

Clasificación digital de combustibles forestales a partir de imágenes de alta resolución y modelos digitales de terreno

Roberto Castro Ríos y Emilio Chuvieco Salinero

Departamento de Geografía
Universidad Alcalá de Henares

RESUMEN

En este trabajo se discriminan modelos de combustibles, en la costa mediterránea de Chile, utilizando imágenes Landsat-TM y SPOT-HRV y un modelo digital del terreno (MDT). A partir de las imágenes se ha obtenido una banda textural y un índice de vegetación de diferencia normalizada compuesto (NDVIC). Del MDT, la altitud, pendiente e iluminación. La clasificación resultante, para ocho clases de combustibles y cuatro incombustibles, otorga una fiabilidad estimada entre 70,9 y 76,5%, y un índice Kappa de 71%. Las variables de mayor peso en la discriminación de las clases resultaron ser las bandas del infrarrojo, rojo y verde, seguidas del NDVIC, insolación y pendiente.

SUMMARY

Discrimination of fuel models, using satellite imagery (Landsat-TM and SPOT-HRV) and a digital terrain model (DTM) is performed on the mediterranean coast of Chile. A band of texture and a normalized difference vegetation index component (NDVIC) has been obtained from the satellite images. Altitude, slope and shaded relief were generated from the DTM. The resulting classification, for eight that classes and four not fuel classes, yielded an estimated accuracy between 70,9 and 76,5%, whith a index Kappa value of 71%. The main variables of major weight for discrimination the fuel classes were the following, according to their importance: the infrared, red and green bands, consecutive the NDVIC, shaded relief and slope.

Introducción

El problema de los incendios forestales en los países mediterráneos reviste una especial importancia, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Basta citar, que los países mediterráneos de la Comunidad Europea sufrieron 353.575 incendios en la última década (1981-90), afectando a 4.192.200 de hectáreas (Calabri y Ciesla, 1992). Chile sufre una pérdida anual de 59.000 hectáreas (Haltenhoff, 1990), que se reflejan en daños directos e indirectos del orden de 230 millones de dólares anuales.

Entre las diversas aplicaciones de la teledetección al estudio de incendios forestales (Chuvieco, 1992), la cartografía de las formaciones vegetales resulta especialmente clave, puesto que este factor es uno de los más determinantes en el inicio y desarrollo del fuego. Desde el punto de vista de la gestión de incendios, la cubierta vegetal tiende a clasificarse en una serie de modelos combustibles, *fuel types* (Deeming et al, 1978; Burgan y Rothermel, 1984), por presentar unas características similares frente al fuego.

Su cartografía entraña importantes problemas, ya que las características del material combustible son, por un lado, bastante dinámicas, y, por otro, exigen un nivel de detalle difícilmente abordable con la periodicidad requerida. Además, y desde el punto de vista del empleo de la teledetección espacial, hay que tener en cuenta que los modelos combustibles se refieren principalmente a la vegetación de sotobosque (matorrales, pastizales, acículas, restos de poda)¹, que puede estar cubierta por el dosel superior, lo que hace compleja su definición espectral.

Pese a estas dificultades, el empleo de la teledetección, junto a variables auxiliares complementarias, ha permitido abordar con cierto éxito la cartografía de modelos combustibles. Uno de los trabajos pioneros se realizó a finales de la década de los 70, sobre el *Crater Lake National Park*, de Oregon (Rabii, 1979). A partir de imágenes Landsat-MSS y de información topográfica, se lograron discriminar los principales modelos combustibles del área, observándose un buen ajuste con la información de campo. Posteriormente, se han desarrollado trabajos con similar objetivo, basando la cartografía de modelos combustibles en imágenes MSS e información auxiliar (Kourth, 1977; Cosentino, 1977; Shasby et al., 1981; Salazar, 1982; Burgan y Shasby, 1984; Dixon et al., 1984; Agee y Pickford, 1985; Root et al., 1986; Van Wyngarden y Dixon, 1989). Las fuentes auxiliares más utilizadas en estos trabajos son las variables topográficas, la fotografía aérea infrarrojo y los trabajos de campo. La mayor parte de estas experiencias se basan en la clasificación no supervisada de las imágenes, con la cual se definen los grupos espectrales presentes. Una vez obtenidos éstos, se asimilan a modelos combustibles con apoyo de la información auxiliar. Este enfoque ha permitido obtener precisiones del orden del 85% para los modelos incluidos en el *National Fire Danger Rating System* (Agee y Pickford, 1985), y entre el 70 y el 80% para los modelos canadienses (Dixon et al., 1984).

Aunque estos trabajos se dirigen a zonas relativamente pequeñas, también existen algunas experiencias sobre grandes espacios, apoyándose en la información facilitada por el sensor AVHRR (Miller y Johnston, 1985; McKinley et al, 1985; Werth et al, 1985). Las ventajas sobre imágenes Landsat atañen al menor coste y mayor repe-

¹ La mayor parte de las clasificaciones de modelos de combustibles que en la actualidad se aplican (ej. NDFDRS norteamericano, BEHAVE, ICONA) están referidos a fuegos de superficie.

titividad, lógicamente al precio de un menor detalle espacial, lo que invalida su empleo en modelos de cierto detalle. No obstante, para algunas aplicaciones, resulta un método suficientemente eficaz (Miller et al, 1986).

Objetivos

El propósito de este trabajo es establecer un método apropiado para obtener cartografía de combustibles forestales en ámbitos mediterráneos. Para ello, hemos pretendido evaluar la incidencia de distintas variables en la definición espectral de los modelos combustibles. De acuerdo a la composición de estos modelos, parecía oportuno analizar tres aspectos: estado y evolución fenológica, textura y emplazamiento. El primero se ha evaluado a partir de la comparación entre imágenes adquiridas en dos estaciones contrastadas (verano e invierno); el segundo, aplicando distintos algoritmos texturales a la banda del rojo, y el tercero, mediante la experimentación con tamaños diferentes del filtro modal.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la comuna de Valparaíso, situada en la provincia del mismo nombre y perteneciente a la V Región de Chile, que se ubica en la costa central del país. Su superficie es de 30.620 ha. Está situada entre los paralelos 33° y 33°13' L.S. y entre los meridianos 71°21' y 71°45' L.O.

La Comuna se inserta en una región mediterránea, marcándose claramente las cuatro estaciones a lo largo del año. Las temperaturas, con rasgos moderados de variación, registran sus máximos en la estación de verano, de lo que resultan dos períodos bien definidos: el de superávit de humedad, que transcurre preferentemente entre mayo y septiembre, y el de déficit hídrico, entre octubre y abril. Las temperaturas medias anuales se sitúan entre los 13 y 17°C, y las precipitaciones entre los 200 y 500 mm/año (IGM, 1985).

El territorio se caracteriza por una geomorfología montañosa, perteneciente a la cordillera de la Costa. Las cotas máximas alcanzan los 600 m, con una media de 300 m. Las pendientes predominantes se sitúan en un rango medio de 30 a 40%, las exposiciones dominantes son norte y noroeste.

Desde el punto de vista vegetacional, el área de estudio cuenta con una alta presencia de bosques artificiales, fundamentalmente de *Pinus insigne* y *Eucaliptus globulus*.

La vegetación nativa se concentra en las quebradas y en las laderas de exposición sur, siendo también importante la presencia de matorral esclerófilo en las la-

deras de orientación norte. El *Nothofagus obliquae* (roble) encuentra aquí su límite de distribución norte, a lo que se añade la presencia en esta zona de la mayor concentración de la especie *Jubea chilensis* (palma chilena), que se encuentra en vías de extinción.

A lo anterior, se suma una de las reservas más importantes, desde el punto de vista productivo y de protección de fuentes de agua, como es el caso de la reserva forestal del lago Peñuela.

Las instalaciones industriales en la Región, y especialmente en la comuna bajo estudio, son aserraderos y barracas. Estas actividades se abastecen principalmente de los bosques artificiales.

La población de la comuna de Valparaíso al año del censo de 1982 alcanzaba los 272.520 habitantes (INE, 1989), de los cuales 2.103 corresponden a habitantes rurales (0,07%).

Los centros urbanos son focos permanentes de riesgo de incendios, a consecuencia de la densidad ocupacional. Este riesgo se agrava en las temporadas de verano y los fines de semana, por cuanto esta comuna tiene una función turística de primer orden.

Metodología

Material

El trabajo se basa en dos imágenes satelitales, una del Landsat TM (bandas 2, 3, 4 y 5) y otra del SPOT-HRV (multiespectral), tomadas en invierno (22 de Agosto de 1991) y verano (19 de Diciembre de 1987), respectivamente.

El procesamiento digital se realizó en ordenadores personales con el sistema ERDAS (ERDAS, 1991) e IDRISI (Eastman, 1992). En lo que respecta al procesamiento de los datos topográficos, se utilizó una estación de trabajo RISC-6000, con el software ARCINFO para la digitalización de las cartas escala 1:50.000, del Instituto Geográfico Militar de Chile, y posterior generación del modelo topográfico digital.

Se agrega a los datos anteriores, los provenientes del campo que fueron registrados en Noviembre y Diciembre de 1991, y los de fichas de incendios de las temporadas comprendidas entre los años 1984 a 1988, que incluyen la localización de los combustibles incendiados.

Variables de Estudio

Un primer paso fue la corrección geométrica de ambas imágenes. Los errores de la imagen SPOT fueron de 0,63148 píxeles en X y de 0,71045 en Y, con un RMS medio de 0,95053 píxeles. En el caso de la imagen Landsat, se obtuvieron errores de 0,48513 en X y de 0,87196 en Y, con un RMS total de 0,99783. Esto supone un error de 47,5 y 49,8 metros, respectivamente.

Las variables consideradas para la clasificación de modelos combustibles corresponden a las bandas HRV1, HRV2, HRV3 del SPOT, y las bandas TM2, TM3, TM4 y TM5 del Landsat. Las texturas de las bandas HRV2 y TM2, se obtuvieron con el algoritmo BCM (Matriz de Comparación Binaria) y el de varianza respectivamente. También se introdujo en el análisis una banda de cambio temporal denominada NDVIC (índice de vegetación de diferencia normalizada compuesto). Finalmente, se integraron asimismo en el modelo las variables de pendiente, altitud e insolación obtenidas del MDT.

Puesto que el NDVI resulta un índice adecuado para estudiar la dinámica de las coberturas forestales (Cihlar et al, 1991; Curran, 1980; Curran et al, 1992), se elaboró una variable multitemporal que corresponde a la diferencia normalizada de los NDVI, según la siguiente expresión:

$$\text{NDVIC} = \left(\frac{\text{NDVI}_{(\text{TM})} - \text{NDVI}_{(\text{HRV})}}{\text{NDVI}_{(\text{TM})} + \text{NDVI}_{(\text{HRV})}} + 1 \right) \times 100$$

Este índice proporciona información crítica sobre el estado de la cubierta vegetal, considerando su estado fenológico y los cambios producidos en la vegetación entre invierno y verano. El resultado toma el valor 100 cuando no existen cambios entre ambas fechas, entre 1 y 100 cuando las zonas tienen mayor actividad fotosintética en verano (HRV) que en invierno (TM), y entre 101 y 200 en el caso contrario.

En cuanto a las bandas texturales, para determinar los algoritmos aplicados se realizó una comparación visual entre las medidas de variabilidad que son utilizadas en ecología del paisaje (Murphy, 1985) y la usada por otros autores en trabajos de cartografía vegetacional (Kouertz, 1977; Strahler et al, 1978).

La información de pendiente, altitud e insolación se generó a partir del modelo digital de terreno (MDT), el cual se realizó por interpolación lineal de perfiles, a partir de las curvas de nivel rasterizadas. Al resultado se aplicó un filtro de paso bajo para eliminar protuberancias en cotas. La verificación se efectuó mediante un muestreo

sistemático de 287 puntos. El error final indica una subestimación de los valores en 10 metros.

Clasificación

El punto de entrada para la clasificación fue la definición de las clases informacionales, según la clasificación preliminar de modelos de combustibles forestales realizada para Chile (Julio, 1987). En un compromiso entre el nivel de modelos específicos y la realidad vegetacional del propio terreno, se definieron un total de 12 clases de combustibles y 5 clases incombustibles, las que se presentan a continuación:

- 1.- Formaciones mixtas de praderas, pastizales y estratos herbáceos no leñosos, en zonas abiertas y/o asociados a estepa de *Acacia caven* de baja densidad (espinos). (1, 2)
- 2.- Pastizales y estratos herbáceos no leñosos, predominantes en formaciones de arbustos y matorrales nativos costeros. (3)
- 3.- Matorrales y arbustos de alta inflamabilidad, bajos, con predominancia de especies espinosas. (4, 5, 27, 28)
- 4.- Matorral esclerófilo arborescente y matorral bajo. (6, 7, 16)
- 5.- Formaciones continuas de matorrales y arbustos nativos de quebradas. (8, 9)
- 6.- Regeneración de roble densa, con especies nativas subarbóreas y /o matorral arborescente. (10, 11, 12)
- 7.- Renoval de Roble con matorral, con predominancia de arbolado. (13, 14, 15)
- 8.- Plantaciones jóvenes de Pino Insigne (menores a 18 años), con sotobosque discontinuo de matorral y arbustos. (17, 18, 19)
- 9.- Plantaciones adultas de Pino insignie (mayores a 18 años), con sotobosque discontinuo de arbustos y matorral. (20, 21, 22)
- 10.- Plantaciones de *Eucaliptus globulus*, adultas, con matorral y arbustos asociados. (23, 24, 25)
- 11.- Desechos de explotación a tala rasa y áreas intervenidas con restos aislados de bosque en pie. (26)

Clases incombustibles:

- 12.- Zonas agrícolas de regadío. (29, 30)
- 13.- Zonas urbanas. (31, 32)
- 14.- Aguas continentales superficiales. (33)
- 15.- Aguas continentales profundas. (34, 35)
- 16.- Suelos desnudos. (36)

Los ficheros con las variables a estudiar se denominaron TMS y SPOTS. El primero está integrado por las cuatro bandas del TM (2, 3, 4, 5), más pendiente

(PEND), altitud (ALT), insolación (INST), índice de vegetación de diferencia normalizada compuesto (NDVIC) y textura de la banda TM2 (TEXT). El fichero SPOTS, está compuesto por las tres bandas del HRV multiespectral (1, 2, 3), más altitud (ALT), pendiente (PEND), insolación (INSH), NDVIC y la textura de la banda HRV2 (TEXH).

Sobre estos ficheros, se obtuvieron las clases espectrales con los valores medios para cada muestra, gráficos de medias, desviación estándar y matrices de covarianzas. Conjuntamente, la separabilidad de las clases espectrales se evaluó mediante la distancia de Jeffries Matusita (JM) y la distancia euclidiana.

El peso discriminatorio de cada variable al conjunto de datos, se obtuvo aplicando análisis factorial discriminante con 221 píxeles, determinados en forma aleatoria en las 16 clases informacionales.

Revisadas y evaluadas las áreas de entrenamiento, se aplicó una clasificación con paralelepípedo y mínima distancia a los ficheros TMS y SPOTS. Los resultados obtenidos se suavizaron con un filtro de mayoría de 3x3 píxeles, con la finalidad de reducir su variabilidad espacial. Para evaluar la influencia del tamaño del filtro sobre los resultados, se ensayó un tamaño de filtro de 2x2 píxeles, sobre la imagen TMS, generándose un tercer archivo denominado TMS2.

Evaluación de la exactitud

El primer paso consistió en definir las muestras para la verificación, que se eligieron de acuerdo a un muestreo aleatorio estratificado (Congalton, 1988). Sobre una imagen del área de estudio, a escala 1:25.000, se estratificaron las clases de combustibles, de acuerdo a los trabajos previos de campo (muestras definidas en terreno, antecedentes cartográficos del área). Posteriormente, se eligieron los polígonos más representativos de cada clase.

Del archivo digitalizado se obtuvo en un mapa de polígonos, que se convirtió a formato raster para su comparación con las clasificaciones previamente realizadas (SPOTS y TMS) y el archivo TMS2. Obtuvimos, para cada ensayo, una matriz de confusión, con las respectivas medidas estadísticas de la exactitud. Para la comparación entre matrices, utilizamos el estadístico Kappa (Congalton et al., 1983).

Clasificación Final

Considerando los resultados obtenidos en los pasos anteriores, se procedió a una nueva clasificación, creándose un archivo (TMRE) con las variables que resultaron significativas, de acuerdo al resultado del análisis discriminante, que son las bandas del verde (TM2), rojo (TM3) e infrarrojo cercano (TM4), del Thematic Mapper; la

pendiente, el índice vegetacional de diferencia normalizada compuesto (NDVIC) y la insolación. Seguidamente, considerando los resultados de confusión entre clases, se redefinieron las clases de combustibles a 8, y las incombustibles a 4, de la siguiente forma:

- 1.- Formaciones mixtas de praderas, pastizales y estratos herbáceos no leñosos, en zonas abiertas y/o asociados a estepa de *Acacia caven* de baja densidad (espinos).
- 2.- Matorrales y arbustos de baja densidad, con predominancia de especies espinosas y coriáceas.
- 3.- Matorral esclerófilo arborescente, incluye formaciones mixtas con regeneración de roble.
- 4.- Formaciones continuas de matorrales y arbustos nativos de quebradas.
- 5.- Renoval de roble y matorral, con predominancia de arbolado y regeneración subarborea.
- 6.- Plantaciones de *Pino Insigne*, con sotobosque discontinuo de matorral y arbustos.
- 7.- Plantaciones de *Eucaliptus globulus* con matorral y arbustos asociados.
- 8.- Áreas intervenidas, en parte con regeneración de matorrales y arbustos bajos poco densos, bosque en pie, y desechos de explotación.

Clases incombustibles:

- 9.- Zonas agrícolas de regadío.
- 10.- Zonas o núcleos urbanos.
- 11.- Aguas continentales.
- 12.- Suelos desnudos.

La definición de las clases espectrales se realizó a partir del archivo TMRE, manteniéndose las muestras que resultaron fiables y redefiniendo las de mayor confusión.

Seguidamente, se aplicó el clasificador del paralelepípedo y el de mínima distancia. El resultado fue posteriormente generalizado, con el filtro de mayoría de matriz de 2 x 2, obteniéndose de esta manera el mapa final.

Los pasos finales consistieron en la obtención de las superficies de cada clase de combustible y la correspondiente verificación. El muestreo se realizó definiendo en forma aleatoria 3 polígonos por clase, de 16 píxeles de tamaño, con excepción de los casos de pino y eucalipto, que se ampliaron al doble, constituyéndose, de esta manera, una muestra de 672 píxeles.

Resultados

Análisis de las muestras

El análisis de separabilidad de las muestras indicó algunas confusiones, como las existentes entre matorral esclerófilo con arbustos bajos, constituido por especies espinosas y matorral de quebradas, o entre pino joven con pino adulto y eucalipto. La clase de renoval de roble era la que presentaba mayor separabilidad. Este resultado se confirma en ambas imágenes, aunque los índices de separabilidad son menores para la imagen SPOTS (JM = 1402 versus 1406 en TMS).

Selección de variables

Gracias al análisis discriminante (tablas 1 y 2), pudimos señalar cuáles eran las variables más influyentes para abordar la clasificación final, dado que para efectos de comprobar esta selección las clasificaciones preliminares se realizaron con la totalidad de las variables. En el caso de los datos TMS, las primeras cuatro funciones explicaron el 91,81% de la varianza de los datos. A partir de los coeficientes de estas funciones discriminantes, ordenamos la cantidad de información de cada una de nuestras variables, en orden decreciente, de la siguiente manera: banda TM2, TM3, TM4, NDVIC, Altitud, Insolación, Pendiente, TM5 y Textura.

En los datos SPOTS, a diferencia de los del TMS, los primeros cuatro componentes explican el 86,99% de la variación total. Es decir, en este caso, pudimos abordar una menor reducción de las variables, que resultaron ordenadas de la siguiente forma: HRV1, HRV2, NDVIC, HRV3, Insolación, Pendiente, Altitud y Textura. En ambos casos, la textura resulta ser la variable de menor peso para discriminar entre modelos de combustibles.

Función	Archivo: TMS			Archivo: SPOTS		
	Eigvalue	Porcentaje	Correlación	Eigvalue	Porcentaje	Correlación
1	8,3480480	41,04	0,94500	6,9305131	43,50	0,93483
2	6,48771933	31,89	0,93083	3,3635052	21,11	0,87797
3	2,2872940	11,24	0,83415	2,0054740	12,59	0,81687
4	1,5546702	7,64	0,78010	1,5594084	9,79	0,78057

Tabla 1
Funciones Discriminantes del Análisis Factorial

Var (TMS)	1	2	3	4	Var (SPOTS)	1	2	3	4
TM2	-0.50095	-0.72201	-1.14909	1.14061	HRV1	-0.77687	-0.03397	-0.40155	0.47251
TM3	-0.00760	1.60170	0.33493	-0.95894	HRV2	-0.50767	0.05619	1.21321	0.86926
TM4	1.05195	-0.46337	-0.25375	-0.40693	HRV3	0.88695	-0.94881	-1.15862	-0.95930
TM5	0.27596	0.36062	0.23857	-0.11826	ALT	0.18293	0.67545	0.14092	0.32987
PEND	0.30509	0.31207	0.58161	0.61081	PEND	-0.38808	-0.01135	-0.50678	-0.48664
ALT	-0.01765	-0.24509	0.48288	-0.76977	INSH	0.38481	0.23090	-0.38184	0.55955
INS	0.53701	-0.17049	-0.51685	-0.25158	NDVIC	0.01110	-0.22296	0.10135	0.21114
NDVIC	-0.58045	-0.36666	0.34776	0.20006	TEXH	-0.80899	-0.00383	0.74876	-0.61382
TEXH	-0.03819	-0.5125	-0.12376	0.11912	-	-	-	-	-

Tabla 2
Coeficientes de las Funciones Discriminantes Estandarizados

Evaluación de los archivos TMS, SPOTS y TMS2

Los resultados de las tablas de contingencia (tabla 3) y los respectivos mapas resultantes (figuras 1, 2 y 3) llevan a las siguientes consideraciones y comparaciones: (i) las clases que mantienen una confusión importante en los tres archivos son la clase de matorral esclerófilo arborecente con la clase de matorrales y arbustos con predominio de especies leñosas; (ii) la clase de formaciones continuas de matorral de quebradas con la de pastizales en formaciones de arbustos y matorrales costeros, confusión que se aminora en el archivo TMS2; (iii) la clase de plantaciones jóvenes de pino con la de renoval y formaciones de regeneración de roble y (iiii) entre las clase de pino adulto con la eucalipto. Esta última confusión es menor en los archivos TMS y TMS2.

Llama la atención la alta confusión que se produce en el archivo SPOTS entre las plantaciones de pino adulto con los cuerpos de agua, llegando a desaparecer la clase de aguas continentales profundas. Este problema no es tan evidente en el archivo TMS, y no se encuentra en el TMS2.

Los mapas elaborados confirman también lo anterior, denotando una mayor coherencia en la definición de las clases como una menor confusión en los archivos TMS y TMS2.

Gran parte de estas confusiones coinciden con lo que se había analizado previamente, en la separabilidad de las muestras.

Los estadísticos generales confirman la tendencia de las confusiones de los diferentes archivos. Así la fiabilidad del mapa y el índice Kappa, son coincidentes en va-



Figura nº3
 Mapa Archivo TMS2. (A. 84)

Mapa	Fac. Kappa	Fiab. del Mapa	Int. de Conf.	Ex. Usuar.	Ex. Prod.
SPOTS	17%	40.9%	34.3-47.6%	40.2%	40.2%
TMS	19%	51.0%	44.2-57.8%	55.2%	49.2%
TMS2	18%	53.4%	46.3-60.1%	50.8%	52.2%

Tabla 3
 Resumen de los Estadísticos Generales de las Tablas de Contingencia de los Archivos SPOTS, TMS y TMS2

lorar la clasificación de TMS ($K = 19\%$, $Fm = 51\%$) con mayor nivel de precisión que la realizada con SPOTS ($K = 17\%$, $Fm = 40,9\%$). Asimismo, reflejan la mayor calidad de los resultados entre el TMS2 ($K = 18\%$, $Fm = 53,4\%$) y TMS, estableciendo la validez de la aplicación del filtro de mayoría con matriz de 2×2 .

En relación a la exactitud (promedio) de las 16 clases informacionales, se aprecia claramente mejores resultados con TMS y con TMS2. En este último, se mejora la exactitud del productor, respecto de TMS, es decir disminuye el porcentaje de píxeles que no se encuentran en la clase que les corresponde.

Clasificación final

En esta última etapa se procedió a realizar una nueva clasificación considerando las variables seleccionadas y las nuevas clases definidas.

La tabla de contingencia (tabla 4) y el mapa final (figura 4), nos indican una notable mejoría de los resultados.

CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL	Exu	Eu
1	39	0	6	1	0	0	0	0	0	1	0	1	48	81.2	17.8
2	5	36	0	8	2	0	0	5	0	9	0	0	65	55.4	44.6
3	2	5	40	9	5	8	8	0	0	0	0	0	77	51.9	48.1
4	0	0	0	24	0	2	10	0	5	0	0	0	41	58.5	41.5
5	0	0	0	0	41	4	2	0	0	0	0	0	47	87.2	12.8
6	1	6	0	2	0	51	30	0	0	0	0	0	90	56.7	43.3
7	0	0	2	1	0	31	46	0	0	0	0	0	80	57.5	42.5
8	0	1	0	3	0	0	0	43	0	0	0	1	48	89.6	10.4
9	1	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	44	97.7	2.7
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	38	100.0	0.0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	48	100.0	0.0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	46	100.0	0.0
Total	48	48	48	48	48	96	96	48	48	48	48	48	672		

Exp 81.3 75.0 83.3 50.0 85.4 53.2 47.9 89.6 89.6 77.1 100.0 95.8

Ep 18.7 25.0 16.7 50.0 14.6 46.8 52.1 10.4 10.4 22.9 0.0 4.2

Los errores (Ep, Eu) y la exactitud (Exp, Exu), se expresan en %.

Estadísticos generales:

Factor Kappa = 71%

Fiabilidad del mapa = 73.7%

Intervalo de confianza (IC) = [70.9 - 76.5%]

El cuadro muestra los aciertos y errores de las clases de combustibles que se encuentran señaladas en la primera columna (CLASES) con números del 1 al 12, en correspondencia con las definidas anteriormente en el texto (4.5).

TABLA 4
Clasificación Final
TABLA DE CONTINGENCIA (Filas = TMRE; Columnas = Muestras de Verificación)

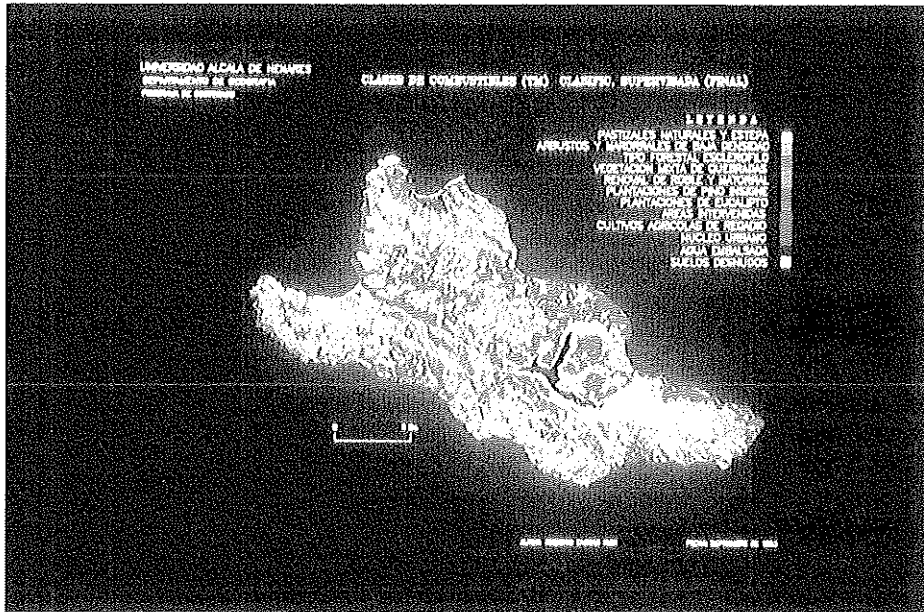


FIGURA Nº 4
Mapa Archivo TMRE. (A. 85)

Las confusiones disminuyeron en todas las clases por debajo del 30%, salvo las clases de pino y eucalipto que tiene un porcentaje cercano al 33% de confusión.

Los estadísticos generales, tanto la fiabilidad del mapa, como el índice Kappa, se sitúan en niveles similares. Así, por un lado la fiabilidad estimada al 95% de probabilidad se ubica en un rango de 70,9 a 76,5%, por su parte el índice Kappa, indica que el 71% de la clasificación obtenida es comparativamente mejor, que la esperada al azar. Los porcentajes promedios de exactitud del mapa, en relación al usuario y al productor, se elevaron considerablemente, resultando ser de 78 y 77,4%, respectivamente. Estos resultados son la consecuencia de una menor confusión entre las clases, lo que se confirma por el bajo nivel de dispersión del número de píxeles en clases diferentes.

En resumen, en relación a las clasificaciones anteriores (SPOTS, TMS), las confusiones disminuyeron considerablemente y los niveles de fiabilidad del mapa aumentaron, hasta un nivel que puede considerarse aceptable.

Del mapa se obtiene que los combustibles con mayor presencia en el área de estudio corresponden al tipo forestal esclerófilo, con densidades medias a densas; matorrales y arbustos de baja densidad; eucaliptos y pinares.

El matorral esclerófilo se encuentra en diferentes estados de composición y estructura. Fundamentalmente está integrado por géneros como *Escallonia*, *Cryptocaria*, *Psoralea*, *Quillaja*, *Peumus*, *Maitenus*, mezclados con arbustos y otros géneros lauriformes.

En algunas situaciones, forma parte del estrato subarboreo del tipo forestal Palma chilena.

El matorral ralo, formado principalmente por géneros como *Acacia*, *Podantus*, *Trevoa*, *Colliguaya*, *Berberis*, *Baccharis*, *Satureja*, y, en menor medida, *Peumus* y *Maitenus*.

Las plantaciones de pino y eucalipto corresponden a bosques jóvenes y adultos, con doseles cerrados, generalmente sin manejo, lo que favorece la presencia de material muerto en el sotobosque.

Conclusiones

El desarrollo realizado para la consecución de los objetivos inicialmente previstos, permite enunciar las siguientes conclusiones:

1. En el proceso de clasificación, resultó ser fundamental el análisis de la separabilidad de las clases espectrales, con la finalidad de redefinir las áreas de entrenamiento, o fusionar clases informacionales con respuestas similares, que no pueden separarse sin un alto grado de confusión. En esta situación se encontraron las clases correspondientes a matorrales bajos costeros, regeneración nativa con matorral, tipo forestal esclerófilo, pinares y eucaliptos.
2. Los resultados obtenidos indican que las clases de combustibles que presentan mayor dificultad para separarlas, sin un alto grado de confusión, son las plantaciones de pinares con las de eucalipto.
3. La evaluación conjunta de los resultados, especialmente los de la separabilidad espectral de las muestras y el análisis discriminante, determinan que las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano tienen el mayor peso para diferenciar las clases de combustibles, a las que se suma el NDVIC, como la variable derivada de mayor aporte, luego la insolación y pendiente. La textura resulta ser la variable con menor aporte discriminatorio.
La diferencia, entre los dos algoritmos texturales aplicados, no es significativa por cuanto en ambos archivos, el análisis discriminante, no varía la posición de la textura. Sin embargo, al graficar los valores medios, más menos una desviación estándar, la textura obtenida a partir de la varianza, otorga a las muestras mayor separabilidad espectral entre ellas.

4. Respecto de la comparación entre las dos imágenes (TM y HRV), los datos del TM ofrecen mejores resultados cartográficos y con mayor fiabilidad, lo que valida, contrariamente a lo que se podría suponer, la fecha de toma (invierno), resultando adecuada para realizar la cartografía de combustibles. Esta fecha, es que permite incorporar los cambios que se producen en los combustibles, en la temporada de explotación anterior, y otorga el tiempo suficiente para disponer de la información de manera oportuna en la temporada de incendios siguiente.
5. En relación a la homogeneización de la representación cartográfica final, mediante la aplicación del filtro de mayoría, se determinó que una matriz de 2 x 2 es suficiente para lograr el objetivo, mejorando los resultados de superficies, si se comparan con una de 3 x 3.
6. El resultado final obtenido, en la clasificación de las ocho clases de combustibles y cuatro incombustibles, tanto por la mapificación, como por la evaluación estadística (70,9 - 76,5% de fiabilidad) se encuentran dentro del rango de bueno (Yool et al. 1985). Resultados similares se encuentran reportados por otros autores, en clasificaciones digitales de coberturas del suelo, por ejemplo: 64% para 10 clases (Pedley y Curran, 1991), 70% para 8 clases (Verdin et al, 1988).

En consecuencia, la clasificación digital de los combustibles resulta adecuada, pero precisa de un buen control de terreno, y de una elección adecuada de las variables más relevantes, para conseguir mejores resultados. La continuación del trabajo intentará mejorar la fiabilidad, incluyendo algunas de las variables auxiliares en forma posterior a la clasificación, así como aumentar las muestras de terreno.

Los resultados obtenidos en esta primera etapa y la metodología determinada permiten apoyar estas aplicaciones.

Referencias

- Burgan, R.E. y Rothermel, R.C.:** (1984): *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Fuel Subsystem*, U.S. Department of Agriculture National Association of State Foresters. Ogden UT.
- Burgan, R.E. y Shasby, M.B.:** (1984): Mapping broad-area fire potential from digital fuel, terrain, and weather data, *Journal of Forestry*, vol. 82, pp. 228-231.
- Calabri, G. y Ciesla, W.M.:** (1992): *Global Wildland Fire Statistics, Food and Agriculture Organization*, Roma.
- Chuvieco, E.:** (1992): Remote Sensing Applications in Forest Fires, en *E.E.C. Course on Fo-*

- rest Fires and Management*, Commission of the European Communities, Bruselas, en prensa.
- Cihlar, J., ST-Laurent, L. y Dyer, A.:** (1991): Relation Between the Normalized Difference Vegetation Index and Ecological Variables, *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 279-298.
- 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*, vol. 54, pp. 593-600.
- Congalton, R.G., Oderwald, R.G. y Mead, R.A.:** (1983): Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 1671-1678.
- Cosentino, M.:** (1977): *Fuel Mapping in Relation to the Management of Brushlands and Timberlands in Mendocino County, California*, Space Sciences Laboratory, Berkeley.
- Curran, P.J., Duncan, J.L. y Gholz, H.L.:** (1992): Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM, *Remote Sensing of Environment*, vol. 39, pp. 3-13.
- Curran, P.:** (1980): Remote Sensing systems for monitoring crops and vegetation, *Progress in Physical Geography*, vol. 4, pp. 315-341.
- Dixon, R., Shipley, W., Briggs, A.:** (1984): *Landsat - A Tool for Mapping Fuel Types in the Boreal Forest of Manitoba. A pilot study*, Winnipeg. Manitoba.
- Eastman, R.E.:** (1992): *IDRISI users' guide*, Worcester, Clark University.
- ERDAS:** (1991): *Image Processing Module Vers. 7.4*, Atlanta.
- Haltenhoff, H.:** (1990): ¿Por qué es Importante Preocuparse de los Incendios Forestales? Corporación Nacional Forestal. Doc. Interno 5 p. Santiago. Chile.
- Instituto Geográfico Militar:** (1985): *Geografía de los Climas*, IGM. Colección Geográfica de Chile, Santiago.
- Instituto Nacional de Estadísticas:** (1989): Censo Nacional. Boletín Oficial.
- Julfo, G.A.:** (1987): *Clasificación Preliminar de Modelos de Combustibles Forestales*, Univ. Austral de Chile. Fac. de Ciencias Forestales, Valdivia.
- Kourtz, P.H.:** (1977): An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping, en *Proc. 11th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1111-1115.
- McKinley, R.A., Chine, E.P. y Werth, L.F.:** (1985): Operational fire fuels mapping with NOAA-AVHRR data, en *Pecora X Symposium*, Fort Collins, pp. 295-304.
- Miller, W. y Johnston, D.:** (1985): Comparison of fire fuel maps produced using MSS and AVHRR data, en *Pecora X Symposium*, Fort Collins, pp. 305-314.
- Miller, W.A., Howard, S.M. y Moore, O.G.:** (1986): Use of AVHRR data in an Information System for fire management in the Western United States, en *20th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Nairobi, pp. 67-79.
- Murphy, D.L.:** (1985): Estimating Neighborhood Variability with a Binary Comparison Matrix, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 667-674.
- Pedley, M. y Curran, P.:** (1991): Per-Field Classification: and Example Using SPOT HRV Imagery, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 12, pp. 2181-2192.
- Rabii, H.A.:** (1979): *An Investigation of the Utility of Landsat-2 MSS Data to the Fire-Danger Rating Area, and Forest Fuel Analysis within Crater Lake National Park, Oregon*, Oregon State University, Ph.D. dissertation.
- Root, R.R., Stitt, S.C.F., Nyquist, M.O., Waggoner, G.S. y Agee, J.K.:** (1986): Vegetation and fire fuel models mapping of North Cascades National Park, *ACSM-ASPRS Annual Convention. Tech. Papers*, vol. 3, pp. 78-85.

Salazar, L.A.: (1982): *Remote Sensing Techniques Aid in Preattack Planning for Fire Management*, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley.

Shasby, M.B., Burgan, R.R. y Johnson, R.R.: (1981): Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data, en *Proc. 7th Inter. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, pp. 529-537.

Strahler, A.H., Logan, T. y Woodcock, C.: (1979): Forest Classification and Inventory System Using Landsat Digital Terrain, and Ground Sample Data, *Proc. Thirteenth International Symp. on Remote Sensing of Environment Arn Arbor, Michigan*, pp. 1541-1557.

Van Wyngaarden, R. y Dixon, R.: (1989): *Application of GIS to model forest fire rate of spread*, Tydac Techn., Ottawa.

Verdin, J.P., Eckhardt, D.W. y Lyford, G.R.: (1988): ¿Evaluation of SPOT Imagery for Monitoring Irrigated Lands SPOT I Image Utilization Assessment, Results, Centro National D'Etudes Spatiales. Cepadues Ed. pp 81-91, Toulouse.

Werth, L.F., McKinley, R.A. y Chine, E.P.: (1985): The use of wildland fire fuel maps produced with NOAA-AVHRR scanner data, en *Pecora X Symposium*, Fort Collins, pp. 326-331.

Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Estes, J.E. y Cosentino, M.J. (1985): Describing the brushfire hazard in southern California, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75, pp. 417-430.