

UTILIZACION DE IMAGENES AVIRIS EN LA CARTOGRAFIA DEL COMBUSTIBLE EN EL CHAPARRAL DE CALIFORNIA

F. GONZÁLEZ-ALONSO¹, S. L. USTIN², A. PALACIOS-ORUETA² Y M. GARDNER³

RESUMEN

La cartografía del combustible existente en el chaparral de California a partir de imágenes procedentes del sensor hiperspectral AVIRIS parece que es bastante factible mediante el empleo del Análisis de Mezclas Espectrales.

Palabras clave: AVRISI, Análisis de Mezclas Espectrales, Cartografía del combustible, Incendios forestales.

INTRODUCCION

En los últimos años el estado de California ha sufrido grandes incendios forestales que han afectado fundamentalmente a superficies cubiertas por chaparral. Estas áreas normalmente están cercanas a zonas urbanizadas y en consecuencia los daños económicos ocasionados han sido de una gran importancia, además de los graves impactos ecológicos sufridos por el medio ambiente.

Los costes de la extinción de estos grandes incendios superan ampliamente la cifra de 50 millones de dólares USA cada año para todo el estado de California.

Los ecosistemas de California son extremadamente diversos debido a las interacciones existentes entre diversos factores tales como la existencia de un clima de tipo mediterráneo, los numerosos gradientes existentes en la topografía y la presencia a veces de condiciones edáficas difíciles.

Esta combinación de factores ha creado un mosaico de vegetación muy complicado con una

gran diversidad genética donde son muy abundantes los endemismos y las especies sensibles e indicadoras (MINNICH, 1983).

El tipo de comunidad vegetal denominada «chaparral» es uno de los muchos tipos de ecosistemas adaptados al fuego que existen en California y en él abundan las especies endémicas en peligro de extinción.

El chaparral es el tipo de vegetación que ocupa una mayor extensión en el estado de California, cubriendo una superficie de 3,5 millones de hectáreas lo cual representa el 5% de la superficie del estado e incluso más si se incluye el chaparral blando (*soft chaparral*) (WEISLANDER & GLEASON, 1954).

El chaparral alcanza su mayor grado de desarrollo en el sur de California pudiéndose distinguir al menos cuatro tipos de chaparral distintos, sobre los que existe un grado de conocimiento considerable acerca de su ecología y fisiología (SAMPSON & JESPERSEN, 1963).

El tipo de chaparral denominado *chamise* es el más abundante en toda California y la especie más representada es *Adenostoma fasciculatum*, normalmente forma masas puras y prefiere las orientaciones más cálidas y las crestas de las sierras.

El segundo tipo de chaparral llamado *ceanothus* es un tipo de comunidad intermedio en la serie sucesional y algunas veces forma masas puras compuestas por una o varias especies del género

¹ Laboratorio de Teledetección. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Crta. de la Coruña km 7. 28040 Madrid. España.

² Department of Land, Air and Water Resources. University of California. Davis. CA 95616, USA.

³ Department of Geography. University of California. Sta. Barbara. CA 93106, USA.

Ceanothus. Tiende a tener un grado de cubierta más completo que el tipo *chamise* pero con una menor densidad de plantas.

El tercer tipo de chaparral denominado *Manzanita*, está compuesto por una mezcla de especies con hoja ancha. Se presenta en altitudes superiores a los anteriores y en suelos más profundos. Constituye una comunidad más diversa compuesta por especies de los géneros *Arctostaphylos*, *Ceanothus*, *Quercus*, *Heteromeles*, *Rhus*, etc. Este tipo de chaparral es el más exigente y el que presenta un tipo de cubierta más denso.

El cuarto tipo de chaparral se denomina *Coastal Sage* (salvia costera) y esta dominado por *Artemisia californica* y otras especies de los géneros *Rhus*, *Haplopappus*, *Encelia* y *Eriogonum*. Es el tipo de chaparral más común en altitudes bajas por debajo del tipo *ceanothus*. También es el que tiene menor talla (menos de 1,5 m) y menos grado de cubierta.

Los diferentes tipos de chaparral presentan distintas respuestas frente al fuego debido a sus diferentes comportamientos en aspectos tales como: estrategia de regeneración (por semilla, por brotes), tipo de crecimiento, acumulación de combustible, relación planta-agua, tipo de ignición, etc.

Los tipos *chamise* y *ceanothus* se consideran matorrales esclerófilos mientras que el tipo *coastal sage* se considera no esclerófilo debido a que sus hojas son más verdes y grandes con un mayor contenido de agua.

Más de 70 años de lucha contra el fuego unido a los efectos de las sequías recientes en California, han producido como resultado una tremenda acumulación de combustible en las comunidades de chaparral (YOOL *et al.*, 1985).

El proceso de urbanización acelerado que se ha producido en la región del gran Los Angeles ha incrementado el riesgo de incendio en las comunidades de chaparral hasta niveles críticos y por este motivo presenta un gran interés el estudio de la cartografía de los combustibles a partir de los datos suministrados por los sensores multiespectrales.

El objetivo del presente trabajo es analizar las posibilidades que ofrecen las imágenes multies-

pectrales procedentes del sensor AVIRIS en la determinación de la biomasa seca y en la cartografía del combustible en las comunidades de chaparral del sur de California de cara a la integración de dichas informaciones en la determinación del peligro de aparición de incendios forestales y en la planificación de fuegos prescritos de carácter preventivo.

MATERIAL Y METODOS

La zona de estudio considerada se encuentra localizada en las Montañas de Santa Mónica que se extienden aproximadamente a lo largo de 73 km desde la llanura aluvial de Oxnard en el oeste hasta el río Los Angeles en el este. El intervalo de altitudes oscila desde el nivel del mar hasta los 950 m. La precipitación anual es baja y las temperaturas moderadas. El clima es de tipo mediterráneo con veranos calientes y secos e inviernos fríos y húmedos.

La geología de la zona es complicada y está compuesta principalmente por esquistos marinos del Mioceno y rocas volcánicas. En el este de la zona de estudio predominan las areniscas del Cretácico y las calizas marinas del Paleoceno.

Dispersos por la zona de estudio se encuentran depósitos aluviales recientes de origen no marino del Eoceno. El levantamiento y erosión de la zona es relativamente reciente y ocurrió durante el Plioceno y el Cuaternario (DIBBLEE, 1982).

La combinación de los diferentes factores climáticos, geológicos, edáficos y topográficos ha producido un complejo mosaico de vegetación que incluye al menos cuatro tipos distintos de chaparral, humedales, vegetación de ribera y bosques.

La distribución especial de la vegetación es complicada debido a los incendios reiterados y a los diferentes estados de evolución en los que se encuentra la vegetación como consecuencia de los mismos. A modo de ejemplo basta citar que entre 1935 y 1994 se han producido en la zona 115 incendios forestales de tamaño superior a 16 ha.

Para la realización del presente trabajo se ha utilizado una imagen del sensor AVIRIS captada el 19 de octubre de 1994 y correspondiente a la zona de Point Dume cerca de la ciudad de Santa Mónica en el océano Pacífico.

El sensor AVIRIS (*Airbone Visible Infrared Imaging Spectrometer*) es un sensor hiperespectral que capta información en 224 bandas contiguas de 10 nm de anchura en el intervalo del espectro electromagnético comprendido entre los 370 nm y los 2500 nm (VANE *et al.*, 1993).

El sensor AVIRIS vuela instalado en un avión del tipo ER-2 de la NASA a una altitud de 20.000 m con una anchura de barrido de 11 km. El tamaño de píxel en esta imagen es de 17 m × 17 m. Una imagen típica de AVIRIS contiene 512 líneas de 614 píxeles cada una y cubre aproximadamente un área de 11 km × 9 km. En la Lámina IV se presenta la imagen AVIRIS correspondiente a la zona de Point Dume que se ha empleado en este trabajo.

La metodología empleada ha consistido fundamentalmente en los siguientes pasos:

En primer lugar se han determinado los valores de reflectancia correspondientes a las 224 bandas de la imagen AVIRIS, para ello se ha empleado el código MODTRAN3 (GREEN *et al.*, 1993).

A continuación se ha procedido a la corrección geométrica de la imagen a coordenadas UTM mediante el empleo de 10 puntos de control y una función polinómica de primer grado. El error cuadrático medio de la calibración ha sido inferior a un píxel en filas y columnas.

Seguidamente a partir de un listado de estadísticos correspondientes a las 224 bandas se ha procedido a eliminar aquellas bandas que presentaban anomalías de captación o que no presentaban un rango de variación suficiente. Mediante este procedimiento se han eliminado 22 bandas.

A continuación se ha definido una ventana en la imagen AVIRIS considerada que presentara un grado de homogeneidad suficiente en la vegetación, esta subventana tiene por dimensiones 304 filas y 381 columnas.

El siguiente paso ha consistido en proceder a descomponer la imagen multiespectral de AVIRIS en una serie de componentes básicos mediante el empleo de la técnica del Análisis de Mezclas Espectrales (Spectral Mixture Analysis, SMA). La hipótesis fundamental del SMA consiste en suponer que una respuesta espectral mezclada, como puede ser la que corresponde a la mayoría

de los píxeles de una imagen, puede ser modelizada mediante una combinación lineal de espectros puros denominados *endmembers*, estando cada uno de ellos pesado por el porcentaje de superficie que ocupan en el píxel.

Esta aproximación presupone que el efecto no lineal debido a la difusión múltiple de la vegetación puede ser despreciado (ADAMS *et al.*, 1986; SMITH *et al.*, 1990; USTIN *et al.*, 1996).

Los clasificadores típicos no han sido útiles para predecir mezclas complejas de tipos de vegetación o para estimar la biomasa viva y/o muerta debido a la especificidad que tiene la información digital de una imagen concreta.

El mayor interés de la técnica del Análisis de Mezclas Espectrales radica en que se plantea un modelo basado en características físicas de la vegetación (proporción de vegetación viva *versus* proporción de vegetación muerta) en lugar de relaciones estadísticas empíricas tal y como es el caso de las técnicas de clasificación convencionales supervisadas o no supervisadas.

En los tipos de paisaje que presentan la vegetación más o menos dispersa, como puede ser el caso de los climas mediterráneos, la hipótesis de linealidad en el Análisis de Mezclas Espectrales se puede asumir de una forma razonable.

La utilización del Análisis de Mezclas Espectrales de tipo lineal en el caso de imágenes AVIRIS se ha ensayado en diversos trabajos con resultados aceptables (USTIN *et al.*, 1996; ROBERTS *et al.*, 1993; GAMON *et al.*, 1993).

Dado que el objetivo del presente trabajo es la cartografía de la biomasa seca como principal fuente de combustible en un incendio forestal, hemos pensado que esta característica puede estar estrechamente relacionada con la fracción correspondiente a la vegetación que no está fotosintéticamente activa, entendiendo por ésta la que corresponde a las ramas, el tronco, la hojarasca seca, etc., en definitiva la vegetación muerta.

Así pues, el conjunto de espectros puros o *endmembers* que hemos considerado en nuestro estudio han sido los cuatro siguientes: vegetación viva (verde), vegetación fotosintéticamente no activa (vegetación muerta), suelo y sombra.

Los espectros representativos de estos cuatro componentes se han seleccionado de la librería de espectros PRISM del Departamento de Geografía de la Universidad de California en Santa Bárbara. La librería PRISM contiene más de 400 espectros de reflectancia determinados en laboratorio y en el campo, correspondientes a las especies de chaparral presentes en la zona, a diversos tipos de vegetación muerta, a diversos tipos de suelo y a un espectro típico de sombra.

Después de un análisis visual de todos los espectros se seleccionó como espectro representativo de la vegetación verde el correspondiente a la especie *Adenostoma fasciculatum*, como espectro representativo de la vegetación muerta se ha seleccionado el correspondiente a las ramas y tallos de la especie *Eriogonum cinereum*, como espectro representativo del suelo se seleccionó el correspondiente al suelo de la zona de Zuma y como espectro característico de la sombra se seleccionó un espectro plano con una reflectancia muy baja en todas las bandas.

La selección de los espectros correspondientes a los *endmembers* a partir de una librería espectral posee las ventajas siguientes:

- 1) El proceso es repetible.
- 2) Los mismos espectros de reflectancia pueden servir para otras imágenes.
- 3) Las imágenes correspondientes a las diferentes fracciones de los componentes están relacionadas con los espectros reales de los materiales que componen la escena.
- 4) Es posible analizar la evolución de la composición de la imagen a lo largo del tiempo si los mismos espectros se aplican a imágenes sucesivas.

Los espectros seleccionados fueron depurados eliminando las bandas que presentaban anomalías debido a la absorción del vapor de agua u otras causas y finalmente sólo se han considerado 170 bandas de la imagen original AVIRIS para realizar la descomposición de la imagen.

El programa empleado para realizar dicho proceso ha sido el que incluye el paquete comercial ENVI.

En la Lámina V se presentan los espectros representativos de los cuatro *endmembers* considerados.

RESULTADOS

Una vez realizada la descomposición de la imagen en las fracciones correspondientes el resultado obtenido se ha representado en la Lámina VI, donde se ha asignado el color rojo a la fracción correspondiente a la vegetación muerta, el color verde a la fracción de vegetación verde y el color azul a la fracción correspondiente al suelo.

El resultado obtenido es bastante elocuente pues se pueden identificar perfectamente las áreas donde predomina con claridad el color rojo que se corresponderían con las áreas donde la vegetación muerta o no activa fotosintéticamente es más abundante y en consecuencia la acumulación de combustible seco es mayor.

La coherencia de la descomposición realizada se puede verificar calculando la correlación lineal existente entre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y las imágenes correspondientes a las fracciones de vegetación verde, vegetación muerta y suelo. Los valores obtenidos para el coeficiente de correlación entre el NDVI y el % de vegetación verde, % de vegetación muerta y el % de suelo fueron respectivamente: 0,696, -0,511 y -0,712. Es decir cuanto mayor es el % de vegetación verde, mayor es el valor correspondiente al NDVI y cuanto mayores sean los % de vegetación muerta y suelo, menor es el valor correspondiente al NDVI.

En la Tabla I se presentan los valores de biomasa viva y muerta obtenidos en dos áreas de muestreo y los valores del porcentaje de vegetación verde y vegetación muerta deducidos a partir del Análisis de Mezclas Espectrales realizado.

De la observación de dicha tabla se deduce que cuando el porcentaje de vegetación verde disminuye, también disminuye la cantidad de biomasa viva y que cuando el porcentaje de vegetación muerta aumenta, también aumenta la cantidad de biomasa muerta, ambos en unos ratios semejantes.

Esta observación sugiere que puede existir una relación entre los porcentajes de vegetación muerta y viva deducidos del Análisis de Mezclas Espectrales y las cantidades de biomasa muerta y viva existentes si bien para verificar y generalizar este extremo sería necesario disponer de un

TABLA I

VALORES DE BIOMASA VIVA Y MUERTA Y PORCENTAJES DE VEGETACION VIVA Y MUERTA DEDUCIDO DEL ANALISIS DE MEZCLAS ESPECTRALES EN DOS AREAS DE MUESTREO

Localidad	Biomasa viva Mgr/ha	Biomasa muerta Mgr/ha	% verg. verde	% veg. muerta
Castro Peak (1)	19,76	3,39	47,07	39,77
Lower Kanan West (2)	11,7	5,87	34,64	61,57
(1)/(2)	1,68	0,57	1,35	0,64

mayor número de puntos de muestreo en el campo en los que se evaluarán las correspondientes cantidades de biomasa.

Si estas relaciones existieran y fueran consistentes sería posible cartografiar la cantidad de combustible a partir de la descomposición de las imágenes AVIRIS y esta información se podría incorporar a un Sistema de Información Geográfica orientado a la determinación de los índices de peligro de incendio y a la planificación de fuegos prescritos como estrategia de eliminación de combustibles.

CONCLUSIONES

La descomposición de imágenes AVIRIS mediante el empleo de la técnica del Análisis de Mezclas Espectrales puede presentar unas grandes posibilidades de aplicación en la cartografía del combustible existente en las comunidades del chaparral de California.

La utilización de esta técnica en lugar de las técnicas de clasificación convencionales en este tipo de aplicaciones parece ser más adecuada al estar

basada en una realidad física más consistente, como es la respuesta espectral de los materiales que estamos directamente interesados en cartografiar (vegetación muerta, biomasa seca, cantidad de combustible, etc.).

El lanzamiento en un futuro próximo de satélites de observación de la tierra provistos de sensores hiperespectrales (HSI, ASTER-MODIS) abre un enorme campo de posibilidades al tipo de aplicaciones consideradas en este trabajo de cara a una mejor conservación de los bosques y paisajes propios de los climas mediterráneos.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la concesión de una beca de investigación INIA-MAPA al primer autor para realizar una estancia en CStars (Center for Spatial Technologies and Remote Sensing) del Departamento de Suelo, Aire y Agua de la Universidad de California, Davis, a cuyos componentes se agradecen muy sinceramente todas las facilidades prestadas para la realización del mismo.

SUMMARY

The cartography of the fuel in the «chaparral» of south California has been tested using the hyper-spectral AVIRIS images. Spectral Mixture Analysis was used to generate fraction images of green vegetation, dead vegetation and soil. Reference endmembers were selected from a library of spectra generated by the Department of Geography of the University of California, Sta Barbara. The results show that the cartography of fuels could be possible, however additional research is required to fully evaluate the technique and validate the obtained results.

Key Words: AVIRIS, Spectral Mixture Analysis, Cartography of fuel, Forest fires.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS J. B., SMITH M. O. & JOHNSON P. E. 1986: «Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site». *Journal of Geophysical Research*, 91: 8098-8112.
- DIBBLEE T. W. 1982: «Geology of the Santa Monica Mountains and Simon Hills, Southern California». *Geology and Mineral wealth of the California Transverse Ranges*, South Coast Geological Society, 94-130.
- GAMON J. A., FIELD C. B., ROBERTS D. A., USTIN S. L. & RICCARDO V. 1993: «Functional patterns in an annual grassland during an AVIRIS overflight». *Remote Sensing of Environment*, 4: 1-15.
- GREEN R. O., CONEL J. E. & ROBERTS D. A. 1993: «Estimation of Aerosol Optical Depth and Additional Atmospheric Parameters for the Calculation of Apparent Surface Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS». *Summaries of the 4th Annual JLP Airbone Workshop*, Washington D.C., pp. 73-76.
- MINNICH R. A. 1983: «Fire mosaics in southern California and northern Baja California». *Science*, 219: 1281-1294.
- ROBERTS D., ADAMS J. B. & SMITH M. O. 1993: «Discriminating green vegetation, non photosynthetic vegetation and soils in AVIRIS data». *Remote Sensing of Environment*, 44: 1-25.
- SAMPSON A. W. & JESPERSEN B. S. 1963: «California Range Brushland and Browse Plants», University of California, 162 p.
- SMITH M. O., USTIN S. L., ADAMS J. B. & GILLESPIE A. R. 1990: «Vegetation in deserts: I A regional measure of abundance from multispectral images». *Remote Sensing of Environment*, 31: 1-26.
- USTIN S. L., SMITH M. O. & ADAMS J. B. 1993: «Remote Sensing of ecological processes: a strategy for developing and testing ecological models using spectral mixture analysis» *In: Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, edited by J. EHLRINGER and C. FIELD (New York: Academic Press), 339-357.
- USTIN S. L., HART Q. J., DUAN L. & SCHEER G. 1996: «Vegetation mapping of hardwood rangelands in California». *International Journal of Remote Sensing*, 17(15): 3015-3036.
- VANE G., GREEN R. O., CHRIEN T. G., ENMARK H. T., HANSEN E. G. & PORTER W. M. 1993: «The airborne visible infrared imaging spectrometer AVIRIS». *Remote Sensing of Environment*, 44: 127-144.
- WEISLANDER A. E. & GLEASON C. H. 1954: «Major brushland areas of the coast ranges and Sierra-Cascade foothills of California», USDA For. Ser. PSW For & range Exp. Sta. Misc. Pap. PSW-15, 8p.
- YOOL S. R., ECKHARDT D. W. & COSENTINO M. J. 1985: «Describing the brushfire hazard in southern California», *Anal. Assoc. Am. Geograph.*, 75: 431-442.