

EL SEGUIMIENTO ESPACIAL HIPERESPECTRAL DE RESIDUOS MINEROS DE PIRITAS, UN REGISTRO GEOLÓGICO DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

A. Riaza^a, C. Ong^b, A. Müller^c, J.M. Moreira^d

^aInstituto Geológico y Minero de España (IGME), Tres Cantos (Madrid), España, Investigador Titular, a.riaza@igme.es

^bCSIRO Exploración y Minería, Kensington, Australia, Investigador en Teledetección, c.ong@csiro.es

^cDLR_Agencia Espacial Alemana, Centro de Datos de Teledetección, Oberpfaffenhofen, Alemania, Jefe del Grupo de Modelado Espectral, Andreas.Mueller@dlr.de

^dJunta de Andalucía, Jefe del Servicio de Información y Evaluación Ambiental, Sevilla, España, jm.moreira.ext@juntadeandalucia.es

Abstract

Monitoring of mine waste on sulphide deposits through hyperspectral remote sensing data contributes to predicting surface water quality quantitatively estimating acid drainage and metal contamination on a yearly basis. The mineralogy of surface crusts loaded with highly soluble salts is a record of available humidity and temperature along the year. A temporal monitoring of salt efflorescence on mine wastes at a mine site in the Iberian Pyrite Belt (Huelva, Spain) has been mapped in this work using hyperspectral airborne Hymap data. Climate variability estimations are made based on oxidation stages derived from well-known sequences of minerals tracing sulphides oxidation intensity, using archive spectral libraries. Therefore, mine waste weathering products of sulphide mapped from airborne hyperspectral remote sensing data can be used as a short-term record of climate change, providing a useful tool for assessing environmental geoindicators in semi-arid areas. Recognized rapidly changing earth systems are coral reefs, periglacial systems or coastal areas.

Keywords: mine waste, remote sensing, imaging spectroscopy, contamination, geoindicators.

JEL Code: Q34, Q53, Q54

Resumen

Las sustancias que se producen por oxidación de piritas en las minas abandonadas de sulfuros generan aguas ácidas y concentran metales pesados en las mismas. La mineralogía de las costras superficiales formadas por sulfatos fácilmente solubles, es función de la temperatura y humedad disponibles durante el año. Estas sustancias pueden cartografiarse desde aviones o satélites usando sensores hiperespectrales. De este modo, puede realizarse un seguimiento desde el espacio de las sustancias producto de meteorización de piritas durante las estaciones del año, que contribuye a predecir la calidad del agua superficial estimando cuantitativamente tanto el drenaje ácido de mina, como la contaminación por metales pesados.

En este trabajo, se ha cartografiado la evolución temporal de eflorescencias salinas en residuos mineros en la mina de Sotiel (Huelva), usando datos aeroportados Hymap en cuatro fechas distintas, a comienzos de la estación seca, y en plena estación seca. A partir de estas cartografías, se realizan estimaciones de variabilidad climática basadas en series minerales conocidas por oxidación de piritas y espectrootecas de referencia. De

este modo, las cartografías de sustancias de meteorización de piritas realizadas con sensores hiperespectrales pueden usarse como un registro de variabilidad climática estacional y anual, constituyendo una herramienta para establecer geoindicadores en zonas semiáridas. Los residuos mineros de sulfuros masivos podrían formar parte de los ambientes geológicos sensibles a cambios climatológicos rápidos, como los arrecifes de coral, las turberas, los sistemas periglaciares o las zonas costeras.

Palabras clave: residuos mineros, teledetección, espectroscopia de imágenes, contaminación, geoindicadores
Código JEL: Q34, Q53, Q54.

1. INTRODUCCION

La espectroscopia de imágenes con espectrotecas de archivo se ha desarrollado como una técnica apropiada para el estudio de residuos mineros que permite un análisis mineralógico rápido, y 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 a la observación directa (Plumlee, 1999) proporcionando una herramienta inapreciable para la información y la evaluación ambiental.

El clima es el factor que controla la precipitación y disolución de sales de piritas y otros sulfuros metálicos en los residuos mineros (Seal y Hammarstrom, 2003). 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, 2000; Zabcic et al, 2005). 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 Ambientalía vol.1(2009-2010) 194-207

disponibilidad de humedad y la intensidad de la evaporación. El trabajo de campo y laboratorio que se describe a continuación pretende añadir observaciones sobre el mismo fenómeno, con un seguimiento espectral de los cambios mineralógicos que experimentan los residuos mineros desde el final de la estación húmeda a lo largo de la estación seca (Olias et al, 2004).

Así, se sugieren variaciones en la identificación espectral de productos de meteorización de lodos piriticos usando espectrotecas relacionadas con el contexto geológico (Clark et al 1993; Crowley et al, 2003). También se esboza la influencia geológica y geomorfológica en las respuestas espectrales de las superficies con productos de oxidación de piritas. Este trabajo se inscribe en un estudio más amplio que pretende desarrollar un sistema de seguimiento orientado a la estimación preventiva de la calidad del agua, que las administraciones puedan operar en el futuro.

2. LOS DATOS HIPERESPECTRALES: UN METODO DE SEGUIMIENTO DE LA METEORIZACION DE PIRITAS EN RESIDUOS MINEROS

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. Se exploró así el comportamiento espectral de la pirita y de los

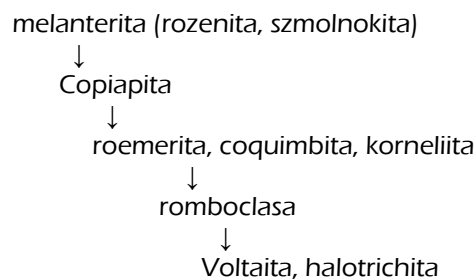
sulfatos que produce por oxidación, y sus soluciones, y se establecieron secuencias de precipitación que pudieran identificarse con datos hiperespectrales (Swayze et al, 2000). El desarrollo de espectrotecas en localidades precisas ha favorecido la cartografía casi automática de las sales efímeras relacionadas con las aguas ácidas (Ong et al, 2002; Mars y Crowley, 2003).

Hoy día muchas explotaciones mineras están abandonadas, y expuestas a la influencia exclusiva de los agentes atmosféricos. La pirita, entonces, se oxida a un ritmo que sólo está condicionado por las condiciones atmosféricas. El proceso de oxidación de piritas es un proceso complejo que se acelera cuando los sulfuros se exponen al aire, vertiendo sulfatos al agua y aumentando los niveles de pH (Nordstrom y Alpers, 1999).

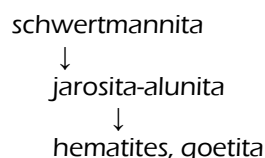
La mineralogía de la sal resultante puede cambiar con la evaporación progresiva del agua ácida (Nordstrom y Alpers, 1999). Las sales se alojan en escombreras, lodos y otros restos mineros. En la Faja Pirítica Ibérica, la meteorización de sulfuros produce sulfato por oxidación de las menas ricas en pirita, que se disuelven y precipitan a continuación en una combinación de reacciones de oxidación, deshidratación y neutralización (Velasco et al, 2005).

Se conoce una secuencia de sulfatos ferruginosos que se forman a partir de una disolución de pirita (Buurman, 1975; Alpers et al, 2003). Los sulfatos ferrosos se forman cerca de la fuente de pirita (melanterita, $Fe^{2+}(SO_4) \cdot 7(H_2O)$, rozenita $Fe^{2+}(SO_4) \cdot 4(H_2O)$, szmolnokita $Fe(SO_4) \cdot H_2O$), mientras que los sulfatos férricos (romboclasa $HFe^{3+}(SO_4)_2 \cdot 4(H_2O)$, voltaita, halotrichita $Fe^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22(H_2O)$) pueden considerarse finales hidrológicos, una vez que el ión ferroso se ha oxidado por completo a férrico.

La secuencia de minerales de oxidación de pirita establecida a partir de experimentos de laboratorio por evaporación de aguas ácidas es la siguiente (en Nordstrom y Alpers, 1999, p.152, que cita a Buurman, 1975; Nordstrom, 1982 y C. Maentz, comunicación escrita, 1995):



Una oxidación más intensa lleva a la formación de schwertmanita ($Fe^{3+}16O_{16}(OH)_{12}(SO_4)_2$) y al grupo de la jarosita-alunita ($(SO_4)_2KFe_3(OH)_6$, $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$). La Mineralogía de las zonas oxidadas en los gossans está dominada por el hematites, (Fe_2O_3) goetita ($FeO(OH)$) y jarosita ($(SO_4)_2KFe_3(OH)_6$)



3. EL CONTROL CLIMATICO

La temperatura y la humedad controlan la evaporación. En regiones con un clima semi-árido en el que el nivel piezométrico es bajo y hay dos estaciones anuales húmeda y seca, el crecimiento de sulfatos alcanza el máximo al final de la estación seca. Entonces, la mineralogía de los precipitados es un registro de la humedad y la temperatura disponibles durante el año (Seal y Hammarstrom, 2003). Una cartografía anual de la distribución de sulfatos se realiza rutinariamente, es un registro del régimen climático anual. Esta evolución anual de precipitación de sulfatos se conoce ampliamente y se sigue por los analistas de calidad del agua locales (Olias et al, 2004).

4. METODOS

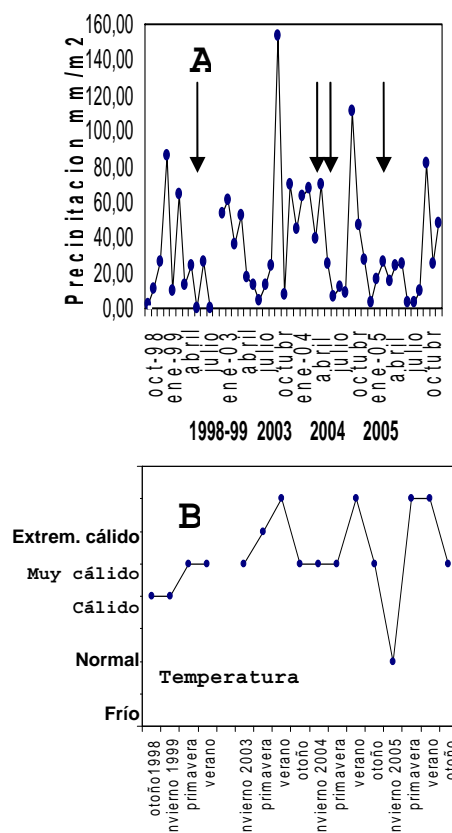
4.1. Datos

Se tomaron datos con el sensor hiperespectral Hymap el 6 de Mayo de 1999, el 19 de Mayo de 1999, el 14 de Agosto de 2004 y el 17 de Junio de 2005 sobre la mina de Sotiel en la Faja Pirítica Ibérica (Huelva). El sensor Hymap cuenta con 125 canales entre 0.4572 μm y 2.4904 μm con una resolución espectral de 0.0150 μm . En el mismo intervalo de longitudes de onda, el sensor Thematic Mapper que vuela en la serie de satélites Landsat sólo cuenta con seis canales y resoluciones espectrales variables de déci mas de μm . La resolución espacial en los vuelos Hymap estudiados varía de 5 m en 1999 a 4 m en 2004 y 2005. Hyvista corrigió defectos de funcionamiento interno del sensor (Cocks et al 1998), y la Agencia Espacial Alemana efectuó correcciones atmosféricas (Richter and Schlöpfer, 2002) y geométricas (Schlöpfer and Richter, 2002).

El año hidrológico en la región comienza con una lluvia intensa en Octubre, y lluvias menores durante el otoño y la primavera (fig.1). La estación seca muy calurosa y seca comienza en Mayo y llega a la precipitación mínima en Agosto (Agencia Estatal de Meteorología, www.aemet.es). Las imágenes Hymap disponibles se tomaron a lo largo de cinco años, dos de ellas en primavera y dos en verano. La distribución espacial de los minerales de oxidación de piritas cartografiada es el reflejo de las condiciones climáticas precedentes.

Durante 2005, 2006 y 2007 se realizaron campañas de campo en las que se tomaron muestras para su estudio en laboratorio con un espectrómetro Perkin Elmer Lambda 950, y se tomaron asimismo espectros en el campo con un

espectrómetro ASD Fieldspec3 en los intervalos de



longitudes de onda 0,4-2,4 μm .

Figura 1. Precipitación y temperatura registradas en la estación meteorológica de Ronda (Cádiz) de la Agencia Estatal de Meteorología durante el periodo de estudio (www.aemet.es). Las flechas indican las fechas en las que se tomaron los datos Hymap.

EC =Extremadamente Cálido: Las temperaturas sobrepasan el valor máximo registrado en el periodo de referencia 1961 – 1990.

MC =Muy cálido: $f < 20\%$. Las temperaturas registradas se encuentran en el intervalo correspondiente al 20% de los años más cálidos.

C =Cálido: $20\% \leq f < 40\%$.

N =Normal: $40\% \leq f < 60\%$. Las temperaturas registradas se sitúan alrededor de la mediana.

F =Frio: $60\% \leq f < 80\%$.

MF =Muy Frio: $f \geq 80\%$.

EF =Extremadamente frío: Las temperaturas no alcanzan el valor mínimo registrado en el periodo de referencia 1961 – 1990

Para el diagnóstico espectral de minerales se usó una espectroteca con productos de oxidación de piratas de 18 minerales elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (Clark et al, 1993; Crowley et al, 2003). El software de análisis espectral incluye varios algoritmos del Analizador Espectral (RSI, 2000), para obtener un resultado comparativo de similitud entre ellos. Para la cartografía digital de imágenes hiperespectrales se utilizaron los programas comerciales desarrollados especialmente para estos datos (RSI, 2000).

Las muestras de campo se analizaron en laboratorio por difracción de rayos X y análisis químicos convencionales.

4.2. Tratamiento de imágenes

Las imágenes hiperespectrales ofrecen grandes posibilidades para cartografiar áreas espectralmente complejas en la superficie de la tierra, puesto que son datos multidimensionales, siempre que la relación señal/ruido y la resolución espacial sean adecuadas (Hubbard y Crowley, 2005). El procedimiento que se sigue en este trabajo es una secuencia orientada por el intérprete, de tratamientos convencionales de desmezcla espectral, que llevan a una identificación mineralógica de los píxeles de una imagen basada en rasgos espectrales, que se resumen en un mapa. En cada escena se practican varios pasos de reducción de la información espectral contenida en la imagen, en forma de máscaras sucesivas, y se produce un mapa final de minerales de oxidación de pirita.

Se parte de un falso color con los canales 10 (0,5719 μm), 39 (1,0063 μm) and 125 (2,4702 μm) del sensor Hymap, que permiten una evaluación superficial de la distribución de la

vegetación, zonas urbanas, agua y suelo descubierto (fig.2). La secuencia de tratamientos a partir de las Fracciones de Ruido Mínimo, Índice de Pureza de Píxeles, y Análisis n-dimensional (RSI, 2000) proporciona una espectroteca de uso de suelo inicial con el que se enmascaran vegetación, agua y áreas urbanas por medio del Cartógrafo de Ángulos Espectrales (Kruse et al, 1993), aislando así las zonas sin vegetación para una exploración posterior. Las zonas ocupadas por residuos mineros se identifican fácilmente del resto de las zonas sin vegetación, siguiendo la misma secuencia de tratamiento. En un paso posterior, se distinguen las zonas oxidadas de las hidratadas en las minas abandonadas o activas (Riaza et al, 2007). La cartografía detallada usando la espectroteca de referencia elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (Clark et al, 1993; Crowley et al, 2003) produce los mapas finales en estas áreas preseleccionadas.



Figura 2. Esquema que reproduce la secuencia simplificada de tratamiento de imágenes seguida para elaborar los mapas de sustancias de meteorización de piratas a partir de imágenes Hymap. Esta secuencia puede variar según las líneas de vuelo y subescenas a cartografiar. Los algoritmos desarrollados para el tratamiento de imágenes hiperespectrales se recopilan en RSI (2000).

5. CARTOGRAFIA DE MINERALES PRODUCTO DE OXIDACION DE PIRITAS: UN REGISTRO DE VARIABILIDAD CLIMATICA

Las distribuciones espaciales de minerales de oxidación de piratas que muestran las imágenes Hymap son diversas según el entorno geomofológico en la mina abandonada estudiada. A ello hay que añadir que el periodo de tiempo entre vuelos es diverso, y la interpretación sobre la evolución temporal de las fases mineralógicas está condicionada a los datos existentes. Para la realización de estas cartografías se han utilizado espectros de campo y laboratorio cuyo análisis es objeto de otro estudio (Riaza et al, 2009). En la mina de Sotiel-Almagrera, las labores mineras se distribuyen en la orilla del rio Odiel, donde aparecen la mayor parte de las escombreras. Desde allí, una cinta transportadora lleva el mineral a la planta de tratamiento de menas. Los residuos se almacenan en una balsa de cenizas cercana a la planta, y los lodos se desvían posteriormente a una balsa de lodos que drena al rio Odiel.

5.1. Las balsas de cenizas y lodos y los alrededores de la planta de tratamiento de menas.

En Mayo de 1999, la planta de tratamiento de menas estaba aún en funcionamiento. Por ello la interpretación de la evolución temporal de los productos de oxidación en sus alrededores tiene que adaptarse a cambios provocados por la actividad industrial. La superficie de la balsa de cenizas está dominada por alunita y halotrichite en Mayo de 1999 (fig.3A, línea añil). En cambio, la balsa de lodos piriticos meridional muestra jarosita, halotrichita e incluso hematites (fig.4A), minerales más oxidados comparativamente. La balsa de cenizas no tiene agua en Mayo de 1999 (fig.3A, línea añil), mientras que sí hay agua en 2004 y 2005 (fig.3B,

3C y 3D, líneas añil). Se supone que no hubo aporte de agua a la balsa de cenizas septentrional en el invierno anterior de 1998-99.

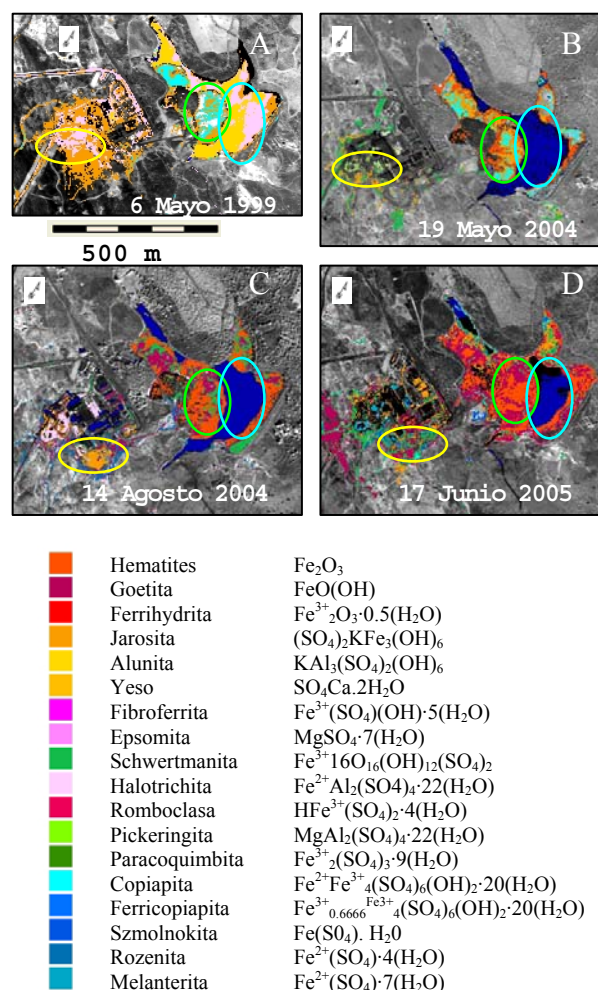


Figura 3. Planta de tratamiento de menas y balsa de cenizas septentrional: A, B, C y D: Mapas de minerales de productos de meteorización de piratas elaborados con datos hiperespectrales Hymap en los cuatro vuelos disponibles. Los colores rojizos indican oxidación intensa. Los colores azulados y verdosos indican zonas hidratadas. El agua se cartografía en azul marino (no incluido en la leyenda de colores correspondientes a minerales) a partir de máscaras extraídas digitalmente.

Por el contrario, las escombreras que rodean la balsa septentrional de cenizas, muestran extensas áreas cubiertas por copiapita, un mineral temprano en la secuencia de oxidación de piratas en 1999 (3A, línea verde). El invierno seco y cálido

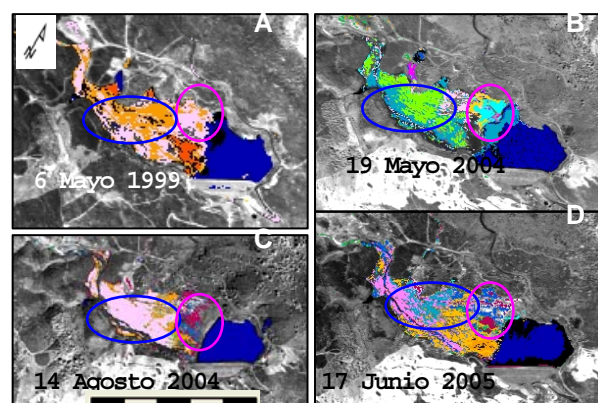
de 1998-99 anterior sugiere que hubo una evapotranspiración reducida.

El invierno de 2003 a 2004 fue muy húmedo (fig.1). Por ello, se despliega ampliamente melanterita en Mayo de 2004, que es el primer sulfato a formarse en la secuencia de oxidación de piratas, que cubre zonas de la balsa de lodos meridional y los alrededores de la planta de tratamiento de menas (fig.4B, línea azul). Los lodos están intensamente hidratados en Mayo de 2004 (fig.4B) y el agua llena la balsa septentrional. Los espectros tomados en las escombreras que rodean la balsa de cenizas destacan un borde de hematites, con copiapita y alunita en las pendientes y los regueros (fig.3B, línea verde). Las escombreras que rodean la planta de tratamiento de menas muestran un estado menos oxidado en Mayo de 2004 (fig.3B, línea amarillo) que en Mayo de 1999 (fig.3A, línea amarillo).

Se da una tendencia inversa de oxidación entre la balsa de lodos y las escombreras alrededor de la balsa de cenizas septentrional. Los procesos de oxidación en una escombrera estable son distintos que en una masa de lodos. La lluvia y la humedad permanecen más fácilmente en la superficie plana y uniforme de la masa de lodos, que disuelven las sales preexistentes en la superficie, y precipitan inmediatamente como fases mineralógicas nuevas (Plumlee, 1999). Sin embargo, una escombrera es un cuerpo heterogéneo con una superficie externa permeable que no retiene fácilmente el agua de lluvia. Por ello reacciona de distinta manera a un incremento de humedad ambiental.

En Agosto de 2004, después de un periodo extremadamente seco y cálido (fig.1), que provoca una evapotranspiración intensa, la planta de tratamiento de menas y las dos balsas de residuos muestran una oxidación mayor (fig.3C, fig.4C). Hematites y goetita dominan las

escombreras de la balsa de cenizas septentrional (fig.3C, línea verde). Alrededor de la planta de tratamiento aparecen romboclasa, yeso y rozenita (fig.3C, línea amarillo). La melanterita y pickeringita que aparecen en la balsa de lodos meridional en Mayo de 2004 (fig.4B, línea azul), se oxidan completamente a halotrichita, alunita, yeso y goetita en Agosto de 2004 (fig.4C, línea azul).



500 m

<ul style="list-style-type: none"> ■ Hematites ■ Goetita ■ Ferrihidrita ■ Jarosita ■ Alunita ■ Yeso ■ Fibroferrita ■ Epsomita ■ Schwertmanita ■ Halotrichita ■ Romboclasa ■ Pickeringita ■ Paracoquimbita ■ Copiapita ■ Ferricopiapita ■ Szmolnokita ■ Rozenita ■ Melanterita 	<ul style="list-style-type: none"> Fe_2O_3 $\text{FeO}(\text{OH})$ $\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ $(\text{SO}_4)_2\text{KFe}_3(\text{OH})_6$ $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}^{3+}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_2$ $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22(\text{H}_2\text{O})$ $\text{HFe}^{3+}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ $\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}^{3+}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}^{3+}_{0.666}\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}^{2+}(\text{SO}_4) \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Fe}^{2+}(\text{SO}_4) \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$
---	--

Figura 4. Balsa de lodos meridional: A, B, C y D:

Mapas de minerals de productos de meteorización de piratas elaborados con datos hiperespectrales Hymap en los cuatro vuelos disponibles. Los colores azulados y verdosos indican zonas hidratadas. Los colores naranja y rojo oscuro corresponden a zonas oxidadas. El agua ácida retenida detrás de la pared de la balsa se cartografía en azul marino.

El invierno de 2004-2005 fue extremadamente seco y cálido (fig.1). La extensión de agua se reduce en las dos balsas y el río (fig.3D,

fig.4D, fig.5D, fig.6D). Aumentan hematites y goetita en las escombreras alrededor de la balsa de cenizas septentrional, y alrededor de la planta de tratamiento de menas (fig.3D, líneas verde y amarillo). La rozenita y halotrichita de 2004 (fig.3C, línea amarillo) se oxida a schwertmanita y jarosita en 2005 (fig.3D, línea amarillo) alrededor de la planta de tratamiento de menas.

La balsa meridional de lodos piríticos en 2005 (fig.4D) muestra un estado comparativamente menos oxidado que el año anterior (fig.4C). El residuo de halotrichita de 2004 (fig.4C, línea azul) en la balsa se sustituye por rozenita-szmolnokita-pickeringita (fig.4D, línea azul), que son minerales que se forman previamente en la secuencia de oxidación de piritas. El área más oxidada detrás de la pared de la balsa también retrocede desde goetita-halotrichita-jarosita en 2004 (fig.4C, línea rosa) a halotrichita-schwertmanita-jarosita en 2005 (fig.4D, línea rosa). La balsa meridional de lodos puede haber recibido vertidos desde la balsa de cenizas septentrional como parte de las actividades de operación de la planta de tratamiento. Por ello la balsa meridional de lodos muestra minerales más hidratados. Esto puede explicar la contradicción entre las evoluciones mineralógicas de ambas balsas en relación con la secuencia mineralógica de minerales de oxidación de piritas.

5.2. Las escombreras a orillas del río Odiel

Las escombreras en las labores mineras que bordean el río Odiel y el cauce del río son entornos que muestran de manera más fiable los efectos de la variabilidad climática en la evolución mineralógica de los productos de oxidación de piritas. En Mayo de 1999, aparecen copiapita, halotrichita y en parte rozenita, restringidos a charcos de agua estancada abandonados en el río

durante la época de estiaje (fig.5A, línea azul). Las pendientes de las escombreras están cubiertas por alunita y jarosita, mientras que hay schwertmanita y pequeñas manchas de hematites en las superficies planas superiores de las escombreras.

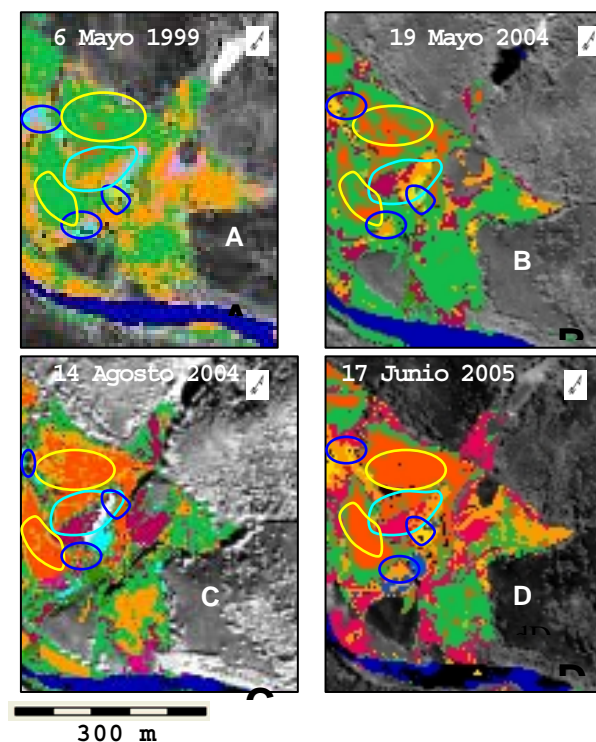


Figura 5. Escombreras en las labores mineras a orillas del río Odiel: A, B, C y D: Mapas de minerales de productos de meteorización de piritas elaborados con datos hiperespectrales Hymap en los cuatro vuelos disponibles. Los colores rojizos indican oxidación intensa. Los colores azulados y verdosos indican zonas hidratadas. El agua se cartografía en azul marino (no incluido en la leyenda de colores correspondientes a minerales) a partir de máscaras extraídas digitalmente. La leyenda de minerales coincide con la figura 3.

Las superficies planas superiores de las escombreras con schwertmanita en 1999 (fig.5A, línea amarilla) se oxidan parcialmente a hematites o jarosita en Mayo de 2004 (fig.5B, línea amarillo). Los charcos con copiapita y halotrichita en 1999 (fig.5A, líneas azules) se oxidan a alunita y jarosita en Mayo de 2004 (fig.5B, líneas azules); la jarosita que se desarrolla en las pendientes de las

escombreras en 1999 (fig.5A, líneas añil) se oxidan a goetita en Mayo de 2004 (fig.5B, línea añil). La tendencia general desde Mayo de 1999 a Mayo de 2004 es de un aumento claro de la oxidación.

El período seco de Mayo 2004 a Agosto de 2004 (fig.1) muestra aumento de las fases deshidratadas y las fases oxidadas. Las superficies planas de los residuos se cubren de hematites y jarosita (fig.5C, línea amarilla), aparece goetita en las pendientes (fig.5C, línea añil), y la distribución espacial de la schwertmanita se reduce de manera general.

En Junio de 2005 se repite la misma tendencia al incremento de la oxidación (fig.5D) en las escombreras a orillas del río Odiel en relación con Agosto de 2004 (fig.5C), después de un año extremadamente seco y cálido (fig.1). Las superficies planas superiores de las escombreras se cubren generalizadamente con costras de hematites (fig.5D, líneas amarillos), mientras que en los taludes aparece goetita, jarosita y alunita (fig.5D, líneas añil), y los charcos pequeños entre las escombreras albergan costras de halotrichita (fig.5D, líneas azules).

5.3. El cauce del río Odiel

Las sales sulfatadas y los productos de oxidación de piratas cubren tanto los fondos, las barras de gravas y arenas fluviales y los taludes en las orillas del río, dependiendo de los niveles de inundación y caudal anteriores, y de la variabilidad climática. En el cauce del río, los productos de oxidación que aparecen sobre los sedimentos o las rocas infrayacentes son independientes de las actividades industriales en las instalaciones mineras. El diagnóstico espectral de las costras que se desarrollan en el cauce fluvial implica cautelas particulares. Las costras de precipitados a partir de aguas ácidas en los sedimentos del río implican efectos de tamaño de grano de los sedimentos y de efectos de sombras

provocados por la microtopografía de las formas fluviales, que están en estudio por los autores en este momento. En principio, las fases mineralógicas más frecuentes son jarosita y schwertmanita. La jarosita tiende a vestir las gravas y arenas de las barras fluviales (fig.6). La schwertmanita se desarrolla en rebordes a lo largo de los taludes laterales con pendiente más abrupta del cauce del río. En charcos aislados aparece melanterita, preferiblemente en épocas de sequía, cuando disminuye el caudal del río. Este diagnóstico tiene que tomarse con precaución, porque las aguas ácidas se diagnostican también como melanterita si no se han excluido previamente de las áreas a cartografiar en el proceso previo de tratamiento digital de imágenes.

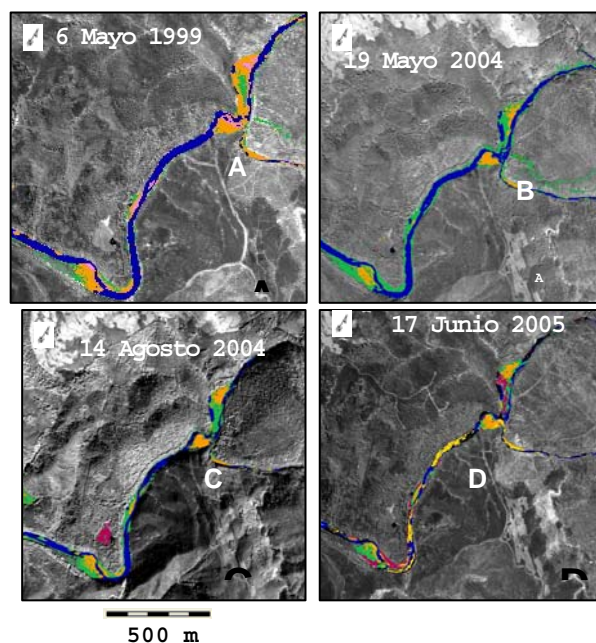


Figura 6. Cauce del río Odiel: A, B, C y D: Mapas de minerales de productos de meteorización de piratas elaborados con datos hiperespectrales Hymap en los cuatro vuelos disponibles. Los colores rojizos indican oxidación intensa. Los colores azulados y verdosos indican zonas hidratadas. El agua se cartografía en azul marino (no incluido en la leyenda de colores correspondientes a minerales) a partir de máscaras extraídas digitalmente. La leyenda de minerales coincide con la figura 3.

La extensión de las costras de jarosita se reduce desde Mayo de 1999 (fig. 5A) a Mayo de 2004 (fig.6B). La húmeda primavera que le precede (fig.1) provoca esta disminución espacial. Las costras de jarosita se expanden durante el verano, y las áreas con goetita apuntan en los taludes en Agosto de 2004 (fig.6C).

El aspecto del río en 2005, después de un año de sequía y temperaturas altas, es muy oxidada (fig.6D). La mayor parte de la schwertmanita se ha oxidado a goetita y alunita. La melanterita y rozenita aparecen ocasionalmente en charcos pequeños de agua estancada en el fondo del río. La jarosita se reduce a las zonas superiores de las barras de gravas y arena. La schwertmanita se aloja preferentemente en los taludes con una pendiente suave, mientras que la goetita cubre superficies con una pendiente más inclinada, en las que el agua se retira en una etapa inicial de la estación seca. En los períodos de sequía, la ausencia de flujo de agua en el cauce del río permite una oxidación más intensa.

6. DISCUSION

Los sulfuros de hierro se meteorizan rápidamente produciendo una secuencia de sales sulfatadas, que a su vez se solubilizan rápidamente. Las minas abandonadas son áreas favorables para la concentración de sulfuros de hierro como fuente de aguas ácidas. La planta de tratamiento de menas en las instalaciones mineras aún funcionaba cuando se tomaron los primeros datos de este estudio. Los residuos se vertían en las balsas, cambiando la composición y la evolución mineralógica de sus superficies y las áreas circundantes, y los residuos previamente almacenados. Incluso después de que cesara la

actividad industrial, las instalaciones están controladas ambientalmente, y una planta depuradora de agua impide la contaminación de las aguas que tributan al río Odiel desde las balsas de residuos. La interpretación que se ofrece en este trabajo de la evolución mineralógica de las costras de minerales producidas por procesos de oxidación de piritas en relación con la variabilidad climática tiene en cuenta las influencias de la actividad industrial reseñada.

Las distribuciones de los minerales de oxidación se muestran claramente en los datos hiperespectrales Hymap usando espectrotecas de referencia. Puede constatarse un estado de incremento de oxidación correlativo con temperaturas en aumento y descensos de la humedad ambiental desde la primavera de 2005 al verano de 2005. También puede identificarse de manera general la secuencia de crecimiento de minerales individuales en superficies geomorfológicamente definidas, y se puede seguir su evolución en el tiempo. La secuencia de crecimiento de minerales de meteorización puede seguirse asimismo en las orillas de ríos por los que fluyen aguas ácidas.

Las tendencias de oxidación reflejadas por los minerales cartografiados son distintas en los restos de lodos y las escombreras. Las partículas finas de los residuos de lodos favorecen la reactividad mineral (Plumlee, 1999). Además, los residuos de lodos con masas viscosas homogéneas que presentan superficies externas suaves que almacenan el agua de lluvia, que disuelve los productos de meteorización externos más rápidamente. Los residuos de lodos están más afectados por cambios producidos por tormentas estivales de corta duración. En cambio, las escombreras son más resistentes a una meteorización rápida, puesto que son partículas gruesas con profusión de huecos. Por ello

responden más lentamente a los cambios de tiempo atmosférico que los lodos, y por lo tanto proporcionan indicadores más fiables de variaciones climáticas estacionales o más prolongadas.

Los mapas que se contruyen con tratamiento digital de imágenes hiperespectrales ilustran la tendencia diversa de meteorización en los lodos y las escombreras. Las escombreras en minas completamente abandonadas, y los sedimentos de los ríos por los que fluyen aguas ácidas pueden testimoniar efectos de variaciones climáticas en periodos de tiempo largos. Para ello, es necesario un seguimiento continuo en fechas estacionalmente controladas del año para observar cambios provocados por condiciones variables de temperatura y humedad. Con este trabajo se inicia la elaboración de parámetros geológicos locales y tratamientos de imágenes orientativos que permitan automatizar en un futuro estas cartografías, y diseñar actuaciones de mitigación de la contaminación previas a las lluvias de otoño, con una predicción adecuada. La rápida puesta en órbita de sensores hiperespectrales en satélite (Hyperion, NASA, ya en órbita desde el año 2000, EnMAP (GFZ, Alemania), previsto para 2012, y desarrollos futuros planeados por la Agencia Espacial Europea en el Programa del Planeta Vivo, proveerán datos que permitan un análisis operativo de estos fenómenos.

Para producir mapas representativos de minerales de meteorización de sulfuros de piritas, hay que aplicar tratamientos digitales de imágenes de manera secuencial para identificar las áreas a cartografiar en las superficies ocupadas por minas abandonadas, tanto en los alrededores de las instalaciones, como en los drenajes de agua cercanos. El proceso de tratamiento de imágenes se practica de manera secuencial en zonas

aisladas digitalmente para desarrollar la cartografía de minerales. Este proceso secuencial se adapta a cada escena y cada fecha estudiada, y puede variar incluso en imágenes de distintas fechas sobre la misma zona geográfica, y sólo así pueden producirse mapas representativos de los productos de oxidación de sulfuros de hierro, en superficies con mezclas espectralmente complejas.

6. CONCLUSIONES

Los residuos de sulfuros de hierro en zonas semiáridas pueden utilizarse como objetivos a escala local que proporcionan información sobre variaciones climáticas a corto plazo. De este modo, pueden considerarse geoindicadores, y un instrumento de seguimiento en el análisis del cambio global.

Los investigadores que trabajan con datos hiperespectrales han distinguido varios grados de oxidación y deshidratación en lodos y escombreras de piritas en minas abandonadas. Los indicadores minerales de estas etapas se han cartografiado usando técnicas de análisis espectral utilizando una espectroteca que incluye datos espectrales de laboratorio y campo tomados en la zona de estudio, además de espectrotecas de referencia desarrolladas por el Servicio Geológico de Estados Unidos.

La secuencia de sales eflorescentes que documentan el proceso de oxidación de piritas se confirma en las zonas más estables frente a la oxidación de las labores mineras. El seguimiento anual de los productos de oxidación al final de la estación húmeda y el momento álgido de la estación seca, pueden utilizarse como un registro climático. Los cambios en regímenes de temperatura, humedad y evaporación pueden deducirse de los mapas de productos de meteorización de residuos.

Los efectos del tamaño de grano de los materiales sobre los que se desarrollan las costras de minerales de meteorización de piritas son críticos para la reactividad mineral. Los residuos de lodos, tanto alrededor de la planta de tratamiento de menas como las balsas, muestran minerales iniciales en la secuencia de oxidación en períodos cortos de tiempo. Sin embargo, las escombreras y las sales que precipitan en el cauce del río a partir de aguas ácidas son más fiables como indicadores de efectos de variaciones climáticas estacionales, independientemente de las fechas en que se producen tormentas ocasionales, o transferencias de agua o residuos a las balsas por actividades de explotación industrial.

El proceso de tratamiento de imágenes tiene que adaptarse a cada escena y área estudiada. No existe una secuencia rutinaria que permita establecer un mapa de minerales de oxidación fiable. La cartografía fiable de minerales es crítica para una interpretación adecuada de tendencias en variabilidad climática, estimaciones de contaminación por metales en las aguas, y la consiguiente predicción de drenaje ácido de minas. Los mapas que se producen en subescenas individuales, aplicando tratamientos de imágenes diversos en cada una de ellas, coinciden en términos generales en los cambios que muestran en las secuencias de oxidación y deshidratación mineralógicas. Previamente a este análisis mineralógico hay que enmascarar las zonas cubiertas por vegetación, u otros usos del suelo que entorpezcan la interpretación, para elaborar mapas fiables de secuencias de minerales de oxidación en piritas.

Los datos hiperespectrales Hymap pueden utilizarse para ilustrar la evolución progresiva de crecimiento mineral en superficies geomorfológicamente identificables en las escombreras de residuos mineros y el cauce del

río. Estas secuencias confirman cambios en temperatura, humedad y precipitación registradas en las estaciones meteorológicas locales. La mayor parte de las áreas cartografiadas en las imágenes se identificaron utilizando una espectroteca de referencia de minerales elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos. Los datos espectrales de campo y laboratorio confirman las tendencias mostradas por las imágenes Hymap. Puesto que las imágenes muestran diferencias que no se explican suficientemente con las referencias espectrales disponibles, hace falta una espectroteca local que permita explicar estas variaciones sutiles, tanto en su mineralogía y sedimentología como geomorfología.

7. AGRADECIMIENTOS

El Plan Nacional de Investigación (CGL2005-02462, CGL2006-01544/CLI y CGL2007-60004/CLI) ha financiado este trabajo. Los comentarios de J.M. Nieto y R. Sáez en mineralogía y calidad de agua han clarificado muchas de las observaciones. J.M. Moreira y A. Gil proporcionaron información sobre inventarios de indicios mineros y bases de datos ambientales regionales. La Agencia Estatal de Meteorología proporcionó información sobre datos climáticos. La Junta de Andalucía facilitó el acceso a las minas abandonadas de Sotiel bajo su tutela. J.P. Calvo y R. Rodríguez hicieron posible la solicitud de fondos al Plan Nacional de Investigación dinamizando la organización interna en el Instituto Geológico y Minero de España.

BIBLIOGRAFIA

Agencia Estatal de Meteorología, Spain, (2005) *Resumen Anual Climatológico de los años 2003, 2004 y 2005* (Annual Climate Summary of the years 2003, 2004 and 2005)

<http://www.aemet.es>. Madrid.

Alpers C.N., Nordstrom D.K., Spitzley, J. (2003), *Extreme acid mine drainage from a pyritic massive sulfide deposit: the Iron Mountain endmember*. En: Jambor JL, Blowes DW, Ritchie, AIM. (eds) *Environmental Aspects of Mine-Wastes*. Mineralogical Association of Canada: 407-430. Mineralogical Association of Canada. Ottawa (Canada).

Buurman, P. (1975) *In vitro weathering products of pyrite*. En: *Geologie Mijnbouw* 54: 101-105. Springer (Países Bajos)

Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A., King T.V.V., Calvin W.M. (1993) *The U.S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 μm* . U.S. Geological Survey Open File Report 93-5 92. Publicaciones U.S. Geological Survey, Reston (VA, EEUU).

Cocks T., Janssen R., Stewart A., Wilson I., Shields T. (1998) *The HyMapTM Airborne Hyperspectral Sensor: The system, calibration and performance*. En: *Proceedings 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zürich, October 1998, 37-44. Publicaciones EARSEL, Paris (Francia).

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

Hubbard B.E., Crowley J.K. (2005), *Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery, Data*

dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment* 99:173-186. Elsevier. Amsterdam (Países Bajos).

Kramer H.J. (2002) *Observation of the Earth and its Environment*. Springer. Heidelberg (Republca Federal de Alemania).

Kruse F.A., Lebkeoff A.B., Boardman J.B., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J., Goetz, A.F.H. (1993) *The Spectral Imaging Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data*. *Remote Sensing of Environment* 44:145-163. Elsevier. Amsterdam

Mars J.C., Crowley J.K. (2003) *Mapping mine wastes and analyzing areas affected by selenium-rich water runoff in southeast Idaho using AVIRIS imagery and digital elevation data*. *Remote Sensing of Environment* 84-3:422-436. Elsevier. Amsterdam (Países Bajos).

Nordstrom, D.K., 1982, *Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals*; in Kittrick, J.A., Fanning, D.S. and Hossner, L.R., (eds.) *Acid Sulfate Weathering: Soil Science Society of America Soc. Pub. Nr.10*, 37-56. Publicaciones Universidad Stanford (Ca, EEUU)

Nordstrom D.K., Alpers C.N. (1999) *Geochemistry of acid mine waters*. In: Plumlee GS, Logsdon MJ (eds) *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Part A: Processes, Techniques, and Health Issues*. *Reviews in Economic Geology*, 6A: 133-160. Publications Society of Economic Geologists. Littleton (Co, EEUU).

Ong C., Cudahy T. (2002) *Deriving Quantitative Monitoring Data Related to Acid Drainage Using Multi-temporal Hyperspectral Data*. Paper

presented at the AVIRIS Workshop 2002. JPL Publications. Pasadena (Ca, EEUU).

Olías M., Nieto J.M., Sarmiento A.M., Cerón J.C., Cánovas C.R. (2004) *Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain)*. Science of The Total Environment 333, 1-3:267-281. Elsevier. Amsterdam (Países Bajos).

Plumlee G.S. (1999) *The environmental geology of mineral deposits*. Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. Reviews in Economic Geology 6A: 71-116. Publications Society of Economic Geologists. Littleton (Co, EEUU).

Riaza A., Ong C., Müller A. (2007) *Pyrite mine wastes hyperspectral monitoring as a tool to detect Climate Change*, Paper presented at the 10th Intl. Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, ISPMRS07, WG VII/1, March 12-14, 2007, Davos, Switzerland. 228-233. Publicaciones Universidad de Wageningen. Wageningen (Países Bajos)

Riaza, A., García-Meléndez, E., Müller, A., 2009, *Spectral identification of pyrite mud weathering products: a field and laboratory evaluation*, International Journal of Remote Sensing, in press. Taylor and Francis. Londres (Reino Unido).

Richter, R., Schläpfer, D. (2002) *Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction*. International Journal of Remote Sensing 23:2631-2649. Taylor and Francis. Londres (Reino Unido).

RSI, (2000), ENVI User 's Guide. Research Systems Inc. Publications RSI, Boulder (Co, EEUU).

Schläpfer D., Richter R. (2002) *Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1: parametric orthorectification*. International Journal of Remote Sensing 23: 2609-2630. Taylor and Francis. Londres (Reino Unido).

Seal II R.R., Hammarstrom J.M. (2003) *Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits*. In: Jambor J.L., Blowes D.W., Ritchie A.I.M. (2003), Environmental Aspects of Mine-Wastes. Mineralogical Association of Canada: 11-51. Ottawa (Canada).

Swayze GA, Smith KS, Clark RN, Sutley SJ, Pearson RM, Vance JS, Hageman Ph.L., Briggs P.H., Meier A.L., Singleton M.J., Roth S. (2000) *Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste*. Environmental Science and Technology 34:47-54. Publications American Chemical Society. Washington DC (EEUU).

Velasco F., Alvaro A., Suarez A., Herrero J., Yusta I. (2005), *Mapping Fe-bearing sulphate minerals with short wave infrared (SWIR) spectral analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain)*. Journal of Geochemical Exploration 87: 45-72. Elsevier. Amsterdam (Países Bajos).

Zabcic N., Ong C., Müller A., Rivard B. (2005), *Mapping pH from airborne hyperspectral data at the Sotiel-Migollas mine; Calanas, Spain*. Paper presented at the 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Warsaw (Poland) 27-29 April 2005, 467-472. Publicaciones Universidad de Varsovia. Varsovia (Polonia).