

IDENTIFICACIÓN ESPECTRAL DE PRODUCTOS DE METEORIZACIÓN DE LADOS DE PIRITA: UNA EVALUACIÓN EN CAMPO Y LABORATORIO

A. Riaza (*), E. García-Meléndez (**), E. Bellido (*) y A. Müller (***)

(* *Instituto Geológico y Minero de España, La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid, Spain). a.riaza@igme.es*

(** *Área de Geodinámica Externa, Fac. de Ciencias Ambientales, Universidad de León, 24071, León.*

(*** *DLR- German Aerospace Research Establishment, Remote Sensing Data Centre, P.O. Box 1116,
D-82234 Wessling, Deutschland.*

RESUMEN

El seguimiento de residuos mineros en yacimientos de sulfuros complejos con datos hiperespectrales contribuye a predecir la calidad del agua de escorrentía estimando cuantitativamente el drenaje ácido de mina y la contaminación por metales, que acompaña al año hidrológico. Las Agencias de Protección Ambiental y los Servicios Geológicos han adoptado el uso de datos hiperespectrales como herramienta de estudio orientada a lodos en labores mineras, por ser espacios completamente inaccesibles a la observación directa. Este trabajo se inspira en una cartografía digital previa de eflorescencias salinas en residuos mineros con datos Hymap, con espectrotecas de series mineralógicas bien conocidas, que sugería cambios mineralógicos ligados a condiciones de humedad y temperatura del período anual inmediatamente precedente. De este modo, los productos de meteorización de sulfuros en residuos mineros cartografiados con datos hiperespectrales, pueden utilizarse como registro a pequeña escala de la variabilidad climática a corto plazo, y puede considerarse una herramienta adecuada como indicador ambiental geológico en zonas semi-áridas.

ABSTRACT

Monitoring of mine waste on sulphide deposits through remote sensing hyperspectral data contributes to predict potential surface water quality estimating quantitatively acid drainage and metal contamination on a yearly basis. Prior to the work described below, a temporal monitoring of salt efflorescence on mine wastes at a mine site in the Iberian Pyrite Belt (Spain) has been mapped with Hymap data. Mineralogical change estimations under the influence of climate variability are made based on pyrite oxidation weathering products. Archive spectral libraries of well-known sequences of minerals tracing sulphide oxidation intensity are used on the spectral analysis. Trends of mineral growth differ spectrally with time according to the geological setting. Subtle mineralogical changes are described using the spectral response and their meaning as indicators of pyrite oxidation intensity on mine waste piles, pyrite mud tailings and river sediments. Therefore, mine waste weathering products of sulphide may be used as small scale targets for a short-term record of climate variability, providing a useful tool to assess environmental geological indicators in semi-arid areas.

Palabras clave: espectroscopia de imágenes, datos hiperespectrales, eflorescencias por oxidación de piritas, meteorización, variabilidad climática.

INTRODUCCIÓN

La espectroscopia de imágenes con espectrotecas de archivo se ha desarrollado como una técnica apropiada para la cartografía en residuos mineros, ya que permite un análisis mineralógico rápido, que ahorra tiempo y costes respecto a la recolección de muestras tradicional y la interpretación espacial de los resultados de análisis químicos o mineralógicos con métodos de interpolación convencionales (Swayze *et al* 2000).

También, permite el diagnóstico mineralógico de costras delgadas efímeras que concentran metales pesados en superficies inaccesibles proporcionando una herramienta

inapreciable para la información y la evaluación ambiental.

La mayor parte del trabajo realizado en cartografía de residuos mineros con datos hiperespectrales se orienta a proporcionar pruebas ambientales para predecir la concentración de contaminación de metales en aguas ácidas, tanto en la escorrentía superficial como en el agua subterránea. (Swayze *et al*, 2000). Una cartografía anterior en la zona de estudio con datos Hymap (Riaza *et al* 2007) sugirió que la distribución de minerales producidos por oxidación de piritas podría ser una expresión de cambios estacionales y anuales de la disponibilidad de humedad y la intensidad de la evaporación.

Los minerales que generan aguas ácidas atrajeron la atención de la comunidad geológica por su gran movilidad ambiental en solución en aguas superficiales y subterráneas. Por ello, se exploró el comportamiento espectral de la pirita (generador de aguas ácidas) y de los sulfatos que produce por oxidación, y sus soluciones, y se establecieron secuencias mineralógicas de precipitación que pudieran identificarse con datos hiperespectrales (Swayze *et al* 2000; Crowley *et al* 2003).

MÉTODOS

Durante el tratamiento de datos Hymap (Riaza *et al* 2007) en la mina de Sotiel (Huelva), se distinguen espectralmente muy pronto las zonas oxidadas y las zonas hidratadas en los lodos piriticos. Se seleccionaron varios afloramientos representativos: el borde accesible de la masa de lodos piriticos, la pared interna de la balsa de lodos, y una barra de gravas en el río Odiel cercana a las escombreras de la mina de Sotiel.

Se tomaron espectros en el campo y en un cuarto oscuro con un espectrómetro ASD Fieldspec3, entre las longitudes de onda de 400 y 2400 nm con una resolución espectral de 1 nm. En el campo, se instaló la fibra óptica en la pistola sujeta a un trípode a una altura a 30 cm del suelo con iluminación solar directa. Como referencia blanca se usó un panel de Spectralon, (PTFE, politetrafluoruro de etileno y halon sinterizado).

El año hidrológico comienza con una lluvia intensa en Octubre, y lluvias menores durante el otoño y la primavera. La estación seca muy calurosa comienza en Mayo y la precipitación es mínima en Agosto.

Por ello, se tomaron espectros en el campo en Junio, y a la vez se recogieron muestras en cajas abiertas que estuvieron al aire durante todo el verano en un espacio abierto expuesto al sol durante el día. En varias fechas a lo largo del verano, se trasladaron las cajas al cuarto oscuro para medir espectros, teniendo en cuenta la continuidad de los periodos sin precipitaciones, y las ocasionales tormentas de verano.

A cada medida se suceden análisis de difracción de rayos X. Para el diagnóstico espectral de minerales se usó una espectroteca con productos de oxidación de piritas de 18 minerales (Crowley *et al* 2003), identificados con varios algoritmos del Analizador Espectral.

IDENTIFICACION MINERALOGICA DE LOS ESPECTROS EN LODOS PIRITICOS: EL CONTROL GEOLOGICO

El Analizador Espectral identifica la mayor parte de los espectros tomados tanto en el campo como en el cuarto oscuro, como schwertmannita principalmente, y goethita o jarosita secundariamente (Figuras 2, 3 y 4). Si se tienen en cuenta los 18 espectros incluidos en la espectroteca de referencia, el espectro de cualquier suelo se asemeja más a los espectros de schwertmannita, jarosita o ferrihidrita. Luego no es de extrañar que aparezcan muy frecuentemente estos minerales en las diagnosis. Los rasgos espectrales definitivos tienen que extraerse una vez que el contexto geológico está suficientemente definido.

Los espectros identificados como jarosita muestran siempre una absorción en 0.439 μm , tanto en los espectros tomados en campo como en el cuarto oscuro (Figura 2). La influencia de la presencia de jarosita también se manifiesta en absorciones en 1.46 μm , 1.84 μm y 2.26 μm .

Los espectros de lodos piriticos presentan con frecuencia absorciones típicas de la presencia de suelos con yeso, y también una reflectancia global alta, que el Analizador Espectral atribuye a copiapita o melanterita (Figura 1). Esta forma típica de los suelos que contienen yeso se ve también en las gravas del río con costras blancas (Figura 3). La pareja de absorciones en 1.490 μm y 1.526 μm en el tramo ascendente entre 1.300 y 1.700 μm , y una absorción profunda en 1.943 μm son típicas de la presencia de yeso en un suelo en medios geológicamente favorables.

Los tres algoritmos usados para la identificación mineralógica con espectrotecas de referencia muestran resultados variables. El Cartógrafo de Ángulos Espectrales es el algoritmo más influyente y domina los resultados finales en las identificaciones mineralógicas. La Codificación Binaria sólo produce resultados en el 10% de los casos. En cambio, la Coincidencia de Rasgos Espectrales no produce resultados en la mayor parte de los casos.

Estas tendencias generales ilustran la necesidad de reunir una espectroteca geológicamente cualificada en el área de estudio. A continuación se muestran algunos ejemplos más representativos de la evolución mineralógica temporal en los ambientes seleccionados.

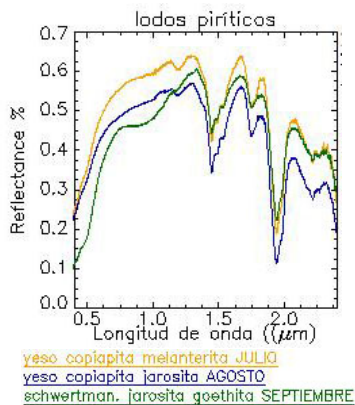


Figura 1.- Espectros medidos en el cuarto oscuro durante el verano en una muestra de costras blancas en lodos piríticos.

La balsa de lodos piríticos

Las costras blancas desarrolladas en lodos muestran una evolución mineralógica desde Junio a Septiembre (Figura 1), en medidas realizadas en el cuarto oscuro, que demuestra una oxidación progresiva y efectos de pérdida de agua molecular. Este efecto se nota sobre todo en las muestras con espuma seca y en las costras con cristales bien desarrollados. El cambio mineralógico es más intenso de Julio a Agosto. Las típicas absorciones asociadas al contenido en yeso entre $1.4\mu\text{m}$ y $1.7\mu\text{m}$ se suavizan progresivamente hasta una curva que se identifica como schwertmanita en Septiembre.

La pared interna de la balsa de lodos piríticos

Los minerales diagnosticados en espectros medidos en el campo en Junio indican un aumento en el progreso de la oxidación desde el borde del agua hacia la parte alta de la pared. En los espectros medidos en el cuarto oscuro se repite la misma tendencia, evolucionando desde copiapita-ferricopiapita a schwertmanita-goethita y ferrihidrita. En los espectros medidos en el cuarto oscuro en la franja al borde del agua, las costras se identifican como jarosita-schwertmanita-goethita en los espectros medidos en el campo (Figura 2). A principio del verano, aparecen las absorciones en $0.436\mu\text{m}$, $1.84\mu\text{m}$ y $2.27\mu\text{m}$ típicas de jarosita. En Agosto y Septiembre, se observa un hombro en $2.21\mu\text{m}$, y se profundiza la absorción en $2.27\mu\text{m}$. Estos cambios menores indican una progresión débil hacia las formas dominantes de schwertmanita-goethita.

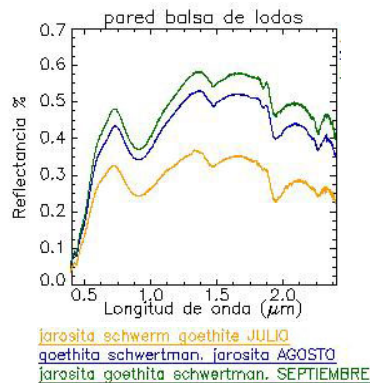


Figura 2.- Espectros medidos en el cuarto oscuro durante el verano en una muestra próxima al borde del agua en la parte interna de la pared de la balsa de lodos piríticos.

El curso del río Odiel: una barra de gravas en el periodo de bajo nivel de agua

Los espectros tomados en los sedimentos fluviales varían mucho, sobre todo por la heterogeneidad en tamaño de grano y forma de los sedimentos sobre los que se desarrollan las costras de minerales precipitados a partir de aguas ácidas. Por ejemplo, los espectros medidos en el campo en las gravas cubiertas de una costra blanca, tienen un diagnóstico de copiapita-ferricopiapita.

En el cuarto oscuro, sin embargo, el diagnóstico mineralógico corresponde a un estado mucho más oxidado de schwertmanita-goethita-jarosita (Figura 3) en Julio y Agosto, que se convierte en schwertmanita-goethita-ferrihidrita en Septiembre. Hay pequeños rasgos típicos del yeso y la copiapita, que no se diagnostican como tales, y que se reconocen en los espectros de Julio y Agosto. El mínimo en $1.44\mu\text{m}$ (jarosita) en Julio se desplaza a $1.41\mu\text{m}$ (yeso) en Agosto (Figura 3). Esta absorción se debilita y se redondea en Septiembre al aumentar la oxidación.

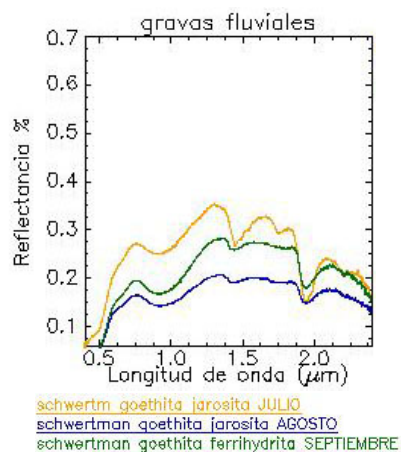


Figura 3.- Espectros medidos en el cuarto oscuro durante el verano en una muestra de gravas con costras blancas en el cauce del río Odiel.

CONCLUSIONES

El seguimiento espectral de estos minerales en el laboratorio indica cambios mineralógicos sutiles, pero significativos, que indican una oxidación creciente.

El Cartógrafo de Ángulos Espectrales es el algoritmo dominante como identificador de minerales en espectros con espectrotecas de referencia. Tanto la Codificación Binaria como la Coincidencia de Rasgos Espectrales son ineficaces en la identificación mineralógica. Para que la diagnosis sea correcta, hay que tener en cuenta la totalidad de la forma de la respuesta espectral.

De modo general, en las fases hidratadas, aparecen copiapita y ferricopiapita en los espectros medidos en el campo, y jarosita cuando se miden en el cuarto oscuro. Al oxidarse, evolucionan a schwertmanita, goethita y ferrihidrita a lo largo del verano.

BIBLIOGRAFIA

Crowley, J.K., Williams, D.E., Hammarstrom, J.M., Piatak, N., Chou, I-M. and Mars, J.C. 2003. Spectral reflectance properties (0.4–2.5 μm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, y Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3- 3: 219-228 (10).

Riaza, A., Ong, C. and Müller, A. 2007. Pyrite mine wastes hyperspectral monitoring as a tool to detect climate change, *Proceedings 10th Intl. Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, ISPMRS07, WG VII/1, March 12-14, 2007, Davos, Switzerland: 228-233.

Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, Ph.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J., and Roth, S. 2000. Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste. *Environmental Science and Technology*, 34: 47-54.

AGRADECIMIENTOS

El Plan Nacional de Investigación (CGL2005-02462, CGL2006-01544/CLI y CGL2007-60004/CLI) ha financiado este trabajo. R. Rodríguez y J. P. Calvo facilitaron la solicitud de fondos dinamizando la organización interna en el Instituto Geológico y Minero de España.