

CARTOGRAFIA DE ALUNITA EN LA CALDERA DE LAKE CITY (COLORADO) UTILIZANDO IMAGENES AVIRIS Y TM

S. E. Martínez Alonso

University of Colorado at Boulder. Department of Geological Sciences y Center for the Study of Earth from Space-Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CSES-CIRES). Campus Box 216. Boulder, CO 80309-0216 (USA). Tlf. (303) 492 5051. Fax (303) 492 5070. martin@ucsu.colorado.edu.

RESUMEN.- Los objetivos de este trabajo son cartografiar el depósito de alunita existente en la caldera de Lake City (Colorado) utilizando imágenes AVIRIS y TM y comparar la capacidad de ambos sensores en la identificación de minerales. La alunita es un mineral de especial interés en prospección minera por ir asociada a depósitos epitermales, susceptibles de contener altas leyes de Au y Ag. El resultado de este estudio se ha comparado con una cartografía preexistente elaborada a partir de imágenes Landsat MSS y datos de campo y laboratorio (medidas de reflectancia espectral y análisis geoquímicos de elementos traza) (Lee, 1986). Los resultados obtenidos en el presente estudio mejoran la cartografía del área estudiada, ya que se han delimitado zonas de distinta mineralogía dentro del área de alteración.

ABSTRACT.- The goals of this study are mapping the alunite deposit located at Lake City Caldera (Colorado) using AVIRIS and TM imagery as far as studying the capabilities of both sensors as mineral identifiers. Alunite is an alteration mineral linked to epithermal deposits which may present high Au and Ag contents. The results attained have been compared to the cartography produced by Lee in 1986, using Landsat MSS images, field and laboratory data (spectral reflectance measurements and trace-elements geochemical analysis). The results obtained in the present study improve the cartography of this deposit as differentiation of mineral species in the alteration area was achieved.

1.- INTRODUCCION

La caldera de Lake City es una de las 15 calderas cartografiadas en las Montañas de San Juan, al suroeste de Colorado (Steven y Lipman, 76). Estas calderas corresponden a erupciones de carácter explosivo que se iniciaron hace 28 millones de años. Todos y cada uno de los distritos mineros de las Montañas de San Juan están directamente relacionados con calderas.

En el margen oriental de la caldera de Lake City (Red Mountain) existe uno de los mayores depósitos de alunita de los Estados Unidos (Bove, 1988). Red Mountain corresponde a un evento volcánico tardío en la región y consiste en un domo y colada de cuarzo-latita porfirítica con fenocristales de plagioclasa, sanidina, biotita y augita. El núcleo del domo se encuentra alterado a cuarzo y alunita (Steven y Lipman, 76).

La alunita $[KAl_3(SO_4)(OH)_6]$ es un mineral de alteración que aparece en rocas feldespáticas alteradas asociadas a depósitos epitermales. Estos depósitos son producidos por actividad hidrotermal (relacionada con volcanismo) a poca profundidad y baja temperatura. Las rocas encajantes en las proximidades de las venas epitermales se encuentran por lo común fuertemente alteradas: elevada porosidad y permeabilidad permiten que los fluidos circulen a través de la roca encajante a grandes distancias y diferencias entre la temperatura del

encajante y las soluciones hidrotermales favorecen reacciones que pueden conllevar la deposición de minerales de interés económico (con altas leyes de Au y Ag).

2.- CARACTERISTICAS DEL ESPECTRO DE ABSORCION DE LA ALUNITA

La teoría cuántica afirma que la energía emitida o absorbida por un cuerpo se transmite en "paquetes" cuya energía viene dada por la expresión $E = h/\lambda$, donde h es la constante de Planck y λ la longitud de onda. Esto es importante en teledetección porque el valor y distribución de esos "paquetes" de energía son característicos para cada sustancia. Si hay transición a un nivel de energía mayor, se produce absorción de energía a una longitud de onda dada. La gran mayoría de los minerales de alteración de interés en prospección minera tienen rasgos de absorción característicos entre 1.6 y 2.5 μm . En particular la región entre 2.0 y 2.5 μm contiene los rasgos de absorción característicos de minerales que contienen $(\text{OH})^-$ y $(\text{CO}_3)^{2+}$, como la alunita y minerales arcillosos.

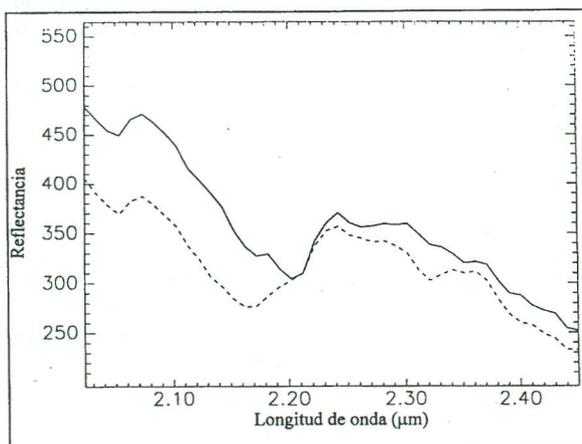


Figura 1.- Espectros de absorción de alunita (línea discontinua) y kaolinita (línea continua) obtenidos de la imagen AVIRIS analizada en este estudio.

3.- ANALISIS DE LAS IMAGENES AVIRIS Y TM

El sensor AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Image Spectrometer) cubre el rango de longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 2.5 μm , con un intervalo de muestreo de 0.01 μm , ancho de canal de 0.01 μm y 224 bandas espectrales. Trabajos previos (Goetz et al., 85; Clark et al., 93) muestran que el uso conjunto de imágenes hiperespectrales y bibliotecas de espectros electromagnéticos permiten la identificación de minerales característicos de alteración hidrotermal.

Una imagen TM (Landsat Thematic Mapper) ha sido así mismo utilizada a fin de evaluar su utilidad para discriminar el depósito de alunita de Red Mountain. Dicha imagen cuenta con 7 bandas espectrales localizadas en longitudes de onda visibles e infrarrojas (cercano, medio y lejano). El ancho de canal varía entre 0.07 μm (TM3) y 2.1 μm (TM6). Su resolución espectral es por lo tanto menor que la de AVIRIS.

Ambas imágenes han sido rectificadas geométricamente utilizando la red UTM como

referencia y la imagen TM ha sido remuestreada a fin de conservar la resolución espacial de AVIRIS (pixel de 16.5 x 16.5 m). Los valores digitales de gris originales han sido convertidos a reflectancias utilizando en el caso de AVIRIS un modelo de transferencia atmosférica que asume superficies horizontales y reflectancia lambertiana (Gao et al., 92). Para la calibración de la imagen TM, los coeficientes lineales proporcionados por EOSAT han sido utilizados. A fin de optimizar el procesado de la imagen AVIRIS, únicamente las bandas de longitudes de onda comprendidas entre 2.0 y 2.5 μm fueron utilizadas (44 bandas). El análisis de las imágenes AVIRIS y TM ha consistido en la aplicación de clasificación supervisada utilizando el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper, Boardman et al., 92) y técnicas de desmezcla espectral (Boardman, 93). A continuación se describen estas dos técnicas.

3.1.- Spectral Angle Mapper (SAM)

Este algoritmo de clasificación determina la similaridad entre dos espectros calculando el ángulo entre ellos. Los espectros (previamente reducidos a reflectancia aparente) son tratados como vectores en un espacio de n dimensiones, siendo n el número de bandas.

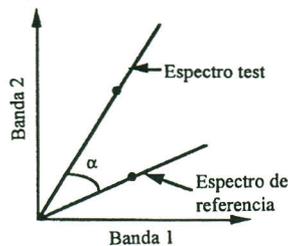


Figura 2.- Espectros de referencia y test para una imagen de dos bandas. Las diferencias de iluminación en un material son representadas por un vector que une el origen (sombra) y el punto que representa el espectro real.

Consideremos el caso más simple, en el que contamos con dos bandas (ver figura 2). Las líneas que unen cada punto del espectro y el origen contienen todas las posibles posiciones para ese material correspondiendo a todas las posibles iluminaciones del mismo: la distancia al origen aumenta con la iluminación del píxel. Pero el ángulo entre vectores es el mismo, sea cual sea su longitud (Kruse et al., 93).

El espectro de referencia puede proceder de una biblioteca espectral, de datos de espectrometría de campo o de áreas de entrenamiento seleccionadas en la imagen a clasificar. Espectros obtenidos en el laboratorio pueden ser comparados directamente a datos de teledetección, evitando los problemas relacionados con efectos de iluminación.

3.2.- Desmezcla espectral

Puesto que un píxel comprende por lo común diversas cubiertas, su reflectancia es el resultado de la interacción de la reflectancia de todas y cada una de las cubiertas representadas por dicho píxel (mezcla espectral). En un modelo de mezcla lineal la

reflectancia final del píxel es una combinación lineal de las reflectancias de sus componentes. Si suponemos que las cubiertas representadas por un píxel se hallan íntimamente mezcladas (como lo están las casillas blancas y negras en un tablero de ajedrez), el modelo de mezcla es no lineal: las reflectancias de las diferentes cubiertas comprendidas en el píxel interactúan produciendo efectos multiplicativos en cascada. Las interrelaciones entre fluidos son buenos ejemplos de mezcla no lineal. Estudios previos (Boardman, 93) demuestran la validez del modelo de mezcla lineal para cubiertas sólidas.

Utilizando un modelo de mezcla lineal y un conjunto de componentes puros (*endmembers*) hipotéticos, las técnicas de desmezcla espectral permiten estimar la abundancia relativa de las cubiertas en un píxel. La determinación de los componentes puros presentes en una imagen se puede llevar a cabo bien a través del conocimiento previo del terreno o bien a partir de la información contenida en la propia imagen. Boardman (1993) propone un método para la determinación automática de componentes puros, utilizando conceptos de geometría convexa. Un conjunto convexo en n dimensiones es un grupo de puntos que son combinación lineal de ciertos puntos. Los coeficientes de la combinación lineal son siempre positivos y su suma es la unidad. Esta es también la definición del modelo de mezcla espectral lineal. Este método determina en primer lugar la dimensionalidad de la imagen: en una imagen n -dimensional existen $n+1$ componentes puros. Uno de ellos es siempre el componente sombra. Aunque las imágenes AVIRIS cuentan con 224 bandas, su dimensionalidad suele ser mucho menor (de 3 a 10), debido a la alta correlación entre las bandas. Para determinar su dimensionalidad se utiliza análisis de Componentes Principales. Por lo común un número bajo de componentes explica la práctica totalidad de la señal, y el resto refleja ruido en la imagen.

En la figura 3 se muestran las Componentes Principales 1 y 4 obtenidas de la subimagen AVIRIS analizada (bandas entre 2.0 y 2.5 μm). Los vértices de la figura resultante corresponden a componentes puros presentes en la imagen que han sido identificados como sombra, nieve, alunita y kaolinita.

Una vez determinadas la dimensionalidad de la imagen e identificados los componentes puros, los datos son desmezclados por conversión a coordenadas baricéntricas y los espectros de los componentes puros son proyectados de nuevo al espacio original de n -bandas para derivar el espectro con toda su resolución espectral.

4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir del estudio de la imagen TM y utilizando el algoritmo SAM se ha conseguido delimitar el área de alteración si bien la identificación de especies minerales no ha sido posible. La técnica de desmezcla espectral en este caso no ha sido capaz de detectar la zona de alteración. La razón es que la mayor parte de la varianza en la escena representa diferencias entre nieve, agua y sombra. La varianza correspondiente al depósito de alteración es muy pequeña y en consecuencia queda enmascarada por los otros componentes puros.

A partir de la observación de diversas composiciones en color TM tres tipos de suelos fueron detectados en el depósito. La clase representada en rojo (ver figura 4) aparece únicamente en la zona de alteración, y atendiendo a los resultados proporcionados por la imagen AVIRIS puede concluirse que se trata de una zona rica en alunita y kaolinita. Las otras dos clases son más ubícuas, incluyendo zonas fuera de la caldera que no corresponden a áreas de alteración (se puede ver perfectamente delimitado un deslizamiento activo de tierras, "Slumgullion", al este del área de alteración). Para identificar la naturaleza de dichos suelos sería necesarios datos de campo, ya que la imagen AVIRIS disponible solo cubre el área de la caldera.

El análisis de la imagen AVIRIS ha dado como resultado la identificación y cartografía de

las especies minerales (alunita, kaolinita) presentes en el depósito de la caldera de Lake City. Las dos técnicas empleadas (SAM, desmezcla espectral) han dado resultados idénticos. La utilización de imágenes AVIRIS ha permitido la mejora de la cartografía preexistente. Del mismo modo que cada mineral presenta en su espectro electromagnético rasgos de absorción característicos que permiten su identificación, otros tipos de cubierta pueden ser identificados y analizados gracias a espectrómetros aerotransportados, siendo esta técnica de gran valía en numerosas disciplinas (ecología, glaciología, hidrología, ...).

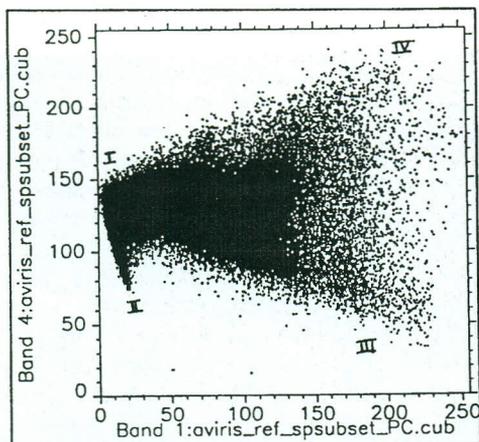


Figura 3.- Diagrama correspondiente a los CP1 y CP4 obtenidos de la imagen AVIRIS. Los vértices de la figura resultante han sido identificados como: sombra (I), nieve (II), alunita (III) y kaolinita (IV).

5.- AGRADECIMIENTOS

La presentación de este trabajo ha sido posible gracias a financiación proporcionada por el Department of Geological Sciences (University of Colorado, Boulder) y el Center for the Study of Earth from Space - Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CSES-CIRES). El Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera (CSIC) ha facilitado el uso de sus instalaciones para la elaboración de este artículo.

6.- REFERENCIAS

- Boardman, J.W., et al. 1992. SIPS (Spectral Image Processing System) User's Guide. CSES-CIRES, University of Colorado at Boulder.
- Boardman, J.W. 1993. Automatic Spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Robert Green ed. NASA-JPL.
- Bove, D.J. 1988. Evolution of the Red Mountain alunite deposit, Lake City Caldera, San Juan Mountains, Colorado. Tesis (M.S.) University of Colorado.
- Clark, R.N. et al. 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geoph. Res.*, **95**:12653-12680.
- Gao, B.C. et al. 1992. Atmosphere removal program (ATREM) User's Guide. CSES-CIRES, University of Colorado at Boulder.
- Goetz, A.F.H. et al. 1985. Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, **228**: 1147-1153.

Kruse, F.A: et al. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS). Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote Sens. of the Environ., 44: 145-163.
Lee, K. 1986. Map showing areas of limonitic hydrothermal alteration in the Lake City caldera area, western San Juan Mountains, Colorado. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
Steven. T.A. y Lipman, P.W. 1976. Calderas of the San Juan Volcanic Field, SW Colorado. USGS Professional Paper 958, 35.

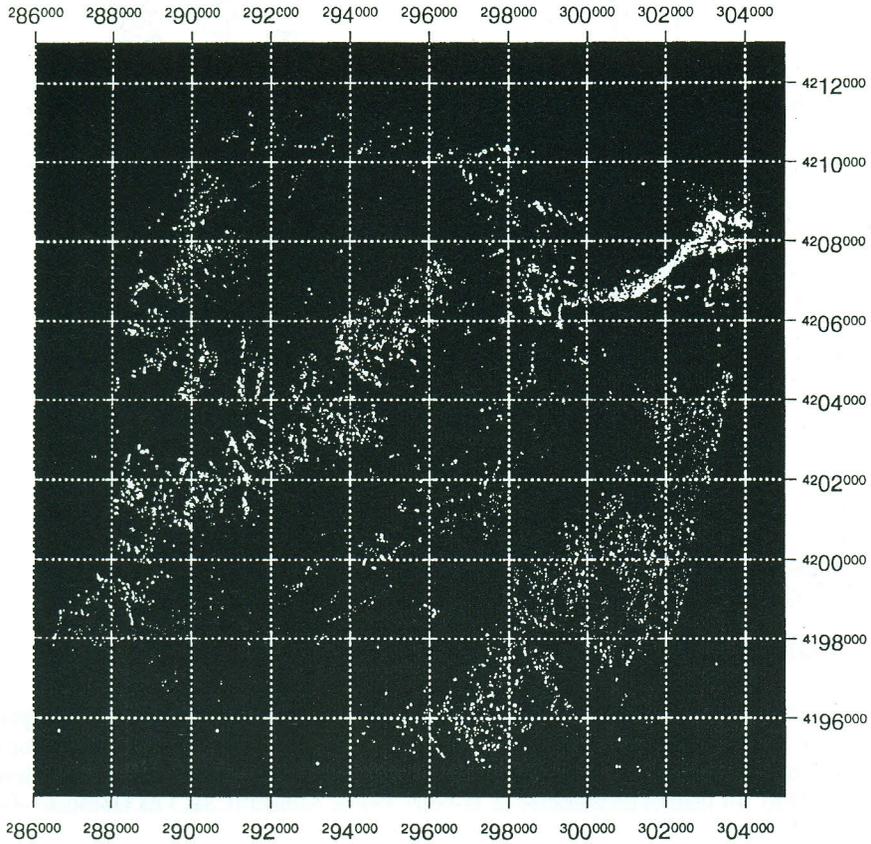


Figura 4.- Resultado de la clasificación de la imagen TM utilizando el algoritmo SAM. Los espectros de referencia proceden de áreas de entrenamiento definidas sobre la misma imagen. Se han diferenciado tres tipos de suelos en la zona de alteración. La clase representada en rojo corresponde a la zona del depósito de alteración rica en alunita y kaolinita (C. 45)

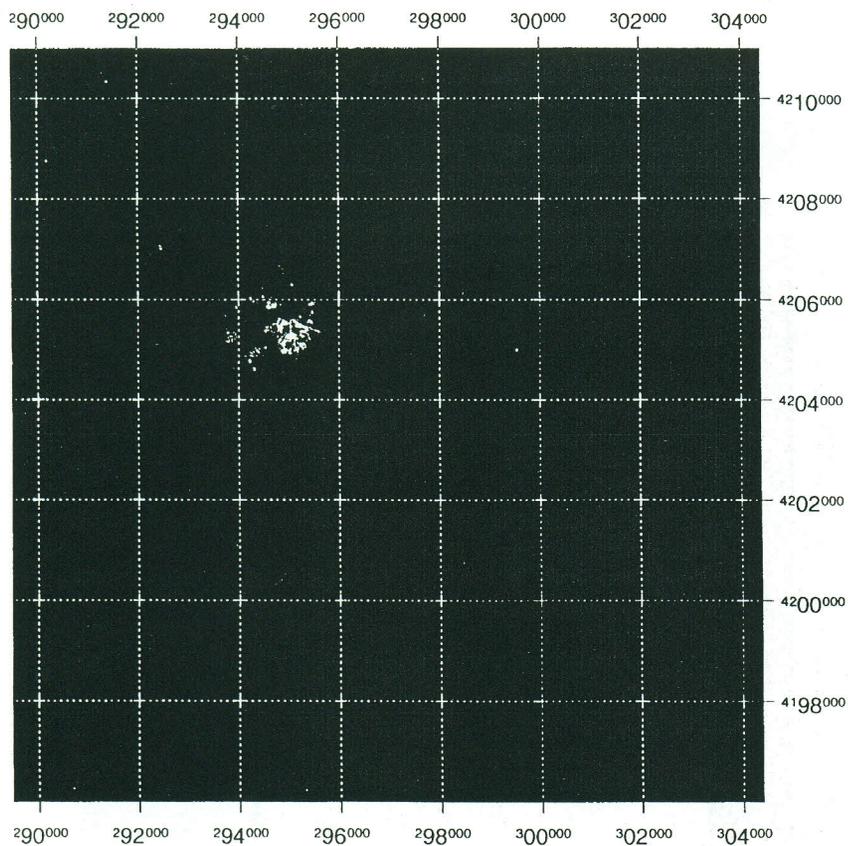


Figura 5.- Cartografía obtenida a partir de la imagen AVIRIS aplicando el algoritmo de clasificación SAM. Los espectros de referencia proceden de una biblioteca espectral. En rojo se ha representado la zona de alunita, en verde kaolinita, en amarillo mezclas de ambos minerales (C. 46)