

Estudio de la Influencia de las
Actividades Mineras de Mercurio
en la Comarca de Almadén
Aplicando Técnicas de
Teledetección

C. Rico
T. Schmid
R. Millán
J. Gumuzzio

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>

Depósito Legal: M -14226-1995

ISSN: 1135 - 9420

NIPO: 471-10-040-1

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S54

MINING; SPAIN; LAND USE; DATA ACQUISITION; DATA PROCESSING; SOIL
CHEMISTRY; GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

**Estudio de la Influencia de las Actividades Mineras de Mercurio en la Comarca de Almadén
Aplicando Técnicas de Teledetección**

Rico, C.; Schmid, T.; Millán, R.; Gumuzzio, J.

96 pp. 29 fig. 130 refs.

Resumen:

Este informe científico-técnico es la base del trabajo de investigación llevado a cabo por Celia Rico Fraile para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados y ha sido desarrollado en colaboración de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid y el Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT.

El objetivo principal de este estudio fue la caracterización y clasificación de los usos de suelos de Almadén en Ciudad Real durante la explotación y tras el cese de la actividad minera en el año 2002, desarrollando una metodología basada en la integración de técnicas de teledetección aplicando datos provenientes de imágenes satélite multi e hiperespectrales. Mediante su procesamiento y, junto con la combinación de los datos obtenidos en las campañas de campo, se ha creado una librería espectral para obtener una clasificación de los usos de suelos representativos del área de estudio. Se han podido observar cambios en los usos de suelos como la disminución de áreas afectadas por las actividades mineras en los últimos años.

**The Study of Mining Activities and their Influences in the Almadén Region Applying
Remote Sensing Techniques**

Rico, C.; Schmid, T.; Millán, R.; Gumuzzio, J.

96 pp. 29 fig. 130 refs.

Abstract:

This scientific-technical report is a part of an ongoing research work carried out by Celia Rico Fraile in order to obtain the Diploma of Advanced Studies as part of her PhD studies. This work has been developed in collaboration with the Faculty of Science at The Universidad Autónoma de Madrid and the Department of Environment at CIEMAT.

The main objective of this work was the characterization and classification of land use in Almadén (Ciudad Real) during cinnabar mineral exploitation and after mining activities ceased in 2002, developing a methodology focused on the integration of remote sensing techniques applying multispectral and hyperspectral satellite data. By means of pre-processing and processing of data from the satellite images as well as data obtained from field campaigns, a spectral library was compiled in order to obtain representative land surfaces within the study area. Monitoring results show that the distribution of areas affected by mining activities is rapidly diminishing in recent years.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en la Unidad de Degradación en suelos del Departamento de Medio Ambiente gracias a una beca FPI adjudicada por el Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis el Dr. Thomas Schmid Sutter, ya que, sin su esfuerzo, apoyo y dedicación continuada desde que integré en la Unidad, la elaboración de este trabajo no hubiera sido posible. Quiero agradecerle a mi tutor académico el Dr. José Gumuzzio Fernández el interés y la ayuda dedicada en la realización de este trabajo.

Gracias a la Dra. Rocío Millán Gómez por la atención y confianza depositada en mí que ha permitido que desarrolle mi trabajo dentro de su Unidad. Asimismo gracias a toda la Unidad por su ayuda en el laboratorio, interpretación de datos y, en general, por sus útiles consejos.

Dentro de la Universidad de Castilla-La Mancha, gracias al Dr. Pablo Higuera y al Dr. José González Piqueras y a sus respectivos grupos de trabajo, por la ayuda personal y material ofrecida, en la Universidad y en el trabajo de campo. Gracias a Minas de Almadén y Arrayanes, S.A (MAYASA) por el apoyo y la oportunidad de trabajar en sus terrenos.

A mis compañeros del Ciemat y sobre todo a aquellos con los que comparto despacho, por vuestra ayuda técnica y más aún por vuestra ayuda personal, convirtiendo siempre el trabajo en buenos momentos que han hecho mucho más llevadero el día a día.

Gracias a mi padre y a María Rosa por su ayuda y sabios consejos y, sobretodo, mi más profundo y cariñoso agradecimiento a Rubén quien día a día me da todo su apoyo y comprensión haciéndome sentir siempre capaz de conseguir todo lo que me proponga.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	7
3. ANTECEDENTES	11
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	19
5. METODOLOGÍA.....	27
5.1 SELECCIÓN PARCELAS Y TOMA DE MUESTRAS.....	30
5.2 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PREPROCESAMIENTO.....	36
5.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	50
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
6.1 TRABAJO DE CAMPO Y RADIOMETRÍA.....	61
6.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO	64
6.3 ANÁLISIS DE LA CARTOGRAFÍA DIGITAL.....	65
6.4 ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES CON LANDSAT.....	67
6.5 SELECCIÓN DE COMPONENTES PUROS A PARTIR DE DATOS HIPERESPECTRALES	71
6.6 DETECCIÓN DE CAMBIOS EN IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....	73
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO.....	77
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
9. CARTOGRAFÍA.....	97
10. ANEXOS.....	i

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Muestra de cinabrio con mercurio.....	3
<i>Figura 2.</i> La Mina de Almadén y el pueblo vistos desde una escombrera cercana	4
<i>Figura 3.</i> Localización del área de estudio. Imagen multiespectral Landsat ETM+ (composición de falso color utilizando bandas de 2.2080, 0.8346 y 0.6614 μm en los canales RGB)	21
<i>Figura 4.</i> Situación geográfica, geológica y estratigráfica de los diferentes tipos de yacimientos del distrito de Almadén. LC: Las Cuevas. Cor: Corchuelo. Gu: Guadalperal. NVC: Nueva y Vieja Concepción. EE: El Entredicho (y Nuevo Entredicho). (Higuera, 2009).....	23
<i>Figura 5.</i> Catena potencial de la provincia Luso-Extremadurensis: 1. alisedas riparias; 2, fresnedas de las vegas silíceas; 3. encinares mesomediterráneos; 4. alcornoques mesomediterráneos subhúmedos; 5. melojares mesomediterráneos de umbrías;6. melojares supramediterráneos	25
<i>Figura 6.</i> Cuadro general de la metodología	29
<i>Figura 7.</i> Localización de las parcelas y de puntos de controlFusión de una imagen multiespectral Landsat ETM+(composición de falso color utilizando bandas de 2.2080, 0.8346 y 0.6614 μm en los canales RGB)con su banda pancromática	30
<i>Figura 8.</i> Medida radiométrica con el espectrómetro de campo GER 3700	32
<i>Figura 9.</i> Utilización del GPS Garmin 76 CSX en campaña de campo de abril de 2008	34
<i>Figura 10.</i> Medida del blanco con el panel Spectralon®	34
<i>Figura 11</i> Recogida de muestras de suelo durante un campaña de campo	35
<i>Figura 12.</i> Medición de firmas espectrales en laboratorio	35
<i>Figura 13.</i> Muestras de suelo secadas al aire	37
<i>Figura 14.</i> Muestra tamizada menor de 2mm y fracción mayor de 2 mm	37
<i>Figura 15.</i> Imágenes Landsat TM 25/03/89 y ETM+ 22/04/02	39
<i>Figura 16.</i> Imágenes ASTER 08/04/06 y ASTER 30/06/07.....	41

<i>Figura 17.</i> Imagen ALI del 02/07/08	43
<i>Figura 18.</i> Imágenes Hyperion adquiridos en diferentes fechas a) 17/07/06, b) 02/06/08, c) 28/06/08 y d) 03/07/08.....	45
<i>Figura 19.</i> Punto de interés para determinar áreas de interés (ROI) en el área minera: a) composición de falso color para la imagen ETM+ (utilizando bandas en 2.2080, 0.8346 y 0.6614 μm en los canales RGB) con el apoyo de b) fotografía aérea de agosto de 2004 y fotos en c) octubre de 2004 y d) octubre 2006	54
<i>Figura 20</i> Curva espectral del cinabrio proveniente de una librería espectral (USGS) visualizada con el programa ENVI 4.4.....	57
<i>Figura 21.</i> Curvas espectrales obtenidas en las campañas de radiometría del año 2008	63
<i>Figura 22.</i> Modelo Digital de Elevaciones con la imagen Hyperion 17/07/06 66	
<i>Figura 23.</i> NDVI de la imagen ETM+ 22/04/02.....	67
<i>Figura 24</i> Imágenes de componentes principales para a) PC2, b) PC4, c) PC5 y d) PC6	69
<i>Figura 25.</i> Curvas espectrales de los miembros puros obtenidos de la imagen Hyperion 17/07/06 y curva espectral del cinabrio obtenida con el radiómetro de campo	71
<i>Figura 26.</i> Curvas espectrales de los elementos puros en las imágenes Multiespectrales: TM 25/03/89, b) ETM+ 22/04/02, c) ASTER 08/04/06, d)ASTER 30/06/07.....	72
<i>Figura 27.</i> Resultado clasificación SAM en las imágenes multiespectrales	74
<i>Figura 28</i> Mina a cielo abierto de El Entredicho en 1996 a la izquierda (Higueras, 2008) y a la derecha una imagen obtenida en una campaña de campo de noviembre de 2006.....	75
<i>Figura 29.</i> Ampliación de la clasificación angular SAM para la zona El Entredicho.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Análisis de parcelas del área minera de Almadén.....	31
<i>Tabla 2.</i> Parcelas seleccionadas en las campañas de campo y su localización	33
<i>Tabla 3.</i> Características espectrales de los sensores TM y ETM+	38
<i>Tabla 4.</i> Detalles de los metadatos de las imágenes TM y ETM+	39
<i>Tabla 5.</i> Características espectrales del sensor ASTER.....	41
<i>Tabla 6.</i> Detalles de los metadatos de las imágenes ASTER	42
<i>Tabla 7.</i> Características espectrales del sensor ALI.....	42
<i>Tabla 8.</i> Detalles de los metadatos de la imagen ALI.....	43
<i>Tabla 9.</i> Características espectrales del sensor Hyperion.....	44
<i>Tabla 10.</i> Detalles de los metadatos de las imágenes Hyperion.....	45
<i>Tabla 11.</i> Datos de imágenes Hyperion tras la corrección cosmética	48
<i>Tabla 12.</i> Datos de georreferenciación para las imágenes Hyperion	49
<i>Tabla 13.</i> Parcelas seleccionadas dentro del estudio general del proyecto	61
<i>Tabla 14.</i> Resultados de análisis de laboratorio	54
<i>Tabla 15.</i> Resultados de CP, autovectores para cada uno de los componentes principales de las imágenes TM y ETM+	68

1.INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Los depósitos de mercurio más importantes del mundo se localizan en la cuenca mediterránea y la mayor concentración se sitúa en Almadén, España (Ferrara *et al.*, 1998). El cinabrio (*Figura 1*) es el mineral predominante y las actividades mineras han tenido lugar en el área durante más de dos mil años hasta el cierre de la mina en mayo de 2002. Sin embargo gran cantidad del mineral fue almacenado hasta febrero de 2004 (Newman, 2002; Gray *et al.*, 2004). La explotación del yacimiento ha representado más del 30 % de la cantidad total producida en el mundo. De hecho, el propio nombre de Almadén significa en árabe “la mina” (Hernández, 2007).



Figura 1. Muestra de cinabrio con mercurio.

La demanda del mineral ha sido siempre superior a la producción pero durante las últimas tres décadas la actividad minera ha sufrido una progresiva regresión y por primera vez en los años ochenta tuvo pérdidas hasta que tuvo lugar el cierre de la mina debido a la nueva normativa que prohíbe la exportación de mercurio metálico y ciertos compuestos y mezclas de mercurio por su elevada toxicidad (Reglamento (CE) n.º 1102/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2008).



Figura 2. La Mina de Almadén y el pueblo vistos desde una escombrera cercana.

Las principales actividades en la región de Almadén (*Figura 2*) incluían la extracción del mineral, su fundición, construcción de vertederos y escombreras; las secundarias englobaban el transporte del material y su procesamiento. Tras este período de explotación minera, las actividades antropogénicas han facilitado la movilidad y la dispersión del mercurio, el cual ha producido un gran impacto en el medio ambiente de la zona de estudio (Adriano, 2001). Éstas afectan a los componentes abióticos y bióticos del entorno así como a los usos del suelo, los cuales han sufrido un cambio relevante durante la explotación del mineral y conlleva a cambios inevitables en los recursos naturales y el paisaje de la región (Gray *et al.*, 2004, Newman, 2002). Un ejemplo de ello fue la disminución de los encinares debido a la tala de estos árboles para el uso de su carbón como combustible en los hornos, mezclado a veces con leña de enebro (Matilla, 2005).

En este contexto, tras el problema que plantea la fase terminal de un distrito minero debe planificarse un apoyo al desarrollo de los usos alternativos del suelo: actividades ganaderas, agrícolas, cinegéticas, servicios técnicos, de obras y de obras públicas (Ortega y Díez, 2001).

A parte de las actividades relacionadas con la minería, los principales usos del suelo de la comarca son pastizales para el aprovechamiento ganadero y los cultivos de secano de legumbres y cereales. Estas alternativas han ganado importancia después del cese de la actividad minera, siendo la rehabilitación de las áreas afectadas por la minería la principal prioridad en la región hoy en día. Gracias a ello el turismo está creciendo actualmente en la región gracias a la creación del Parque Minero de Almadén que fue inaugurado el 7 de noviembre de 2006 e incluye la recuperación para el turismo de la mina subterránea, los cercos mineros, los hornos de metalurgia, los museos y los edificios singulares.

Por todo lo descrito en los párrafos anteriores, realizar controles regulares para supervisar el efecto producido por tales actividades y monitorizar el impacto de tales procesos en las áreas donde se llevaban a cabo, es crucial para un desarrollo sostenible del entorno.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto de investigación es desarrollar una metodología basada en técnicas de teledetección de datos multi e hiperespectrales, que permite identificar y monitorizar los parámetros abióticos y bióticos de la región afectados por las actividades mineras, además de otras actividades antropogénicas en la zona de Almadén. Para lograr la monitorización del cambio de las áreas afectadas posteriormente recuperadas, se han aplicado datos de numerosas fuentes y en diferentes escalas espaciales y en periodos de tiempo distintos.

Los objetivos específicos incluyen:

- Caracterizar las condiciones ambientales de parcelas de estudio mediante análisis en laboratorio de los principales parámetros físico-químicos del suelo con muestras recogidas en campañas de campo.
- La identificación de las características espectrales de los distintos componentes del suelo aplicando datos hiperespectrales.
- La construcción de una librería espectral para disponer de curvas espectrales de referencia de las principales cubiertas presentes (suelo, vegetación y agua) a partir de su medida en campo y análisis de muestras de suelos en laboratorio seleccionadas.
- Tipificar miembros puros y curvas espectrales tomadas de una imagen hiperespectral con el fin de mejorar la clasificación de las áreas afectadas por la minería con datos multiespectrales.
- Monitorizar los cambios de las actividades mineras implementando imágenes multiespectrales de distintas fechas.
- Compilación de una base de datos georreferenciada mediante Sistemas de Información Geográfica.

3. ANTECEDENTES

3. ANTECEDENTES

Debido al carácter multidisciplinar del trabajo, la bibliografía asociada engloba diversas áreas de investigación, desde el estudio de la zona sobre la influencia del mercurio en el suelo hasta su visualización remota desde el espacio.

Existe una amplia literatura relacionada con la geología y petroquímica de la zona (Higueras y Munhá, 1993; Higueras, 1995; Higueras, 1997; Higueras *et al.*, 1999; Higueras *et al.*, 2000; Higueras *et al.*, 2003; Higueras *et al.*, 2005). Sin embargo, a pesar de su relevancia geológica a nivel científico, no son numerosos los estudios sobre el efecto de la presencia del mineral, ya sea natural o antropogénica, sobre el medioambiente de esta región. Algunos artículos destacables son los de Lindberg *et al.*, 1979; Hildebrand *et al.*, 1980; Huckabee *et al.*, 1983; Ferrara *et al.*, 1998.

Los estudios sobre el efecto del mercurio en suelos mediterráneos incluyen análisis de muestras de suelo superficial para aplicación de biorremediación (Carrasco *et al.*, 2001 y Rodríguez *et al.*, 2005), además de estudios ambientales de muestras de distintas tipologías de suelo del área de Almadén (Higueras *et al.*, 2001).

En la última década se han desarrollado en el CIEMAT líneas de investigación para analizar la dispersión que ha tenido el mercurio en los suelos y en la vegetación de Almadén, dentro del marco de los Proyectos de I+D del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. Estos son los proyectos RETAMA (Recuperación de terrenos afectados por mercurio, Ref.: REN2002-04229-CO2-02) y REUSA (Recuperación de suelos contaminados por mercurio: recomendaciones de usos de suelos y plantas en la Comarca de Almadén, Ref: CTM2005-04809 / TECNO). Éstos comprenden campañas de campo, análisis de muestras en laboratorio y experimentación en lisímetros (Schmid *et al.*, 2003; Schmid *et al.*, 2005a; Vera *et al.*, 2005; Millán *et al.*, 2006; Sierra *et al.*, 2008; Carrasco y Millán, 2008).

Tras el cierre de la mina en mayo de 2002, se pretende obtener resultados para recomendar estrategias de recuperación y restauración de las superficies afectadas, así como evaluar y fomentar las distintas alternativas de uso agrícola para la zona, dándole

al suelo un uso sostenible sin riesgos para la salud humana estudiando el uso agrícola como alternativa económica para el suelo del distrito minero de Almadén (Sierra, 2008), ya que a partir del 15 de marzo de 2011 quedará prohibida la exportación por parte de la Comunidad Europea de mercurio metálico, mineral de cinabrio, cloruro de mercurio (I), óxido de mercurio (II) y mezclas de mercurio metálico con otras sustancias (Reglamento (CE) n o 1102/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2008, relativo a la prohibición de la exportación de mercurio metálico y ciertos compuestos y mezclas de mercurio y al almacenamiento seguro de mercurio metálico (DO L 304/75 de 14/11/2008).

Además, entender y monitorizar los procesos de impacto ambiental en estas áreas es crucial para un desarrollo sostenible del entorno. Por ello, a parte del trabajo de campo tradicional, su combinación con técnicas de teledetección han demostrado ser una herramienta muy útil para determinar, espacial y espectralmente, la variación de la superficie del suelo en un momento determinado en el tiempo, así como para monitorizar explotaciones mineras en uso y abandonadas. (Towsend *et al.*, 2008)

Los datos que proporciona la teledetección son una moderna herramienta de gran importancia en los estudios ambientales por su capacidad a la hora de seguir procesos dinámicos. Las imágenes de satélite son una valiosa fuente de información para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre debidas a alteraciones antropogénicas, ya que la información que brindan es excelente para la evaluación de impactos ambientales debido a su rango espectral, su coste asequible, el ahorro de tiempo y dinero en las campañas de campo y la rápida adquisición de coberturas de grandes áreas, así como la capacidad de juntar información para realizar un estudio de monitorización (Nielsen *et al.*, 2008).

Cabe destacar que los datos pueden provenir de sensores que difieran en el procedimiento de recibir la energía de las diferentes cubiertas. Los sensores pasivos, como por ejemplo los sensores ópticos, son aquellos en los que la energía que reciben proviene de un foco exterior a ellos y los activos, como los sensores radar y Lídár, son aquellos capaces de emitir su propio haz de energía. La calidad de los datos de los sensores ópticos dependen del tiempo que haga en ese momento, mientras que los radar son capaces de producir imágenes a través de las nubes y de la oscuridad, lo que es una gran ventaja cuando las

condiciones climáticas son adversas. Un ejemplo de los primeros son los sensores multiespectrales, tales como Landsat/Thematic Mapper (TM), Landsat/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), TERRA/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Systeme Pour L'Observación de la Terre (SPOT), Earth Observing-1 mission (EO1)/Advanced Land Imager (ALI), Advanced Land Observing Satellite (ALOS)/Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR2), y los sensores hiperespectrales como Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), HyMap Airborne Hyperspectral Sensor y EO1/Hyperion. En cuanto a los sensores activos, el equipo más conocido es el radar que trabaja en la región micro-ondas (European Remote-Sensing Satellite (ERS) 1 y 2, ALOS/Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (Palsar), RADARSAT2) existiendo también el Lidar (*Light Detection and Ranging*) que opera con luz polarizada.

En este estudio se han utilizado datos provenientes de sensores pasivos, pudiendo diferenciarse por su resolución espectral. Los sensores multiespectrales son aquellos en los que la información multiespectral viene proporcionada por la observación en un número relativamente bajo de bandas espectrales no continuas, por ejemplo en este estudio el número varía entre 7 y 14 bandas. Las mediciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético, aportan una amplia información sobre distintos aspectos del medio ambiente. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorizar los niveles de ozono en las capas altas de la atmósfera. Las bandas visible e infrarrojas permiten determinar la salud de la cubierta vegetal (cultivos, bosques). Los captadores sensibles a la radiación infrarroja térmica sirven para determinar la temperatura cada superficie. Ejemplos de sensores multiespectrales son el Landsat/ Multi Spectral Scanner (MSS), TM, y ETM+, ASTER y ALI. Los sensores hiperespectrales poseen una elevada resolución espectral a bordo de un satélite, de varias decenas de bandas a centenas (como el caso del sensor Hyperion utilizado en este estudio el cual posee 220 bandas), y además elevada resolución espacial (AVIRIS de 5 a 20 m) cuando son aerotransportados. Esto les permite adquirir un espectro bastante continuo de los píxeles observados y en consecuencia incrementando el número de datos a procesar, pudiendo realizar tratamientos muy específicos a partir de estas imágenes. El primer sensor hiperespectral aerotransportado fue AVIRIS pero existen algunos otros como Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS), Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) y HyMap. Con respecto al

primer sensor hiperespectral a bordo de plataformas satélite se puede referenciar a Hyperion instalado en la plataforma EO-1.

Datos y técnicas de teledetección han sido ya aplicados en proyectos de explotaciones mineras de ámbito internacional, tales como: Nuevas Tecnologías para la exploración y vigilancia de los impactos ambientales de operaciones mineras basadas en técnicas de teledetección, dentro del marco de CORDIS RTD-PROJECT para las Comunidades Europeas y fue realizado entre 1992 y 1995; la monitorización y asesoramiento del impacto ambiental de la minería en Europa utilizando Técnicas Avanzadas de Observación (MINEO, 2000) es un proyecto de investigación y desarrollo de la Unión Europea (Chevrel *et al.*, 2001). Otro ejemplo es el proyecto PECOMINES: *Inventory, Regulations and Environmental Impact of Toxic Mining Wastes in Pre-Accession Countries* (Vîjdea *et al.*, 2004) y el proyecto RESEDA: *Assimilation of multisensor and multitemporal remote sensing data to monitor soil and vegetation functioning* (Baret, 2000).

La integración de las resoluciones espaciales, espectrales y temporales de los datos obtenidos por los sensores multiespectrales del programa Landsat, tiene como resultado la representación de los usos del suelo en una gran área con detalles espaciales únicos e indispensables para la monitorización y el desarrollo científico del área de estudio (Song *et al.*, 2001; Wulder *et al.*, 2008; Towsend *et al.*, 2009).

La detección de cambios temporales se estudia mayormente con sensores multiespectrales a bordo de satélites por la mayor disponibilidad de imágenes a lo largo del tiempo y es aplicable a cualquier área de estudio: detección de cambios en humedales (Nakayama *et al.*, 1997; Schmid, 2005b), viñedos (Lanjeri *et al.*, 2001), ecosistemas urbanos (Howarth y Boasson, 1983, Fung 1990; Stefanov *et al.*, 2001), ecosistemas áridos y semiáridos (Pilon, 1981; Elmore *et al.*, 2001). Sin embargo también existen estudios multitemporales con datos hiperespectrales como el realizado para el seguimiento de la revegetación de escombreras de minería (Levesque y Staenz, 2004). Asimismo, la combinación de ambos tipos de sensores es ventajosa para dichos estudios de monitorización y clasificación (Schmid *et al.*, 2004) Phinn *et al.*, 2008).

Resultados de estudios con sensores hiperespectrales en el campo de la ecología revelan el potencial que éstos ofrecen a la hora de clasificar superficies de suelo y vegetación; (Richard y Scott, 2004; Pignatti *et al.*, 2009). Numerosos estudios exploran la

reflectancia de la vegetación como indicador de contaminación del suelo (Lévesque y King, 1999; Reusen *et al.*, 2000; Kooistra *et al.*, 2001; Davids y Tyler, 2003; Kooistra *et al.*, 2004; Dunagen *et al.*, 2007).

A parte se han estudiado minas abandonadas con este tipo de sensores concretamente con AVIRIS como es el caso de las minas de Summitville en Colorado (Lawrence, 2001). Otro tema es el nuevo método que consiste en la combinación de datos hiperespectrales con datos digitales de elevación del terreno como el que se ha llevado a cabo en el sureste de Idaho para evaluar la contaminación producida por residuos de la minería (Petrie *et al.*, 2000; Mars y Crowley, 2003).

Las imágenes obtenidas por sensores radar también son un medio para determinar patrones a la hora de clasificar superficies debido a la sensibilidad del sensor detectando cambios en suelos afectados por la minería (Raucoules *et al.*, 2003), cambios estructurales y de humedad en la vegetación (Kaischke *et al.*, 1997), control de humedales (Wdowinski *et al.*, 2008) y en la caracterización de suelos salinos (Taylor *et al.*, 1996).

Las imágenes polarimétricas aportan más ventajas que las imágenes de radar convencionales, por lo que son frecuentemente utilizadas para el estudio y clasificación de diferentes superficies (McNairn *et al.*, 2002; Craig *et al.*, 1995). Los sistemas para investigación tienden a tener polarización múltiple (cuadri-polarización).

La combinación de datos ópticos, ya sean multiespectrales o hiperespectrales, con datos de radar es una técnica utilizada para clasificar componentes geológicos y suelos (Kruse, 1996; Kuplich *et al.*, 2000) además de superficies forestales (Lucas *et al.*, 2006).

En relación a la espectrometría de campo, el uso de esta técnica es fundamental por su gran potencial a la hora de determinar características en los materiales de la superficie. La importancia de la información adquirida por los espectrorradiómetros, usados tanto en campo como en laboratorio, cae en la alta definición de las firmas espectrales de los objetos a estudiar. Una gran ventaja de esta técnica es la interrelación que existe entre las características espectrales de los objetos y sus atributos biofísicos. Esta técnica es a menudo utilizada para calibrar y contrastar datos de campo cuando se está utilizando datos de origen multiespectral e hiperespectral. Kemper y Sommer (2002) han estimado la

contaminación por metales pesados tras el desastre de Aznalcóllar. Zhao *et al.* (2005) evaluaron suelos contaminados por mercurio midiendo el espectro de las muestras en laboratorio.

En España se han llevado a cabo numerosos estudios para asesorar el mantenimiento en áreas de minería y sus accidentes como el caso del distrito minero de Río Tinto (Antón-Pacheco *et al.*, 2001), el del vertido de la mina de Aznalcollar (López-Pamo *et al.*, 1999 y Antón-Pacheco *et al.*, 1999) y el caso de el área minera de Rodalquilar (Choe *et al.*, 2008).

Los primeros estudios de teledetección sobre el área minera de Almadén datan de la década de los ochenta con el objetivo de realizar un estudio de interpretación geológica a escala regional con ayuda de imágenes multiespectrales del satélite LANDSAT TM adquiridas el 27 de diciembre de 1982 y el 14 de julio de 1984 y del sensor multiespectral Daedalus AADS 1268 montado sobre una avioneta Piper Aztec que sobrevoló el área de estudio el 17 y 18 de julio de 1985. Dichos estudios fueron dirigidos por Minas de Almadén y Arrayanes (MAYASA S.A) en colaboración con la Universidad Técnica de Dinamarca (IMSOR) y el Departamento de Geología del Trinity College de Dublín (The application of Remote Sensing and Data Integration as an aid to mineral-exploration in the Almadén region, 1987).

Por otro lado, MAYASA S.A comenzó una línea de investigación diferente en la zona de Almadén, junto con Instituciones Europeas para la aplicación de la teledetección en la explotación minera y para la delimitación de suelos contaminados dentro del Primer Programa Marco de la Unión Europea (Knut *et al.*, 1987).

En conclusión, lo anteriormente descrito demuestra que la combinación de datos de distintos sensores facilita la detección de cambios en distintos ecosistemas en general y en espacios mineros como caso particular.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Situación geográfica

El distrito minero de Almadén ($38^{\circ}46'34.82''N$ $4^{\circ}50'13.28''O$) se encuentra en el suroeste de la Provincia de Ciudad Real, Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha (*Figura 3*) a unos 300 km al sur-suroeste de Madrid. Su extensión es aproximadamente unos 30 km² dentro de los 239.64 km² que ocupa el término municipal y presenta una altitud media de 600 m sobre el nivel del mar (400 m y 750 m cota mínima y máxima respectivamente).

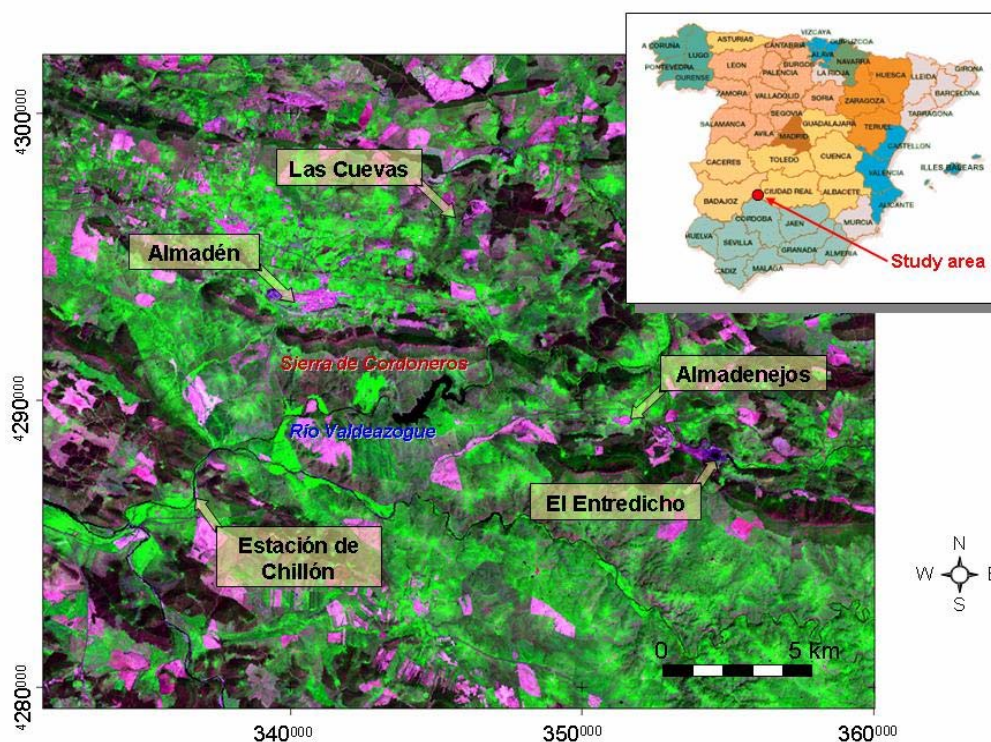


Figura 3. Localización del área de estudio. Imagen multispectral Landsat ETM+ (composición de falso color utilizando bandas de 2.2080, 0.8346 y 0.6614 μm en los canales rojo, verde y azul - RGB).

Desde el punto de vista geográfico, el distrito se localiza en el borde septentrional de la región de Sierra Morena, caracterizada por relieves de cierta altura que discurren según las directrices estructurales hercínicas, y que delimitan valles de anchura variable, que condicionan el encajamiento de la red fluvial.

La Comarca de Almadén comprende los siguientes municipios: Agudo, Alamillo, Almadén, Almadenejos, Chillón, Guadalmez, Saceruela y Valdemanco de Esteras. La comarca presenta dos zonas diferenciadas: la norte, pobre de recursos y poco poblada; y la sur, industrializada y centro de comunicaciones y servicios. Almadén es el centro de la comarca y el municipio más habitado, su densidad de población es de menor de 26.24 habitantes/km² con un total de 6288 habitantes (INE, 2008).

Climatología

Desde el punto de vista climático la región presenta un clima Mediterráneo con húmedos y fríos inviernos y secos y calurosos veranos. Según la estación meteorológica de las Minas de Almadén con datos de más de 30 años (Carrasco *et al.*, 2001), la temperatura media anual es de 16 °C y los rangos de temperatura oscilan entre 1-8 °C en enero y los 17-31 °C en julio (Higueras *et al.*, 2003), la precipitación media anual es de 587 mm.

El balance hídrico de la región muestra un excedente de agua en invierno y una falta de la misma durante los meses de verano. La media anual de evapotranspiración potencial es de 963 mm y llega a su máximo durante los meses de menos lluvia de verano. Esto es crucial para las reservas de agua del suelo que comienzan a mermar en verano, permaneciendo seco el suelo hasta las primeras lluvias del otoño. Según indica la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se trata de un régimen de humedad xérico (Schmid *et al.*, 2003).

Fisiografía, geología y metalogénia

La geología del Distrito minero de Almadén (*Figura 4*) presenta un entorno geológico con unos caracteres metalogénicos muy especiales, los cuales han sido siempre objeto de estudio como las mineralizaciones de la denominada Cuarcita del Criadero. Almadén se encuentra en la Zona Central Ibérica, la cual forma parte del Macizo Ibérico Hercínico, caracterizado por la presencia de una sucesión paleozoica fundamentalmente detrítica, afectada por las deformaciones tectónicas propias de la orogenia Hercínica, coincidiendo con una unidad geológica y tectónica dirección Este-Oeste denominada Sinclinal de Almadén. Además existe otra deformación de edad prehercínica que afecta

sólo a los materiales precámbricos. Existen rocas cuarcíticas que condicionan altos relieves que presentan una muy alta competencia diferencial frente a las rocas pizarrosas en que se encajan los valles, los cuales siguen la dirección oeste-este. En cuanto a la estratigrafía geológica, en el área de Almadén existen tres grupos de materiales litológicos bien diferenciados: precámbricos, paleozoicos y pliocuaternarios (Higueras *et al.*, 2000).

Existen numerosos afloramientos de rocas ígneas los cuales se localizan en distintos contextos geológicos: rocas volcánicas y subvolcánicas de edad Silúrico y Devónico, interestratificadas o intruidas en la serie paleozoica del Sinclinal de Almadén, rocas plutónicas y subvolcánicas de edad tardihercínica (Carbonífero), intruidas en rocas metasedimentarias paleozoicas y precámbricas del sector meridional de la Zona Centroibérica, rocas volcánicas lávicas y piroclásticas de edad Pliocuaternario de la región del Campo de Calatrava. Una variedad importante en el ámbito de la minería son las “Rocas Frailescas”, rocas piroclásticas de tamaño lapillo y composición basáltica, llamadas así por su coloración parda debido a la alteración de carbonato ankerítico.

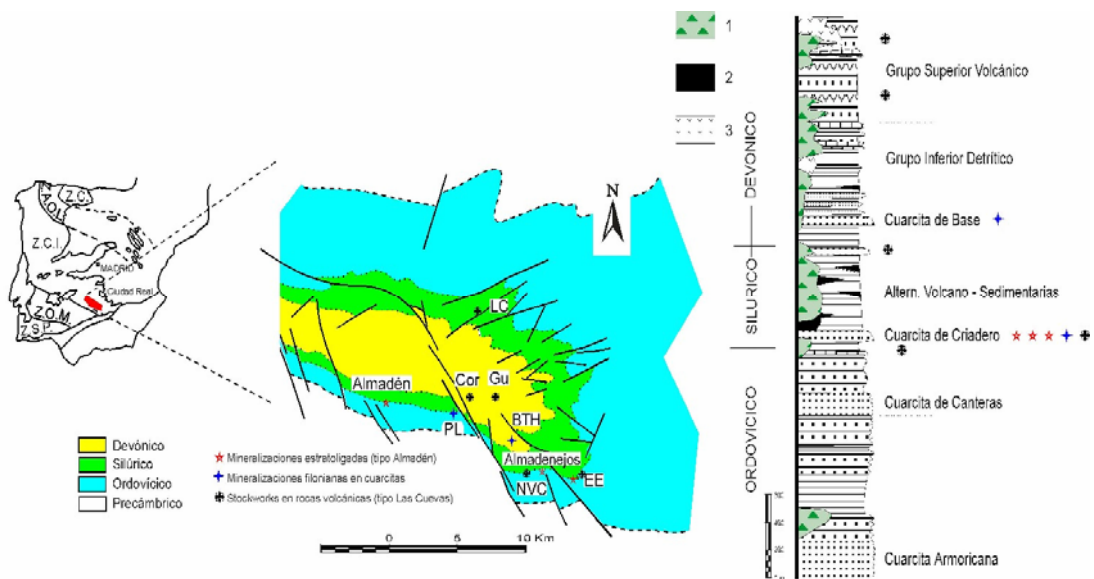


Figura 4. Situación geográfica, geológica y estratigráfica de los diferentes tipos de yacimientos del distrito de Almadén. LC: Las Cuevas. Cor: Corchuelo. Gu: Guadalperal. NVC: Nueva y Vieja Concepción. EE: El Entredicho (y Nuevo Entredicho) (Higueras 2009).

Los yacimientos de mercurio del distrito de Almadén pueden clasificarse en dos grandes categorías (Higueras *et al.*, 2003):

1. Yacimientos primarios, los encontrados en las minas de Almadén, El Entredicho y posiblemente La Vieja Concepción, encajados en la denominada "cuarcita del Criadero". La mineralización está constituida casi exclusivamente por cinabrio. No son frecuentes los cristales, pero sí son más comunes que en los yacimientos de tipo secundario. Destaca la presencia generalizada de la "roca Frailesca".
2. Yacimientos secundarios, localizados en las minas de Las Cuevas, Nuevo Entredicho y Nueva Concepción, encajados en rocas de tipología diversa. La mineralización en estos yacimientos se encuentra rellenando fracturas. En otros casos, se trata de simples indicios de cinabrio, que pueden estar claramente relacionados con fracturillas, rellenas por cuarzo-carbonatos-cinabrio, o pueden constituir reemplazamientos locales de las rocas ígneas.

Hidrología

La red fluvial de Almadén se inserta en la Cuenca hidrográfica del Guadiana, siendo el principal río que atraviesa la zona el Valdezogues (valle del mercurio), afluente del Zújar que lo es a su vez del Guadiana. El río Valdezogues y sus afluentes drenan el área del Distrito, recogiendo incluso las aguas residuales de las localidades mineras y metalúrgicas de Almadén y Almadenejos. En concreto, el Arroyo Azogado recoge las aguas que drenan la zona de la Mina de Almadén y el Complejo metalúrgico, mientras que el Arroyo de la Pila recoge las aguas residuales urbanas de la localidad de Almadén. Recientemente (años 2001-2003) se han puesto en funcionamiento sendas Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) en el curso de ambos arroyos (Higueras *et al.*, 2003).

Flora y fauna

Respecto a la vegetación, Almadén se encuentra dentro de la provincia corológica Lusoextremadurensis (*Figura 5*) establecida por Rivas-Martínez *et al.* (1977). La vegetación es fundamentalmente silicícola, se observa una gran variabilidad en el gradiente altitudinal. El paisaje vegetal más característico se compone de encinares en las dehesas bajas, bosque mediterráneo en las laderas de solana y melojares en las umbrías más húmedas y en las alturas supramediterráneas (Peinado Lorca y Martínez Parras). Las dehesas surgieron inicialmente como resultado de la intervención del hombre sobre

determinados bosques mediterráneos en los que el aprovechamiento mixto agrícola, ganadero y forestal ha conformado un característico mosaico de vegetación de formaciones arboladas abiertas. La composición florística presenta plantas hemirciptófitas, caméfitas y nanofanerófitas típicas del clima mediterráneo con influencia atlántica.

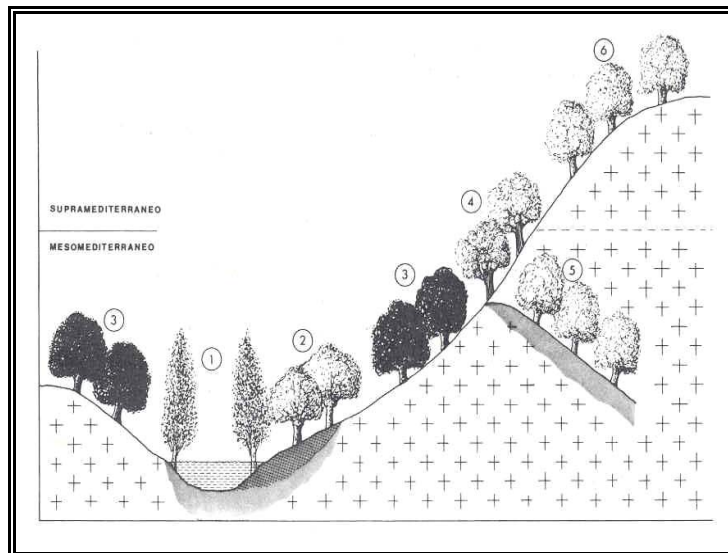


Figura 5. Catena potencial de la provincia Luso-Extremadurensis: 1. alisedas riparias; 2. fresnedas de las vegas silíceas; 3. encinares mesomediterráneos; 4. alcornoques mesomediterráneos subhúmedos; 5. melojares mesomediterráneos de umbrías; 6. melojares supramediterráneos.

Con relación a la fauna de la región, destacar el predominio de especies de carácter cinegético como el venado, la perdiz, el ciervo y el jabalí. Además se pueden encontrar especies de mamíferos como la gineta, uno de los predadores más abundantes en la comarca, la liebre mediterránea o el conejo de monte. Entre las aves podemos encontrar la abubilla, el alimoche y la cigüeña negra. Entre los anfibios y reptiles encontramos la rana común y varias especies de sapos en el primer grupo y varias especies de culebras y lagartijas en el segundo.

Suelos

Los suelos del área de estudio varían de aquellos poco desarrollados, encontrados en zonas de pendiente, a los que tienen un mayor desarrollo, encontrados en los valles. Según la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) se clasifican como Entisoles, Inceptisoles y Alfisoles con un régimen de humedad xérico (Schmid *et al.*, 2003). Los Entisoles son suelos poco desarrollados encontrados en pendientes que no presentan horizontes diagnósticos ni desarrollo de perfiles exceptuando el horizonte A. Los Inceptisoles presentan suelos menos evolucionados con algún perfil de diagnóstico como

puede ser el horizonte B cámbico. Los Alfisoles son suelos bien desarrollados que presentan un horizonte B argílico. Estos suelos son encontrados dentro de las principales áreas de pastizales y cultivos. A menudo es evidente la alteración de los suelos por actividades humanas tales como la minería a. Los suelos afectados son considerados como suelos antropogénicos (Wilding y Ahrens, 2001).

Usos del suelo

En relación a los usos del suelo, a parte de las actividades mineras, en el pasado una actividad frecuente era la obtención del carbón vegetal utilizando la madera de la encina de la región para la implementación en los procesos de extracción del mineral así como para el uso local. Además los principales usos del suelo de la comarca han sido pastizales para el ganado y el cultivo de legumbres y cereales. Las actividades cinegéticas, nuevos cultivos y el turismo rural son las alternativas a las tradicionales.

Las escasas pendientes del terreno hacen que los encinares sean aclarados y usados como dehesas ganaderas de ovino o, mejoradas con riego, para bovino. Así mismo, son frecuentes las repoblaciones con pinos resinero y, más raramente, con pino piñonero (Peinado Lorca y Martínez Parras, 1985). Además es de frecuente costumbre entre los habitantes de la comarca, la recogida de espárragos silvestres, siendo la esparraguera una planta acumuladora de mercurio, y setas, de hecho en Saceruela se celebran desde 1997 jornadas micológicas anuales.

5. METODOLOGÍA

5. METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico fue adaptado e implementado para determinar y monitorizar las características de la superficie afectadas por la minería y otras actividades alternativas en la región. La metodología puede dividirse en varias etapas bien diferenciadas (*Figura 6*). Selección de áreas de estudio y toma de muestras, adquisición y preprocesamiento de datos y finalmente, procesamiento de datos.

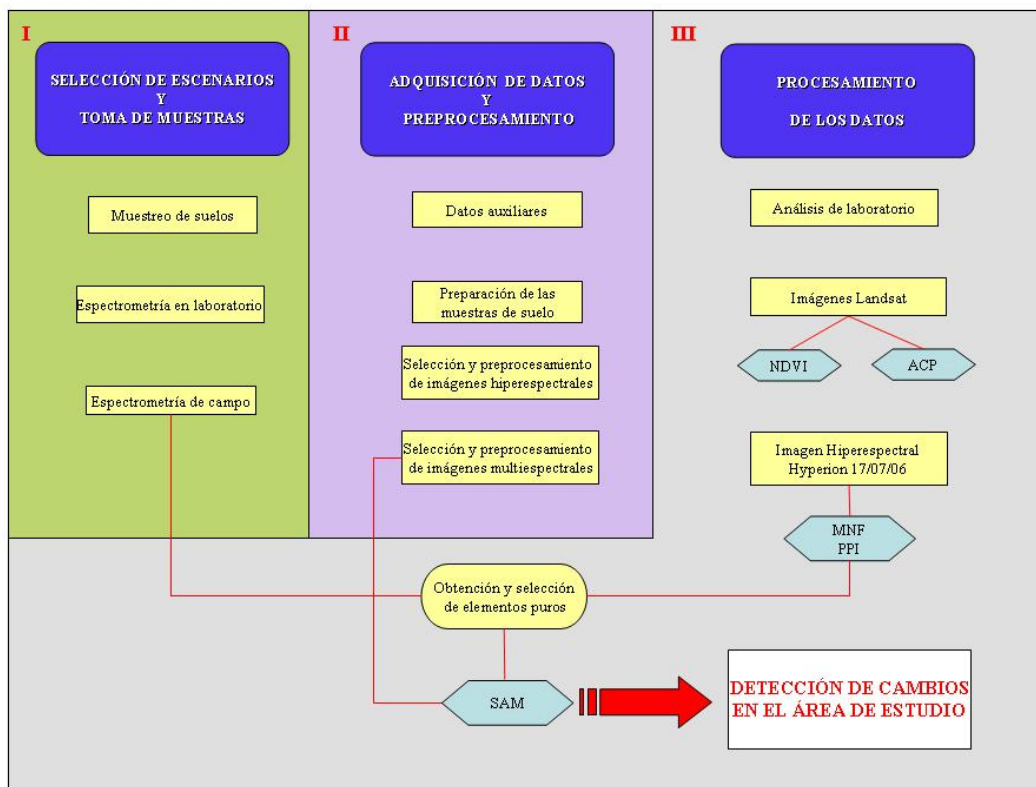


Figura 6. Cuadro general de la metodología.

5.1. SELECCIÓN DE PARCELAS Y TOMA DE MUESTRAS

Las parcelas de estudio seleccionadas en años anteriores, fueron elegidas de acuerdo a la clasificación botánica de la zona de trabajo. Además, la selección se centra en las zonas de extracción (Almadén, El Entredicho, Las Cuevas), en las zonas de procesamiento del mercurio (Estación de Chillón, Almadenejos), en las escombreras (Almadén, El Entredicho) y en puntos que engloban otros usos del suelo predominantes (*Figura 7*). Esto sirvió para caracterizar de forma general la zona de estudio.

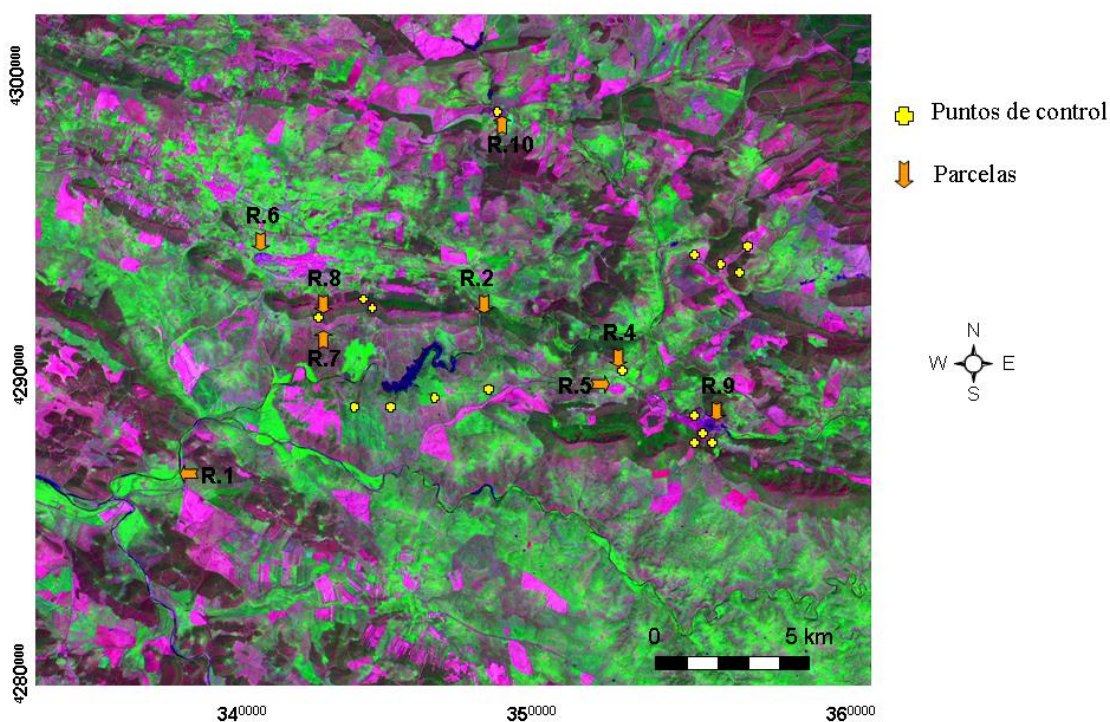


Figura 7. Localización de las parcelas y de puntos de control. Fusión de una imagen multiespectral Landsat ETM+ (composición de falso color utilizando bandas de 2,2080, 0,8346 y 0,6614 μm en los canales RGB) con su banda pancromática.

Las parcelas de estudio forman parte de un proyecto de investigación en proceso en el Grupo de Conservación y Recuperación de Suelos contaminados del CIEMAT que estudia la restauración ambiental de áreas afectadas por mercurio (*Tabla 1*).

Tabla 1. Parcelas del área minera de Almadén.

Parcelas	Coordenadas UTM- 30N (m)		Altitud (m)	Litología	Característica física	Descripción	Uso del suelo	Área (Ha)*
	Longitud	Latitud						
R1	336695	4286590	377	Areniscas y cantos rodados	Cuenca fluvial	Almadén, Río Valdeazogues	Ribera del río	1
R2	346850	4291800	435	Depósitos Coluviales	Ladera	Almadén, fuente del jardinillo	Bosque Meditrráneo	0.5
R4	352133	4289605	490	Pizarras y areniscas	Valle fluvial	Almadenejos, carretera a Gargantiel	Cultivo de cereales	1
R5	351300	4289600	505	Cuarcita	Terreno con suave pendiente	Almadenejos	Granja porcina	0.5
R6	339284	4293683	548	Cuarcita	Montículo artificial	Mina de Almadén	Escombrera	1
R7	341805	4291450	500	Pizarra y gravuaca	Ladera	Almadén, Sierra de Cordoneros, pastizal de Castilserás	Pastizal	1
R8	341747	4291699	547	Pizarra y gravuaca	Ladera	Almadén, cara sur de la Sierra de Cordoneros, área de Castilseras	Encinar	1
R9	355073	4288027	444	Cuarcita y areniscas	Talud	Almadenejos, mina de El Entredicho.	Área minera	1
R10	347261	4298651	529	Depósitos coluviales	Ladera	Almadén, mina de Las Cuevas	Área minera	0.5

En estas campañas previas de reconocimiento del área de estudio se anotaron las coordenadas de puntos de control de componentes y superficies que podrían ser de interés para el estudio, tales como áreas de bosque mediterráneo natural, zona de pastos, cultivos, escombreras, antiguas áreas de explotación minera,... Este reconocimiento no habría sido posible sin la colaboración del personal de MAYASA que en todo momento puso a nuestra disposición medios personales y materiales para poder acceder a las zonas mineras y a la propia finca de MAYASA

Durante el año 2008 se realizaron campañas de campo con la finalidad de caracterizar las condiciones ambientales de la región, observar características del paisaje, localizar y referenciar puntos de interés con la ayuda de un GPS, realizar un muestreo de suelos para analizar posteriormente en laboratorio sus condiciones físico-químicas y obtener firmas espectrales de distintas coberturas con el espectrómetro de campo GER 3700 (Figura 8).



Figura 8. Medida radiométrica con el espectrometro de campo GER 3700.

Las campañas de radiometría se llevaron a cabo del 1 al 3 de abril y del 28 de junio al 3 de julio en el término municipal de Almadén, con dos objetivos definidos, por un lado, la calibración del sensor hiperespectral Hyperion (intervalo espectral 400 nm a 2500 nm en 220 bandas) y ALI (480 nm a 235 nm en 10 bandas) del satélite EO-1 (Figura 1) normalizando valores de radiancia, TOA (*top of atmosphere*) y BOA (*bottom of atmosphere*) de superficies invariantes a los valores tomados con el radiómetro de campo GER 3700 (intervalo espectral de 300 a 2500 nm en 640 bandas) y por otro, la obtención de firmas espectrales de diferentes coberturas de suelo y vegetación para la creación de una librería espectral del área de estudio. En cada campaña de radiometría se completaba un cuaderno de campo, en el que quedaba todo anotado (localización mediante GPS, superficie, archivos con los espectros, fotografías y observaciones).

Este tipo de campañas deben realizarse en la fecha de posicionamiento del satélite sobre la zona y a lo largo de la misma debe haber ausencia de nubes para que las medidas sean correctas. El primer día de campaña se lleva a cabo un reconocimiento previo de la zona para la selección de lugares representativo. Los días de las pasadas del satélite sobre la zona de estudio (2 de abril, 28 de junio y 3 de julio) se comenzó la toma de medidas espectrales con el radiómetro para su calibración. Adicionalmente, se tomaron medidas para la creación de la librería espectral de diversas muestras durante los días de campaña en distintas parcelas escogidas previamente (*Tabla 2*).

El campo de visión estándar (FOV) del radiómetro es de 6,6°; es decir que a una altura de 1,75 m sobre la cubierta, el campo de visión observado es de 20,18 cm de diámetro. En cada uno de ellos fue necesario hacer un transecto perpendicular al sentido del sol de 6 medidas para obtener una representativa de la parcela La orientación del transecto de medidas será perpendicular al recorrido del sol, es decir en dirección Norte-Sur, evitando

sombrear la superficie medida ya sea por el operador o por cualquier elemento extraño (Jackson, 1980).

Tabla 2 Parcelas seleccionadas en las campañas de campo y su localización.

Campaña	Descripción	Longitud (E)	Latitud (N)
Abril 2008	Escombrera Mayasa	339337	4293742
	Suelo húmedo	342466	4290692
	Suelo seco	342516	4290630
	Embalse Castilseras	343629	4289579
	Cultivo de cebada	343131	4290847
	Dehesa	337389	4289635
	Cinabrio*	339963	4293462
Junio-Julio 2008	Suelo con rastrojo	343134	4290834
	Embalse Castilseras	343600	4289572
	Cultivo de maíz	342617	4290791
	Escombrera El Entredicho	354139	4288000
	Encina	352227	4286018
	Retama	352221	4286020
	Pradera natural	342945	4288049
	Pradera con gramíneas	346791	4289230
	Suelo desnudo	353084	4285894
	Marrubio	351320	4289572
	Suelo con marrubio	351312	4289574
	Jara	351039	4288735
	Embalse El Entredicho	354942	4288116
	Ribera embalse El Entredicho	353325	4288621
	Suelo desnudo	355603	4291864

*Medida tomada de un bloque de cinabrio situado en el Parque Minero de Almadén

La configuración de iluminación entre medidas de la superficie y panel de referencia no debe variar, por tanto, las medidas se deben hacer rápidamente, tomando una medida del panel de referencia previa a cada medida espectral. Las medidas se deben realizar en condiciones de radiación directa y bajo condiciones de iluminación estables (ausencia de nubes). La localización exacta de los lugares de medida se efectúa apuntando las coordenadas con un GPS (Global Positioning System), en este caso el modelo utilizado es GPS Garmin 76 CSX (Figura 9).



Figura 9. Utilización del GPS Garmin 76 CSX en campaña de campo de abril de 2008.

Antes de cada medida se realiza una medida del blanco (panel Spectralon®) midiendo de esta forma el espectro solar, se retira el blanco y se mide la superficie bajo observación (Figura 10). El radiómetro permite promediar un número determinado de medidas espectrales dentro de su intervalo corto de medida, en este caso se obtuvo el promedio de 4. Teniendo en cuenta la dependencia de la función de reflectividad con el ángulo de observación, las medidas espectrales se toman manteniendo la observación vertical sobre la superficie estudiada (nadir) y en horario de paso del satélite, colocando el radiómetro en vertical y orientándolos con los niveles de la rótula de anclaje al trípode. Con ello, aseguramos que aunque las condiciones de iluminación cambien a lo largo de la medida, la observación se mantiene (González-Piqueras, 2006).



Figura 10. Medida del blanco con el panel Spectralon®.

Paralelamente al trabajo con el espectrómetro de campo se recogieron muestras de suelo (*Figura 11*) en áreas seleccionadas para su posterior análisis físico-químico en el laboratorio.



Figura 11. Recogida de muestras de suelo durante una campaña de campo.

Una vez obtenidas y procesadas las muestras de suelo se midieron las firmas espectrales de cada una con el espectrómetro ASD FieldSpec3 (*Figura 12*).

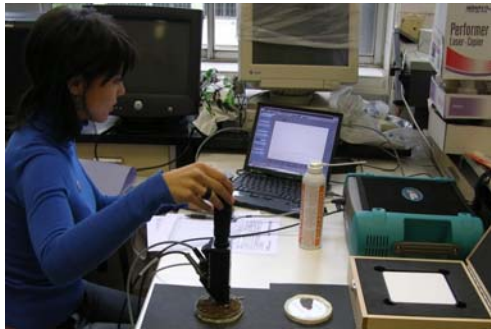


Figura 12. Medición de firmas espectrales en laboratorio.

5.2. ADQUISICIÓN DE DATOS Y PREPROCESAMIENTO

DATOS AUXILIARES

Se solicitaron datos meteorológicos a través de la Unidad de Información Meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se adquirieron datos de temperatura y precipitación desde enero de 1970 hasta abril de 2008 tomados en la estación de Almadén (minas), en el caso de las temperaturas y en las estaciones de Almadén (minas) y Gargantiel para los datos de precipitación. Con ellos se calcularon las temperaturas máximas y mínimas diarias y medias mensuales de, así como se realizó el cálculo de la precipitación diaria, media mensual y anual de los años de los que datan las imágenes.

En cuanto a la bibliografía cartográfica utilizada, se han adquirido mapas topográficos de escala 1:25.000 pertenecientes a Almadén, Almadenejos, Sierra de Alcudia, Guadalmez, Chillón, Fontanosas, Santa Eufemia, Sierra de la Osa, Saceruela, Valdemanco del Esteras, Valtravieso, Sierra de los Panales, Navalmedio de Mora. Además han sido de utilidad el Mapa Geológico de Almadén y el Mapa de Aprovechamientos y Cultivos ambos a una escala de 1:50.000.

También se obtuvieron datos de cartografía digital a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a una escala de 1:25000 y con una equidistancia entre curvas de nivel de 10 m. Los archivos adquiridos se procesaron con el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS 9.2 (Environmental Systems Research Institute Inc., 2008) para obtener mapas diferenciados de curvas de nivel, carreteras y caminos, núcleos de población y ríos.

Por último, mencionar la adquisición de ortofotos del visor SIGPAC 4.2 (M.A.P.A., 2007), con el programa DeCasp 1.3. El visor, ha sido de gran ayuda a la hora de tomar puntos de control para la georreferenciación de las imágenes satélite.

MUESTRAS DE LABORATORIO

La recogida de muestras de suelo tuvo lugar durante abril y julio del 2008. La localización de las muestras individuales se registró con un GPS. Los suelos se diferenciaron entre las muestras tomadas con cilindros para la posterior medida de humedad y densidad aparente del suelo y las muestras superficiales y subsuperficiales, las cuáles se recogieron en bolsas de plástico por separado, fueron etiquetadas, referenciadas y transportadas al laboratorio.



Figura 13. Muestras de suelo secadas al aire.



Figura 14. Muestra tamizada menor de 2 mm y fracción mayor de 2 mm.

Una vez en el laboratorio las muestras de las bolsas, al presentar humedad, se extendieron sobre papel de filtro, previamente referenciado con el correspondiente número de muestra, dejándolas secar al aire durante una semana, removiéndolos diariamente para facilitar su aireación y disgregando a mano los agregados existentes (Figura 13). Estando ya el suelo seco se tamizó con un diámetro de malla de 2 mm (Figura 14). Posteriormente se homogeneizó la muestra mediante técnicas de cuarteo y se guardó en 4 bolsas a partes iguales.

IMÁGENES SATÉLITE

1. Adquisición

Las imágenes de satélite fueron obtenidas en años diferentes dependiendo del tipo de sensor: multiespectral e hiperespectral.

- **Imágenes Multiespectrales**

Los datos de teledetección incluyen imágenes multiespectrales distintos sensores Landsat TM, Landsat ETM+ y ASTER y ALI.

Landsat

Estos sensores han sido desarrollados dentro del programa de observación de la tierra de la NASA desde 1975. El sensor TM (Thematic Mapper) está incorporado e el satélite Landsat 5 que fue lanzado el 1 de marzo de 1984 el cual describe una órbita heliosíncronica y polar a una altura de 705 km. El sensor ETM+ está incorporado en el satélite Landsat 7, lanzado el 15 de abril de 1999 y cuya órbita es similar a la del anterior. Ambas plataformas proporcionan una resolución temporal de la superficie cada 16 días, con escenas individuales de 185x185 km y adquieren datos en continuo.

Tabla 3 Características espectrales de los sensores TM y ETM+ (Lillesand y Kiefer, 2000).

Banda	Localización espectral	Longitud de onda (μm)	TM resolución espacial (m)	ETM+ resolución espacial (m)
1	VNIR	0,45-0,52	30	30
2		0,52-0,60	30	30
3		0,63-0,69	30	30
4		0,76-0,9	30	30
5	SWIR	1,55-1,75	30	30
6	TIR	10,4-12,5	120	60
7	SWIR	2,08-2,35	30	30
8 (ETM+ pan)	Visible a infrarrojo cercano	0,52-0,90		15

Cada sensor consta de 6 bandas en el espectro VNIR y SWIR con valores de reflectancia y con la misma resolución espacial de 30 m (Tabla 3). La resolución espacial de la banda del

infrarrojo térmico (TIR) difiere entre los dos sensores, en el ETM+ pasa a ser de 60 m contra los 120 del TM. Además el nuevo sensor tiene una banda pancromática con una resolución espacial de 15 m. La resolución radiométrica es de 256 (8 bits/píxel).

La adquisición de las imágenes tuvo lugar el 23 de marzo del 1989 (Nasa Landsat Program, 2003a) y 22 de abril de 2002 (Nasa Landsat Program, 2003b) (*Figura 15*) y fueron obtenidas a través de la University of Maryland (1997). A finales de 2008, la NASA ha anunciado la disponibilidad de descarga gratuita de las imágenes Landsat (NASA, 2008), lo que permitirá un exhaustivo análisis multitemporal del área de estudio.

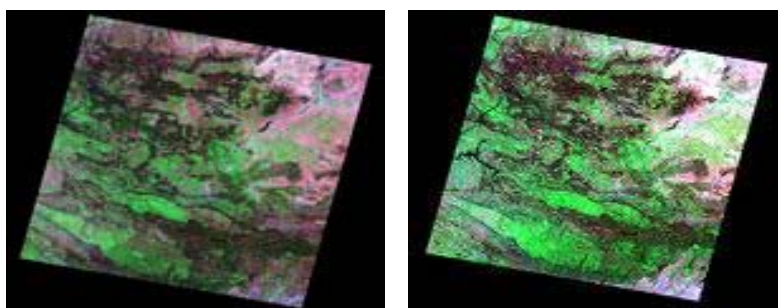


Figura 15. Imágenes Landsat TM 25/03/89 y ETM+ 22/04/02.

En este estudio de monitorización se han utilizado las 6 bandas en el rango óptico. Los datos fueron obtenidos en formato Geotiff nivel 1G, es decir corregidos radiométrica y geoméricamente, con las características que se detallan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Detalles de los metadatos de las imágenes TM y ETM+.

Parámetros	TM	ETM+
Identificación	5,20103E+15	7,20103E+15
Fecha de adquisición	25/03/1989	22/04/2002
Latitud central	38° 53' 00'' N	40° 20' 02'' N
Longitud central	4° 12' 00'' W	3° 51' 41'' W
Camino	201	201
Fila	33	32
Cobertura de nubes (%)	0	0
Elevación solar	44,24 °	55,65 °
Azimut solar	136,61 °	138,62 °

El porcentaje de nubosidad en ambos casos fue nulo y la calidad de la imagen se ha clasificado como muy buena y escena perfecta relativamente.

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

Este sensor es el único de alta resolución espacial lanzado a bordo del satélite Terra de la NASA en diciembre de 1999 como parte de su sistema global de observación de la tierra (EOS AM1, Earth Observing System) y en colaboración con el Ministerio de Economía e Industria japonés (METI).

El satélite Terra describe una órbita heliosíncrona, 30 minutos después del satélite Landsat (NASA, 2008) a una altura de 705 km. Proporciona una resolución temporal de la superficie cada 16 días, con una cobertura de la superficie de 60x60 km.

El instrumento cuenta con tres subsistemas ópticos separados y 15 bandas repartidas en ellos: cuatro en el radiómetro visible e infrarrojo cercano, seis en el infrarrojo de onda corta y cinco en el infrarrojo térmico con 15, 30 y 90 m de resolución espacial respectivamente (*Tabla 5*)

Tabla 5 Características espectrales del sensor ASTER.

Bandas	Localización espectral	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial	Resolución radiométrica
1	VNIR	0,52 - 0,60	15	8 bits
2		0,63 - 0,69		
3N		0,76 - 0,86		
3B		0,76 - 0,86		
4	SWIR	1,60 - 1,70	30	
5		2,145 - 2,185		
6		2,185 - 2,225		
7		2,235 - 2,285		
8		2,295 - 2,365		
9	2,360 - 2,430			
10	TIR	8,125 - 8,475	90	12 bits
11		8,475 - 8,825		
12		8,925 - 9,275		
13		10,25 - 10,95		
14		10,95 - 11,65		

Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron adquiridas los días 8 de abril de 2006 y el 30 de junio de 2007 (*Figura 16*). Los datos fueron obtenidos del U.S Geological Survey, National (USGS) Center for Earth Observation and Science (EROS) en nivel L2, es decir corregidos radiométrica y geoméricamente (Peña, 2007), con las características que se detallan en la *Tabla 6*.

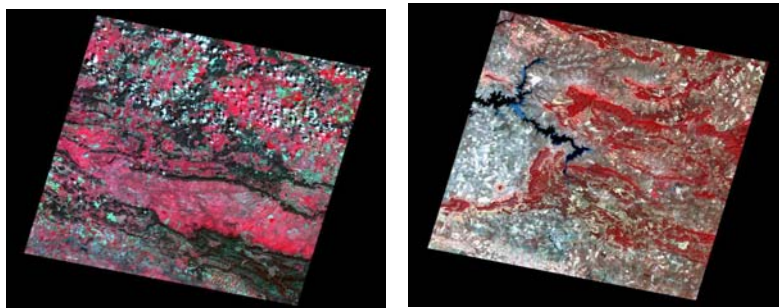


Figura 16. Imágenes ASTER del 08/04/06 y 30/06/07.

Tabla 6. Detalles de los metadatos de las imágenes ASTER

Parámetros	ASTER 8/04/06	ASTER 30/07/2007
Identificación	AST_L1A.003:2033841561	AST_L1A.003:2044422813
Fecha de adquisición	08/04/2006	30/06/2007
Latitud central	38° 44' 41" N	38°48'39"N
Longitud central	4° 34' 00" W	4°59'31"W
Camino	201	201
Fila	33	33
Cobertura de nubes (%)	3	0
Elevación solar	55.598104°	69.177318°
Azimut solar	152.513898°	134.760414°

ALI (Advanced Land Imager)

Es un sensor, creado con la finalidad de seguir la continuidad de los datos Landsat, que se encuentra a bordo del satélite EO-1, el cual fue lanzado el 21 de noviembre del año 2000 por la NASA. Dicho satélite describe una órbita cercana a la polar heliosincrónica a una altura de 705 km. Proporciona una resolución temporal de la superficie cada 16 días.

Tabla 7. Características espectrales del sensor ALI

Bandas	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial	Localización espectral
Pancromática	0,48 – 0,69	10	VNIR
MS - 1'	0,433 – 0,453	30	
MS - 1	0,45 – 0,515	30	
MS - 2	0,525 – 0,605	30	
MS - 3	0,63 – 0,69	30	
MS - 4	0,775 – 0,805	30	
MS - 4'	0,845 – 0,89	30	
MS - 5'	1,2 – 1,3	30	SWIR
MS - 5	1,55 – 1,75	30	
MS - 7	2,08 – 2,35	30	

Tiene 10 bandas, de las cuales la primera es pancromática con 10 metros de resolución espacial y 9 multiespectrales con una resolución de 30 m, 6 en el VNIR y 3 en el SWIR (Tabla 7). La longitud de la toma es variable 37 km x 42 km ó 37 km x 180 km.

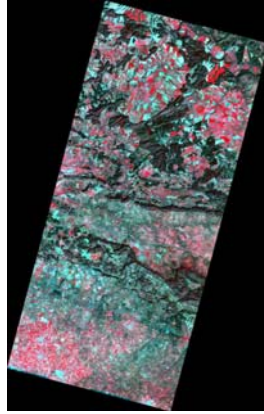


Figura 17. Imagen ALI del 02/07/08.

La imagen se adquirió el 2 de abril del 2008 (*Figura 17*) y fue obtenida a través del del U.S Geological Survey, National Center for Earth Observation and Science (EROS) en formato L1R, es decir corregidas radiométricamente (*Tabla 8*).

Tabla 8. Detalles de los metadatos de la imagen ALI.

Parámetros	ALI
Identificación	EO12010332008093110KI
Fecha de adquisición	02/04/2008
Latitud central	38.7517 N
Longitud central	-4.8347 W
Camino	201
Fila	33
Cobertura de nubes (%)	0- 9
Elevación solar	141.380544°
Azimut solar	50.184363°

- **Imágenes hiperespectrales**

Hyperion EO-1

El sensor hiperespectral Hyperion está instalado en la plataforma satelital EO-1. La cobertura de la superficie tomada es de 7.7x42 km o 7.7x185 km dependiendo del formato de la imagen (estándar o extendida) y una resolución espacial de 30 m.

Este sensor posee 242 bandas, de las cuales 44 no están calibradas, que cubren un rango espectral de 400 a 2500 nm con una anchura de bandas de 10 nm (*Tabla 9*).

Tabla 9. Características espectrales del sensor Hyperion.

Bandas	Localización espectral	Longitud de onda (µm)	Estado
1 – 7	VNIR	0,356 - 0,417	No calibrado
8 – 55		0,426 - 0,895	Calibrado
56 - 57		0,913 - 0,926	Calibrado (solapamiento con SWIR 77-78)
58 - 70		0,936 - 0,1058	No calibrado
71 - 76		0,852 - 0,902	No calibrado
77 - 78	SWIR	0,912 - 0,923	Calibrado (solapamiento con VNIR 56-57)
79 - 224		0,933 - 0,2396	Calibrado
225 - 242		0,2406 -0,2578	No calibrado

Las imágenes fueron adquiridas el 17 de julio de 2006 y el 2 de abril, 28 de junio y 3 de julio del año 2008 (*Figura 18*) y obtenidas a través del del U.S Geological Survey, National Center for Earth Observation and Science (EROS) en formato L1R, es decir corregidas radiométricamente (*Tabla 10*).

Tabla 10. Detalles de los metadatos de las imágenes Hyperion.

Identificación	EO1H201033 2006198110PZ	EO1H201033 2008093110KI	EO1H201033 2008180110KK	EO1H201033 2008185110PC
Fecha de adquisición	17/07/2006	02/04/2008	28/06/2008	03/07/2008
Latitud central	38,75°	38,7517°	38,7372°	38,723°
Longitud central	-4,7056°	-4,8347°	-4,769°	-4,7 °
Camino	201	201	201	201
Fila	33	33	33	33
Calidad de la imagen	9	9	9	9
Cobertura de nubes (%)	0-9	0-9	0-9	0-9
Elevación solar	62,017475	50,104441	65,058666	63,969821
Azimut solar	121,300111	141,095728	121,408708	120,164990

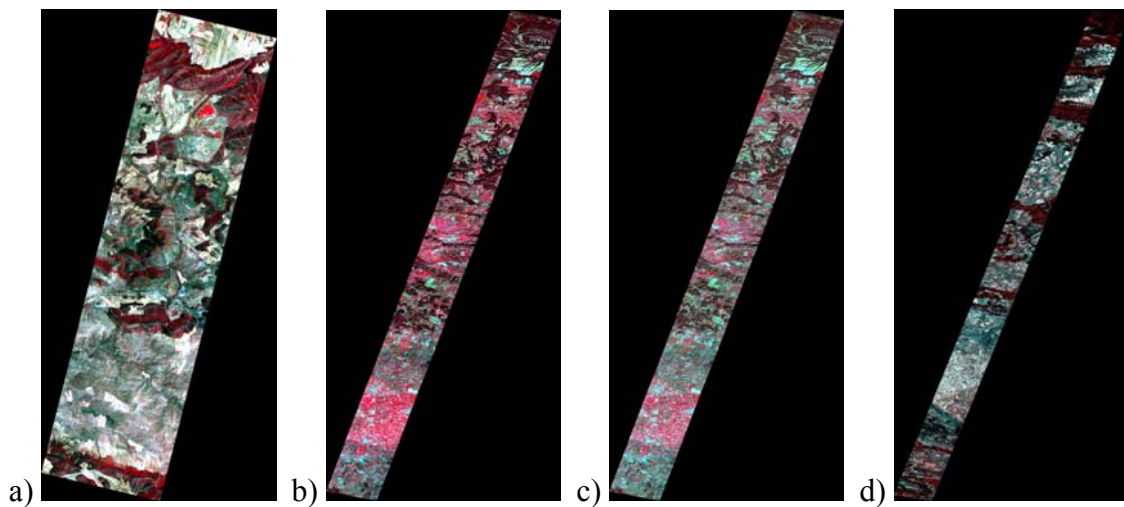


Figura 18. Imágenes Hyperion adquirido en diferentes fechas a) 17/07/06; b) 02/06/08; c)28/06/08 y d) 03/07/08

2. Preprocesamiento

Una fase importante de la metodología es el preprocesamiento de los datos de las imágenes en la cual se realizan varias correcciones previas necesarias para el posterior procesamiento de las mismas. Para ello se ha utilizado el programa ENVI versiones 4.4 y 4.5 (ITT Visual Information Solutions, 2009).

Imágenes Landsat

En primer lugar se realizó la conversión radiométrica para obtener los datos de radiancia, a partir de valores digitales, de cada una de las bandas de ambas imágenes. Posteriormente se obtiene un archivo con extensión .BSQ (*Band Sequential Format*) tras ajustar los datos de radiancia e introducir datos de longitudes de onda en cada banda, tras ello se crea un archivo con extensión .BIL (*Band Interleaved by Pixel Format*) para poder introducirlo en la aplicación que permite hacer la corrección atmosférica.

El motivo para realizar la corrección atmosférica es que la energía radiada por la superficie debe recorrer una cierta distancia antes de ser detectada por un sensor. Durante el recorrido, el flujo radiante es esparcido y absorbido por los aerosoles atmosféricos, lo que modifica la radiancia que finalmente registran los detectores del sensor desde su objetivo (Lillesand y Kiefer 2000) Este efecto puede ser minimizado mediante la aplicación de un modelo de corrección atmosférica sobre las bandas de la imagen y así, con la aplicación FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) obtenemos la imagen con valores de reflectancia. Posteriormente se redimensiona la imagen y se eliminan los valores negativos obtenidos en la imagen con valores de reflectancia.

A continuación, con la herramienta FLAASH se obtuvieron los valores de reflectancia (Aronoff, 2005). Posteriormente se redimensiona la imagen y se eliminan los valores negativos obtenidos en la imagen con valores de reflectancia.

Para conseguir mayor exactitud de los datos geométricos, las imágenes fueron ajustadas geoméricamente con datos de ortofotos utilizando el visor SIGPAC 4.2 (M.A.P.A., 2007). Se aplicaron 20 y 22 puntos de control (GCPs), distribuidos homogéneamente en toda la imagen ETM+ y TM, respectivamente, y se obtuvo un error medio cuadrático (RMS) de 0.325 y 0.283 píxeles. En el caso de la imagen pancromática de ETM+ se seleccionaron 20

GCPs obteniendo un RMS de 0.209 píxeles. Con los GCPs correspondientes, las imágenes individuales se ajustaron geométricamente aplicando una función polinómica de primer grado. Tras ello se vuelve a redimensionar la imagen estando lista ya para su procesamiento.

Imágenes ASTER

Las imágenes ASTER fueron obtenidas en datos de reflectancia por lo que el primer paso de esta etapa fue el cambio al sistema de proyección UTM desde datos WGS-84 a European 1950.

En segundo lugar, las imágenes fueron ajustadas geométricamente con datos de ortofotos utilizando el visor SIGPAC 4.2 (M.A.P.A., 2007). Se aplicaron 25 puntos de control (GCPs) repartidos homogéneamente para ambas imágenes y se obtuvo un error medio cuadrático (RMS) de 0,356 y 0,366 píxeles para las imágenes del 2006 y 2007 respectivamente. Con los GCPs correspondientes, las imágenes individuales se ajustaron geométricamente aplicando una función polinómica de primer grado. Tras ello se redimensiona la imagen estando lista ya para su procesamiento.

Imagen ALI

Para empezar se realizó un mosaico para obtener una imagen completa del área, ya que dicha imagen es obtenida como cuatro imágenes por separado y deben ensamblarse para poder continuar con los siguientes procesos. Posteriormente al no poseer la imagen obtenida bordes homogéneos, se redimensiona para poder georreferenciarla.

Tras ello, la imagen fue ajustada geométricamente con datos de ortofotos utilizando el visor SIGPAC 4.2 (M.A.P.A., 2007). Se aplicaron 100 puntos de control (GCPs) repartidos homogéneamente en toda la imagen y se obtuvo un error medio cuadrático (RMS) de 0,374 píxeles. Con los GCPs correspondientes, la imagen fue ajustada geométricamente aplicando una función polinómica de primer grado.

Imágenes Hyperion

En primer lugar se comprobó el estado de las bandas para clasificarlas y utilizarlas en los procesos posteriores. Después, se aplicaron correcciones cosméticas en la imagen (Mather, 2004), las cuales constan de dos partes: localizar bandas perdidas y eliminar un posible efecto de rayado en la imagen.

El primer efecto puede ser producido por errores en el escaneo o muestreo del equipo, en la transmisión o grabación de los datos de la imagen, o en los medios de reproducción del contenido de los datos como por ejemplo un CD-ROM o una cinta magnética. Sea cual sea el origen del fallo, estas líneas perdidas se suelen mostrar horizontales, blancas o negras y representadas por valores de píxel secuenciales ya sea 0 o 255. Como esta información ya se ha perdido, para su corrección se utiliza una herramienta de preprocesamiento que reemplace estos valores con el resultado de una media de los valores de las líneas adyacentes.

El segundo efecto puede ser debido a fallos electromecánicos en el sensor, observándose en la imagen un patrón de líneas que la distorsionan. La herramienta utilizada del programa corrige este error calculando la media de las líneas implicadas y normaliza cada línea a su respectiva media.

En consecuencia de este paso de preprocesamiento, el conjunto de datos de las imágenes resultantes tienen menos bandas y un menor rango espectral que las imágenes originales (*Tabla 11*).

Tabla 11. Datos de imágenes Hyperion tras la corrección cosmética.

Imagen	Nº Bandas	Rango espectral (μm)
Hyperion 17/07/06	160	0,42682 - 0,23652
Hyperion 02/04/08	170	0,42682 - 0,23652
Hyperion 28/06/08	169	0,42682 - 0,23753
Hyperion 03/0708	175	0,42682 - 0,23955

Tras esta primera etapa, la imagen adquirida el 17 de julio de 2006 en datos de radiancia, fue corregida atmosféricamente para obtener los datos de reflectancia en la superficie con la herramienta FLAASH.

Por último todas las imágenes fueron ajustadas geométricamente con datos de ortofotos utilizando el visor SIGPAC 4.2 (M.A.P.A., 2007). Se aplicaron distinto número de puntos de control (GCPs) homogéneamente para cada imagen y como resultado diferentes valores de error medio cuadrático (RMS) como se puede comprobar en la *Tabla 12*. Con los GCPs correspondientes, las imágenes individuales se ajustaron geométricamente aplicando una función polinómica de primer grado. Tras ello se redimensionaron la imagen quedando listas ya para su procesamiento.

Tabla 12. Datos de georreferenciación para las imágenes Hyperion.

Imagen	GCP's	RMS
Hyperion 17/07/06	75	0,401
Hyperion 02/04/08	60	0,399
Hyperion 28/06/08	60	0,381
Hyperion 03/0708	65	0,371

5.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Tras realizar la fase previa de preparación de las muestras, se procedió a realizar los ensayos de laboratorio, todos ellos por duplicado. Los parámetros analizados hasta el momento han sido pH, conductividad eléctrica y materia orgánica total. Los procedimientos seguidos en el trabajo de laboratorio se encuentran en el Anexo procedimientos de laboratorio incluido al final del documento.

pH

La determinación del pH del suelo se ha realizado mediante pH-metro en una suspensión suelo-agua (1:2,5) y en otra suelo-KCl (1:2,5) siguiendo el método propuesto por el ISRIC y recopilado por Van Reeuwijk (2002).

Conductividad eléctrica

La determinación de la conductividad en el suelo se ha realizado midiendo con conductímetro en relación suelo-agua (1:2,5 y 1:5) según el método de Dahnke y Whitney (1988).

Materia orgánica total

La determinación de la materia orgánica por vía húmeda se realizó mediante el método de oxidación con dicromato en medio ácido (Walkley y Black, 1934) mediante el cual sólo se valora la materia orgánica más activa.

Carbonatos

La determinación de los carbonatos totales se ha llevado a cabo mediante el método volumétrico del calcímetro de Bernard (Duchafour, 1975), consistente en una bureta medidora de los gases que se desprenden en la reacción de la muestra con ácido clorhídrico. El contenido en carbonatos de la muestra se calcula en función del volumen

desprendido mediante la misma operación realizada con una cantidad conocida de carbonato cálcico.

Óxidos de hierro libres y amorfos

Los óxidos libres se obtuvieron mediante extracción con ditionito-citrato sódico (Holmgren , 1967).

Los óxidos amorfos se midieron mediante extracción con oxalato amónico ácido (pH3) en oscuridad- Reactivo de Tamm (Schwertmann 1964 y McKeague y Day (1966).

DATOS AUXILIARES

Con la cartografía digital 1:25.000 se generó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a través de la creación de un TIN (*Triangulated Irregular Network*) empleando la herramienta del 3D Analyst del ArcGIS 9.2.

IMÁGENES SATÉLITE

Con el procesamiento de las imágenes satélite se pretende llegar a la fase culminante del análisis digital de las imágenes: la clasificación digital. Con ella las imágenes multibanda se convierten en otra imagen del mismo tamaño y características de las originales, con la diferencia de que en las últimas el valor de cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel. A partir de estas imágenes se genera fácilmente cartografía temática, así como un inventario estadístico del número de píxeles, y por tanto de superficie, asignados a cada categoría (Chuvienco, 2006).

Puede hablarse de dos tipos de categorización: la no supervisada y la supervisada. La primera, no implica ningún conocimiento del área de estudio. En este tipo de clasificaciones, los niveles digitales de la imagen forman agrupaciones (*clusters*) con un comportamiento espectral homogéneo por lo que se centra más en interpretar y no en conseguir resultados. En este trabajo se han empleado diferentes técnicas, según las imágenes empleadas, del segundo grupo, ya que se parte de un conocimiento previo de la zona de estudio gracias a las campañas de campo, lo que permite delimitar sobre la imagen

áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda (Chuvieco, 2006).

Las imágenes multiespectrales Landsat fueron las primeras en adquirirse dentro de este trabajo, por lo que se realizó una clasificación preliminar menos exhaustiva para poder adquirir un conocimiento previo de la zona de estudio con las mismas. Con ellas también se realizó el análisis del cociente o índice de vegetación normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) y un análisis de componentes principales (ACP).

Las características espectrales de las diferentes cubiertas superficiales del área de estudio, fueron identificadas con los datos proporcionados por el sensor hiperespectral Hyperion. El método de descomposición espectral es uno de los enfoques importantes para el análisis y la clasificación de conjuntos de datos multi/hiperespectrales (Plaza *et al.*, 2002).

Los procedimientos de procesamiento de la imagen utilizados han sido los siguientes: *Minimum Noise Fraction* (MNF), *Pixel Purity Index* (PPI) y N-dimensional visualizer, que se explica más adelante. Lo que se pretende con los métodos anteriormente mencionados es la determinación de componentes puros o miembros terminales en la imagen: *endmembers*. Dichos componentes son los tipos característicos de cubierta que explican la señal reflejada hacia el sensor y se asume que el resto de situaciones que se presenten en la imagen son mezcla de ellos (Chuvieco 2006).

El propósito de la identificación de los componentes puros derivados de la imagen hiperespectral fue el de combinarlos posteriormente con los datos multiespectrales usando el clasificador angular Spectral Angle Mapper (SAM) y poder obtener así una clasificación supervisada del área de estudio.

Imágenes Landsat

Un paso previo dentro del procesamiento de estas imágenes fue la fusión de los datos multiespectrales (en este caso LANDSAT ETM+ del 22/04/02 con las bandas 7, 4, 2 de la longitud de onda 2,2080, 0,8346 y 0,6614 μm respectivamente) de mayor resolución espectral y menor resolución espacial, con la imagen pancromática, de mayor resolución espacial, del sensor ETM+, mediante la transformación (Vrabel, 1996) de color normalizado (Brovey) y utilizando una composición de falso color. El objetivo de las

técnicas de fusión de imágenes es integrar de una forma coherente información procedente de diferentes imágenes, de tal forma que la imagen final fusionada conserve la información más relevante de las imágenes fuentes. Con ello se obtuvo una imagen con mayor resolución espacial permitiendo una mejor visualización e identificación de las diferentes áreas.

Con el NDVI se transformaron los datos multiespectrales de la imagen ETM+ en una imagen compuesta por una única banda que representa la distribución de la vegetación. Los índices de vegetación son transformaciones desarrolladas para caracterizar las cubiertas vegetales reforzando la contribución espectral debida a la vegetación y minimizando la influencia de otros factores como el suelo, las condiciones de la iluminación y la atmósfera, que puedan introducir interferencias en la señal radiométrica. En el caso de NDVI se utiliza para discriminar masas vegetales y su vigor (cuanto mayor sea el contraste entre las reflectividades de la banda infrarroja y roja, mayor es el vigor vegetal).

En este caso, el análisis consiste en el cociente de los valores digitales de los píxeles de la banda roja del visible (0.6-0.7 μm) con los de la banda del infrarrojo cercano (0.7-1.1 μm), en el caso concreto de la imagen ETM+ las bandas 3 y 4 respectivamente. Los valores representados en los píxeles de la imagen indican el estado de la vegetación, los valores altos indicarán vegetación en vigor y los bajos indicarán vegetación enferma, senescente o con poca densidad.

El siguiente paso fue la realización de la clasificación supervisada aplicando el clasificador de máxima probabilidad (Richards, 1999) con el programa ENVI 4.4. Para determinar las regiones de interés (ROIs), se seleccionaron puntos de interés en el campo con ayuda de fotografías aéreas de agosto de 2002 del visor SIGPAC 4.2 (*Figura 19*). El trabajo de campo se realizó entre junio del 2006 y 2007. Cabe destacar que la imagen de ETM+ fue obtenida en abril 2002; sin embargo, basándose en las fotografías aéreas de agosto de 2002, se ha comprobado la posible existencias de cambios.

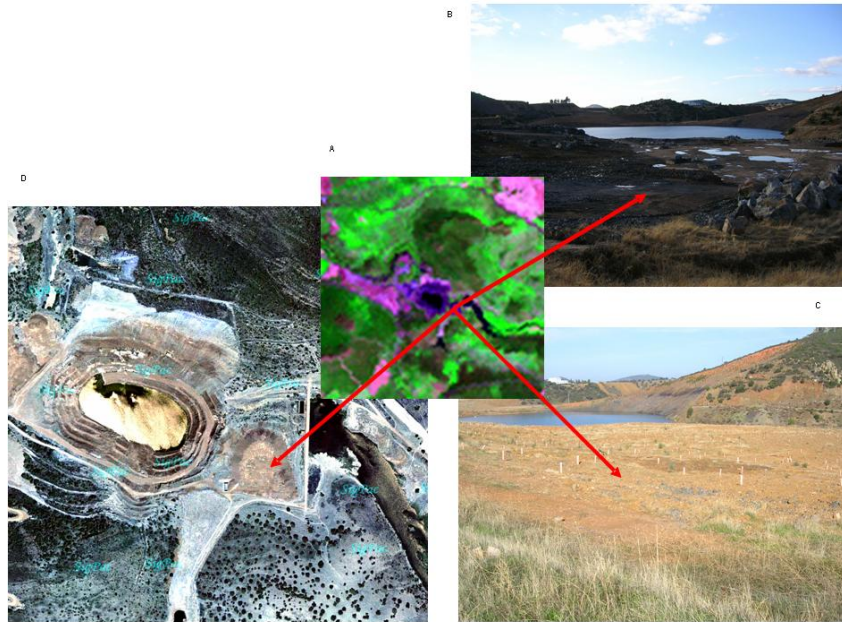


Figura 19. Punto de interés para determinar áreas de interés (ROI) en el área minera a) composición de falso color para la imagen ETM+ (utilizando bandas en 2.2080, 0.8346 y 0.6614 μm en los canales RGB) con el apoyo de b) fotografía aérea de agosto de 2004 y fotos en c) octubre de 2004 y d) octubre 2006.

Se ha logrado observar una detección inicial de los cambios en la cobertura del suelo comparando las distintas fechas obtenidas por los sensores de Landsat. En este caso en particular, entre la adquisición de ambas imágenes han transcurrido 13 años. Para analizar con mayor profundidad dichas variaciones, se realizó un análisis de componentes principales (ACP).

El ACP es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados y construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para

reducir la dimensionalidad de datos. Además las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales.

Tal herramienta es útil para la comparación global de las escenas de las imágenes, puede verse la aplicación de esta técnica con más profundidad en diversos estudios Singh (1989), y Siljeström y Moreno (1995). Se aplicó la correlación basada en esta técnica en ambas imágenes, la cual incluía la estandarización de los datos. Los datos estadísticos fueron valorados para poder obtener una idea global de los cambios producidos.

Imagen Hyperion del 17/07/06

a. MNF

Para reducir la dimensionalidad de la imagen, se aplica la transformación de Fracción de Mínimo Ruido, la cual está basada en la aplicación de dos Análisis de Componentes Principales (ACP) consecutivos, debido a la inhabilidad de este último para separar la señal y el ruido de una manera fiable. El primer paso calcula la matriz de covarianza del ruido, usada para eliminar abundancias y re-escalar el ruido de los datos. El paso siguiente es una transformación de componentes principales estándar donde las bandas transformadas son categorizadas según incrementa su varianza. (Lee *et al.*, 1990). Este paso fue aplicado para determinar la dimensionalidad inherente a los datos de la imagen, es decir, separar la señal del ruido, y reducir los requerimientos computacionales para los siguientes procesos (Boardman y Kruse, 1993).

Tal transformación, se llevó a cabo de forma separada para cada banda, estimando el ruido a partir de los componentes más marginales de los autovalores, centrando el análisis en aquellos que retienen la mayor parte de la información original (Green *et al.*, 1988) reduciendo en este caso el número de bandas de Hyperion de 160 a 20 componentes.

b. Pureza de Píxeles

El Índice de Pureza de Píxeles (PPI) ha sido utilizado para encontrar los píxeles más puros, en términos espectrales, en los datos de la imagen hiperespectral (Boardman *et al.*, 1995). Éste calcula por repetición proyecciones en un espacio n-dimensional sobre un

vector unitario aleatorio. Los puntos que aparecen representados en los vértices serán los píxeles con los valores más extremos de reflectancia y por lo tanto los más puros. Para localizar, identificar y agrupar los píxeles anteriormente comentados se ha utilizado la herramienta interactiva del programa ENVI 4.5 visor n-D (Boardman, 1993).

En este caso, el método fue aplicado con un número de 60000 iteraciones y con un valor umbral de 3 y en cada una se van anotando los píxeles extremos. Con ello se obtiene una imagen formada por píxeles cuyos valores corresponden al número de veces que el píxel ha sido contado como extremo o puro. Aquellos que en la imagen presentan la firma espectral más pura (los cuales suelen coincidir con los componentes puros que posteriormente son utilizados en el clasificador SAM), son identificados y separados de los que representan diferentes características de la superficie.

Otra alternativa utilizada para la obtención de componentes puros ha sido la de incluir una curva espectral obtenida mediante el espectrómetro de campo GER 3700 en la campaña de campo de abril de 2008. La curva en particular refleja el espectro característico del mineral cinabrio. Esta práctica es muy común en la exploración minera (Kruse *et al.*, 1993) y con ello se consigue controlar la pureza de los valores de entrada, evitando efectos anómalos a la cubierta, como las condiciones topográficas o de sustrato, ya que los espectros se toman en situaciones muy controladas (Chuvienco 2006).

c. Clasificador angular

El siguiente paso consistió en la identificación espectral de los materiales que componen los elementos puros, para su almacenamiento en forma de librería espectral contrastándolos con los datos de campo para identificar y verificar el tipo de cubierta que ellos representan. Para ello se utilizó la herramienta *Spectral Analyst* del programa ENVI 4.5.

Las herramientas de *Spectral Libraries* son de gran utilidad a la hora de construir y visualizar nuevas o existentes librerías espectrales. El programa ENVI cuenta con varios archivos de librerías espectrales de diferentes fuentes. Fue utilizada la librería espectral de archivo *usgs_min.sli* (librería espectral de minerales proveniente del USGS (USGS, 2007), en ella se encuentra la firma espectral del cinabrio (*Figura 20*) entre otras de diversos

minerales. Dicha firma espectral se comparó con la tomada en campo con el radiómetro para verificar una correcta adquisición espectral del mineral.

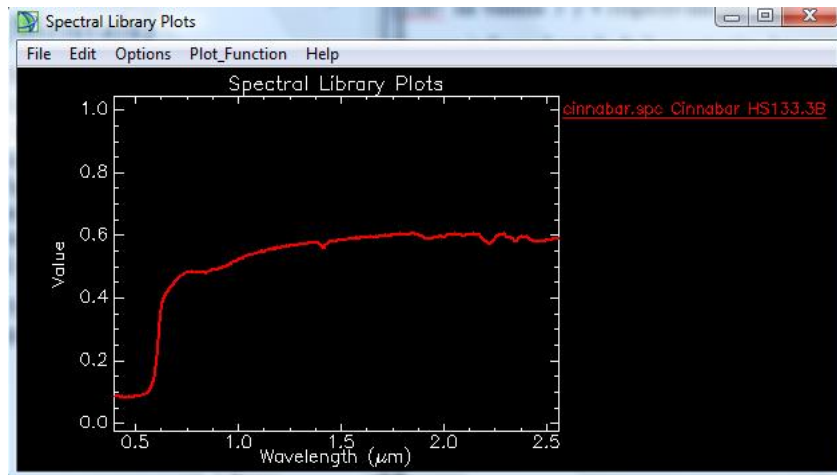


Figura 20. Curva espectral del cinabrio proveniente de una librería espectral (USGS) visualizada con el programa ENVI 4.4.

Finalmente se hizo una selección de los componentes puros derivados de la imagen para utilizarlos en el siguiente paso: la combinación con los datos espectrales multitemporales para la detección de cambios en la zona de estudio utilizando el clasificador angular (*Spectral Angle Mapper* - SAM).

En este tipo de clasificación supervisada, se utiliza un método cuyo algoritmo determina la similitud entre espectros desconocidos (tomados de la imagen o de bibliotecas espectrales) calculando su desviación angular, asumiendo que forman dos vectores en un espacio n -dimensional (siendo n el número de bandas disponibles). Como esta técnica calcula la dirección relativa entre espectros es prácticamente independiente de las condiciones de iluminación, debido a que éstas hacen referencia a la longitud del vector y no a su posición, por lo que los ángulos no cambian aunque cambie el albedo (Mather, 2004). Los ángulos más pequeños representan las coincidencias más cercanas a los espectros de referencia.

Primeramente, se hace una clasificación inicial utilizando un único ángulo para todos los componentes puros. Después se introducen valores distintos para cada componente puro y así poder ajustar mejor la clasificación de cada componente puro.

Este último paso integra toda la información de los pasos anteriores. Como se ha mencionado, uno de los objetivos del procedimiento metodológico es el uso de series temporales de datos de resolución media con el fin de monitorizar y detectar cambios en el área minera de Almadén. Para llevar a cabo tal análisis se han recopilado imágenes de diferentes sensores que cubren un intervalo temporal de 18 años en los cuales el área de estudio ha sufrido importantes cambios y los sensores han ido mejorando notablemente.

Las series de datos temporales provienen de imágenes tomadas por los sensores Landsat TM, ETM+ y ASTER adquiridas el 29 de marzo de 1989, el 22 de abril de 2002, el 8 de abril de 2006 y el 30 de junio de 2006 respectivamente. El área seleccionada recoge dentro de su perímetro importantes enclaves de la minería en Almadén como lugares de extracción del mineral y escombreras.

El conjunto de componentes puros provenientes de la imagen hiperespectral fueron redimensionados espectralmente para su ajuste con los datos multiespectrales correspondientes y así poder utilizarlos en el clasificador angular. En el caso de las imágenes ASTER sólo fueron utilizadas las primeras 8 bandas, las que se encuentran dentro del rango de los datos hiperespectrales.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un importante resultado de este trabajo ha sido la compilación de un conjunto de datos georreferenciados de diferentes fuentes, escalas y fechas. Esto facilitó el trabajo de identificación de las características de las cubiertas superficiales (suelo, vegetación y agua) afectadas por las antiguas actividades mineras, así como la localización de áreas que están siendo rehabilitadas y zonas que están siendo modificadas por actividades alternativas en la región. La combinación de diferentes escalas ha sido fundamental para la detección de cambios y la monitorización final del área minera. Además, los resultados se presentan en distintos niveles de trabajo incluyendo el realizado en campo, las medidas de radiometría, los análisis de laboratorio y el procesamiento de datos de las imágenes de satélite hiperespectral y multispectral.

6.1. TRABAJO DE CAMPO Y RADIOMETRÍA

Las campañas de campo que tuvieron lugar antes del 2008, han servido para caracterizar parcelas de especial interés en el área minera. Estas parcelas forman parte del escenario general del proyecto general del Grupo de Conservación y Recuperación de Suelos del CIEMAT (*Tabla 1*). Los datos existentes han permitido conocer mejor las características del entorno y así poder caracterizar mejor las áreas de interés del presente estudio.

Tabla 13. Parcelas seleccionadas dentro del estudio general del proyecto.

Parcela	P4	P5	P9
Localización	NE de Almadenejos	Almadenejos	Mina de El Entredicho
Altitud (m.s.n.m)	435	508	415
Litología	Pizarras y áreniscas	Cuarcitas	Cuarcitas y areniscas
Geomorfología	Valle fluvial	Terreno de suave pendiente	Talud
Uso del suelo	Cultivos	Granja	Antigua área minera
pH	5,6	6,9	4,4
Materia orgánica (%)	2,4	5,7	2,0
Conductividad (dS m⁻¹)	0,2	0,9	1,2
Carbonatos (%)	0	1,3	0
CIC (cmol/kg)	20,1	17,7	12,1
Arcillas (%)	42	34	4
Limos (%)	13	10	38
Arena (%)	45	56	57
Textura	Arcilloso arenoso	Franco	Franco arenosa
Hg Total (mg kg⁻¹)	21,3 ± 1,1	550 ± 58	122,4 ± 7,5
Hg Soluble (mg kg⁻¹)	0,0850 ± 0,0055	1,040 ± 0,033	< 0,02
Hg Intercambiable (mg kg⁻¹)	0,281 ± 0,024	4,4 ± 2,3	1,20 ± 0,10

Los suelos de la región presentan diferentes características y diversas concentraciones de mercurio (*Tabla 13*). Esto debe analizarse mediante trabajo de laboratorio, debido a que la teledetección tiene sus límites y no es posible analizar la concentración de mercurio en suelos mediante el análisis digital de las imágenes de satélite. Sin embargo, es posible detectar contaminación de mercurio u otros metales pesados en suelos analizando el estado de la vegetación mediante teledetección (Mars y Crowley, 2003).

Otro dato de especial importancia en los estudios del área minera de Almadén es el valor de concentración de mercurio en los suelos los cuales han sido llevados a cabo por el Grupo de Conservación y Recuperación de Suelos del CIEMAT. El contenido total de mercurio total varía entre 5 y 1710 mg kg⁻¹ (Schmid *et al.*, 2005). La parcela P.5 de la tabla coincide con las muestras de suelo obtenidas en las campañas de 2008 nombrada como Almadenejos R.5, en ella el valor de mercurio total es de 550,13 ± 57,64 mg kg⁻¹.

Las campañas de campo de 2008 tuvieron la finalidad de caracterizar in situ las condiciones ambientales de la región, observar características del paisaje, localizar y referenciar puntos de interés con la ayuda de un GPS, realizar un muestreo de suelos para analizar posteriormente en laboratorio sus condiciones físico-químicas y obtener firmas espectrales de distintas coberturas con el espectrómetro de campo GER 3700 (*Figura 21*).

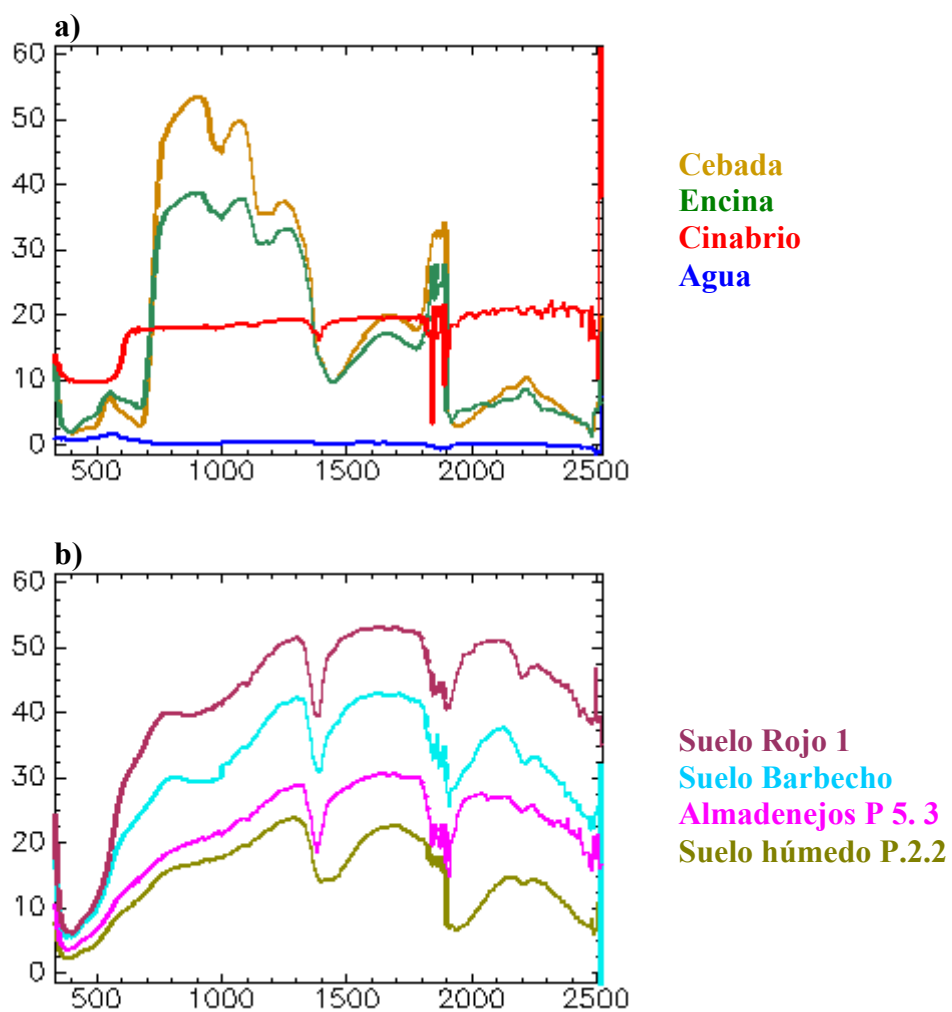


Figura 21. Curvas espectrales obtenidas en las campañas de radiometría del año 2008 para a) vegetación, mineral y agua y b) diferentes suelos.

6.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los análisis para las muestras de suelos recogidas durante las campañas de abril y junio de 2008 muestran los siguientes resultados (*Tabla 14*).

Tabla 14. Resultados de análisis de laboratorio

	pH		Conductividad (dS m ⁻¹)	% Materia Orgánica	% Fe ₂ O ₃		% Carbonatos
	H ₂ O	KCl			Libres	Amorfos	
Suelo seco P.1.4	4,7	4,3	0,5	2,4	1,99	0,28	1,33
Suelo seco P.1.6	4,5	4,3	0,9	2,1	2,10	0,28	1,66
Suelo húmedo P.2.2	6,2	5,8	0,4	2,4	2,23	0,24	1,45
Suelo húmedo P.2.5	5,6	5,1	0,3	1,9	2,84	0,33	1,60
Escombrera MAYASA P.1.2	6,9	5,1	0,1	0,3	3,32	0,24	2,38
Escombrera MAYASA P.1.4	6,7	4,8	0,6	0,4	3,50	0,25	2,33
Escombrera MAYASA P.1.6	5,9	4,3	0,1	0,8	2,12	0,25	2,22
Suelo Barbecho	5,8	5,2	0,1	1,9	2,90	0,40	2,12
Almadenejos P.5.1	7,3	7,1	0,3	8,7	3,73	0,24	1,79
Almadenejos P.5.2	6,8	6,6	0,3	12,2	3,37	0,24	1,43
Almadenejos P.5.3	6,6	6,5	0,2	12,1	4,80	0,61	2,79
Suelo agrícola 1	4,9	3,8	0,1	1,2	4,61	0,62	1,69
Suelo agrícola 2	5,8	4,7	0,1	1,1	5,73	0,44	1,54

Los valores de pH muestran valores que varían entre las siguientes condiciones: fuertemente ácido (4,5-5,0), medianamente ácido (5,6-6,0), ligeramente ácido (6,1-6,5), neutro (6,6-7,3). El pH H₂O es el pH actual y el pH en KCl es el potencial si la diferencia entre ambos es inferior a 0.6 implica baja acidez de cambio (Porta *et al.*, 1999) como ocurre en las siguientes parcelas: suelo húmedo, suelo seco, Almadén campo de cultivo y Almadenejos. Mientras que si es mayor implica que ese suelo es tendente a acidificarse como ocurre en las parcelas: Escombrera MAYASA P.1.2, P.1.4 y P.1.6, Suelo rojo 1 y Suelo rojo 2.

Los valores de conductividad calculados en una relación suelo agua 1:5 para todas las parcelas, muestran que los suelos son normales, es decir no presentan salinidad (Porta *et al.*, 1999).

El porcentaje de materia orgánica en los suelos muestreados es muy bajo en general. El valor más bajo se ha medido en la parcela nombrada como Escombrera MAYASA la cual está en proceso de restauración. Por el contrario el porcentaje más alto lo encontramos en la parcela de Almadenejos, debido a una elevada acumulación de restos orgánicos de

origen animal. Esta parcela, en la que antiguamente estaban localizados los hornos de la mina, actualmente es ocupada por ganado de vecinos del pueblo de Almadenejos.

Los óxidos de hierro libres oscilan entre el 2-6%, mientras que los que presentan estructura amorfa no representan ni el 1% del suelo.

En referencia al contenido en carbonatos, la tabla muestra el promedio de tres medidas distintas sobre cada muestra, debido a la gran variación debido a la influencia de presión y temperatura al realizar las mediciones. El contenido en carbonatos de las parcelas es bajo, ya que oscilan entre 1-5% (Consejo de Abonado, 1992), indicativo de la escasa presencia de calizas en el suelo. El contenido en carbonatos es importante ya que influye sobre el pH del suelo, la CIC y la retención y movimiento de metales pesados (Shang y Zelazny, 2008). La presencia de carbonatos puede interferir en diferentes análisis (Óxidos de Hierro, Arcillas, Difracción de Rayos X, destrucción de materia orgánica) (Kunze y Dixon, 1986), por lo que es necesario su eliminación.

6.3. ANÁLISIS DE LA CARTOGRAFÍA DIGITAL

A partir de las curvas de nivel adquiridas a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se construyó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con el programa ArcGIS 9.2 (*Figura 22*). Gracias a dicho modelo podemos discriminar con facilidad la altitud de cualquier zona de interés superponiendo una imagen del área de estudio. En él se puede observar a mitad de la fotografía en blanco la característica tectónica este-oeste conocida como Sinclinal de Almadén.

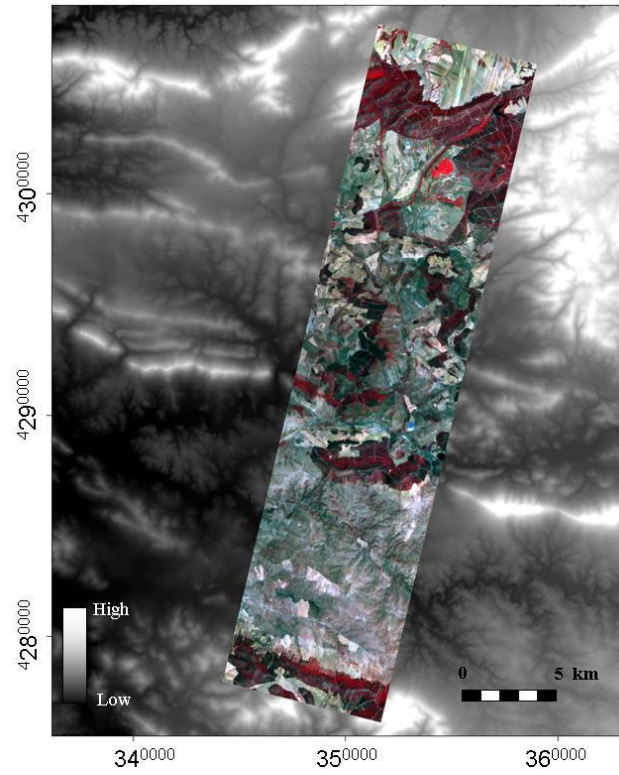


Figura 22. Modelo Digital de Elevaciones con la imagen Hyperion del 17/07/06 superpuesta delimitando el área de estudio.

6.4. ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES CON LANDSAT ETM+ Y TM

En los inicios del presente trabajo, los datos de los que se disponía eran los multiespectrales de las imágenes Landsat. El primer objetivo fue el de analizar su capacidad a la hora de discriminar vegetación, así como detectar cambios entre dos imágenes de distintas fechas. Para ello se realizó un Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y un Análisis de los Componentes Principales (ACP)

En el NDVI realizado con la imagen Landsat ETM+ del 22/04/02 (*Figura 23*), los valores altos (píxeles claros) indican vegetación en vigor, ya que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, mientras que estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano. Los valores bajos (píxeles oscuros) indican vegetación enferma, senescente o con poca densidad, ya que su reflectividad será inferior en el infrarrojo cercano y aumentará paralelamente en el rojo (al tener menor absorción clorofílica). Por ello, se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda roja del espectro y la del infrarrojo cercano. Se observa gran cantidad de vegetación en vigor debido a que la época en la que se tomó la imagen era primavera.

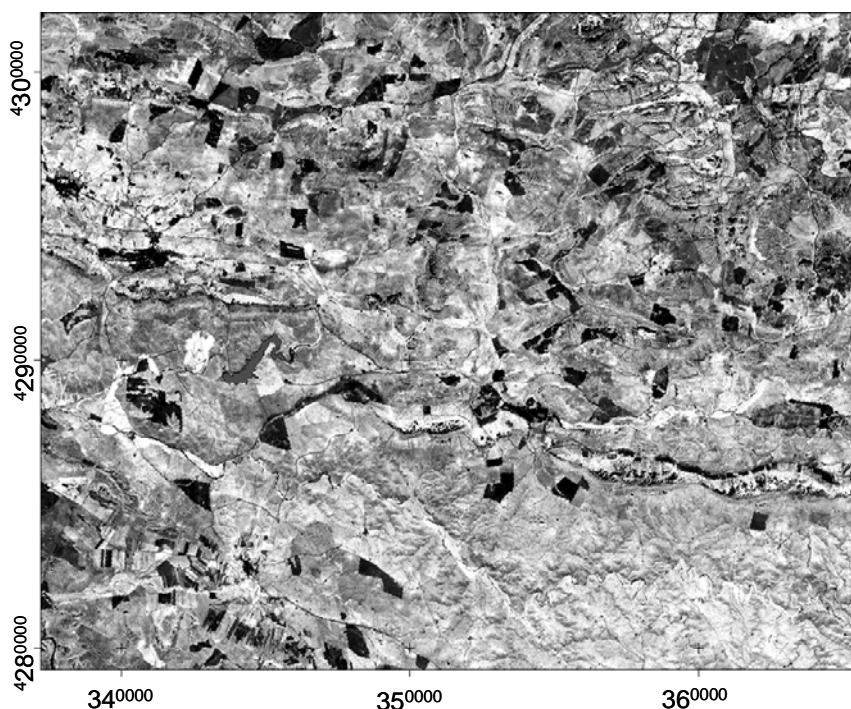


Figura 23. NDVI de la imagen ETM+ del 22/04/02.

Los resultados de una detección inicial de los cambios en la cobertura del suelo aplicando el ACP sobre los datos de Landsat TM y ETM+ son presentados de forma estadística (Tabla 15) y visualmente (Figura 24).

Tabla 15. Resultados de CP, autovectores para cada uno de los componentes principales de las imágenes TM y ETM+.

Eigenvector	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10	PC 11	PC 12
Band 1	0.313	0.280	0.127	-0.058	-0.392	-0.280	0.597	0.301	0.337	-0.099	0.026	-0.027
Band 2	0.324	0.292	0.060	-0.096	-0.258	-0.256	-0.171	-0.126	-0.581	0.290	-0.404	-0.186
Band 3	0.315	0.279	0.224	0.067	-0.112	-0.195	-0.456	-0.266	0.090	-0.156	0.555	0.315
Band 4	0.159	0.129	-0.663	-0.660	-0.022	0.050	-0.151	-0.077	0.207	-0.094	-0.011	-0.009
Band 5	0.314	0.286	0.035	-0.117	0.439	0.448	0.275	0.251	-0.330	0.211	0.250	0.235
Band 6	0.303	0.277	0.270	0.098	0.329	0.291	-0.194	-0.121	0.427	-0.201	-0.431	-0.308
Band 7	0.295	-0.325	0.008	0.052	-0.427	0.517	0.227	-0.523	0.040	0.154	0.065	-0.018
Band 8	0.323	-0.287	-0.119	0.161	-0.199	0.173	-0.182	0.402	-0.252	-0.590	-0.205	0.236
Band 9	0.305	-0.346	0.019	0.005	-0.043	-0.005	-0.326	0.463	0.176	0.422	0.269	-0.428
Band 10	0.138	0.216	-0.628	0.701	0.063	-0.077	0.038	-0.052	0.088	0.164	-0.001	0.012
Band 11	0.309	-0.307	-0.057	-0.019	0.412	-0.361	0.280	-0.285	-0.220	-0.331	0.212	-0.380
Band 12	0.288	-0.367	0.061	-0.067	0.261	-0.310	0.026	-0.074	0.234	0.317	-0.341	0.576
Eigenvalue	6.550	2.989	1.453	0.326	0.287	0.143	0.090	0.067	0.035	0.026	0.019	0.014
% Variance	54.586	24.911	12.109	2.713	2.389	1.196	0.748	0.560	0.289	0.220	0.161	0.118

Los autovectores derivados de la matriz de correlación miden la concentración de la variabilidad en los datos en 12 direcciones ortogonales. Sobre el 54% de la variabilidad en los datos recae en la dirección definida por el primer componente principal (CP). Además, cerca del 97,9 % de la variabilidad se encuentra en los 6 primeros componentes principales. Los CPs del 7 al 12 tan sólo contienen el 2,1 % de la variación en los datos. Por ello, no merece destacar a dichos CPs, sin embargo no pasa así en todos los estudios (Mather, 2004).

Cabe recordar, que ambas imágenes se adquirieron en primavera, cuando la vegetación es predominante. Además, las características observadas en los datos se relacionan fuertemente con el vigor de la vegetación. La columna 1 da la relación entre el PC1 con las 12 bandas; cada banda tiene un valor positivo parecido que indica que existe un solapamiento en la información de los distintos canales. Hay un contraste entre las bandas 4 y 10 del infrarrojo del TM y ETM+, presentando valores más bajos que los de las demás bandas. El PC2 muestra un contraste entre los datos de la imagen TM (bandas de 1 a 6) con los de la imagen ETM+ (bandas de 7 a 12). En el caso de la imagen ETM+, la banda del infrarrojo (banda 10) es positiva e indica que la vegetación es dominante. Contrastando los valores positivos de TM y los negativos de ETM+ se aprecian diferencias con el suelo

y posiblemente sean diferencias de su humedad. En el PC3 se destaca el contraste con las bandas restantes. El PC4 presenta valores de contraste entre las bandas del infrarrojo de ambos sensores mostrando cambios entre las áreas con y sin vegetación en las dos fechas. En el PC5 contrastan las bandas del infrarrojo medio de ambas imágenes (bandas 5, 6, 11 y 12) con las bandas del visible y del infrarrojo, las cuales corresponden a coberturas de suelo desnudo. PC6 contrasta los valores entre las bandas azules de las dos imágenes (banda 1 y 7) y hace referencia al contenido de humedad.

Los PCs seleccionados se representan en una imagen de escala de grises indicando diferencias entre las dos imágenes en relación a píxeles claros u oscuros. La interpretación de las imágenes resultantes y la asociación de características particulares observadas requieren de un minucioso análisis de las estadísticas, así como de las imágenes de las dos fechas

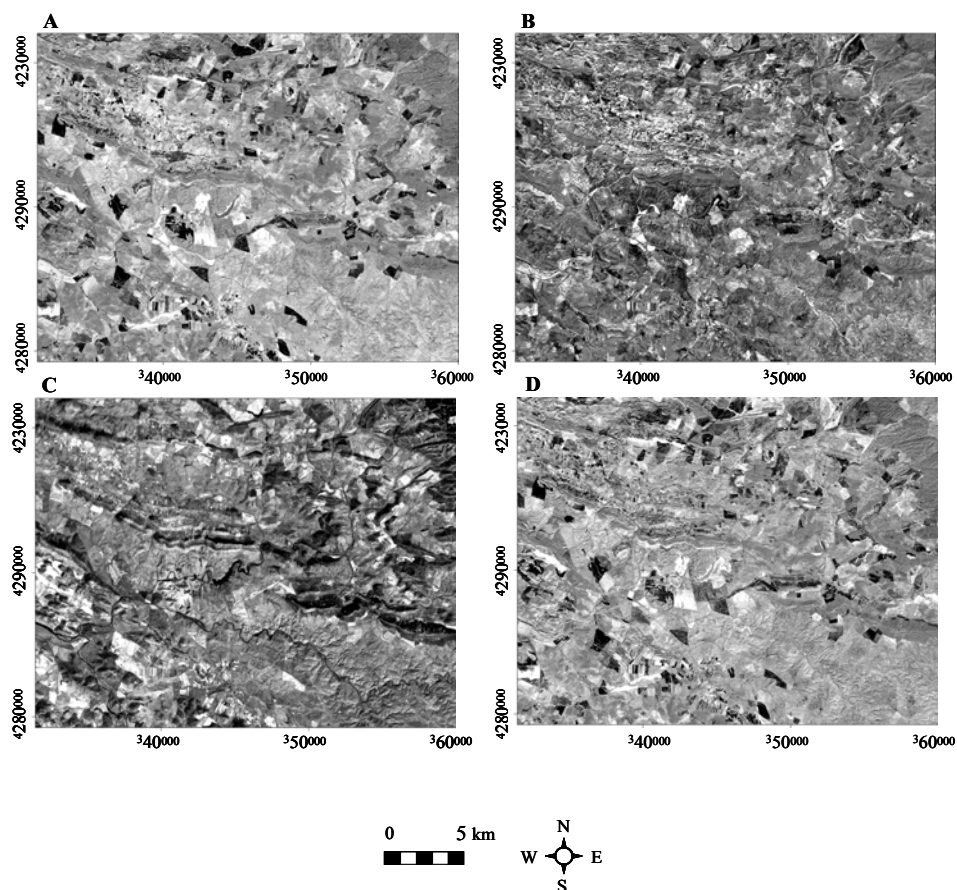


Figura 24. Imágenes de componentes principales para a) PC2, b) PC4, c) PC5 y d) PC6.

El PC2 (Figura 24a) detecta cambios en varias características del suelo. Los píxeles brillantes indican presencia de vegetación en la imagen del sensor ETM+ y suelo desnudo

en la imagen TM. En contra, los píxeles oscuros indican vegetación en TM y suelo desnudo para ETM+, además de cambios en las áreas mineras. En este caso, el movimiento y la rehabilitación de las escombreras alrededor de las minas de El Entredicho y Las cuevas son bien apreciados. El PC4 (*Figura 24b*) muestra la diferencia de vegetación entre las dos fechas. Los valores oscuros representan áreas con vegetación en TM y zonas con ausencia de vegetación en ETM+. En cambio, los valores brillantes indican lo contrario, vegetación en la imagen ETM+ y ausencia de vegetación en TM. Al PC5 (*Figura 24c*) se le relaciona con el suelo desnudo y la cobertura de vegetación, mostrando cambios de estas zonas entre las dos fechas. PC6 (*Figura 24d*) indica las condiciones de humedad, presenciándose condiciones más húmedas en la imagen de abril. Esto se percibe especialmente alrededor del Embalse de Castilseras donde el nivel del agua aumenta sustancialmente en 2002 con respecto al año 1983

Con los datos multiespectrales, se han discriminado diferentes cubiertas superficiales de suelo y vegetación en el área de estudio y su cambio entre dos épocas distintas. Sin embargo, debido a las limitaciones espectrales de este tipo de sensores, hay cubiertas que no se lograrán categorizar si no se utilizan otros datos de mayor resolución. Las bandas de los sensores multiespectrales son amplias, lo que supone el registro de un valor promedio que puede ocultar la diferenciación espectral entre cubiertas de interés. Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione y cuanto más estrechas sean estas, ya que facilitará la caracterización espectral de las distintas cubiertas.

6.5. SELECCIÓN DE COMPONENTES PUROS A PARTIR DE DATOS HIPERESPECTRALES

Debido a las limitaciones anteriormente descritas de los datos ofrecidos por las imágenes multispectrales, se procesaron datos hiperespectrales del sensor Hyperion para conseguir un total de 54 componentes, principalmente relacionados con áreas reforestadas y dedicadas a la agricultura además de zonas dónde se realizaba la extracción del mineral a cielo abierto. Cabe destacar la introducción de un componente puro adicional obtenido en la campaña de espectrometría de campo en abril de 2008. Se introdujeron los elementos puros en el clasificador angular, lo que tiene como efecto la adaptación de los datos hiperespectrales a los datos multispectrales de acuerdo a las bandas de cada imagen, por ejemplo, en el caso de la imagen ASTER, se usaron las primeras ocho bandas que son las que están dentro del rango espectral de los datos hiperespectrales (*Figuras 25 y 26*).

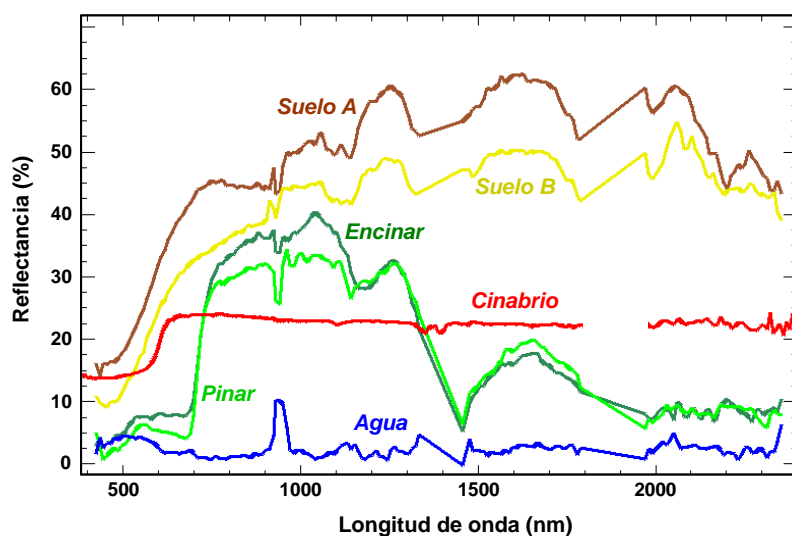


Figura 25. Curvas espectrales de los miembros puros obtenidos de la imagen Hyperion 17/07/06 y curva espectral del cinabrio obtenida con el radiómetro de campo.

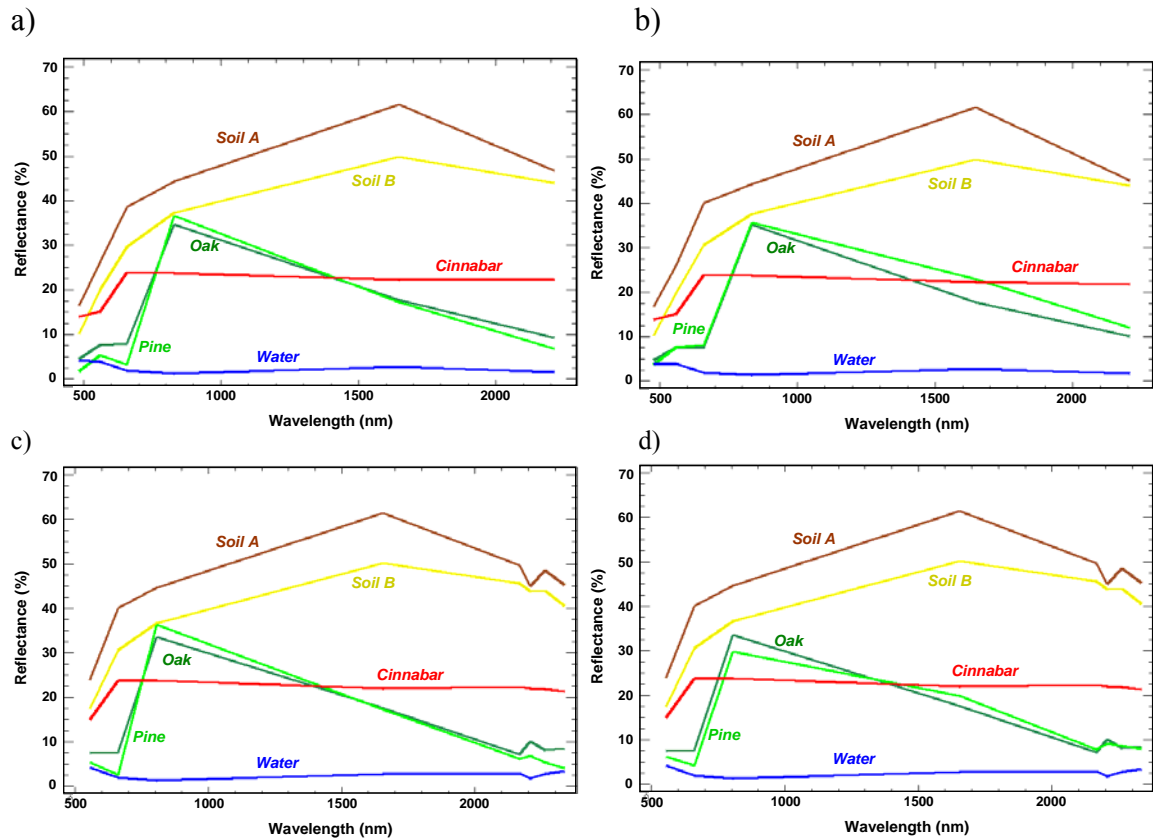


Figura 26. Curvas espectrales de los elementos puros en las imágenes multispectrales. a) TM del 25/03/89, b) ETM+ del 22/04/02, c) ASTER del 08/04/06, y d) ASTER del 30/06/07.

Los miembros terminales que representan al suelo A y al suelo B son frecuentes en el área de estudio y han sido clasificados como suelos de tipo alfisol e inceptisol respectivamente. El primero presenta contenidos en óxidos de hierro y filosilicatos, como se observa en su firma espectral a 870 nm y 2200 nm. El segundo, es un suelo menos desarrollado que el anterior, aunque es evidente que también contiene minerales de arcilla como se representa a 2200 nm. Las superficies con suelo desnudo se encuentran normalmente en las siguientes ocasiones: cuando el campo está en barbecho, cuando antiguas áreas mineras están siendo recuperadas y cuando nuevas áreas urbanas o emplazamientos industriales están siendo construidos.

Las dehesas se caracterizan por la presencia de encinares en praderas o acompañados de cultivos de cebada. La densidad de las encinas encontradas en estas áreas varía, esto dificulta una completa clasificación, pero puede destacarse su presencia en llanuras o lugares con suaves pendientes. La reforestación se lleva a cabo con pinos y en lugares donde sea imposible la realización de cultivos o pastoreo debido a factores tales como la

presencia de suelos poco desarrollados o un relieve más pronunciado. Las características espectrales de la encina y del pino muestran diferencias en cuanto al estado de la vegetación que dependerá de la estación del año en la que la imagen fue adquirida. El 17 de julio del 2006, la encina presenta mayor vigor que el pino, en torno a 750 nm, mientras que la absorción de clorofila es mayor a 700 nm.

Por otro lado, el agua presenta bajos valores de reflectancia en el visible y en el infrarrojo cercano y medio, ya que la mayor parte de la energía es absorbida por este cuerpo en estas regiones del espectro.

Las características espectrales del cinabrio difieren de las del resto de superficies y fueron obtenidas de muestras del mineral que se almacenan en el Parque Minero de Almadén

6.6. DETECCIÓN DE CAMBIOS EN IMÁGENES MULTIESPECTRALES

La selección de componentes puros que incluyen las coberturas anteriormente mencionadas junto con las identificadas como arbustos, vegetación seca, áreas cultivadas y zonas urbanas se procesaron con el clasificador angular SAM. En este caso, una serie temporal de datos multiespectrales de diferentes fechas fueron implementadas para monitorizar cada una de las superficies (*Figura 27*).

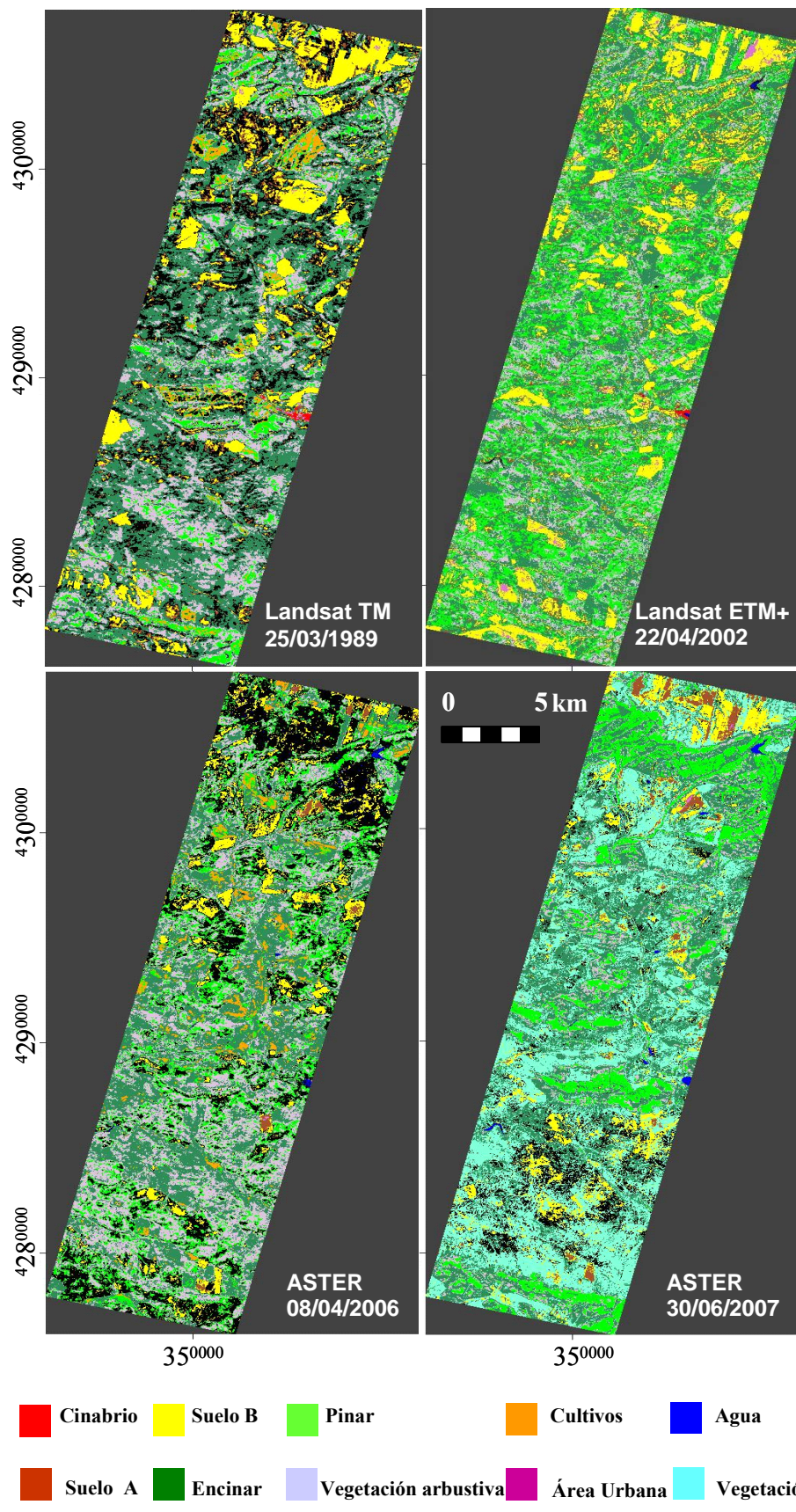


Figura 27. Resultado clasificación SAM en las imágenes multiespectrales de las correspondientes fechas.

Una vez obtenida la clasificación de las distintas coberturas para cada imagen, se puede observar que las áreas afectadas por cinabrio están directamente asociadas con la mina a cielo abierto de El Entredicho, lo que se puede identificar en las imágenes Landsat TM y ETM+ de 25 de marzo de 1989 y 22 de abril de 2002. La mina fue puesta en explotación en el año 1978, tras desviar el río mediante una presa y un túnel. Y en el verano de 1997 se finalizó su explotación (*Figura 28*). A partir de entonces la mina se llenó con agua y los alrededores fueron restaurados y reforestados como muestran las imágenes ASTER de 8 de abril de 2006 y 30 de junio de 2007.



Figura 28. Mina a cielo abierto de El Entredicho en 1996 a la izquierda (Higuera, 1996) y a la derecha una imagen obtenida en una campaña de campo de noviembre de 2006.

Con respecto a la ocupación de cada superficie, el suelo A y B se relacionan principalmente con actividades de agricultura donde la distribución espacial varía desde 133 ha a 1061 ha y desde 1350 ha a 3084 ha respectivamente. La extensión de los encinares, pinares y de la vegetación arbustiva dependerá enormemente de las condiciones fenológicas de la vegetación y de la estación del año, variando notablemente entre los meses de marzo y julio. En particular, la extensión de los encinares, variará entre las 5988 ha y las 9274 ha.

Centrándonos en los cultivos, se percibe que la superficie máxima se encuentra en los meses de primavera, ocupando un área de 592 ha el 8 de abril de 2006. La vegetación seca representa su máxima extensión de 8285 ha en la imagen ASTER de 30 de junio de 2007, lo que es frecuente en los meses de verano cuando las temperaturas son más elevadas y las precipitaciones disminuyen a su mínimo. Por último, las áreas urbanas tienen la mínima extensión que dependerá en gran parte del diseño urbano y también del tipo de edificios.

Resumiendo los resultados de la monitorización, muestran que la distribución de áreas afectadas por las actividades mineras ha disminuido rápidamente en los últimos años (*Figura 29*). Esto coincide con la época posterior al cese de las actividades mineras en 2002 y se debe al gran esfuerzo que la empresa Minas de Almadén y Arrayanes, S.A hace al rehabilitar las zonas afectadas por la minería del mercurio con proyectos como el AZOGUE, el cual consiste en la restauración de la escombrera del Cerco de San Teodoro en Almadén, como se describe en el apartado de antecedentes.

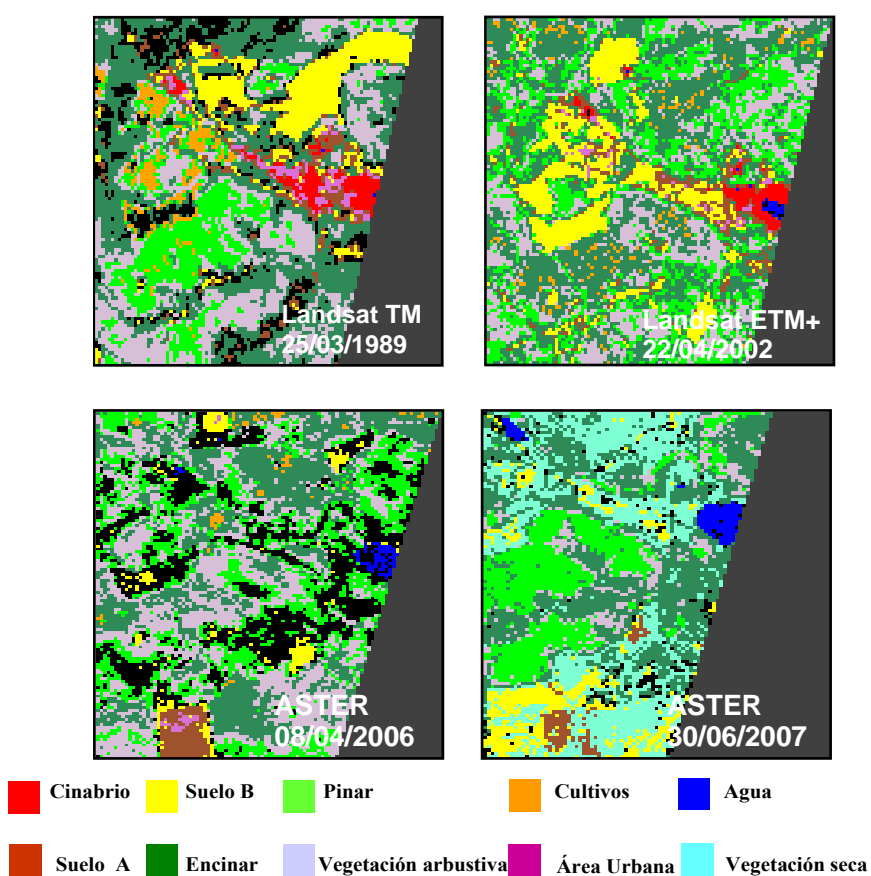


Figura 29. Ampliación de la clasificación angular SAM para la zona El Entredicho.

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS **DE FUTURO**

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

El presente trabajo se ha introducido las técnicas y datos de la teledetección para determinar las diferentes coberturas del suelo que puede presentar el área minera de Almadén y poder observar el efecto que las actividades antropogénicas han tenido en los usos del suelo en la región. El estudio realizado ha permitido definir una metodología integrada para la monitorización de los cambios en el área minera utilizando técnicas de teledetección de distintas características y datos de campo.

Los datos de las campañas de campo han sido fundamentales en el estudio de las diferentes áreas de la región, aportando un conocimiento previo de los distintos tipos de suelo y vegetación presentes en la zona y una ayuda para verificar los componentes de las categorías en las posteriores clasificaciones realizadas. Se han analizado características físico-químicas básicas de determinadas parcelas de estudio como han sido el pH, la conductividad y el contenido en materia orgánica.

Asimismo, se ha construido una librería espectral que reúne curvas espectrales de referencia de las principales cubiertas presentes (suelo, cultivo, vegetación y agua) a partir de los datos medidos en campo. Estas firmas espectrales, en conjunto con el procesamiento de aquellos espectros medidos en laboratorio, formarán parte de una importante base para establecer los componentes clave encontrados en el área.

La tipificación de elementos puros provenientes de datos hiperespectrales y su integración en imágenes multiespectrales multitemporales, ha permitido realizar una detección de cambios más precisa, ya que las imágenes multiespectrales aunque posean limitaciones espectrales, ofrecen la gran ventaja de ofrecer repetidas información de la zona durante un largo período de tiempo.

Además, como el trabajo forma parte de una investigación en curso, el proceso metodológico creado permite la posibilidad de implementación de archivos existentes de teledetección aún no adquiridos, así como aquellos datos de futuros sensores para llevar una monitorización continua de la zona.

Un ejemplo de sensores que tienen el potencial de ser integrados en el estudio son los sensores activos de tipo radar. El futuro trabajo también incluirá el procesamiento de los datos ya preprocesados de las imágenes Hyperion 2008 que cubrirán el total de la zona de estudio, además de la adquisición de nuevas imágenes.

Igualmente, una importante aportación será la adquisición de imágenes del sensor Landsat que recientemente han sido publicadas en Internet de forma gratuita. Esto permitirá un análisis multitemporal más exhaustivo de la zona de estudio.

Los datos se integrarán para la creación de una base de datos mediante sistemas de información geográfica. Igualmente con estas herramientas se obtendrán mapas de pendientes, orientaciones, sombras y alturas a partir del MDE ya creado en este estudio.

La presente investigación se irá completando con futuras campañas de campo y nuevas adquisiciones de datos. Con ello se procederá a un mayor conocimiento del área de estudio y un análisis en profundidad del cambio sufrido en la región por las actividades mineras gracias a la combinación de métodos tradicionales con herramientas de teledetección.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, D.C (2001). *Trace elements in the Terrestrial Environments*. 2nd Edition. Springer, New Cork.

AEMET, (2009). Datos meteorológicos de precipitación y temperatura diarias. Estación de Almadén (minas) y Gargantiel (Ciudad Real)-Agencia Estatal de Meteorología.

Antón-Pacheco, C., Gumiel, J.C., De Miguel, E., Gómez, J. A., Gutierrez, O., Rejas, J. G., Arranz, J., López, J.E., Baretino D. y Jiménez M. (1999). Cartografía del vertido de lodos de la mina de Aznalcóllar mediante imágenes Daedalus ATM. *Revista de Teledetección*, N°.12, pp. 1-6.

Antón-Pacheco, C.; Rowan, L.C.; Mars, J.C. y Gumiel, J.C. (2001). Characterization of mine waste materials and hydrothermally altered rocks in the Rio Tinto mining district (Southwest Spain) using Hymap data: J. Rosell Urrutia y J. Martínez-Casanovas (Editors.), *Teledetección Medio Ambiente y Cambio Global*. Universitat de Lleida - Editorial Milenio, 297-301. Proceedings of the IX Congreso Nacional de Teledetección, Lleida, Spain, 19-21 September 2001.

Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers*. New York, USA. ESRI Press. 487 pp.

Baret, F. (2000). *Assimilation of multisensor and multitemporal remote sensing data to monitor soil and vegetation functioning (RESEDA)*.

Boardman, J.W.(1993). Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. Summaries, 4th Jet Propulsion Laboratory Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory Publication 93-26. 14 pp

Boardman, J.W. y Kruse, F.A. (1994). Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada, in: Proceedings of the Tenth

Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, San Antonio, TX, pp. 407-18.

Boardman, J.W., Kruse, F.A. y Green, R.O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. Summaries of the 5th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 95-1. vol.1, pp. 23-26.

Carrasco, J., Manzanares, P., Tallos, A. y Recreo, F. (2001). Bioremediation and Economical Renewal of Industrially Degraded Land Using Biomasa Fuel Crops. BIORENEW. European Commission DGXII, ENV4-CT97-0610.

Carrasco, S., y Millán, R. (2008). Influencia de la Adición de Fertilizantes y Enmendantes Orgánicos en Suelos Contaminados de Mercurio. Informe Técnico Ciemat.

Chevrel, S., Kuosmannen, V., Marsh, S., Mollat, H., Vosen, P. y Kuronen, E. (2001). Hyperspectral airborne imagery for mapping mining-related contaminated areas in various European environments – first results of the MINEO project. Presented at the Fifth International Airborne Remote Sensing Conference, San Francisco, California.

Choe, E., van der Meer, F.D., van Ruitenbeek, F.J.A., van der Werff, H.M.A., de Smeth, J.B. y Kyoung-Woong, K. (2008). Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: a case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, pp. 3222-3233.

Chuvieco, E. (2006). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Ariel Ciencia.

Dahnke W.C. y Whitney D.A. (1988). Measurement of soil salinity. In: Dahnke W.C., ed. Recommended chemical soil test procedures for the north central region. Fargo, ND: North Dakota State Univ, pp 32-33 North Cen. Regional North Dakota Agric. Exp. Stn.

Davids, C. y Tyler, A. (2003). Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone. *Remote Sens. Environ.*, vol. 85, Issue 1, pp. 30-38.

Dobson, C.M., Ulaby, F.T. y Pierce, L.T. (1995). Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar. *Remote Sens. Environ.*, vol. 51, Issue 1, pp. 199-214.

Duchafour, P. (1975). Manual de edafología. *Toray Mason Ed.*, Barcelona, España.

Dunagen, S., Gilmore, S. y Varekamp, J. (2007). Effects of mercury on visible/near-infrared reflectance spectra of mustard spinach plants (*Brassica rapa* P.). *Environmental Pollution*, vol. 148, pp. 301-311.

Elmore, A., Mustard, J.F., Manning, S., Lobell, D. (2001). Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sens. Environ.*, vol. 73, pp. 87-102.

Environmental Systems Research Institute Inc. (2008). ArcGis 9.2. Redlands, California.

Ferrara, P., Maserti, B.E., Andersson, M., Edner, H., Ragnarson, P., Svanberg S. y Hernández, A. (1998). Atmospheric mercury concentrations and fluxes in the Almadén district (Spain). *Atmospheric environment*, vol. 32, no. 22, pp. 3897- 3904.

Fung, T. (1990). An assessment of TM imagery for land-cover change detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 681-684.

González-Piqueras, J. (2006). *Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental*. Universidad de Castilla La Mancha.

Gray J.E., Hines, M.E., Higuera P.L., Adatto I. y Lasorsa B.K. (2004). Mercury speciation and microbial transformations in mine wastes, stream sediments and surface waters at the Almadén Mining District, Spain. *Environ. Sci. Technol.*; vol. 38, pp. 4285-4292.

Green, A.A., Berman, M., Switzer, P. y Craig, M.D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 26, no. 1, pp. 65-74.

Hernández Sobrino, A.M. (2007). *Los mineros del azogue*. Ed. Fundación Almadén-Francisco de Villegas, 513 pp.

Higueras, P. (1995). Procesos petrogenéticos y de alteración de las rocas magmáticas asociadas a las mineralizaciones de mercurio del distrito de Almadén. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha (Cuenca). Tesis Doctorales, 33, 270 pp.

Higueras, P. (1996). Documentación de Almadén. Universidad de Castilla la Mancha. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/Tema/Almaden/Almaden.htm>. [Consulta: 2008]

Higueras, P. (1997). El distrito minero de Almadén. En: Higueras, P.; Sánchez, C. (Eds.). Itinerarios geológicos: El distrito minero de Almadén. La región volcánica del Campo de Calatrava. Mineralizaciones de Mn-(Co) del Campo de Calatrava. Universidad de Castilla-La Mancha, pp. 1-25.

Higueras, P. y Munhá, J. (1993). Geochemical constraints on the petrogenesis of mafic magmas in the Almadén mercury mining district. *Terra Abstracts*, vol. 6, pp. 12-13.

Higueras, P., Munhá, J., Oyarzun, R., Tassinari, C.C.G. y Ruiz, I.R. (2005). First lead isotopic data for cinnabar in the Almadén district (Spain): implications for the genesis of the mercury deposits. *Mineralium Deposita*, vol. 40, pp. 115-122.

Higueras, P., Oyarzun, R., Biester, H., Lillo, J. y Lorenzo, S. (2003). A first insight into mercury distribution and speciation in the Almadén mining district, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 80, pp. 95-104.

Higueras, P., Oyarzun R., Lunar, R., Sierra, J. y Parras, J. (1999). The Las Cuevas mercury deposit, Almadén district (Spain): Unusual case of deep-seated advanced argillic alteration related to mercury mineralization. *Mineralium Deposita*, vol. 34, pp. 211-214.

Higuera, P., Oyarzun, R., Munhá, J. y Morata, D. (2000). The Almadén metallogenic cluster (Ciudad Real, Spain): alkaline magmatism leading to mineralization process at an intraplate tectonic setting. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, vol. 13-1, pp. 105-119.

Higuera, P., Urbina, M., Biester, H. y Lorenzo, S. (2001). Mercury environmental constraints in the Almadén district. *RMZ - Materials and Geoenvironment*, vol. 48: pp. 195-200.

Hildebrand, S.G., Huckabee, J.W., Sanz Díaz, F., Janzen, S.A., Salomon, J.A., y Kumar, K.D. (1980). Distribution of mercury in the environment at Almadén, Spain. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-7446.

Holmgren, G.G. (1967). A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol.31. pp. 210-211.

Howarth, P.J. y Boasson, E. (1983). "Landsat Digital Enhancements for Change-detection in Urban Environment". *Remote Sens. Environ.*, vol. 13. pp. 149-160.

Huckabee, J.W., Sanz, F., Janzen, S.A. y Solomon, J. (1983). Distribution of mercury in vegetation at Almadén, Spain. *Environmental Pollution*, vol. 30, pp. 211-224.

ITT Visual Information Solutions (2008). The Environment for Visualizing Images ENVI version 4.5, Boulder, USA.

Jackson, R.D., Kimes, D.S., Idso, S.B., Pinter Jr., P.J. y Reginato R.J. (1980). View angle effects in the radiometric measurement of plant canopy temperatures. *Remote Sens. Environ.*, vol.10, pp.273-284.

Kasischke, E.S., Melack, J.M. y Dobson, M.C. (1997). The use of imaging radars for ecological applications - a review. *Remote Sens. Environ.*, vol. 59, pp. 141-156.

Kemper, T. y Sommer, S. (2002). Estimate of Heavy Metal Contamination in Soils after a Mining Accident Using Reflectance Spectroscopy , *Environmental Science and Technology*, vol. 81, pp. 2742-2747.

Knut, C., Allan, A.N., Bjarne K.N., John L.P. y Tage, T. (1987). *The application of Remote Sensing and Data Integration as an aid to mineral exploration in the Almadén region, Vol I and II*. The technical University of Denmark, (IMSOR), Department of Geology, Trinity College de Dublín. Minas de Almadén y Arrayanes.

Kooistra, L., Salas, E. A. L., Clevers, J. G. P. W., Wehrens, R., Leuven R. S. E. W., Nienhuis, P H. y Buydens, L. M. C. (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, vol. 127, pp.281-290.

Kooistra, L., Wehrens, R., Leuven R.S.E.W. y Buydens, L.M.C. (2001). Possibilities of visible-near-infrared spectroscopy for assessment of soil contamination in river floodplains. *Analytica Chimica Acta*, vol. 446, pp. 97-105.

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B. y Dietz, J.B. (1993). Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS) *Remote Sens. Environ.*, vol. 44, pp 309-336.

Kruse, F. (1996). Geologic Mapping Using Combined Analysis of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and SIR-C/X-SAR Data. 11th Thematic Conference, *Applied Geologic Remote Sensing*. Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), Ann Arbor, MI, p. II-142 - II-148.

Kunze, G.W. y Dixon, J.B. (1986). Pretreatment for mineralogical analysis. pp. 91–100. En A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Kuplich, T.M., Freitas, C.C. y Soares, J.V. (2000). The study of ERS-1 SAR and Landsat TM synergism for land use classification. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, no. 10, pp. 2101-2111.

Lanjeri, S., Melía, J. y Segarra, D. (2001). A multitemporal masking classification method for vineyard monitoring in central Spain. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 22, no. 16, pp 3167-3186.

Lawrence, D. (2001). Remote Sensing of Abandoned Mines Summitville Colorado. Disponible en: <http://www.emporia.edu/earthsci/student/lawrence1/lawrence.htm>. [Consulta: 2008]

Lee, J.B., Woodyatt, A.S. y Berman, M. (1990). Enhancement of high spectral resolution remote sensing data by a noise-adjusted principal components transform. *IEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, no. 3, pp.295-304.

Lévesque, J. y D.J. King (1999). Airborne digital camera image semivariance for evaluation of forest structural damage at an acid mine site. *Remote Sens. Environ.*, vol. 68 (2), pp. 112-124.

Levesque, J. y Staenz, K. (2004). A method for monitoring mine tailings re-vegetation using hyperspectral remote sensing. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 1, pp. 575-578.

Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W. (2000). *Remote sensing and image interpretation*. Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc.

Lindberg, S.E., Jackson, D.R., Huckabee, J.W., Janzen, S.A., Levin, M.J. y Lun, J.R., (1979). Atmospheric emission and plant uptake of mercury from agricultural soils near the Almadén mercury mine. *Journal of Environmental Quality*, vol. 8, pp. 572-578.

López Pamo, E., Barretino, D., Antón P., C., Ortiz, G., Arránz, J.C., Gumiel, J.C., Martínez P., B., Aparicio, M. y Montouto, O. (1999). The extend of the Aznalcóllar pyrite sludge spill and its effects on soils. *Sci. Total Environ.*, vol. 242, pp. 57-88.

Lucas, Richard, Cronin, N., Moghaddam, M. y Witte, C. (2006). Integration of Radar and Landsat-derived foliage projected cover for woody regrowth mapping, Queensland, Australia. *Remote Sens. Environ.*, vol. 100(3), pp. 388-406.

M.A.P.A. (2007). Visor del SIGPAC. Disponible en la web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>. [Consulta: 2008]

Mars, J.C. y 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*, vol. 84, pp. 422-436.

Mather, P.M. (2004). *Computer processing of remotely-sensed images: An introduction*. John Wiley & Sons, 3rd ed.

Matilla Tascón A. (2005). *Historia de las Minas de Almadén. Volumen I. Desde la época romana hasta el año 1645. Madrid: Consejo de Administración de las Minas de Almadén y Arrayanes; 1958. Historia de las Minas de Almadén. Volumen II. Desde 1646 a 1799. Madrid; Minas de Almadén y Arrayanes e Instituto de Estudios Fiscales.*

McKeague J A y Day J H. (1966). Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, vol. 46, pp.13-22. Soil Res.Inst., Canada Dept. Agriculture, Ottawa, Canada.

McNairn, H., Duguay, C., Brisco, B., y Pultz, T J. (2002). The Effect of Soil and Crop Residue Characteristics on Polarimetric Radar Response. *Remote Sens. Environ.*, vol. 80, no. 2, pp. 308-320.

Millán, R., Gamarra, R., Schmid, T., Sierra, M. J., Quejido, A. J., Sánchez, D. M., Cardona A. I., Fernández M., Vera, R. (2006). Mercury content in flora and soils for the Almadén mining area (Spain). *Sci. Total Environ.*, vol. 368, no. 1, pp. 79-87.

MINEO (2000). Assessing and monitoring the environmental impact of mining activities in Europe using advanced Earth Observation techniques.

Nakayama, Y., Tanaka, S., Sugimura, T. y Endo, K. (1997). Analyses of hydrological change in lakes of Asian arid zone by satellite data. In: G. Cecchi, E.T Engman and E.Zeioli (eds.), *Proc. SPIE*, vol. 3222, pp. 201-210.

NASA (2008). Datos ASTER. US Geological Survey: Disponible en: <http://asterweb.jpl.nasa.gov>. [Consulta: 2008].

NASA Landsat Program (2003a). Landsat TM scene L5201033008908410, L1G, USGS, Sioux Falls.

NASA Landsat Program (2003b). Landsat ETM+ scene L71008058_05820031026, SLC-Off, USGS, Sioux Falls.

Newman, H.R. (2002). The mineral industry of Spain. U.S. Geological Survey minerals yearbook.

Nielsen, E.M., Prince, S.D. y Koeln, G.T. (2008). Wetland change mapping for the U.S. mid Atlantic reion using an outliner detection technique. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, pp. 4061-4074.

Nienhuis, P.H. y Buydens, L.M.C. (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, vol. 127, pp. 281-290.

Ortega, E. y Díez, C. (2001). Estudio del Distrito Minero de Almadén (Ciudad Real, España). *Grandes Minas y la Comunidad. Efecto socioeconómicos y ambientales en Latinoamérica, Canadá y España*. Editado por Gary McMahon y Felix Remy. 360 pp. Disponible en: http://www.idrc.ca/es/ev-9432-201-1-DO_TOPIC.html. [Consulta: 2008]

Peinado M. y Martínez, J.M. (1985). *El paisaje vegetal en Castilla-La Mancha*. Servicio de Publicaiones de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, 230 pp.

Peña, M.A. (2007). Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. *Bosque*, vol. 28, pp. 162-172.

Petrie, G., Cullinan, V., Cadwell, L., Downs, J., Perry, E. y Battelle, J.T. (2000) Integration of hyperspectral data for rangeland and characterization. Northwest Division, Richland, Washington USA.

Phinn, S., Roelfsema, C., Dekker, A., Brando, V. y Anstee, J. (2008). Mapping seagrass species, cover and biomass in shallow waters: An assessment of satellite multi-spectral and airborne hyper-spectral imaging systems in Moreton Bay (Australia). *Remote Sensing of Environment*, vol 112, pp. 3413-3425.

Pignatti, S., Cavalli, R., Cuomo, V., Fusilli, L., Pascucci, S., Poscolieri, M. y Santini, M. (2008). Evaluating Hyperion capability for land cover mapping in a fragmented ecosystem: Pollino National Park, Italy. *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 3, pp. 622-634.

Pilon, P.G., Horwarth, P.J. y Bullock, R.A. (1988). An enhanced classification approach to change detection in semi-arid environments. *Photogramm, Eng. Remote Sens.*, vol 54, no. 12, pp. 1709-1716.

Plaza, A., Martínez, P., Pérez, R.M., y Plaza J. (2002): Spatial/spectral endmember extraction by multi-dimensional morphological operations, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 40 (9), pp. 2025-2041.

Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouélic, S., King, C. y Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) - Comparaison with groundbased measurement. *Remote Sens. Environ.*, vol. 88, pp. 468-478.

Reglamento CE nº 1102/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2008, relativo a la prohibición de la exportación de mercurio metálico y ciertos compuestos y mezclas de mercurio y al almacenamiento seguro de mercurio metálico DO L 304/75 de 14/11/2008.

RETAMA (2003-2005). Recuperación de terrenos afectados por mercurio, Ref.: REN2002-04229-CO2-02

REUSA (2005-2008). Recuperación de suelos contaminados por mercurio: recomendaciones de usos de suelos y plantas en la Comarca de Almadén, Ref: CTM2005-04809 / TECNO.

Reusen, I., Bertels, L., Debruyne, W., Deronde, B., Fransaer, D. y Sterckx, S. (2000). Species identification and stress detection of heavy-metal contaminated trees. VITO – Flemish Institute for Technological Research, Mol, Belgium.

Richard J. y Scott W. (2004). Evaluation of hyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell China clay (kaolin) region, Cornwall, UK. *Remote Sens. Environ.*, vol. 93, pp 118-130.

Richards, J.A y Xia, X. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis, An introduction*. 3ª Edición, Berlín, Springer-Verlag.

Rivas Martínez, S., Arnaiz, C., Barreno, E. y Crespo, A. (1977). Apuntes sobre las provincias corológicas de la Península Ibérica e Islas Canarias. *Opúscula Botánica Pharmaciae Complutensis*, 1, pp. 1-48, Madrid.

Rodríguez, L., Lopez-Bellido, F.J., Carnicer, A., Recreo, F., Tallos, A. y Monteagudo, J.M. (2005). Mercury Recovery from Soils by Phytoremediation. *Environmental Chemistry Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems*, pp. 197-204.

Schmid, T. (2005). Tesis Doctoral. *Integrated remote sensing approach to detect changes in semi-arid wetland areas in Central Spain*. CIEMAT.

Schmid, T., Koch, M. y Gumuzzio, J. (2005b). Multisensor Approach to determine changes of wetland characteristics in semiarid environments (Central Spain). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 43, no. 11, pp. 2516-2525.

Schmid, T., Koch, M., Gumuzzio, J. y Mather, P.M. (2004) A spectral library for a semi-arid wetland and its application to studies of wetland degradation using hyperspectral and multispectral data. *Int. J. Remote Sens.*, , vol.25, nº 13, pp. 2485-2496.

Schmid, T., Millán, R., Sánchez, D., Quejido, A., Fernández, M., Sierra, M. J. y Vera, R. (2005a). Mining influences on soils in the district of Almadén (Spain). En: O. Uhlmann, G. J. Annokkée y F. Arendt (eds.), 9th International FZK/TNO Conference on soil-water systems. Forschungs-zentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Germany, pp. 2663-2669.

Schmid, T., Millán, R., Vera, R., Tallos, A., Recreo, F., Quejido, A., Sánchez, D.M. y Fernández, M. (2003). The distribution of mercury in a characterized soil affected by mining activities. En: Conference proceedings of ConSoil 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil in cooperation with OVAM ICC, 11-16 May 2003, Gent, Belgium, pp. 3287-3294.

Shang, C. & Zelazny, L. W. (2008). Selective dissolution techniques for mineral analysis of soils and sediments. En A. L. Ulery & L. R. Drees (eds.). *Methods of Soil Analysis: Part 5 - Mineralogical Methods*, Soil Science Society of America Book Series 5 pp. 33–80. Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc. 16, 17, 19.

Schwertmann, U. (1964). The differentiation of iron oxides in soils by extraction with ammonium oxalate solution. *Z. Pflanz. Bodenk*, vol. 105,; pp. 194-202.

Sierra, M.J., Millán, R., Esteban, E., Cardona, A.I., Schmid, T. (2008). Evaluation of mercury uptake and distribution in *Vicia sativa* L. applying two different study scales: Greenhouse conditions and lysimeter experiments. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 96, pp. 203-209.

Sierra Herraiz, M. (2008). Tesis Doctoral: Alternativas de uso agrícola para suelos con altos contenidos de mercurio: aplicación a la comarca minera de Almadén. Madrid, CIEMAT/UAM.

Siljestrom, P.A. y Moreno, A., (1995). Monitoring burnt areas by principal component analysis of multitemporal TM data. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 16, pp. 1577-1587.

Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 10, pp. 989-1003.

Soil Survey Staff (1999). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd Edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Agricultural Handbook Number 436, 871 pp.

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P. y Macomber, S. A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sens. Environ.*, vol. 75, pp. 230–244.

Stefanov, W.L., Ramsey, M.S. y Christensen, P.R. (2001). Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sens. Environ.*, vol. 77, pp. 173-185.

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

Taylor, G.R., Mah, A.H., Kruse, F.A., Kierein-Young, K.S., Hewson, R.D. y Bennett, B.A. (1996). Characterization of saline soils using airborne radar imagery. *Remote Sens. Environ.*, vol. 57, pp. 127-142.

Towsend, P., Helmers, D., Kingdon, C., McNeil, B., de Beurs. K. y Eshleman, K. (2008). Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians

detected using a 1976-2006 Landsat time series. *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, pp. 62-72.

Universidad de Maryland (1997). Global Land Cover Facility. <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>. [Consulta: 2008]

USGS (2008). Datos Landsat. US Geological Survey. Disponible en: http://landsat.usgs.gov/products_data_at_no_charge.php. [Consulta: 2008]

USGS (2007). Librería espectral del USGS. Disponible en: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>. [Consulta: 2008]

Vera, R., Millán, R., Schmid T., Tallos, A. y Recreo, F. (2005). Behaviour of mercury in the soil-plant system. Application to phytoremediation studies. En: A. Faz Cano, R. Ortiz Silla and A. R. Mermut (eds.), Sustainable Use and Management of Soils, Arid and Semiarid Regions, Advances in GeoEcology 36, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 527-534.

Van Reeuwijk, L.P., (2002). Procedures for soil analysis ISRIC-FAO (6th Edition), Wageningen.

Vijdea, A.M., Sommer, S. y Mehl, W. (2004). Use of remote sensing for mapping and evaluation of mining waste anomalies at national to multi-country scale. A Case Study to Integrate Remote Sensing Information with Thematic Data and National Inventories on Mining Features in Pre-Accession Countries. A Report of the JRC Enlargement Project PECOMINES Inventory, regulations and environmental impact of toxic mining wastes in pre accession countries. EUR 21185, Luxembourg.

Vrabel, J. (1996). Multispectral Imagery Band Sharpening Study, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62, no. 9, pp. 1075-1083.

Walkley, A. y Black. I. A. (1934). An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Sci.*, vol. 37, pp. 29-37.

Wdowinski, S. Sang-Wan, K., Amelung, F., Dixon, T.H., Miralles-Wilhelm, F. y Sonenshein, R. (2008). Space-based detection of wetlands' surface water level changes from L-band SAR interferometry, *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, p.681-696.

Wilding , P. y Ahrens, J. (2001). Provisions for Anthropogenically Impacted Soils. *Soil Taxonomy*.

Wulder, M.A., White, J.C., Goward, S.N. Masek, J.G. Irons, J.R. Herold., M , Cohen, W.B., Loveland, T.R.y Woodcock, C.E. (2008). Landsat continuity: issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, pp. 955-969.

Zhao Wu, Y., Chen, J., Feng, J., Jiu, Q. y Min, X. (2005). *Feasibility of Reflectance Spectroscopy for the Assessment of Soil Mercury Contamination*. *Environ. Sci. Technol.*, 39, pp 873–878.

CARTOGRAFÍA

CARTOGRAFÍA

Instituto Geográfico Nacional (1997). Mapa Topográfico Nacional de España. H808-I Almadén, 1ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (1997). Mapa Topográfico Nacional de España. H808-II Almadenejos, 1ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (1997). Mapa Topográfico Nacional de España. H808-IV Sierra de Alcudia, 1ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2003). Mapa Topográfico Nacional de España. H807-IV Guadalmez, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2003). Mapa Topográfico Nacional de España. H807-II Chillón, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (1996). Mapa Topográfico Nacional de España. H808-II Fontanosas, 1ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (1998). Mapa Topográfico Nacional de España. H833-II Santa Efermia, 1ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2004). Mapa Topográfico Nacional de España. H782-III Sierra de la Osa, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2004). Mapa Topográfico Nacional de España. H782-II Saceruela, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2004). Mapa Topográfico Nacional de España. H782-I Valdemanco del Esteras, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2005). Mapa Topográfico Nacional de España. H834-I Valtravieso, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2004). Mapa Topográfico Nacional de España. H834-II Sierra de los Bonales, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geográfico Nacional (2004). Mapa Topográfico Nacional de España. H782-IV Navalmedio de Morales, 2ª Edición. Escala 1:25000. Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1987) Mapa geológico y minero de España. H808 Almadén. Escala 1:50.000.

Ministerio de Agricultura (1981). Mapa de cultivos y Aprovechamientos. H808 Almadén. Escala 1:50.000.

ANEXO

Procedimientos de laboratorio

ANEXO

I. Determinación de la materia orgánica del suelo por oxidación. (Método de Walkey-Black)

1.1. Objetivos

En el presente método se determina el carbono orgánico del suelo que se oxida con dicromato en medio ácido (H_2SO_4). El exceso de oxidante se valora con sulfato ferroso amónico (Sal de Möhr) y la cantidad de dicromato reducido. Tener en cuenta que si el suelo presenta otras sustancias, oxidables o reducibles, pueden dar contenidos en carbono orgánico más altos o bajos, respectivamente, que la cantidad real.

1.2. Aplicación

El Plan Normalizado de Trabajo que se va a proponer a continuación es aplicable sólo a muestras de suelos ya que las cantidades tanto de muestra como de reactivos que se utilizan a lo largo del protocolo pueden variar si la naturaleza de la muestra difiere (sustancias húmicas, fertilizantes, etc.) Actualmente en el laboratorio, las mediciones de % de materia orgánica se realizan de forma automatizada con la utilización de un valorador automático (Tinitro 721. Metrohm) el cual se controla con un programa de ordenador (TiNet). Es por esto que el método que se describe a continuación sólo será válido cuando la realización por el método automatizado no sea posible.

1.3. Material

- Erlenmeyer de 250 ml
- Probeta de 100 ml
- Pipetas de 10 ml y de 1 ml
- Bureta de 25 o 50 ml
- Pesasustancias de 6 mg y de 3 mg
- Agitador magnético. Imanes y de recoge-imanas.
- Matraz aforado de 1L.

1.4. Reactivos

- Dicromato potásico 1N. El dicromato potásico hay que prepararlo antes de utilizarlo. Para ello se coge una cantidad de dicromato, superior a 60 g, y se mete en estufa durante toda la noche a 105°C (o hasta peso constante, para ello comprobar peso constante después de dos pesadas, en balanza de precisión, con 1 hora de diferencia), pasado este tiempo se saca de la estufa y se mete en el desecador. De ahí se coge la cantidad que se necesite. Disolver 49,05 g de $K_2Cr_2O_7$, pesados en granatario, en agua destilada y enrasar a 1L, usando un matraz aforado.
- Ácido sulfúrico concentrado (96%).
- Ácido orto-fosfórico (85%).
- Difenilamina en solución sulfúrica. Disolver 2,5 g de difenilamina en 20 ml de agua destilada y añadir 100 ml de ácido sulfúrico (96%).
- Disolución de sulfato ferroso amónico (Sal de Möhr) 0.5N. Disolver 196,10 g de $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ en unos 800 ml de agua destilada que contengan 20 ml de H_2SO_4 concentrado (96%), medidos con bureta, enrasando a 1L utilizando un matraz aforado.
- Agua destilada.

1.6.5. Procedimiento

Pesar una muestra de suelo finamente disgregada físicamente en seco (la preparación del suelo ha constado de; disgregación del suelo, secado al aire y pasado por tamiz de 2 mm de malla) del orden de 1,0000 g medidos en balanza de precisión y con pesasustancias (anotar peso exacto) y colocarlo en un erlenmeyer de 250 ml. Añadir 10,0 ml de dicromato potásico 1N (ver reactivos) medidos en pipeta de 10 ml y agitar manualmente durante 30 sg con el fin de asegurar una mezcla íntima. Se agregan a continuación 20,0 ml de H_2SO_4 concentrado (96%) medidos en bureta y bajo campana de extracción, agitando el erlenmeyer mientras se realiza la adición, la agitación puede ser manual o ayudándose de un agitador magnético, introduciendo el imán correspondiente dentro del erlenmeyer. Dejar la mezcla en reposo durante 30 minutos, a ser posible sobre placa de amianto o metálica. Añadir a continuación 100 ml de agua desionizada medidos en probeta y dejar enfriar al aire.

Una vez fría la muestra, agregar 10,0 ml de ácido orto-fosfórico (85%) medidos en pipeta de 10 ml y 1,0 ml de indicador difenilamina (ver preparación en reactivos) medidos en pipeta de 1 ml. La adición del ácido fosfórico y de la difenilamina debe hacerse de forma seguida y justo en el momento previo a la valoración. A continuación se procede a la valoración de la mezcla del erlenmeyer con sal de Möhr (ver preparación en reactivo) mediante bureta y utilizando un agitador magnético hasta cambio de color. La coloración vira de azul violáceo hasta verde brillante. En este punto anotar los ml de sal de Möhr gastados en la valoración.

Realizar de vez en cuando una prueba en blanco (la frecuencia de realización de blancos dependerá del número de muestras que se analicen al día, aproximadamente cada 16 muestras de suelos realizar un blanco o siempre que se cambie la procedencia o preparación de cualquiera de los reactivos). Para ello se procede de forma idéntica al procedimiento anterior exceptuando la adición de muestra de suelo. Anotar los ml de sal de Möhr gastados en la valoración.

Cálculos

Los datos obtenidos los llevamos a la fórmula siguiente:

$$\%M.O. = (1 - M/B) * 6,7 / P$$

donde:

M = ml de sal de Möhr gastados en la valoración de la muestra

B = ml de sal de Möhr gastados en la valoración del blanco

P = peso de la muestra

II. Medición de pH por medio de pH-metros.

2.1. Fundamento. Principio del método

Para medir el pH puede utilizarse un pH-metro. Éste consta de un electrodo de vidrio como electrodo indicador, cuyo potencial varía al introducirlo en la suspensión suelo-agua, hasta que se alcanza el equilibrio.

Como electrodo de referencia se emplea un electrodo de calomelanos saturado. El comportamiento del electrodo se describe según la ecuación de Nerst:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \cdot 2,3 \cdot \log (H_3O^+)$$

$$E = E_0 - \frac{2,3 RT}{nF} \cdot pH$$

Donde: E = potencial del electrodo indicador

E_0 = potencial del electrodo de referencia

$(2,3 RT/nF)$ = factor de Nerst

$R = 8,314$ julios/ $^{\circ}K$ y mol

$F = 96493$ culombios

n = número de electrones transferidos

El comportamiento del electrodo depende de la temperatura. A $25^{\circ}C$ K_w permanece constante a 1×10^{-14} , de esta manera la concentración de hidrógeno iones hidróxidos puede ser calculado si la otra concentración se conoce. El potencial de pila a $25^{\circ}C$, es decir, en condiciones estándar, viene dado por:

$$E_p = E + 0,0591 \cdot pH$$

Donde: E = potencial del electrodo

E_p = potencial de pila

$0,0591$ = Factor de Nerst cuando la temperatura es igual a $25^{\circ}C$

El pH de muestras edáficas puede medirse sobre pasta saturada en agua destilada, con lo que se obtiene el pH de la solución del suelo, que se corresponde a la acidez real. También se puede medir sobre pasta saturada en disolución $0,1$ M de KCl, que mide la acidez potencial del suelo. En este segundo caso los iones potasio de la sal van ocupando las posiciones de cambio, en las que puede haber adsorbidos iones tales como calcio, magnesio y protones, entre otros. De este modo, en la solución tendremos una bajada de pH con respecto al obtenido en agua destilada.

La diferencia entre ambos valores nos proporciona un valor cualitativo, es decir, nos da una aproximación de la capacidad de retención de los complejos coloidales del suelo objeto de estudio.

2.3. Material

- Equipo: pH-metro modelo 250 A
- Vaso de 250 ml
- Papel de secar
- Vaso 25 ml para la muestra cuando no se utilice sonda de temperatura
- Frasco lavador con agua destilada
- Varilla de vidrio
- Pipeta pasteur

2.4 Reactivos

- Disolución KCl 0.1 M. Se obtiene a partir de la cantidad que sea necesaria de sal de KCl para conseguir el volumen deseado. Una vez mezclado se agita.
- Agua destilada

La determinación de la **conductividad** en el suelo se ha realizado midiendo con conductímetro en relación suelo-agua (1:2,5 y 1:5) a partir de las muestras preparadas para medir pH.

III. Determinación del contenido en carbonatos: Calcímetro de Bernard

El método se basa en la reacción del ácido clorhídrico (HCl) con el carbonato cálcico (CaCO_3) con desprendimiento de anhídrido carbónico (CO_2). Este gas desplaza un volumen de un líquido indicador que se cuantifica.

Procedimiento

- Se pesan 0,2 g de CaCO_3 en un matraz
- Se pesan 0.5 g de suelo en un matraz
- Se añaden 10 ml de agua destilada y un imán.

- En un tubito de vidrio se echan 5 ml de HCl y se mete con cuidado en el matraz con ayuda de las pinzas y una varilla.
- Se enrasa a cero el líquido del calcímetro subiendo o bajando el recipiente situado en la anilla, que tiene que tener quitado el tapón.
- Al matraz se le pone el tapón grande del calcímetro con la llave en forma de T situada abierta al aire. Cuando se ha enrasado se gira la llave para cerrar al aire el circuito. Se agita el matraz para que reaccione el HCl con el CaCO₃ con energía hasta lectura constante. Se repite el proceso con la muestra. Se pesan 0,5 g de muestra según la cantidad esperada de CaCO₃.

Cálculos

$$\% \text{CO}_3\text{Ca} = \frac{\text{ml CO}_2 \text{ suelo} * 0,2 (\text{peso CO}_3\text{Ca}) * 100}{\text{ml CO}_2 \text{ CO}_3\text{Ca} * 0,5 (\text{peso suelo})}$$

IV. Determinación de óxidos de hierro libres

Reactivo y extracción

Añadir directamente los reactivos con el suelo en el tubo centrífuga:

0.75 g de suelo < 2mm + 40 ml disolución ditionito-citrato al 1.7 % y 20 %

Agitación durante 16 h (dejar por la noche)

Centrifugar a alta revolución

Pipetear del sobrenadante claro diluyendo a la mitad para análisis (7 ml sobrenadante + 7 ml agua destilada)