

Cartografía del vertido de lodos de la mina de Aznalcóllar mediante imágenes Daedalus ATM

C. Antón-Pacheco*, J.C. Gumiel*, E. de Miguel**, E. López*, J. A. Gómez**, M. Giménez**, J.G. Rejas**, O. Gutiérrez**, D. Baretino* y G. Ortiz*

c.pacheco@itge.mma.es

* *Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas 23. 20003 Madrid.*

** *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Crtra de Ajalvil; k.4. 28850 Torrejón de Ardoz. (Madrid).*

RESUMEN

A raíz del accidente de la mina de Aznalcóllar, se han realizado varias campañas de vuelos multiespectrales Daedalus-1268 sobre las áreas afectadas. El objeto de estos vuelos ha sido tanto el control y seguimiento de los trabajos de limpieza de los lodos vertidos en el cauce del río Guadiamar, como la detección de la contaminación remanente una vez finalizadas estas tareas. Se han efectuado correcciones geométricas a partir de fotografía aérea ortorectificada y correcciones radiométricas aplicando distintos modelos basados en transferencia radiativa y en medidas in situ de radiometría. Los análisis químicos, mineralógicos y de reflectividad de muestras de lodos y alteraciones han permitido interpretar el comportamiento espectral de estos materiales y los datos multiespectrales. Los mapas generados a partir de la clasificación digital de las imágenes han permitido controlar la progresión de la limpieza de los lodos y la localización precisa de las costras de sales.

PALABRAS CLAVE: Imágenes Daedalus ATM, lodos piríticos, eflorescencias, suelos, Aznalcóllar, Guadiamar.

ABSTRACT

The failure of the Aznalcóllar mine's impoundment, holding several million tons of pyrite, flotation tailings and acid water produced a flood along the Agrio river, a tributary of the Guadiamar which drains Doñana National Park. The fine-grained sulfide deposit covered 2600 ha of riverbanks and adjacent farmlands, extending to the upper Entremuros area, 40 km downstream from the mine. Removal of the pyritic sludge has been carried out by mechanical methods. Several airborne Daedalus-1268 surveys were performed over the affected area. Geometric and radiometric corrections were applied. Chemical, mineralogical and spectral reflectance analysis on sludge and efflorescence samples have permitted to interpret multispectral data. Digital classification maps have allowed to monitor the progression of the pyritic sludge removal as well as the precise location of the highly soluble efflorescence salts.

KEY WORDS: Daedalus ATM images, pyritic sludge, efflorescences, soils, Aznalcóllar, Guadiamar.

INTRODUCCIÓN

La rotura del dique de la balsa de estériles de la mina de Aznalcóllar, en abril de 1998, originó una enorme riada de lodos piríticos y agua ácida en el cauce del río Agrio, tributario del río Guadiamar, que drena al Parque Nacional de Doñana y vierte en el Guadalquivir cerca de su desembocadura. La construcción de varios diques de contención en la zona conocida como Entremuros evitó la entrada del agua contaminada en el perímetro del Parque Nacional (Figura 1). Sin embargo, el depósito de lodos cargados de metales pesados arrastrados por la riada anegó una franja de hasta 600 metros de ancho y más de 40 km de longitud, cubriendo una superficie de 2616 ha, en su mayor parte vegetación de ribera y campos agrícolas. Las labores de retirada de los lodos por métodos mecánicos, y el tratamiento del agua embalsada en Entremuros por métodos químicos se realizaron a lo largo de 1998.

A instancias de la Secretaria de Estado de Aguas y Costas del Ministerio de Medio Ambiente, el

ITGE realizó en los días siguientes al accidente una cartografía, a escala 1: 10.000, de la distribución espacial de los lodos, así como varias campañas geoquímicas para la caracterización química y mineralógica de los lodos, el estudio de su evolución temporal, y la afección de los suelos cubiertos por los lodos mineros (ITGE, 1998). Así mismo, se creó un grupo de trabajo, integrado por el ITGE, INTA y CEDEX, con el fin de adquirir y utilizar imágenes multiespectrales registradas por el sensor aeroportado Daedalus-1268 en el estudio del impacto ambiental y seguimiento de los trabajos de limpieza de los lodos.

MARCO GEOLÓGICO y MINERO

El distrito minero de Aznalcóllar se localiza en el borde meridional de la Faja Pirítica Ibérica (FPI), a unos 25 km al oeste de Sevilla. La FPI es una extensa provincia metalógena que comprende el mayor y más importante conjunto de yacimientos de sulfuros polimetálicos de Europa occi-



Figura 1. Localización del área afectada por el vertido de la mina de Aznalcóllar.

dental. De los 90 yacimientos conocidos, se ha estimado un total de 1.700 Mt de mineral, del que el 20% ha sido explotado y entre un 10% y un 15% se ha perdido por erosión. Esta enorme masa mineral representa una importante anomalía geoquímica en S, Fe, Zn, Cu, Pb, Sn, As y otros metales. Las explotaciones mineras han generado un gran volumen de escombreras con alto contenido en minerales ricos en pirita y otros compuestos de azufre. Los metales contenidos en las masas piríticas son liberados por la oxidación de los sulfuros y transportados por las aguas ácidas en las cuencas de los ríos, en cuyos aluviales precipitan, generalmente asociados a hidróxidos y sulfatos de Fe, dando lugar a una importante contaminación metálica. Un estudio geoquímico de los suelos de la cuenca del Guadiamar y del estuario del Guadalquivir, previo al accidente, ya detectó la existencia de contaminación de metales pesados en este área (Cabrera et al., 1987).

Las mineralizaciones de sulfuros se alojan en el denominado Complejo Volcanosedimentario (CVS), conformado por un conjunto heterogéneo de rocas volcánicas y sedimentarias. El distrito de Aznalcóllar incluye varios yacimientos, con unas reservas totales de más de 130 Mt de sulfuros masivos. La mineralización está constituida principalmente por pirita con esfalerita, galena, arsenopirita, calcopirita, boumonita, bolangerita, estannita y casiterita.

La balsa de estériles de la mina contenía varios millones de metros cúbicos de residuos piríticos procedentes de la planta de tratamiento y desde 1995 se utilizaba para la nueva explotación del yacimiento de Los Frailes. Se ubica en la margen derecha del río Agrio, 2 km aguas arriba de la confluencia con el Guadiamar; Geológicamente se localiza en el borde norte de la cuenca terciaria del Guadalquivir, donde sedimentos transgresivos pliocenos cubren materiales paleozoicos del zócalo hercínico. Los materiales terciarios están formados por una unidad inferior de areniscas y carbonatos,

una unidad intermedia de margas y una unidad superior de arcillas. Los depósitos aluviales cuaternarios del valle del Guadiamar, afectados por la riada de Iodos, están constituidos por conglomerados, gravas y arenas. De las dos terrazas reconocidas en el tramo afectado, la superior solo se preserva al norte, en el área de confluencia del Agrio y el Guadiamar. El perfil longitudinal del río Guadiamar presenta un gradiente muy suave aguas abajo del Vado del Quema, donde los sedimentos de marisma son dominantes y aparecen parcialmente cubiertos por depósitos eólicos.

ADQUISICION DE DATOS

Para la obtención de imágenes se ha utilizado un instrumento Daedalus-1268 (sensor multiespectral con doce canales entre 0.42 y 13 μm), operando desde un avión C-212 de INTA. (Figura 2) Se ha cubierto la zona afectada por el vertido en tres fechas (mayo, julio y noviembre de 1998). En cada una de las campañas se han efectuado varias líneas que cubren la totalidad del área afectada y a varias alturas de vuelo, con el fin de obtener información detallada de ciertas áreas, de hasta 1,8 metros de resolución a una altura de 680 metros. Simultáneamente, se ha registrado fotografía aérea convencional como apoyo a los trabajos de campo y a la corrección geométrica de las imágenes. En las mismas fechas se han adquirido datos de espectroradiometría de campo con un instrumento GER-1500, como soporte a la caracterización radiométrica de las superficies observadas. Las imágenes correspondientes a mayo no se han procesado por su alta nubosidad, sí bien se encuentran disponibles para un posible uso posterior.

Canal	Longitud de onda	(μm)
1	0.42-0.45 μm	
2	0.45-0.52 μm	(TM1)
3	0.52-0.60 μm	(TM2)
4	0.60-0.62 μm	
5	0.63-0.69 μm	(TM3)
6	0.69-0.75 μm	
7	0.76-0.90 μm	(TM4)
8	0.91-1.05 μm	
9	1.55-1.75 μm	(TM5)
10	N/A	
11	3.00-5.00 μm	
12	8.50-13.0 μm	(TM6)

Figura 2. Configuración ATM ADS-1268

CORRECCIONES GEOMETRICAS Y RADIOMETRICAS

Se ha corregido geométricamente la imagen correspondiente al valle del Guadiamar, utilizándose

para ello una transformación polinómica (orden 3) basada en puntos de control. Estos puntos se han obtenido tanto de cartografía convencional como de fotografía aérea ortorectificada (corrección de la actitud de la cámara y el efecto del relieve), para lo que se utilizó un modelo digital del terreno generado a partir de la altimetría 1:25000 del IGN. La imagen se dividió en diferentes subescenas, y las transformaciones se derivaron independientemente para cada una (error cuadrático medio < 2 pixels tanto en x como en y), realizándose un mosaico para obtener la imagen final.

Para optimizar la comparación de las imágenes adquiridas en las distintas fechas, es conveniente transformar los niveles digitales originales a reflectividad. Para esta conversión, y basándonos en la hipótesis del comportamiento lambertiano de las superficies observadas, se puede optar por dos procedimientos: aplicación de un modelo analítico de transferencia radiativa, o mediante un modelo empírico, a partir de datos de reflectividad medidos en el terreno con correspondencia en la imagen. En este caso se dispone de los datos registrados con el instrumento GER-1500 en unos 15 puntos distribuidos por la zona de estudio y cubriendo un amplio rango de cubiertas. Estos datos se han utilizado para derivar las reflectividades para ($< 1 \mu\text{m}$. Para el canal 9 (1.55 -1.75 μm), que se encuentra fuera del rango del GER 1500, se ha utilizado el código 6S (Vermote et al., 1995).

ANAÁLISIS QUÍMICOS, MINERALÓGICOS y DE REFLECTIVIDAD

Durante el trabajo de campo realizado en la misma fecha de la realización de los vuelos, se han tomado muestras de lodos, sales y suelos de referencia. El análisis mineralógico por difracción de rayos x (DRX) muestra que el lodo se compone de pirita (75-80%), esfalerita y galena (5%), y un componente silicatado compuesto por clinocloro, cuarzo, y algo de yeso. El análisis químico da concentraciones elevadas de Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, As, Cd, Sb, TI y Hg. La presencia mayoritaria de pirita en el lodo explica la baja reflectividad de este material en todo el rango espectral considerado. Las sales originadas por la progresiva alteración de los lodos piríticos son sulfatos complejos hidratados, formados principalmente por rozenita, boyleita, szomolnokita, halotrichita, hexahedryta y starkeyita. Estas fases sulfatadas presentan un elevado contenido en Zn (hasta un 10%), Cu, As, Sb y Cd. La disolución de las sales representa una de las principales vías de contaminación de los suelos, al movilizarse los metales pesados en épocas de lluvia.

Sobre las mismas muestras se han realizado medidas de reflectividad en laboratorio en el rango entre 0,4 a 2,5 μm . Las curvas espectrales de cam-

po y de laboratorio (Figura 3) confirman la baja reflectividad y la ausencia de rasgos significativos en los lodos. Los sulfatos hidratados muestran una reflectividad general alta, con picos de absorción característicos a 1,4 μm y 1,9 μm , que indican la presencia de agua molecular en estos compuestos, mientras que los suelos de referencia muestran una reflectividad media, con mínimos menos acusados que las sales a 1,4 μm , 1,9 μm y 2,2 μm .

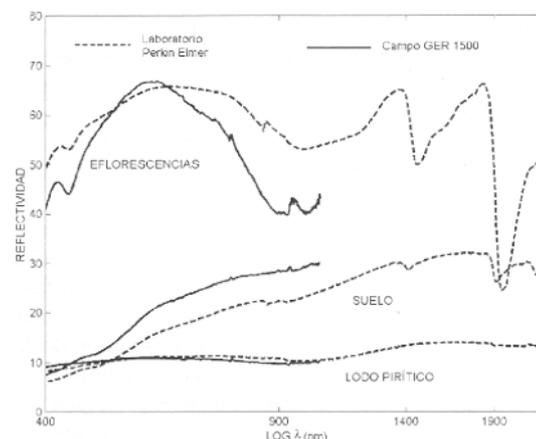


Figura 3. Espectroradiometría de campo y laboratorio de lodo, sales y suelos de referencia.

CARTOGRAFIA DE LODOS PIRITICOS y EFLORESCENCIAS

Los métodos convencionales para estudiar la distribución de metales en suelos y rocas se basan en estudios geoquímicos que son procedimientos caros y lentos. Durante la última década, se han desarrollado métodos de teledetección que permiten identificar minerales específicos y cartografiar su distribución en áreas mineras. Estas nuevas técnicas se basan en la detección de los rasgos de absorción diagnósticos que presentan los minerales con Fe en su composición en la región entre 0.4 y 1.2 μm , y en los de los minerales con grupos hidroxilos entre 1.5 y 2.5 μm . La identificación de óxidos, hidróxidos y sulfatos de Fe es particularmente importante en áreas mineras porque a ellos se asocian los metales pesados (King, 1995). La identificación de los sulfatos complejos hidratados que se forman por meteorización de los lodos, y que contienen así mismo un elevado contenido metálico, es también crítica por su alto potencial contaminante.

La imagen ATM971 (Figura 4A), registrada en Julio de 1998, muestra el sector principal del valle del río Guadiamar, desde la balsa de estériles, al norte de la imagen, al Vado del Quema, al sur. La interpretación visual de la misma permite discriminar las áreas cubiertas por el lodo, que dan una respuesta muy baja, tanto en las bandas del visible como en el infrarrojo próximo. Las costras de sales exhiben valores altos en todas las bandas y se

localizan preferentemente en la balsa y en varias graveras ubicadas en el tramo norte del valle. Con objeto de clasificar los datos registrados en el vuelo de Julio, se seleccionaron varias áreas correspondientes a superficies bien expuestas de lodos y efflorescencias a lo largo del valle del Guadimar. Una vez establecidas las firmas espectrales para estas dos categorías, se procedió a clasificar la imagen mediante un algoritmo de máxima probabilidad. La Figura 4B corresponde a la clasificación de la imagen de julio, en la que el color amarillo corresponde a las áreas todavía cubiertas por lodo pirítico (en esta fecha ya se había retirado un 30% del lodo), y el color rojo a las costras formadas por sulfatos hidratados. Del mismo modo se ha procedido con las imágenes registradas en noviembre de 1998 (Figura 4C), fecha en la que los trabajos de limpieza estaban en su fase final. En la imagen clasificada (Figura 4D), las sales se restringen a pequeñas áreas en el interior de la balsa, y el lodo aparece en áreas todavía sin limpiar en estas fechas, aunque también puede identificarse en áreas en las que, a pesar de haberse efectuado los trabajos de limpieza, se observan superficies con firmas típicas del lodo. Una de estas áreas aparece dando una estructura de bandas claras y bandas oscuras muy netas en la imagen (Figura 5A). En el terreno, se ha confirmado que estas bandas están relacionadas con la sistemática seguida en la retirada del lodo en los campos de labor.

Para la caracterización de la naturaleza de estas bandas, se realizó un muestreo de los suelos a lo



Figura 4 A. Imagen ATM 971 de la cuenca del Río Guadimar, 07/07/98.

B. Lodos y sales clasificados a partir de la imagen A.

C. Imagen ATM 971, 25/11/98.

D. Lodos y sales remanentes clasificados a partir de la imagen C.

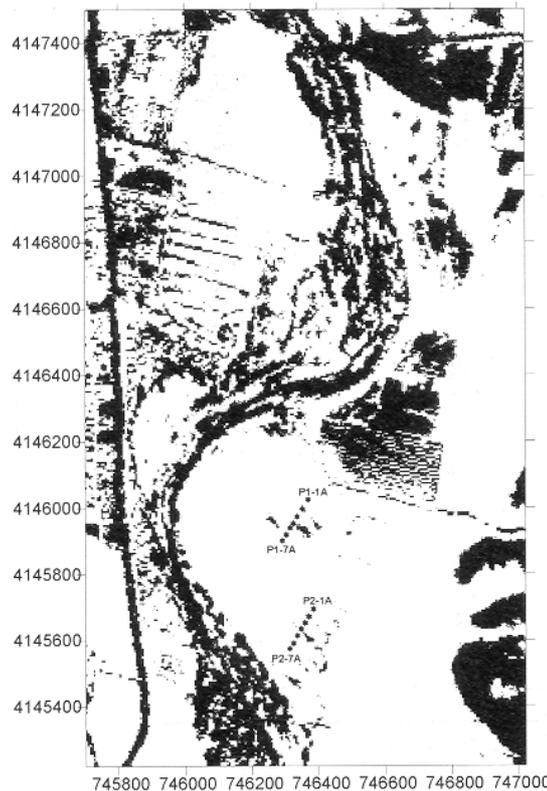


Figura 5A. Subescena imagen ATM nov.98 con situación de muestras de suelos en bandas limpias y sucias.

largo de dos perfiles transversales a las mismas. En cada perfil se tomaron siete muestras de suelo correspondientes a cuatro bandas limpias y tres sucias, tal y como aparece en la figura 5 A. Los resultados de los análisis químicos y mineralógicos muestran que los suelos de las bandas sucias presentan un alto contenido en Fe, Cu, Pb, Zn, As, Cd y Sb, apareciendo la pirita siempre como mineral mayoritario en la DRX. En la Figura 5 B, puede observarse la marcada diferencia composicional del arsénico en las bandas limpias y sucias. Lo mismo ocurre para el resto de los metales pesados analizados.

Basándonos en los resultados analíticos, se puede establecer que las bandas oscuras representan bandas sucias, con restos de lodo remanente en superficie. Por el contrario, en los suelos corres-

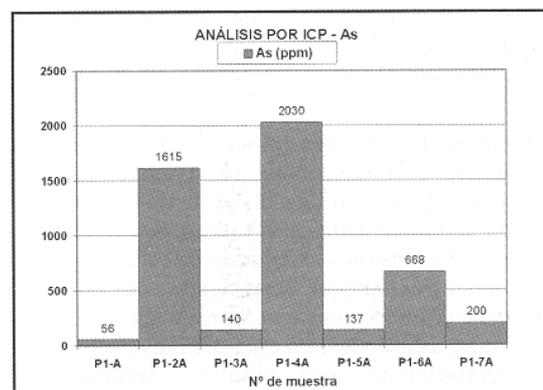


Figura 5B. Valores de arsénico en bandas claras y oscuras.



Figura 5 C. Clasificación de la imagen de la figura 5A.

pendientes a las bandas claras, el contenido en estos elementos es mucho menor, y la pirita o no aparece o lo hace como componente muy minoritario.

Tomando como referencia las áreas sucias y limpias establecidas en este área, se procedió a realizar la clasificación digital de la imagen, obteniéndose como resultado un mapa del lodo remanente, tal como aparece en la Figura 5C. El resto de los suelos de la zona afectada por el vertido, no incluidos en esta categoría, se consideran suelos limpios, es decir suelos que no presentan lodo significativo en superficie. Al decirse limpios, no se quiere decir que estos suelos no puedan presentar algún grado de afección por el lodo. (En todo caso, en este trabajo se ha puesto el énfasis en la cartografía de los suelos que presentan lodo significativo en superficie, puesto que las técnicas de teledetección utilizadas solo proporcionan información referente a los primeros centímetros del suelo).

CARTOGRAFIA DEL LODO REMANENTE

Tomando como base la clasificación digital de las zonas sucias, con lodo en superficie, realizada sobre los datos multispectrales ATM, el trabajo de verificación en campo y los resultados de la

campana geoquímica, se ha generado una cartografía del lodo remanente en julio de 1999. Esta cartografía digital se ha compuesto sobre la base topográfica, a escala 1: 10000, del Instituto Cartográfico de Andalucía (I.C.A.), realizándose un total de siete hojas que cubren el valle del Guadiamar, desde la balsa al Vado del Quema. La figura 6 muestra la cartografía del lodo remanente sobre la hoja topográfica 983 (4-2), correspondiente al sector de los Ranchos del Guadiamar.

Las siguientes unidades han sido consideradas en la leyenda de los mapas:

- **Suelos con abundante lodo en superficie.** Se han incluido aquellas áreas en las que a pesar de haberse realizado las labores de limpieza, persisten fragmentos del sedimento del lodo original. Generalmente se trata de zonas roturadas en las que los terrones de la costra de lodo no han sido retirados y han quedado mezclados con el suelo. En otros casos, se trata de los amplios corredores utilizados para la circulación de los camiones que transportaban el lodo a la corta de Aznalcóllar por la margen izquierda del Guadiamar. Estas bandas presentan una mayor cantidad de lodo remanente, tal como se ha podido corroborar con la analítica. En otros casos, se trata de estructuras relacionadas con el proceso de acordonamiento del lodo previo a la carga de los camiones. En las áreas con lodo abundante en superficie, es frecuente la aparición de pequeñas costras de sales en zonas deprimidas. También se incluyen aquellas áreas donde la maquinaria de limpieza no ha podido actuar por falta de accesibilidad o exceso de humedad.
- **Suelos con restos de lodo.** Representan áreas en las que el lodo aparece pulverizado y mezclado con el suelo, con algunos fragmentos de lodo dispersos.
- **Graveras.** Se han incluido las graveras de Los Ranchos del Guadiamar, en la margen derecha y la situada al norte del puente de Las Doblas, en la margen izquierda. Los análisis realizados muestran valores altos de lodo en la matriz de las gravas, aunque superficialmente la aparición de lodo compacto se restringe a algunas zonas localizadas. En estas áreas es frecuente la formación de costras de sales posteriormente a las labores de limpieza, lo que implica la existencia de lodo remanente.
- **Gravas del cauce.** Se han considerado las gravas y arenas del canal principal del Guadiamar, donde es habitual encontrar lodo resedimentado.
- **Parcelas de experimentación.** Se trata de varias parcelas de pequeñas dimensiones, en las que se ha dejado la capa de lodo original con el fin de realizar estudios a medio y largo plazo por distintos organismos de investigación.

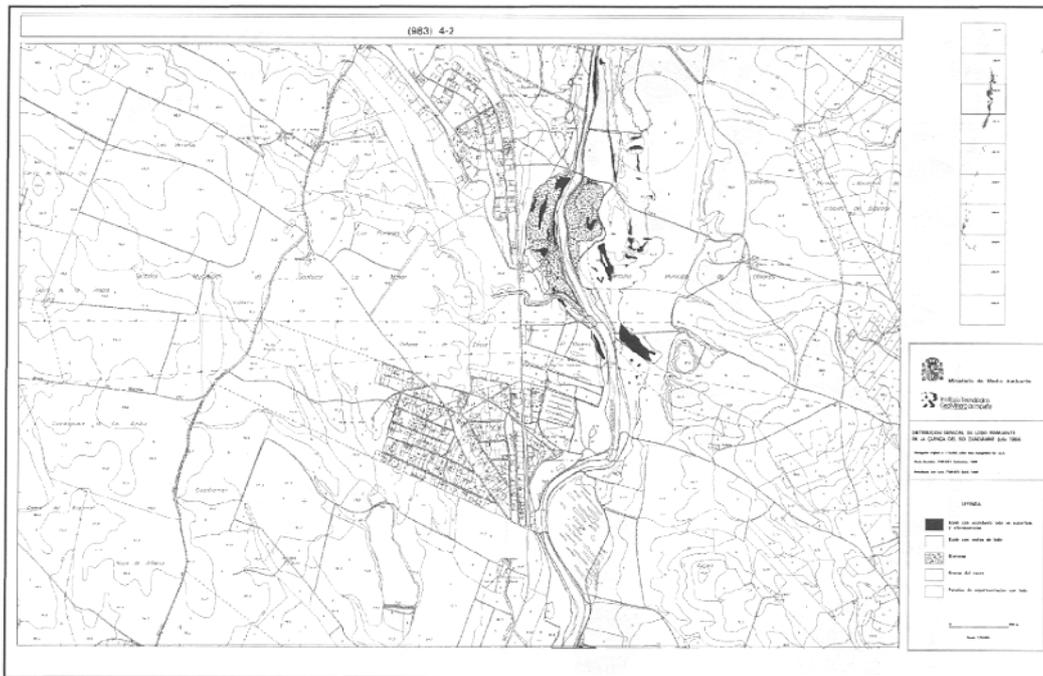


Figura 6. Mapa de distribución espacial del lodo remanente en la cuenca del río Guadiamar. Hoja 983 (4-2).

El cálculo del recubrimiento superficial de las distintas unidades consideradas ha dado los siguientes resultados:

- Suelos con lodo abundante en superficie: 25 ha
- Suelos con restos de lodo: 64 ha
- Graveras: 62 ha
- Gravas del cauce: 63 ha
- Parcelas de experimentación: 0,75 ha

CONCLUSIONES

Las imágenes multiespectrales registradas por el sensor aeroportado Daedalus-1268 han demostrado ser una herramienta muy eficaz para cartografiar la extensión superficial de la riada de Iodos a lo largo del valle del río Guadiamar, así como para la detección de costras de sulfatos solubles cuyo control es crítico por su potencial contaminante.

La realización de vuelos en junio, noviembre de 1998, y en junio de 1999, ha permitido evaluar la progresión de los trabajos de limpieza y cartografiar con gran detalle las áreas con lodo remanente. Esta cartografía ha sido básica en la planificación de la segunda fase de los trabajos de limpieza, realizados durante el verano de 1999.

Debido a la persistencia de contaminación remanente en el área afectada por el vertido, especialmente en el tramo superior del Guadiamar, se ha estimado conveniente el registro de nuevos datos a principios del verano del año 2000 con objeto de actualizar la cartografía del lodo remanente en esas fechas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a L.Rowan y J. Crowley del U .S. Geological Survey (Reston, VA, USA), la realización de la espectrometría de laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- CABRERA, F. et al. 1987. Heavy metal pollution in fue Guadiamar river and fue Guadalquivir estuary (South West Spain). *Chemosphere*. 16: 2/3: 463-468.
- I.T.G.E. 1998. Cartografía y cubicación de Iodos mineros en la cuenca del río Guadiamar. Aznalcóllar-Entremuros. Internal Report. RM-OOI -98. 103 p. 11 maps. 1CDrom.
- HUDSON-EDWARDS, K., SCHELL, C., K MACKLIN, M. 1999. Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area., southwest Spain. *Applied Geochemistry*. 14: (8): 10151030.
- KING, T. V. V. 1995. Environmental considerations of active and abandoned mine lands: U. S. Geological Survey. Bulletin 2220, 38 p.
- NORDSTROM, D.K. and ALPERS, C.N. 1999a. Geochemistry of acid mine waters. In: Plumlee, G. and Logsdon, M. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*. *Rev. Econ. Geol.* 7 A.
- NORDSTROM, D.K. and ALPERS, C.N., 1999b. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at fue Iron Mountain Superfund site, California. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 96: 3455-3462.
- VERMOTE, E., TANRE, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M. y MORCLETTE, J.J., 1995. 6S Users Guide, version 1 (http://oasy.unin-lilleUr/informatique/sixs_qb.html).