0.190) más menos una desviación estándar (0.066) de los 100 puntos muestrales tomados al interior del perímetro del incendio. A simple vista se observa una gran confusión del índice con otras cubiertas presentes en la imagen. En este contexto, las mayores confusiones se dieron en ambos extremos del intervalo. Así en la parte baja, el índice presentó confusiones con pastizales que presentaban una gran participación de suelo descubierto. Por otra parte en la zona superior del intervalo, los principales errores se produjeron en las zonas donde se encontraba cubiertas de vegetación seca, pastizales o praderas, presentando en estas zonas una menor participación de suelo descubierto. El pobre desempeño del NDVI puede deberse a la baja densidad de vegetación presentada en dichas zonas o al bajo nivel de verdor presentado por las cubiertas, especialmente al fin de la temporada de verano (Pereira, 1999b).

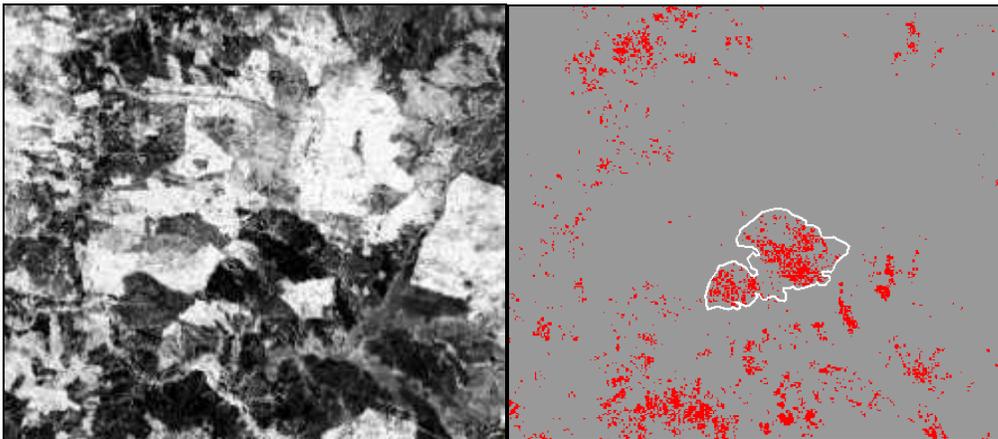


Figura 2. A la izquierda imagen NDVI. A la derecha imagen segmentada.

La figura 3 muestra la imagen calculada para el cociente 7/4 y la transformación de la misma en dos categorías, quemado y no quemado. Para la segmentación de la imagen fue empleado un umbral simple, obtenido de manera similar al NDVI. Su rango osciló entre la media (2.2060) mas y menos una desviación estándar (0.686) obtenidos a partir de puntos muestrales colectados al interior del incendio. A simple vista se puede apreciar como el ratio 7/4 tuvo un desempeño más alto que el NDVI, aislando de mejor forma el área quemada y produciendo un menor número de confusiones con otras cubiertas (Smith et al, 2007). Aún así en el índice se producen algunas confusiones en la parte baja del rango de umbralización, las que son asociadas con cubiertas de pastizales secos o con poca vegetación, que presentaron valores similares al área quemada, esto como consecuencia de una baja respuesta ofrecida por la cubiertas en el banda del

infrarrojo cercano y una alta respuesta en la banda del infrarrojo medio (Miller y Yool, 2002).

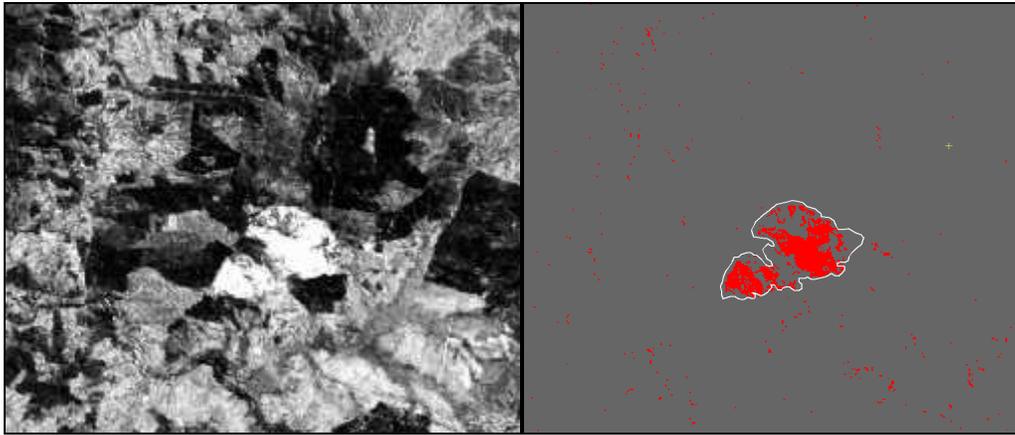


Figura 3. A la izquierda imagen cociente 7/4. A la derecha imagen segmentada.

En el caso del BAI se emplearon umbrales acotados por los valores mínimos, de forma que sólo aquellos píxeles con valores mayores al rango comprendido por la media (338.097) menos la desviación estándar (131.212) fueron considerados quemados (Bastarrika y Chuvieco, 2006). La figura 4 muestra la imagen BAI y la segmentación del índice en las categorías de quemado y no quemado, se puede apreciar como el índice ha logrado caracterizar de forma más adecuada el área quemada que el resto de las bandas comentadas anteriormente. Sin embargo, debido a que este índice fue diseñado para enfatizar la señal del carbón vegetal, presenta algunas confusiones en la parte baja del rango con cubiertas de baja reflectancia como posibles sombras topográficas y de nubes (Chuvieco et al, 2002).

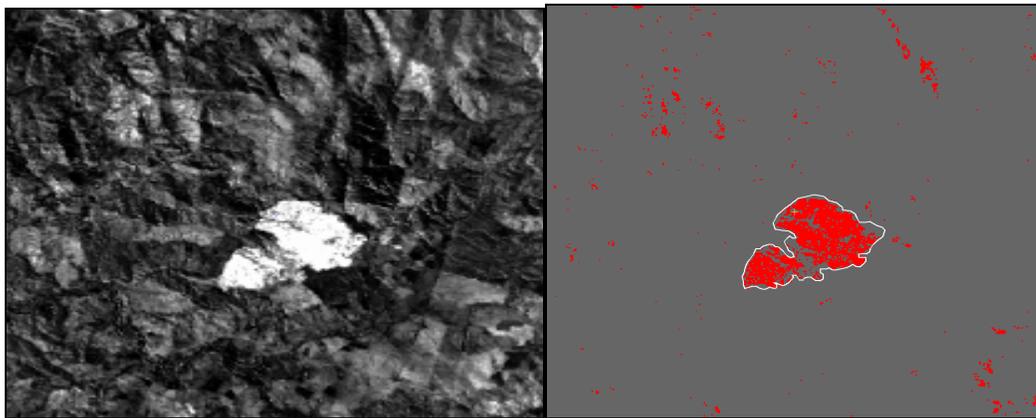


Figura 4. A la izquierda imagen BAI. A la derecha imagen segmentada.

El desarrollo de la técnica del ALME, implicó la recolección de tres miembros puros o endmembers comúnmente considerados en estudios de incendios forestales (área quemada, vegetación sana y sombras topográficas) (Chuvieco, 2002), aunque otros autores (Smith et al, 2007; Riaño et al, 2001) sugieren la inclusión de uno más, la vegetación en estado senescente. A partir de esta técnica se obtuvo la proporción de superficie de cada endmember que ocupaba dentro del píxel. La figura 5 muestra el resultado de la aplicación de la técnica y las imágenes de los endmembers obtenidos. Se aprecia como los miembros puros de área quemada (figura 5a) y vegetación sana

(figura 5b) pudieron ser separados de forma satisfactoria presentando una mayor proporción de superficie ocupada por dichas clases, las cuales son reflejadas por aquellos pixeles con tonalidades más claras dentro de la imagen. Lo anterior no ocurre para el endmember de sombras topográficas (figura 5c) que presenta una imagen con poco contraste, indicando que no fue posible discriminar de forma adecuada las zonas de sombras del resto de las cubiertas presentes en la imagen. La segmentación y transformación del endmember de área quemada en la imagen binaria (figura 4d) fue llevada a cabo empleando un umbral que consideraba quemados a todos aquellos pixeles que se encontraban por sobre el percentil 45 (0.93) de los puntos muestrales considerados al interior del incendio (Smith et al, 2007). Las mayores confusiones del ALME se produjeron en la zona baja del rango de discriminación, las que pueden ser atribuidas a pastizales secos o senescentes no considerados en la recolección de los endmembers.

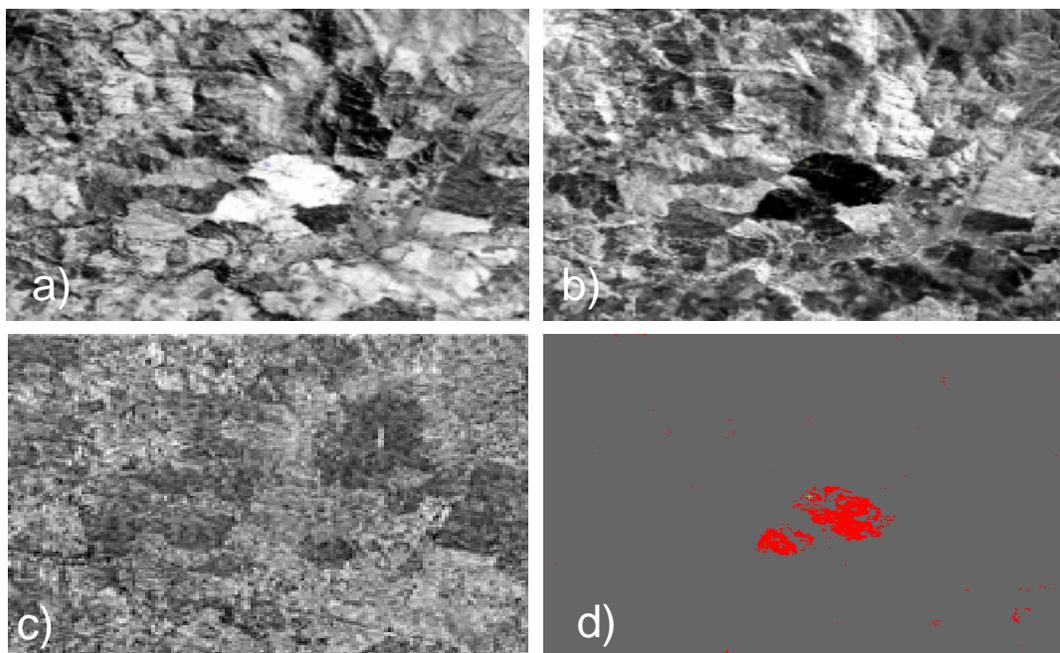


Figura 5. Componentes del ALME de la imagen: a) área quemada; b) vegetación sana; c) sombras y d) miembro puro segmentado.

La tabla 2 muestra los valores obtenidos por los diversos métodos empleados en cartografiar la zona del incendio. Es posible apreciar como la mayoría de los índices probados alcanzan una elevada fiabilidad global (sobre el 90%), sin embargo, en el caso del NDVI, esta medida (93%) se puede deber casi exclusivamente a la concordancia que existe entre los pixeles no quemados, cuyo efecto logra encubrir los elevados errores de comisión (81%) que indican la proporción entre la superficie bien identificada y el total de la detectada como quemada por la segmentación del índice; y los errores de omisión (74%), entendido como la proporción entre la superficie bien identificada por la segmentación y el total realmente quemado (Congalton y Green, 1994). El alto valor alcanzado por estos errores en el índice se debe a las elevadas confusiones que fueron comentadas anteriormente, que se relacionan con los problemas del índice al clasificar como quemado, zonas de pastizales secos o con poco verdor. Además, el bajo valor alcanzado por el índice Kappa (18.7%) que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar (Chuvieco, 2002),

indica que al menos en este caso, el NDVI no es una buena alternativa para la cartografía de las áreas quemadas.

Tabla 2. Método de segmentación y fiabilidad de los resultados.

Método Segmentación	Fiabilidad Global (%)	Índice Kappa	Error Omisión (%)	Error Comisión (%)
NDVI	93.4	18.7	74	81
COCIENTE TM7/TM4	97.7	57.4	66	11
BAI	97.8	66.2	37	25
ALME	97.9	60.5	55	6
SEMILLADO	98.7	77.4	35	2

En el caso de la aplicación del Cociente TM7/TM4, la tabla 2 muestra que alcanzó una elevada fiabilidad global (97.7%), sin embargo, al igual que el caso del NDVI, se debe poner especial atención en los errores de omisión (66%) que indican una gran proporción de píxeles quemados que no fueron cartografiados como tal, lo que puede ser resultado de los umbrales considerados en la segmentación, clasificando como quemados solo aquellos píxeles más severamente afectados por el fuego y dejando de detectar el daño superficial que pudo haber ocurrido en las zonas con menor severidad. Por otra parte, los errores de comisión fueron relativamente bajos (11%), indicando que el cociente presenta menos problemas de confusión entre el área quemada y otras cubiertas, las pequeñas confusiones que se registran se asocian a vegetación senescente que presenta una respuesta espectral parecida al área quemada en las bandas del infrarrojo cercano y de onda corta. Con respecto al indicador de Kappa, el cociente alcanzó un valor (57%) considerablemente más alto que el NDVI, indicando que la fiabilidad global obtenida no es sólo producto del azar, sino que tiene relación con las capacidades de discriminación que presenta el cociente.

La aplicación del BAI y la posterior segmentación de la imagen en las categorías de quemado y no quemado, presentó una alta fiabilidad global (97.8%), que concuerda con el 66% alcanzando en el indicador Kappa (Tabla 2). No obstante, el BAI mostró también algunos errores de omisión (37%) y comisión (25%) que pueden ser asociados a la elección de los umbrales aplicados, los que intentaron reducir al máximo los errores de comisión, aspecto que es siempre crítico en la cartografía de áreas quemadas (Chuvienco et al, 2002). Asimismo, las confusiones producidas en el índice también han sido reportadas por otros autores (Chuvienco et al, 2002; Smith et al, 2007), quienes las atribuyen al diseño propio del índice, a la existencia de cubiertas poco reflectantes como sombras y cuerpos de agua, y a la falta de un tratamiento previo para la corrección del efecto topográfico en las imágenes que presentan un relieve importante.

Para el ALME la tabla 2 indica un buen desempeño de la técnica, logrando esta un bajo error de comisión (6%), que se asocia con una correcta elección del miembro puro, consiguiendo caracterizar casi exclusivamente sólo el área quemada de la imagen. Sin embargo, la mezcla espectral existente en los píxeles al interior del incendio, provocaron un elevado error de omisión (55%), lo que se tradujo en dejar una gran parte del incendio sin cartografiar. En este contexto, Quintano et al (2005) ha manifestado la importancia que posee trabajar con un adecuado retardo temporal entre las fechas del incendio y la adquisición de la imagen de satélite, puesto que a medida que pasa el tiempo y dependiendo del dinamismo ambiental de la zona, las señales del carbón y cenizas del incendio pueden aminorarse significativamente por el viento, la lluvia o la colonización de especies invasivas.

Finalmente, la técnica que presentó el mejor desempeño fue la del semillado, alcanzando una fiabilidad global del 98.7%. Los bajos errores de comisión (2%) y omisión (35%) fueron consecuencia del empleo de un enfoque bi -fase, el cual permitió por una parte reducir los efectos de las perturbaciones producidas por los variados grados de severidad que se encuentran en la zona del incendio, ya que sólo los píxeles totalmente quemados (semillas) fueron identificados en la primera fase (reducción del error de comisión), mientras que en la segunda parte se aspiró a clasificar a través de un algoritmo de crecimiento de regiones los niveles bajos de severidad (reducción del error de omisión) dentro del área considerada quemada (García y Chuvieco, 2004; Bastarrika y Chuvieco, 2006). La figura 6, muestra los píxeles semillas que fueron seleccionados para comenzar el crecimiento del área quemada a través del algoritmo que se propagó sobre la banda (BAI) la cual presentó la mayor separabilidad espectral. Los bajos errores de omisión presentados al usar esta técnica han sido documentados por García y Chuvieco (2004) e indican que se deben a la presencia de píxeles en las zonas borde, donde se encuentra una alta mezcla de vegetación quemada y no quemada y por consiguiente la señal de la zona quemada no es lo suficientemente fuerte para ser registrada y clasificada en la categoría. Respecto a lo mismo, Bastarrika (2005) indica que los errores de omisión son también consecuencia de presencia de islas de vegetación no quemada al interior del perímetro, que las mediciones de terreno usualmente no capturan, pero que las imágenes a través de los índices si dan cuenta de ellas especialmente cuando la señal del carbón vegetal no es lo suficientemente fuerte o el daño del fuego en la vegetación es solo superficial.

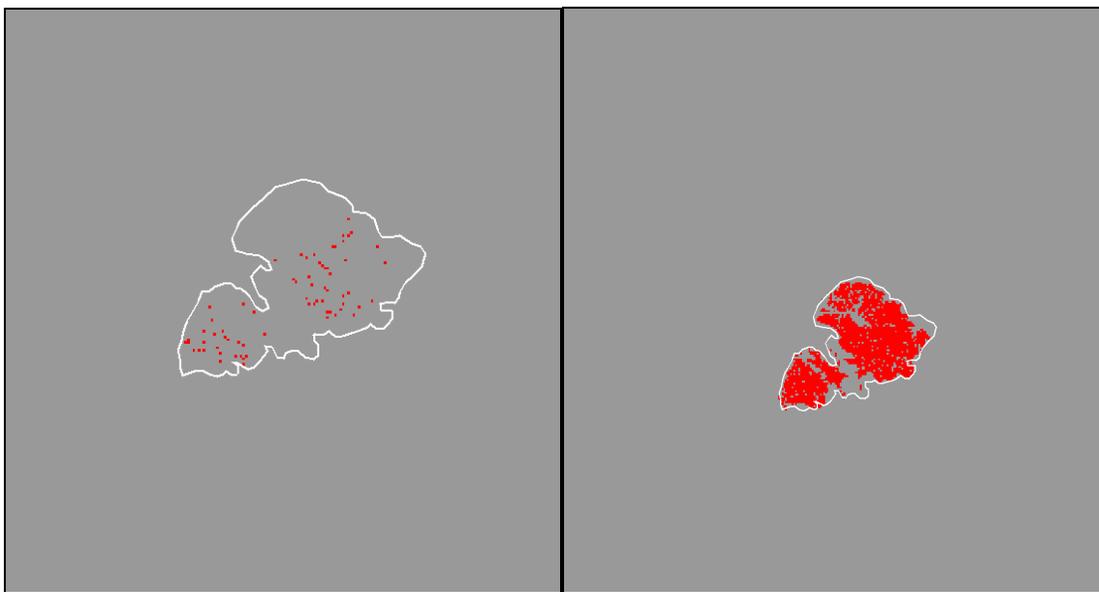


Figura 6. Izquierda semillas. Derecha imagen resultante del crecimiento de regiones.

Analizando los resultados de los diversos índices y métodos empleados, es posible indicar que los mejores desempeños los ofrece el método del semillado o crecimiento de regiones, seguido por el BAI y el ALME. Entre estos, el método del semillado presenta los más bajos errores de comisión, que son el resultado de una correcta delimitación de los píxeles semillas, asimismo, los errores de comisión son también los más bajos entre los índices mencionados, lo anterior es consecuencia de la existencia de variabilidad espectral existente al interior de la zona quemada y a la presencia de píxeles cuyo daño

puede ser superficial impidiendo que la señal reflejada alcance el rango definido por los umbrales para ser considerado quemado.

## CONCLUSIONES

Las imágenes obtenidas del sensor TM pueden ser consideradas como alternativas adecuadas para el estudio y la cartografía de áreas quemadas, gracias a su elevada resolución espacial y la abundante información que proporcionan en la zona del SWIR, que permite eliminar gran parte de las confusiones que se producen entre la zona quemada y otras cubiertas como sombras de nubes y cuerpos de agua (Miller y Yool, 2002; Navarro Cerrillo et al, 2008). Con respecto al desempeño de los índices espectrales y a su capacidad para discriminar áreas quemadas del resto de las cubiertas, el bajo rendimiento alcanzando por el NDVI queda de manifiesto en el presente trabajo y en otros estudios (Pereira et al, 1999b; Chuvieco et al, 2002) en donde ha presentado múltiples confusiones con vegetación seca o con poco vigor que se encuentra a fines del período estival. En este ámbito, autores (García y Chuvieco, 2004) atribuyen estas falencias al diseño propio del índice que fue creado específicamente para realzar la señal de la vegetación y no para discriminar la señal de vegetación quemada como otros índices entre los que se encuentran el BAI y una modificación normalizada del cociente  $TM7/TM4$  denominado NBR, en donde el primero ha presentado mejores resultados que el NDVI en este trabajo. Respecto a los resultados obtenidos por el ALME en el presente trabajo, éste entregó mejores desempeños que el NDVI y el cociente  $TM7/TM4$ , presentando bajos errores de comisión y omisión, siendo estos últimos el resultado de la elección de miembros puros muy severamente quemados. En este sentido, la técnica del ALME podría ser considerada como una alternativa a los índices espectrales para estimar la proporción de un píxel afectado por el fuego (Smith et al, 2007), asimismo, el uso del ALME en conjunto con otras técnicas como la clasificación orientada a objetos ha entregado buenos resultados en la obtención en la cartografía de área quemada (Quintano et al, 2006), sin embargo, se debe poner especial atención a los resultados de las fracciones derivadas del ALME, pues dependen mucho de la elección adecuada de los miembros puros en la imagen, ya que si se introducen valores de un componente puro extraídos de un píxel con mezcla, los resultados pueden ser inadecuados (Chuvieco, 2002). A la luz de lo obtenido la técnica que mostró los mejores resultados fue la del sembrado, presentando una adecuada delimitación del área quemada y una aproximación a la superficie de la misma. Las semillas fueron estimadas a partir del percentil 98 de la banda del BAI que presentó la mejor separabilidad espectral. A través de un algoritmo de crecimiento de regiones, las semillas se propagaron sobre la banda del BAI, logrando delimitar de forma adecuada el perímetro del incendio. Los errores de omisión obtenidos se pueden atribuir a la elección de semillas con valores muy elevados, la presencia de píxeles mixtos en el borde del perímetro y a la diferencia temporal existente (aprox. 2 meses) entre la fecha de ocurrencia del incendio y la fecha de adquisición de la imagen, posibilitando esto una posible regeneración de zonas que no fueron afectadas severamente por el fuego (Smith et al, 2007, Holden et al, 2005). Otro factor que debe ser considerado en las omisiones resultantes, fueron los parches de vegetación no quemada que las imágenes lograron discriminar al interior del perímetro, puesto que las mediciones realizadas en terreno o sobre helicópteros no posibilitan capturar y registrar este tipo de información, produciéndose entonces, una mayor diferencia entre la realidad y lo estimado. Los métodos multipaso ofrecen ventajas por sobre las técnicas de umbralización simple y múltiple, ya que a través de su enfoque metodológico bi-fase permiten cartografiar casi

en forma exclusiva solo los pixeles realmente quemados (Bastarrika, 2005; García y Chuvieco, 2004), evitando de esta manera errores de comisión que pueden llevar a un mal uso e interpretación de la información generada.

## **BIBLIOGRAFIA**

Adams, R. Bischof. L. (1994). Seeded region growing. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol 16. N 6. 641-647 pp.

Barbosa, P., Gregoire, J. y Pereira, M. (1999). An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. Remote Sensing of Environment. pp 253-263.

Bastarrika, A (2005). Métodos semiautomáticos de cartografía de área quemada mediante crecimiento de regiones. Tesina de suficiencia investigativa. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. España. 88 pp.

Bastarrika, A., y Chuvieco, E.(2006). Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TN y ETM+. Revista Internacional de la Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. pp 184-204.

Chander, G., Markham, B., y Barsi. J. (2007). Revised Landsat 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. [http://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf\\_archive/news\\_0077.pdf](http://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/news_0077.pdf)

Congalton, R. Green K. (1998). Assessing the accuracy of remote sensed data: Principles and practices. New York. Lewis Publishers. 137 pp.

Cots. R., Cardona.,E. y Foster. I. (2007). Análisis de la superficie afectada por el fuego en el departamento de Pando en el año 2005 a partir de la clasificación de imágenes del satélite CBERS. XIII Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto, Florianópolis, Brasil. pp 835-842.

Chávez, Jr, P.S (1996). Imagen-based atmospheric corrections-revisited and improved. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 62(9), 1025-1036.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Madrid, Ariel Ciencia Editores, Barcelona, España. 586 pp.

Chuvieco, E. y Congalton, R. (1998). Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. Geocarto International, 4. pp 41-53.

Chuvieco, E., Martín, P. Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discriminations. Int. J. Remote Sensing 23(23): 5103-5110.

Chuvieco, E., Opazo, S., del Valle, H., Sione, W., Anaya, J., González. F., López, G., Di Bella, C., Mari, N., Setzer, A., Csiszar, I., Manzo, L., Morelli, F., Acevedo, P. Bastarrika, A. (2006). Cartografía global de áreas quemadas en américa latina:

Experiencias del proyecto AQL2004. Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER). Bogotá. Colombia.

Donoso, C. (1995). Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica. Tercera edición. Editorial Universitaria. Santiago. pp 483.

FAO (2007). Situación de los bosques del mundo. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.

Fernández, A., Illera, P., y Casanova, J. (1997). Automatic zapping of surface affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. Remote Sensing of Environment. 60. pp 153-162.

García, M y E. Chuvieco. (2004). Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. Remote Sensing of Environment 92: 414-423.

Holden, Z., Smith, A., Morgan, P., Rollins, M y Gessler, P. (2005). Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data. International Journal of Remote Sensing. Vol 26. 21. pp 4801-4808.

Key, C. Benson, N. (1999). The normalized burnt ratio, a Landsat TM (Thematic Mapper) radiometric index of burn severity incorporating multitemporal differencing (<http://nrmsc.usgs.gov/research/nbr.htm>)

Martín, M.P., y Chuvieco, E. (1995). Mapping and evaluation of burned land from multitemporal análisis of AVHRR NDVI images. EARSEL. Advances in Remote Sensing V4. pp 7-13.

Martín, M. P., (1998). "La incidencia de los incendios forestales en España." Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. Serie Geográfica 7: 23-36.

Martín, M.P., Díaz Delgado, R., Chuvieco, E., y Ventura, G. (2002). Burned land zapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. IV International Conference on Forest Fire Research. 2002. Wildland Fire Safety Summit (Ed, Viegas, D.X). Luso, Coimbra, Portugal: Millpress, 45.

Miller, J. Yool, S. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. Remote Sensing of Environment. 82. 481-496 pp.

Morgan, P., Hardy, C., Swetnan, T., Rollins, M., y Long, D. (2001). Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fire-scale fire patterns. International Journal of Wildland Fire, 10, pp. 329-226.

Navarro Cerrillo, R., Hayas, A., García-Ferrer, A., Hernández, R., Duhalde, P y González, L. (2008). Caracterización de la situación post-incendio en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multispectrales. Revista Chilena de Historia Natural. Vol 81. N1. pp 95-110.

Nikolakoupoulos, K. (2003). Use of Vegetation Indexes with ASTER VNIR data for burnt areas detection in Western Peloponnese, Greece. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS (03). Proceedings IEEE International. V5. pp 3287-3289.*

Opazo, S. (2007). Evaluación y análisis de áreas quemadas en Sudamérica, usando teledetección y sistemas de información Geográfica. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. España. <http://www.geogra.uah.es/teledeteccion-ambiental/equipo/sergio/tesis.html>

Quintano, C., Shimabukuro, Y., Fernández, A., y Delgado, J. (2005). Spectral unmixing approach for mapping burned areas in Mediterranean countries. *International Journal of Remote Sensing. V.26, pp 1493-1498.*

Quintano, C., Fernández-Manso, O., Fernández-Manso, A., y Ramírez, J. (2006). Sinergias entre el modelo de mezclas espectrales y el análisis de imágenes basado en objetos en el estudio de incendios forestales. *Revista Ambiencia. Guarapuava. V2. pp 121-134.*

Loboda, T., O'neal. K, y Csiszar. I. (2007). Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area zapping from MODIS data. *Remote Sensing of Environment. pp 429-442.*

Pereira, J., Sá. A., Sousa, A., Silva, J., Santos, T. y Carreiras, J. (1999). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. E. Chuvieco. Berlin, Springer-Verlag: 123-138.*

Pereira, J. (1999b). A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscince and Remote Sensing. Vol 37. N 1. pp 217-226*

Rouse, J. W. Haas, R. Deering, D. Schell, J. Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report (Greenbelt, MD: NASA).*

Smith, A., Drake, N., Wooster, M., Hudak, A., Holden, A. y Gibbons, C. (2007). Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparisons of methods and applications to MODIS. *International Journal of Remote Sensing. Vol 28. N 10. pp 2753-2775.*

Trigg, S., y Flasse, S. (2000). Characterising the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. *International Journal of Remote Sensing. V21. pp 3161-3168.*

Trigg, S., y Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing. V22. N13. pp 2641-2647.*

Sistema de Información de Biodiversidad (SIB). (2005). Protocolo para el preprocesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires. Argentina.

[http://www.sib.gov.ar/introduccion/documentos/preprocimsgsat/Protocolo\\_img\\_Landsat.pdf](http://www.sib.gov.ar/introduccion/documentos/preprocimsgsat/Protocolo_img_Landsat.pdf)

Stroppiana, D., Pinnock, S., Pereira, J., Grégorie, J.M. (2002). Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote Sensing of Environment*. V82. pp 21-37.

Swain, P. H., Davis, S. M. (1978). *Remote sensing: The quantitative approach*. New York: McGraw-Hill, Capítulo 3.

Ulriksen, P., Parada, M., y Aceituno, P. (1979). *Climatología. Perspectivas de desarrollo de los recursos de la VII Región*. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales. (IREN-CORFO). Santiago. pp 89.



UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
4° CONGRESO CHILENO DE CIENCIAS FORESTALES

Aceptación para publicación en plataforma virtual

Señores  
Comisión Organizadora  
4° Congreso Chileno de Ciencias Forestales  
Universidad de Talca, Chile.

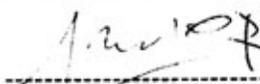
Estimados Señores

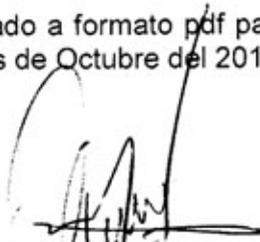
Quien suscribe, autores de la ponencia: "Cartografía local de áreas quemadas empleando teledetección." autorizan a los organizadores del 4° Congreso Chileno de Ciencias Forestales, a la publicación del texto completo en la plataforma virtual *Dspace* de la Biblioteca de la Universidad de Talca, permitiendo con ello a su acceso a través de la Internet.

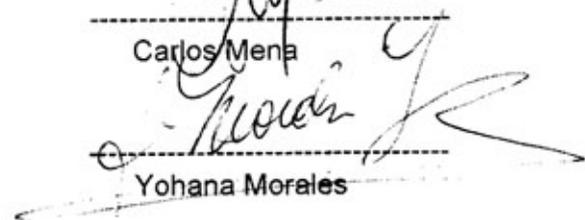
El texto, que se envió en formato Word, será transformado a formato pdf para su publicación. Su difusión estará disponible hasta el mes de Octubre del 2010.

Atentamente,

  
-----  
John Gajardo

  
-----  
Yony Ormazábal

  
-----  
Carlos Mena

  
-----  
Yohana Morales

Talca, junio de 2009.