



## TÍTULO

**ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS LANDSAT ETM+ Y TERRA  
ASTER COMO MÉTODO DE PROSPECCIÓN DE  
YACIMIENTOS EPITERMALES.**

**EL CASO DEL DEPÓSITO  
AURÍFERO DE RODALQUILAR, ALMERÍA**

## AUTORA

**Katherine Claret Díaz Díaz**

Directores  
Tutores  
Curso

©  
©

**Esta edición electrónica ha sido realizada en 2012**

Gabriel Almodóvar y Felipe Nieto

Reinaldo Sáez y Felipe González

POP Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales

Katherine Claret Díaz Díaz

Para esta edición, la Universidad Internacional de Andalucía



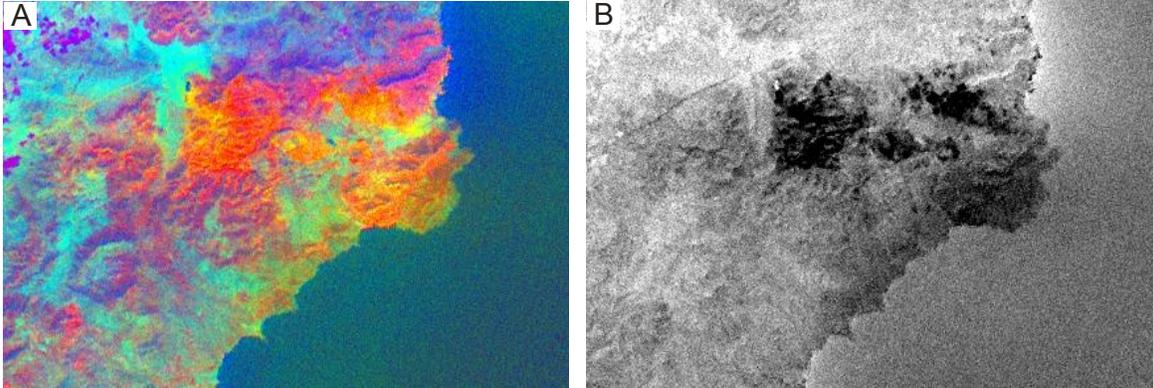
## Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

### Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

### Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
  - **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
  - **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
- 
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
  - *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
  - *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



**ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS LANDSAT ETM+ Y TERRA  
ASTER COMO MÉTODO DE PROSPECCIÓN DE  
YACIMIENTOS EPITERMALES. EL CASO DEL DEPÓSITO  
AURÍFERO DE RODALQUILAR, ALMERÍA**

**ING. KATHERINE DIAZ**



Universidad  
de Huelva



## **ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS LANDSAT ETM+ Y TERRA ASTER COMO MÉTODO DE PROSPECCIÓN DE YACIMIENTOS EPITERMALES. EL CASO DEL DEPÓSITO AURÍFERO DE RODALQUILAR, ALMERÍA**

Memoria descriptiva por Ing. Katherine C. Díaz D., bajo la dirección de Dr. Felipe González y Dr. Reinaldo Sáez, para la obtención del título de Máster.

Memoria realizada dentro del marco del Programa de Postgrado de las universidades de Huelva e Internacional de Andalucía (UNIA) “Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales”.

La maestrante,

Ing. Katherine Díaz

Los directores de la tesis,

Dr. Felipe González  
PSI  
Departamento de Geología  
Universidad de Huelva

Dr. Reinaldo Sáez  
Profesor Titular  
Departamento de Geología  
Universidad de Huelva

Huelva, febrero de 2012



**ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS LANDSAT ETM+ Y TERRA ASTER COMO  
MÉTODO DE PROSPECCIÓN DE YACIMIENTOS EPITERMALES. EL CASO  
DEL DEPÓSITO AURÍFERO DE RODALQUILAR, ALMERÍA**

**Ing. Katherine Díaz**  
Febrero 2012

**ÍNDICE**

AGRADECIMIENTOS.....	1
ABSTRACT.....	2
<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Situación actual del análisis de imágenes .....	3
1.2 Objetivos.....	4
<b>CAPITULO II.</b>	
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Encuadre geológico y metalogénico.....	7
2.2.1 Localización geográfica y geológica .....	7
2.2.2 Origen de las Calderas de Rodalquilar.....	8
2.2.3 Mineralizaciones asociadas.....	8
2.2.4 Edad de la mineralización y de las alteraciones.....	13
<b>CAPITULO III. Metodología de la investigación.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO IV. Resultados de la investigación.....</b>	<b>22</b>
Conclusiones.....	31
Referencias Bibliográficas.....	32

**INDICE DE TABLAS**

<b>Tablas</b>	<b>Pág.</b>
1. Información espectral, radiométrica y espacial de las imágenes ETM+.	15
2. Información espectral, radiométrica y espacial de las imágenes ASTER.	16
3.1 Valores de rango espectral ETM+-7 de gain bajo	17
3.2 Valores de rango espectral ETM+-7 de gain alto	17
4. Valores de irradiancia espectral solar.	18
5. ESUN para cada banda ASTER	19
6. Autovalores del análisis de componentes principales de las bandas ETM+ 1,4, 5 y 7.	27

## INDICE DE FIGURAS

Figuras	Pág.
1. Localización del yacimiento de oro Rodalquilar.	7
2. Zona minera del Cerro del Cinto.	9
3. Imagen tomada del satélite Landsat 5.	10
4. Esquema del mapa de alteración superficial, Rodalquilar.	11
5. Curvas de reflectancia de los minerales dominantes en las distintas zonas de alteración registradas superficialmente en Rodalquilar para un intervalo comprendido entre 0 y 3 $\mu\text{m}$ .	23
6. Ratio 5/7 de la imagen ETM+ sobre la combinación 321. En rojo los valores más altos, en azul los más bajos	
7. Combinaciones de la imagen ASTER $(b_4+b_7)/(b_5)$ para alunita (A), $(b_4+b_7)/(b_6)$ para caolinita (B), y $(b_5+b_7)/(b_8)$ para clorita (C). La figura 7D contiene la combinación: RGB de las imágenes resultantes en A, B y C.	24
8. CP4 del Feature-Oriented Principal Component Analysis de la imagen ETM+. Las bandas empleadas en el análisis fueron 1, 4, 5 y 7.	26
9. Feature-Oriented Principal Component Analysis de la imagen ASTER. <b>A)</b> CP4 del análisis de las bandas 3, 4, 5 y 7 (alunita). <b>B)</b> CP4 del análisis de las bandas 3, 4, 6 y 7 (caolinita). <b>C)</b> CP3 del análisis de las bandas 1, 3, 5 y 8 (clorita).	27
10. Decorrelation stretch aplicado a la combinación 752 de la imagen ETM+.	28
11. A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 457 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.	29
12. A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 467 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.	30
13. A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 578 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.	30

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a los directores de esta investigación Dr. Felipe González y Dr. Reinaldo Saéz quienes colocaron su empeño y dedicación para hacer de este proyecto una realidad, dando gran parte del aporte científico.

A la Universidad Internacional de Andalucía y la Universidad de Huelva por permitirme la realización del postgrado, y utilización de sus espacios para la elaboración de este proyecto.

Al grupo de maestrantes de geología por prestar su colaboración y material científico para el desarrollo de la investigación en especial a Judith Loureiro, Ymelda Mechato y María Paz.

A mis padres Yajaira Diaz y Néstor Diaz por brindarme su apoyo en todo momento aún en la distancia, por ser pilar fundamental y mi mayor motivo de inspiración, este logro también es de ustedes, los quiero.

Agradezco a mi hermana Karen Diaz por brindarme su ayuda cuidando a Sofía en el tiempo de mi ausencia, mil gracias.

A mi querido Rabih Souki por compartir conmigo en el desarrollo de la investigación, por tenerme paciencia en los momentos difíciles, darme ánimos, fuerzas, ayudarme mientras podía, y sentirse orgulloso de mí, es nuestro logro mi amor.

A todos mis familiares, amigos, grupo de gatos la rábida que estuvieron pendientes y presentes en la realización de este proyecto.

**Abstract**

An approach to the analysis of multispectral data for the purpose of surface compositional mapping is presented. We use different remote sensing techniques to analyze two images of the systems Landsat 7 ETM+ and Terra ASTER in Rodalquilar caldera complex, Almeria, SE Spain. The analysis of these two images shows diverse areas of intense alteration. The higher spectral resolution within the Short Wave Infrared Region (SWIR) of the ASTER image permits further differentiation of nearly-concentric alteration zones dominated by different mineral associations. In general terms, the information supplied by the remote sensing analysis accords well with the alteration map proposed by previous authors. Virtually the entire sets of techniques applied provided excellent results.

---

# CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Situación actual del análisis de imágenes

En la actualidad, el uso de imágenes satelitales es amplio, el cual puede estar relacionado con la determinación de la naturaleza geológica de un terreno, vegetación, usos del suelo, planificación urbana y exploración minera entre otros, constituyendo una herramienta valiosa para diversos estudios geológicos. En relación con la exploración minera, el análisis de imágenes obtenidas con sensores remotos permite diferenciar alteraciones hidrotermales asociadas a la presencia de mineralizaciones de interés económico. En este trabajo, se presenta el análisis de imágenes multiespectrales de la zona volcánica del SE de la península Ibérica, y en particular de la zona minera de Rodalquilar, Almería, como una forma de evaluar el uso de esta tecnología como guía de exploración en sistemas epitermales de Au asociados a cinturones de rocas volcánicas.

El complejo minero de Rodalquilar se localiza en Cabo de Gata, Almería. Se trata de un complejo de calderas volcánicas que incluye mineralizaciones de metales base y preciosos en sistema de alta ( $Au\pm Cu$ , Te, Sn) y baja sulfidización ( $Pb-Zn\pm Cu$ , Ag, Au) (Arribas et al, 1995). Sus dimensiones aproximadas son de unos 8 Km en dirección Este-Oeste y aproximadamente 4 Km dirección Norte-Sur, Existen evidencias de explotación en época romana. Durante el periodo industrial se explotó intermitentemente en varios periodos del siglo XX. Las sustancias de interés económico fueron fundamentalmente el oro, el alumbre, la plata, el plomo y caolín, (Hernández Ortiz, 2002).

Los estudios previos basados en cartografía de superficie y análisis de testigos de sondeo ponen de manifiesto extensas zonas de alteración hidrotermal de diversa naturaleza incluyendo: silícica avanzada, argilítica avanzada, argilítica intermedia, sericítica y propilítica (Arribas et al. 1995). En esta investigación se realiza el análisis y caracterización de las zonas presentes en el complejo de calderas mediante el análisis comparativo de imágenes obtenidas con los satélites Landsat 7 ETM+ y Terra ASTER. Se utilizan diferentes técnicas de análisis con la finalidad de comparar cuál de las dos imágenes ofrece mejores criterios para la distinción de las zonas de alteración. Este ejercicio permite seleccionar adicionalmente las imágenes y herramientas de análisis más idóneas para una posible prospección del entorno de Rodalquilar, o de otros yacimientos de igual naturaleza, a fin identificar otras posibles zonas mineralizadas.

## **1.2 Objetivos de la Investigación**

Identificar las diferentes zonas de alteración hidrotermal mediante análisis de imágenes satelitales en el complejo de calderas de Rodalquilar, Almería.

Determinar la herramienta adecuada para diferenciar los diferentes tipos de alteración hidrotermal en sistemas epitermales asociados a complejos volcánicos

Analizar de manera comparativa la información que proporcionan los sistemas ETM+ y ASTER para su aplicación al estudio de distritos mineros similares al complejo de calderas de Rodalquilar, Almería.

---

## CAPITULO II.

---

### 2.1 ANTECEDENTES

Se ha realizado una revisión de investigaciones y estudios preliminares sobre el caso de estudio. A continuación se presenta una recopilación de la información más relevante sobre investigaciones realizadas en el complejo de calderas de Rodalquilar, Cabo de Gata, Almería y el análisis de imágenes de sensores remotos aplicadas a la exploración minera. Como referencias fundamentales son de destacar las siguientes:

El estudio realizado por Arribas et al. (1995), consistió en la caracterización del yacimiento aurífero epitermal de Rodalquilar. Según los mencionados autores, se trata de un yacimiento formado en un contexto de vulcanismo ácido explosivo que dio lugar a extensos depósitos de cenizas riolíticas. Tras el colapso se produjo el resurgimiento de domos félsicos en el interior y en el borde de la caldera. Los

depósitos de oro dentro del complejo Rodalquilar aparecen asociados a sistemas de baja sulfidización Pb-Zn (Cu-Ag-Au), a venas de cuarzo y a contextos de alta sulfidización de Au (Cu-Te-Sn). Estos últimos aparecen asociadas a áreas de alteración caracterizadas por sulfatos ácidos (alunita-jarosita), localizadas hacia los márgenes de la caldera. Estos autores aportan información relevante para enmarcar geológicamente la presente investigación, a la vez que proporcionan datos esenciales para delimitar las diferentes zonas de alteración asociadas a las mineralizaciones de Rodalquilar.

Sabins (1999) revisa los principios de las técnicas básicas de análisis espectral aplicadas en exploración minera. Analizando diversos casos de estudio muestra la potencialidad de imágenes multispectrales tales como IKONOS, TM/ETM+ o ASTER e imágenes hiperespectrales como AVIRIS. Pone de manifiesto la capacidad de las imágenes TM/ETM+ para discriminar zonas con alteración hidrotermal dominadas por minerales arcillosos y zonas de alteración supergénica dominadas por óxidos de hierro. Además muestra como el análisis de imágenes hiperespectrales puede llegar a ser útil en la diferenciación de minerales a nivel de especie. Plantea además la necesidad de desarrollar el análisis de la región térmica de las imágenes ASTER, dado que es en esta región del espectro donde minerales silicatados y rocas ricas en sílice presentan las principales singularidades espectrales.

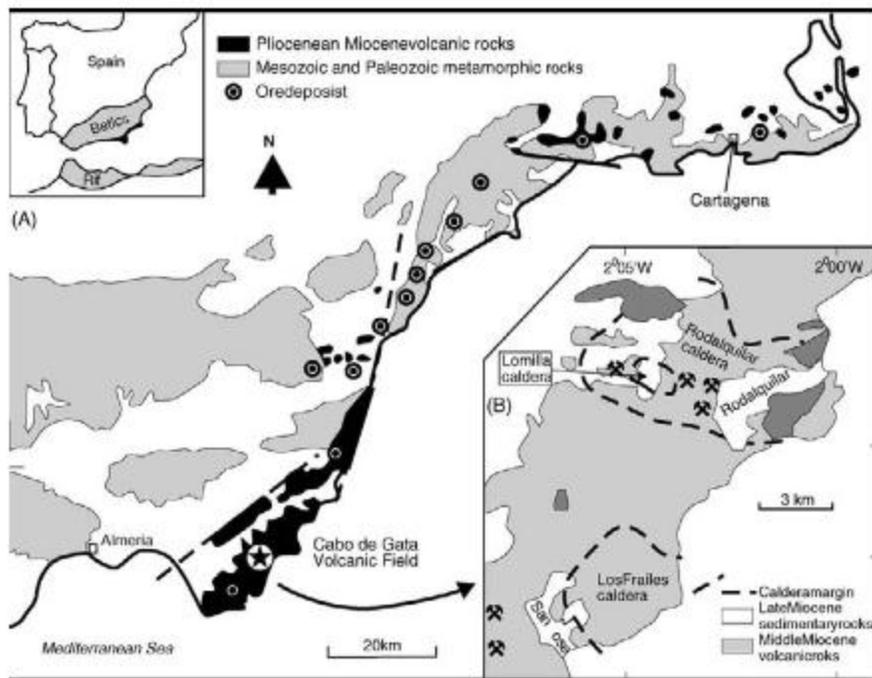
Crosta et al., (2009) realizan una profunda revisión del estado actual de aplicabilidad de las imágenes Landsat TM/ETM+ en exploración minera. Revisan los fundamentos de estos sensores y los principales avances acaecidos en los últimos 25 años en relación con su análisis espectral, describen las técnicas más exitosamente usadas con estas imágenes y presentan diversos casos de estudio que demuestran los beneficios del uso de imágenes TM/ETM+ en prospección. Realizan al mismo tiempo una puesta en valor de la ingente cantidad de imágenes de prácticamente todo el planeta que el programa Landsat ha suministrado desde su inicio. Dado que la información geológica incluida en estas imágenes ha permanecido prácticamente inalterada desde el inicio del programa, la base de

datos Landsat puede considerarse como la mayor colección de imágenes de satélite al servicio de la exploración minera.

## 2.2 Encuadre geológico y metalogénico

### 2.2.1 Localización geográfica y geológica

Las calderas volcánicas de Rodalquilar se localizan junto al poblado minero homónimo, en el extremo sureste de la Península Ibérica (Figura 1), dentro del campo volcánico neógeno de Cabo de Gata (provincia de Almería). Constituyen una estructura ovalada de unos 8 km en dirección E-O y en torno a 4 km en dirección N-S, localizada en el eje volcánico que se extiende desde Cabo de Gata, en la provincia de Almería, hasta Cartagena, en Murcia.



**Figura 1.** Localización del yacimiento de oro Rodalquilar (Van der Meer et al. 2006.)

Se trata de un cinturón volcánico mioceno con una extensión de unos 150 km en dirección NE-SO. Los materiales aflorantes en el complejo volcánico de Cabo de Gata incluyen lavas y rocas piroclásticas de naturaleza calcoalcalina, con

composiciones variables desde andesitas hasta riolitas. Hacia el NE la naturaleza de las rocas cambia hacia composiciones más ricas en potasio, abundando las rocas shoshoníticas (Fernández Soler, 1996). El área de Rodalquilar, se encuentra en el dominio de Cabo de Gata y en ella afloran rocas de composición ácida a intermedia, con predominio de las rocas piroclásticas.

### **2.2.2 Origen de las Calderas de Rodalquilar**

La caldera de Rodalquilar es una estructura de colapso producida por la erupción masiva de magmas riolíticos almacenado en una cámara magmática relativamente somera. El resultado de la erupción son las conocidas como ignimbritas de El Cinto, cuya edad ha sido establecida en 11 Ma (Arribas et al. 1995). La reactivación de los procesos magmáticos subsecuente al colapso de la caldera dio lugar al emplazamiento de diques anulares y domos riolíticos, que abundan especialmente en el borde sur de la misma. La etapa final de la evolución de la actividad magmática queda registrada como una nueva erupción piroclástica que dio lugar a las ignimbritas de Las Lázaras. El colapso subsecuente en el borde occidental de la caldera de Rodalquilar dio lugar a la caldera de La Lomilla.

### **2.2.3 Mineralizaciones asociadas**

En el área volcánica de Cabo de Gata, han sido explotadas históricamente mineralizaciones de oro, metales base, manganeso y minerales industriales, fundamentalmente sulfatos (alunita) y esmectitas. El sistema de calderas de Rodalquilar alberga mineralizaciones de oro que fueron explotadas a gran escala desde principios del siglo XX hasta 1966. Un intento de reactivación posterior, en la década de los 90 del siglo XX resulto fallido. En la actualidad, los posibles intereses mineros están dificultados por la figura de protección ambiental que califica al área de Cabo de Gata como Parque Natural y como Geoparque.

Las mineralizaciones de Au de Rodalquilar constituyen un sistema epitermal de alta sulfurización asociado al desarrollo del sistema de calderas (Arribas et al 1995). Las estructuras mineralizadas más importantes se encuentran en el Cerro de El Cinto (Figura 2). Se trata de fracturas radiales y concéntricas asociadas al

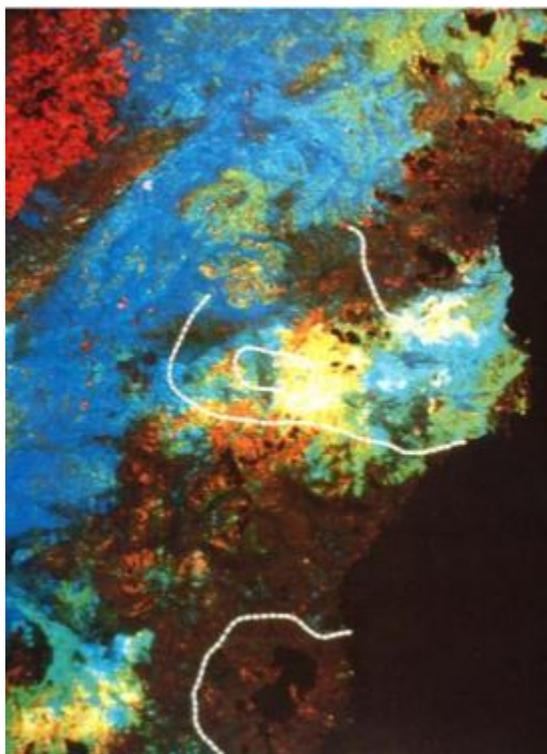
colapso de la caldera de La Lomilla y a fracturas extensionales de dirección NS (Arribas et al. 1995) posiblemente relacionadas con sistemas de fallas regionales paralelas a la dirección de las que delimitan la Serrata de Nijar. Las mineralizaciones encajan indistintamente en brechas de colapso, ignimbritas o en riolitas masivas de los domos anulares. La mineralización de oro aparece restringida a zonas con intensa alteración hidrotermal, especialmente en alteraciones silícicas. La mineralización primaria ocurre principalmente de dos formas diferentes: como venas de cuarzo calcedónicas, y como brechas hidrotermales con alto contenido en Te y Sn. También se ha reconocido cierto enriquecimiento supergénico en el que el Au aparece asociado con óxidos de hierro, escorodita y jarosita, que aparecen rellenando fisuras en las rocas más permeables. El oro en ambos tipos de mineralizaciones (hipogénica y supergénica) es de alta pureza.



**Figura 2.** Zona minera del Cerro del Cinto.

### **Alteración hidrotermal (hipogénica)**

Los yacimientos en Rodalquilar se distribuyen en una zona que posee más de 25 km<sup>2</sup>, la cual está afectada por una intensa alteración hidrotermal. La zona atraviesa las calderas de La Lomilla y Rodalquilar como se puede observar en la Figura 3, que representa una imagen tomada desde el satélite Landsat 5 TM (Arribas et al. 1995)

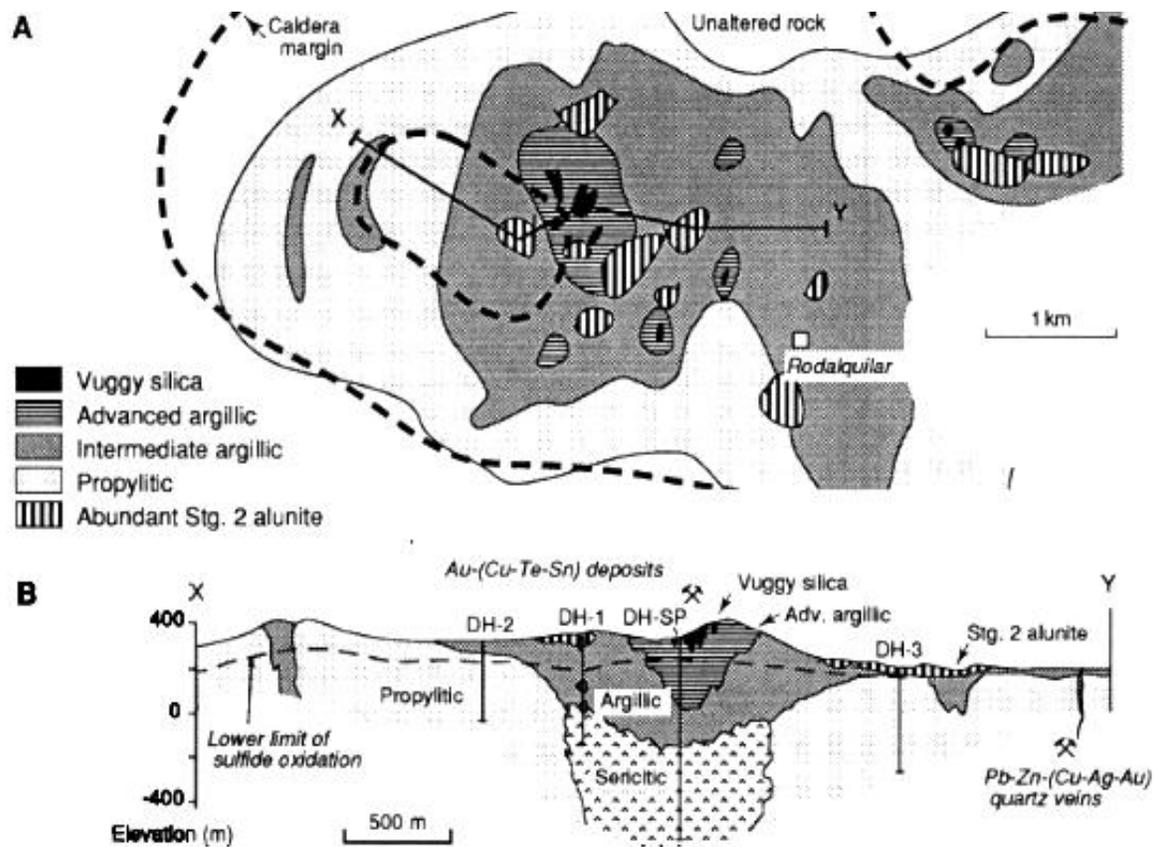


**Figura 3.** Imagen tomada del satélite Landsat 5 TM.  
(Arribas et al. 1995)

En el complejo Rodalquilar, se han distinguido cinco tipos de alteraciones: propilítica, sericítica, argilítica intermedia, argilítica avanzada y silícica, destacando dos áreas de rocas intensamente alteradas, de las que el área central, Cerro del Cinto, es la más importante, y una tercera de menor intensidad de alteración situada al noroeste de la localidad de Rodalquilar (Figura 4).

## Zona Silícica

En el área de Rodalquilar, se han identificado dos tipos de alteraciones silíceas: sílice residual (*vuggy silica*) y la de rocas silicificadas masivas en cuerpos irregulares. Las zonas de sílice residual, están controladas por fallas y fracturas localizadas principalmente en el margen Este en la caldera de La Lomilla. Estas zonas están caracterizadas por alto porcentaje en  $\text{SiO}_2$  y bajo contenido de los otros componentes de la roca. En la Figura 4 se muestra la localización de esta zona en Rodalquilar.



**Figura 4.** Esquema del mapa de alteración superficial, Rodalquilar. Arribas et al, (1995)

### *Zona Argilítica Avanzada*

Alrededor de las zonas de alteración silíceas residual del Cerro de El Cinto y en otros puntos con mineralización aurífera, se extiende una extensa área de rocas con alteración argilítica avanzada. Este tipo de alteración, de acuerdo con Arribas et al. (1995), continúa hasta más de 300 m de profundidad. Estos autores mencionan, en Rodalquilar, dos subzonas dentro de la considerada alteración argilítica avanzada: una zona de cuarzo-caolinita-alunita y una zona cuarzo-caolinita, caolinita-esmectita abundante.

### *Zona Argilítica Intermedia*

La zona argilítica intermedia se compone de una amplia gama de rocas sujetas a grados variables de argilización y se caracteriza por asociaciones de minerales de alteración con cuarzo, caolinita, illita, illita-esmectita, feldespato K, hematites, pirita y bajos contenidos de alunita. La proporción relativa de distintos minerales depende de la proximidad con respecto a zonas más o menos alteradas dentro del sistema y con la acción tardía de procesos supergénicos caracterizados por fluidos meteóricos de bajo pH. El rasgo mineralógico más característico de la zona argilítica intermedia es la abundancia de caolinita y la presencia de alunita como fase subordinada. La composición química de la zona intermedia argilítica es muy variable.

### *Zona Sericítica*

Algunos sondeos realizados en la zona del Cinto han puesto de manifiesto alteraciones de tipo sericítica a profundidades mayores de 300 m. La mineralogía de las rocas alteradas sericíticamente es simple y está formada por illita, cuarzo y pirita con cantidades menores de rutilio, caolinita y alunita.

### *Zona Propilítica*

La alteración propilítica da lugar a asociaciones minerales con cuarzo, clorita, feldespato K, illita y esmectitas. Este tipo de alteración se extiende en un área muy

amplia alrededor del sistema hidrotermal. La composición química de las rocas alteradas propíliticamente es similar a las de las rocas frescas.

### **Alteración Supergénica**

Además de la alteración hidrotermal, las rocas del sistema de Rodalquilar presentan una intensa alteración supergénica asociada a fluidos meteóricos fuertemente acidificados, que percolaron a través de poros y fracturas de las rocas. Como consecuencia, una segunda generación de alunita (alunita 2), asociada con cuarzo, caolinita, jarosita, hematites, y sílice amorfa hidratada aparece localmente en zonas superficiales, que se presentan intensamente alteradas.

#### **2.2.4 Edad de la mineralización y de las alteraciones**

La edad de la mineralización, determinada por el método K-Ar en sericitas y alunitas formadas en el proceso de alteración hidrotermal, se estima en  $10.8 \pm 5$  Ma (Arribas et al. 1995) y es congruente con la de las dacitas precaldera de Rodalquilar que han sido datadas en 11 Ma (Rytuba et al. 1990)

---

## CAPITULO III.

---

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

El estudio realizado en el yacimiento de Rodalquilar y su entorno más inmediato se ha basado íntegramente en el análisis espectral de dos imágenes satelitales: la imagen Landsat 7 ETM+ p036r084, tomada el 01/12/2001 y descargada de forma gratuita desde servidor NASA de ESDI (Earth Science Data Interface); y la imagen terra ASTER ASTL1B 0609261101040609290425 tomada el 26/09/2006 y adquirida en el portal japonés del ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). En ambos casos se seleccionó la imagen con menor cobertura de nubes de cuantas estaban disponibles.

El satélite Landsat 7 posee un sensor radiométrico multispectral denominado Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), que proporciona imágenes con 8 bandas espectrales. La resolución espacial de las imágenes varía entre 15 y 60 m

y el tamaño aproximado de la escena es de 170 x 183 Km. Los principales datos radiométricos, espectrales y espaciales se sintetizan en la siguiente tabla.

Plataforma	Sensor/Altitud	Resolución espectral			
		Canal	Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
Landsat 7	ETM+/705 Km	1	Blue	0.45-0.515	30
		2	Green	0.525-0.605	30
		3	Red	0.63-0.69	30
		4	NIR	0.75-0.90	30
		5	SWIR	1.55-1.75	30
		6	TIR	10.4-12.5	60
		7	SWIR	2.08-2.35	30
		8	PAN	0.52-0.90	15

**Tabla 1.** Información espectral, radiométrica y espacial de las imágenes ETM+.

El sensor ASTER, a bordo del satélite Terra, posee mayor resolución espectral (14 bandas). La resolución espacial varía entre 15 y 90 m, y el tamaño de la escena es aproximadamente de 60x60 km, como se ilustra en la tabla 2.

El estado de corrección y calibración de las imágenes en el momento de su adquisición fue distinto. Si bien en ambos casos las imágenes adquiridas habían sido ortorectificadas respecto a las imágenes originales, el valor del pixel se aportaba en cada caso en diferentes unidades, lo que implicaba un desigual grado de calibración radiométrica.

La imagen ETM+ presentaba valores originales de Nivel Digital (ND), mientras que la imagen ASTER, adquirida en un nivel de tratamiento 1B, ofrecía valores de radiancia aparente.

Plataforma	Sensor/Altitud	Resolución espectral			
		Canal	Banda	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)
Terra	ASTER/705 km	1	Green	0.52-0.60	15
		2	Red	0.63-0.69	15
		3	NIR	0.76-0.86	15
		4	SWIR	1.60-1.70	30
		5	SWIR	2.145-2.185	30
		6	SWIR	2.185-2.225	30
		7	SWIR	2.235-2.285	30
		8	SWIR	2.295-2.365	30
		9	SWIR	2.36-2.43	30
		10	TIR	8.124-8.475	90
		11	TIR	8.475-8.825	90
		12	TIR	8.925-9.275	90
		13	TIR	10.25-10.95	90
		14	TIR	10.95-11.65	90

**Tabla 2.** Información espectral, radiométrica y espacial de las imágenes ASTER.

El proceso de calibración de la imagen ETM+, y por tanto la transformación en valores de reflectancia se realizó mediante la transformación de los valores iniciales de ND a valores de Radiancia y estos a su vez a valores de reflectancia aparente. Tanto las ecuaciones como las constantes empleadas se ajustaron a las suministradas por la Agencia Espacial Europea (Saunier and Jackson 2009):

- 1) Transformación de ND a valores de radiancia:

$$L(\lambda_i) = \text{Gain}_i * \text{DN}_i + \text{offset}_i \quad (\text{Ec. 1})$$

**Dónde:**

$L(\lambda_i)$  = radiancia espectral de cada banda  $i$

$DN_i$  = Número digital de cada banda  $i$

Offset =  $L_{min}$

$$\text{Gain} = \frac{L_{max} - L_{min}}{255}$$

Los valores calibrados de offset y el gain de cada banda se obtuvieron de las siguientes tablas (Saunier and Jackson 2009):

Band	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{min}$ ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu$ )	-6,2	-6,4	-5	-5,1	-1	0	-0,35	-4,7
$L_{max}$ ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu$ )	293,7	300,9	234,4	241,1	47,57	17,04	16,54	243,1
Offset = $L_{min}$ , (A0)	-6,2	-6,4	-5	-5,1	-1	0	-0,35	-4,7
Gain = $(L_{max} - L_{min})/255$ , (A1)	1,1761	1,2051	0,9388	0,9655	0,1905	0,0668	0,0662	0,9718

**Tabla 3.1.** Valores de rango espectral ETM+-7 de gain bajo

Band	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{min}$ ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu$ )	-6,2	-6,4	-5	-5,1	-1	3,2	-0,35	-4,7
$L_{max}$ ( $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu$ )	191,6	196,5	152,9	157,4	31,06	12,65	10,8	158,3
Offset = $L_{min}$ , (A0)	-6,2	-6,4	-5	-5,1	-1	3,2	-0,35	-4,7
Gain = $(L_{max} - L_{min})/255$ , (A1)	0,7757	0,7957	0,6192	0,6373	0,1257	0,0371	0,0437	0,6392

**Tabla 3.2.** Valores de rango espectral ETM+-7 de gain alto

2) Transformación de radiancia a valores de reflectancia aparente:

$$Re_i = \frac{(\pi \cdot L(\lambda_i) \cdot d_0^2)}{E_{\lambda_i} \cdot \cos(\theta)} \quad (\text{Ec. 2})$$

**Dónde:**

$Re_i$  = reflectancia aparente para cada banda  $i$

$L(\lambda_i)$  = radiancia espectral de cada banda  $i$  (expresada en  $.m^{-2} \cdot sr^{-1} \mu m^{-1}$ )

$E_{\lambda_i}$  = irradiancia espectral solar para cada banda  $i$  (expresada en  $wm^{-2} \mu m^{-1}$ )

$\theta$  = ángulo zenith solar (expresado en grados)

$d_0$  = distancia del sol a la tierra (expresada en unidades astronómicas)

$$d_0 = (1 - 0.016729 \cdot \cos(0.9856 (\text{DOY} - 4))) \quad (\text{Ec. 3})$$

**Dónde:**

DOY= número de día juliano, desde 1 a 365/366

Para el cálculo de  $\theta$  y  $d_0$  se utilizaron respectivamente los valores de elevación solar y día de adquisición suministrados en el archivo de cabecera de la imagen ETM+ utilizada. Los valores de irradiancia solar fueron obtenidos de la siguiente tabla (Saunier and Jackson 2009):

Band	watts/(meter squared * $\mu\text{m}$ )
1	1969
2	1840
3	1551
4	1044
5	225.7
7	82.07
8	1368

**Tabla 4.** Valores de irradiancia espectral solar.

Cabe resaltar que durante el proceso de calibración la resolución espacial de las bandas de la imagen ETM+ fue uniformizada a 28.5 m. Por otro lado, para el caso de la imagen ASTER, la calibración a valores de reflectancia aparente se realizó mediante la aplicación de la Ecuación 2. El paso previo de ND a radiancia no fue necesario dado que los valores iniciales venían ya expresados en dicha unidad. Al igual que para ETM+, los datos de la imagen ASTER requeridos en la ecuación de transformación a valores de reflectancia (Ecuación 2) se extrajeron del archivo de cabecera suministrado.

Los valores de  $E_{\lambda_i}$  se tomaron de acuerdo con los datos aportados por Thome et al. (2001):

Band#	Smith: $E_{SUN}$	Thome et al 2001(A): $E_{SUN}$
1	1845.99	1847
2	1555.74	1553
B3N	1119.47	1118
4	231.25	232.5
5	79.81	80.32
6	74.99	74.92
7	68.66	69.20
8	59.74	59.82
9	56.92	57.32

**Tabla 5.** ESUN para cada banda ASTER

El proceso de calibración y transformación a valores de reflectancia aparente seguido en este trabajo lleva implícito una corrección atmosférica de orden menor en la que intervienen únicamente la compensación de la variación interanual de la radiación solar y el efecto producido por el ángulo de elevación solar (Brizuela et al. 2007). Aunque aparentemente sería más correcto utilizar un proceso de corrección atmosférica que implícitamente contemplara los distintos efectos que la atmosfera produce en la radiación solar, el análisis de un yacimiento epidermal como el de Rodalquilar no requiere de tal grado de corrección. Los distintos algoritmos de corrección atmosférica disponibles en la literatura afectan mayoritariamente a las bandas del VNIR, dejando la región del SWIR prácticamente inalterada. Es precisamente esta región del SWIR donde mejor se aprecian los efectos de las alteraciones asociadas a depósitos epidermales, y por tanto donde se encuentran las bandas que comúnmente se usan para su análisis espectral.

Por otra parte, muchas de las técnicas de análisis empleadas en este estudio se basan en algoritmos que compensan, o no son afectados, por las alteraciones atmosféricas existentes, independientemente de la banda que se considere. En consecuencia, la ausencia de un mayor grado de corrección atmosférica en las imágenes analizadas en este trabajo queda totalmente justificada.

El análisis espectral de las imágenes ETM+ y ASTER adquiridas para este estudio se basó en la aplicación de cuatro técnicas comúnmente utilizadas en

teledetección y que se detallan a continuación. El software de análisis espectral utilizado fue ENVI 4.7.

### **Band rationing**

Consiste en la división de los píxeles de una banda por los correspondientes píxeles de otra. La imagen monobanda resultante permite discriminar con mayor facilidad superficies cuyos valores de reflectividad de las bandas implicadas son desiguales. Este procedimiento elimina además la diferencia de iluminación que existe entre las bandas relacionadas por lo que suprime cualquier efecto topográfico indeseado, como por ejemplo la existencia de sombras. En la práctica, el proceso de band rationing puede incluir además relaciones de adición, sustracción y multiplicación de bandas tanto en el dividendo como en el divisor.

### **Feature-oriented Principal Component Selection (FPCS) o Técnica Crosta**

El análisis de componentes principales es una técnica estadística multivariante comúnmente utilizada para reducir la redundancia de datos multiespectrales. Implica una transformación lineal de las bandas de la imagen original y la creación de un nuevo conjunto de bandas llamadas Componentes Principales. Por lo tanto los nuevos valores de los píxeles de los Componentes Principales están relacionados linealmente con los ND o valores de radiancia originales de las bandas implicadas en el análisis.

Los primeros Componentes Principales contienen información redundante, mientras que la información peor correlacionada entre bandas, que representa la más interesante para la identificación de cuerpos y superficies de gran contraste espectral entre bandas, se registra paulatinamente en los sucesivos componentes principales.

La FPCS, o Técnica Crosta, es una variante del Análisis de Componentes Principales. Requiere un estudio previo de los perfiles espectrales de aquellos cuerpos o superficies que pretenden identificarse en la imagen a fin de conocer que regiones del espectro poseen mayor contraste. Una vez seleccionadas las

bandas correspondientes se les realiza exclusivamente a ellas el Análisis de Componentes Principales. Esta técnica goza de gran aceptación como herramienta de mapeo de zonas de alteración, y es utilizada para la identificación de áreas potenciales de prospección minera.

### **Decorrelation stretch**

Es una técnica de mejora de la imagen basada en el Análisis de Componentes Principales, que consiste en la transformación de los colores iniciales en base al teorema de Karhunen-Loève. Técnicamente consiste en la realización de un Análisis de Componentes Principales de una imagen tribanda, seguido de una normalización de los valores de varianza de cada Componente y de un aumento gaussiano de contraste de cada uno de ellos. Por último se combinan en una imagen tribanda los tres Componentes Principales modificados, dando como resultado una imagen con mayor contraste del color, que permite la identificación de regiones difícilmente discriminables en la imagen original.

### **Density slicing**

Consiste en la creación de distintos intervalos de valores de una imagen monobanda a los que se les asigna un determinado color. Tanto el rango de los intervalos como la asignación de color son definidos por el usuario. Las imágenes monobanda a las que se aplica esta técnica pueden ser originales, producidas por band rationing o por cualquiera de los métodos basados en el Análisis de Componentes Principales. A diferencia de los métodos anteriores el density slicing no concentra información, simplemente la realza. En el presente trabajo se ha utilizado como apoyo a otras técnicas, únicamente en aquellos casos en los que la imagen resultante requería una mejora substancial en su visualización.

---

## CAPITULO IV.

---

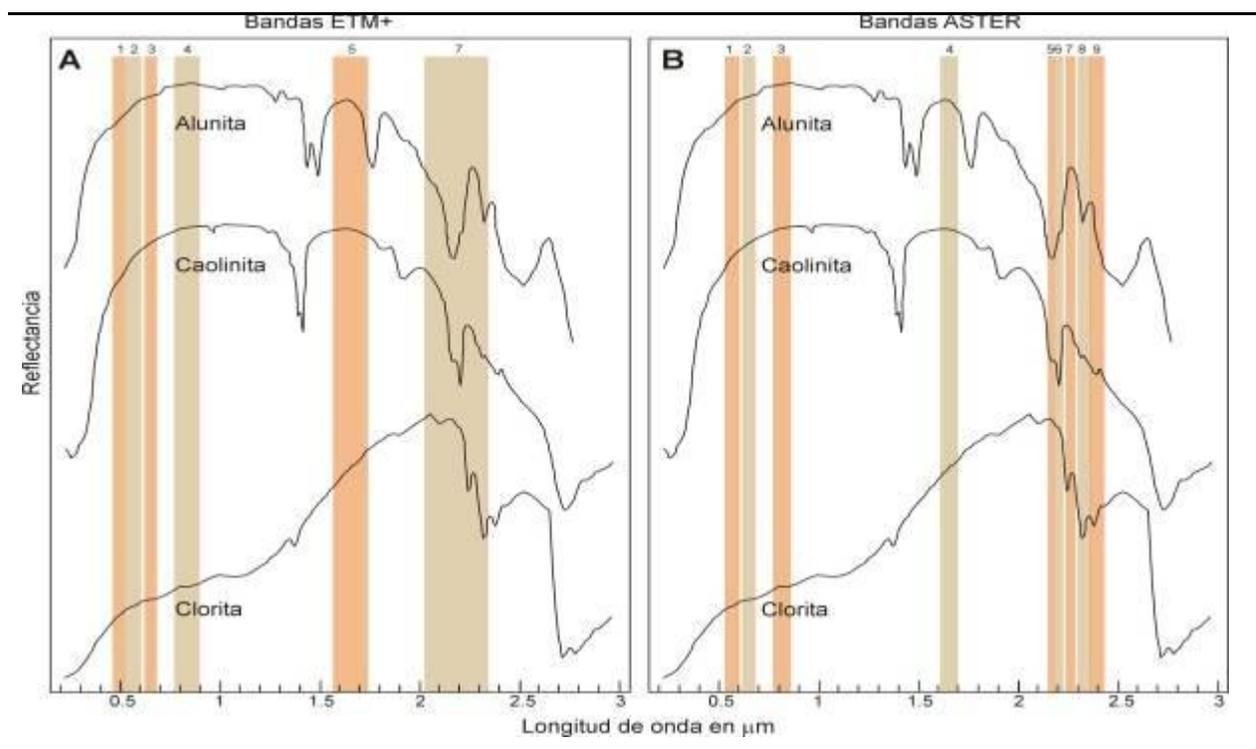
### **Resultados de la Investigación**

Tal y como quedó plasmado en el apartado de Metodología, los resultados del presente estudio provienen íntegramente del análisis espectral de dos imágenes de satélite: una imagen Landsat 7 ETM+ y una imagen Terra ASTER. Con posterioridad a la etapa de calibración, en la que se transformaron los valores iniciales de Nivel Digital de la imagen ETM+ y los de radiancia de la imagen ASTER en valores de reflectancia, se procedió a la selección de los minerales característicos de cada una de las zonas de alteración definidas en el área de Rodalquilar y mencionadas en el encuadre geológico.

Para áreas dominadas por alteración silícica se seleccionó el cuarzo como mineral representativo. Para la alteración argilítica avanzada la alunita, para la argilítica

intermedia alunita y caolinita y para la propilítica la clorita. La alteración sericitica no aflora en superficie, por lo que quedó desestimada en este estudio.

La alteración silícica también fue desestimada dado que posee un reducido tamaño de afloramiento, lo que hace difícil su identificación con imágenes de 30 m de resolución espacial. La figura 5 muestra las curvas de reflectancia de los minerales seleccionados confrontadas con las bandas espectrales de ETM+ y ASTER.

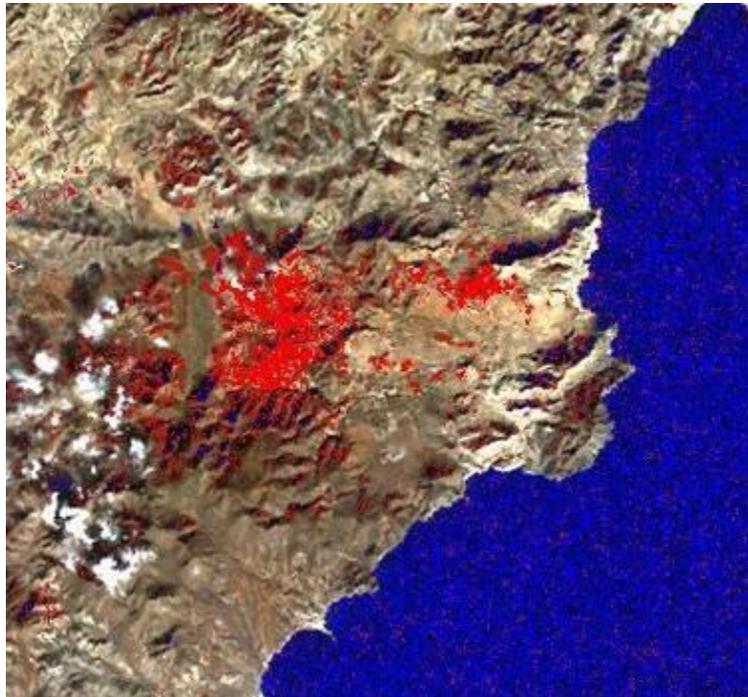


**Figura 5.** Curvas de reflectancia de los minerales dominantes en las distintas zonas de alteración registradas superficialmente en Rodalquilar para un intervalo comprendido entre 0 y 3  $\mu\text{m}$ . Extraído de Clark et al. (2007). Se incluyen las bandas que ETM+ (A) y ASTER (B) poseen en dicho intervalo.

### ***Band Rationing***

Del análisis de la curvas espectrales de los minerales seleccionados (Figura 5A) se observa que alunita y caolinita presentan un máximo de reflexión en la región de la banda 5 ETM+ y un pico de absorción en la banda 7. Por el contrario la

clorita es reflectiva en la banda 7 y absorbente en la banda 5. Por tanto en la combinación 5/7 de la imagen ETM+ cabe esperar que las regiones potencialmente dominadas por alunita y caolinita, correspondientes a las zonas de alteración alunítica avanzada e intermedia, posean tonos claros, mientras que las zonas con alteración propilítica, representada por clorita, presente tonos oscuros. En la Figura 7 se muestra el resultado de este ratio sobre la combinación RGB 321. Para mayor claridad de observación se ha realizado un density slice con tonos rojos y azules para los valores respectivamente más altos (alteraciones argilítica avanzada e intermedia) y bajos (alteración propilítica).



**Figura 6.** Ratio 5/7 de la imagen ETM+ sobre la combinación 321. En rojo los valores más altos, en azul los más bajos.

Tal y como se deduce de la observación de la Figura 6, el sensor ETM+ puede discriminar áreas con moderada a alta intensidad de alteración, pero no puede llegar a diferenciar distintos tipos de alteración dentro de estas áreas. Esto se debe a la escasa resolución espectral que dicho sensor posee en la región del SWIR comprendida entre 2.1 y 2.4  $\mu\text{m}$ . (sólo una banda), que es donde la mayoría

de los minerales típicamente hidrotermales presentan sus singularidades espectrales más significativas. Por el contrario, el sensor ASTER posee hasta 5 bandas en esta región, lo que posibilita la potencial identificación de zonas de alteración dominadas por cada una de las especies minerales seleccionadas.

Atendiendo a la relación entre las curvas espectrales de los minerales seleccionados y las bandas ASTER (Figura 5B) las combinaciones utilizadas en este estudio fueron las siguientes:

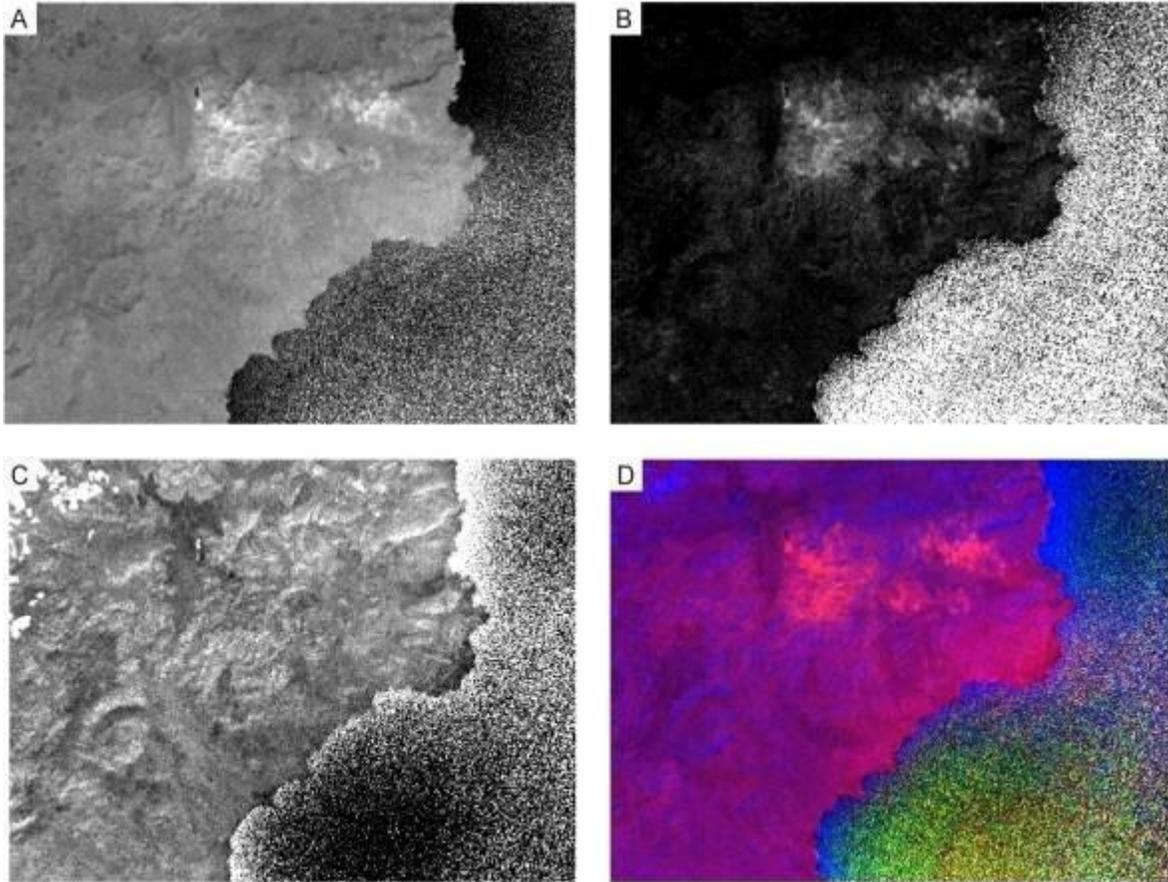
$$\text{Alunita} \rightarrow (b4 + b7)/(b5)$$

$$\text{Caolinita} \rightarrow (b4 + b7)/(b6)$$

$$\text{Clorita} \rightarrow (b5 + b7)/(b8).$$

Las figuras 7A, B y C muestran respectivamente el resultado de cada una de estas combinaciones. Se observa que tanto alunita como caolinita presentan un comportamiento parecido mientras que la clorita aparece de forma más diseminada. En conjunto se aprecian tres áreas con alta intensidad de alteración, aunque una de ellas, la más suroriental, es marcadamente más débil. La figura 7D representa la combinación RGB de los ratios para alunita, caolinita y clorita. En esta imagen se resaltan claramente estas tres áreas de alteración. La más occidental, correspondiente a la zona de Cinto, y la nororiental, en Los Tollos, presentan núcleos con tonos anaranjados que pueden identificarse con zonas de alteración argilítica avanzada. Los tonos rosa claro que envuelven a estas regiones y que predominan en la región suroriental cercana a la localidad de Rodalquilar, con menor intensidad de alteración, puede identificarse con las zonas internas del halo de alteración argilítica intermedia, donde las proporciones de alunita y caolinita aun siguen siendo importantes.

La alteración propilítica vendría marcada por los tonos azules que de forma irregular rodea a estas tres zonas de mayor intensidad de alteración. La discontinuidad de este color se justifica por el carácter escasamente pervasivo de esta alteración.



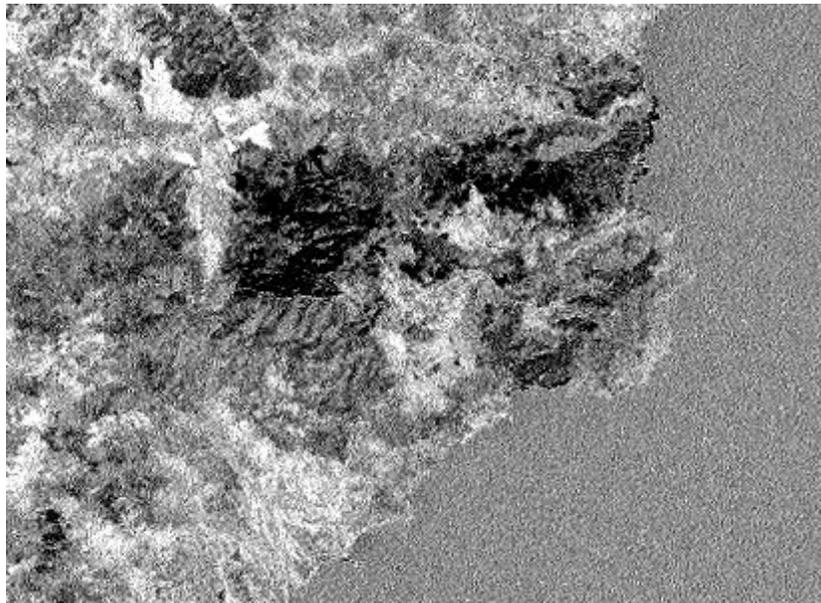
**Figura 7.** Combinaciones de la imagen ASTER  $(b4+b7)/(b5)$  para alunita (A),  $(b4+b7)/(b6)$  para caolinita (B), y  $(b5+b7)/(b8)$  para clorita (C). La Figura 7D representa la composición RGB de las combinaciones en A, B y C.

***Feature-oriented principal component selection (FPCS) o técnica Crosta***

Para la aplicación del método Crosta a la imagen ETM+ se llevó a cabo el análisis de componentes principales de las bandas 1, 4, 5 y 7. Del estudio de la tabla de autovalores resultante (Tabla 6) se deduce que la CP4 es la que aglutina la mayor cantidad de información sobre alteración hidrotermal, dado el fuerte contraste entre los valores de las bandas 5 y 7. Además, la participación negativa de la banda 5 y positiva y de la banda 7 en la CP4 hace que los píxeles potencialmente dominados por minerales hidrotermales aparezcan en tonos oscuros (Figura 8).

Autovalores	Banda 1	Banda 4	Banda 5	Banda 7
CP1	0.189314	0.487500	0.681060	0.512505
CP2	0.619353	0.612028	-0.351314	-0.344095
CP3	0.739189	-0.582854	-0.040387	0.335037
CP4	-0.184827	0.219195	-0.641174	0.711820

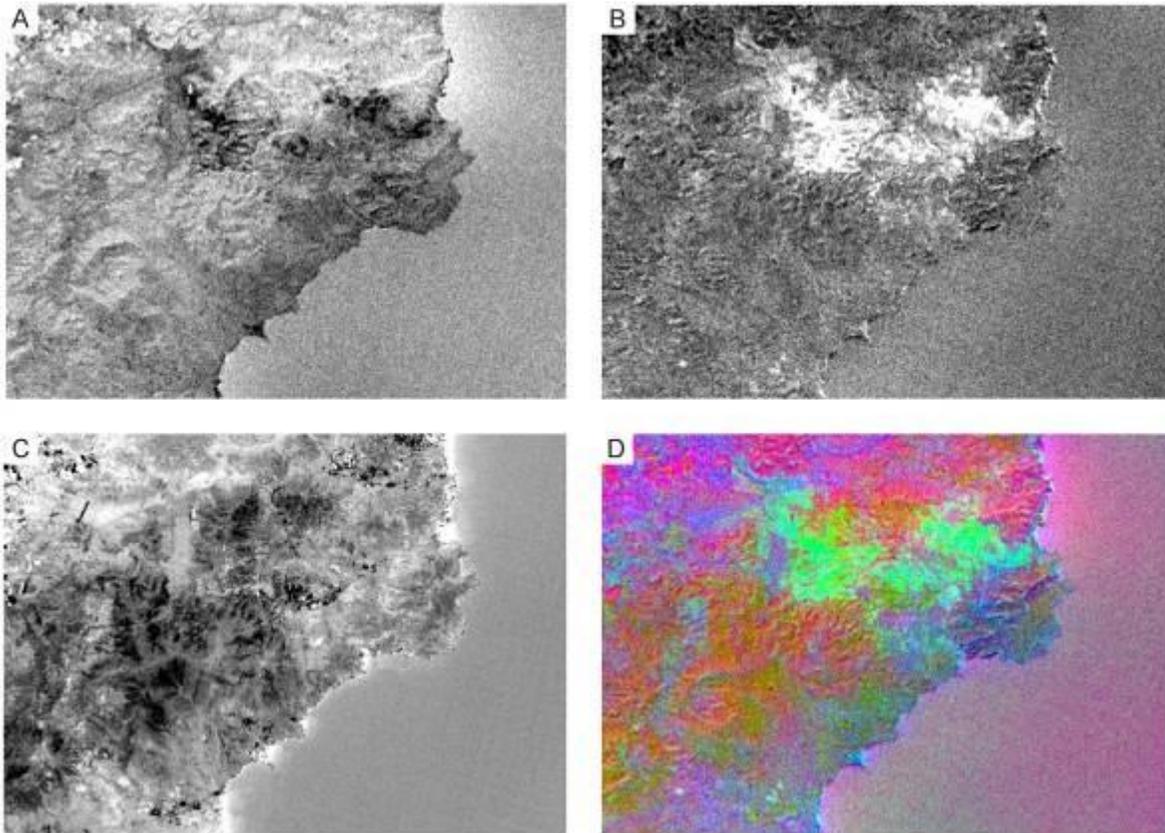
**Tabla 6.** Autovalores del análisis de componentes principales de las bandas ETM+ 1,4, 5 y 7.



**Figura 8.** CP4 del Feautre-Oriented Principal Component Analysis de la imagen ETM+. Las bandas empleadas en el análisis fueron 1, 4, 5 y 7.

Para discriminar las zonas de alteración en la imagen ASTER utilizando la técnica de Crosta se realizó el análisis de componentes principales de las bandas 3, 4, 5 y 7 (para alunita), 3, 4, 6 y 7 (para caolinita) y 1, 3, 5 y 8 (para clorita). Siguiendo el mismo razonamiento empleado con la imagen ETM+, se observó que los CP más relevantes fueron CP4 para alunita (Figura 9A), CP4 para caolinita (Figura 9B) y CP3 para clorita (Figura 9C). De la observación de las imágenes resultantes se vuelve a deducir que las zonas internas de los tres núcleos de alteración definidos anteriormente están fundamentalmente representadas por alunita (alteración argilítica avanzada), que el área con predominio de caolinita en las tres zonas se extiende más allá del límite de la zona con alto contenido en alunita, y que la

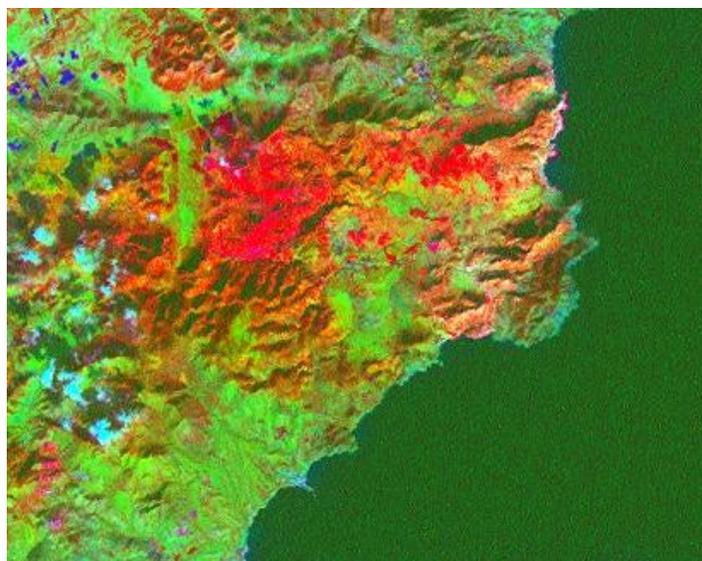
alteración propilítica de la zona externa es más difusa e irregular. La combinación RGB de estos tres CP (Figura 9D) permite realizar estas mismas observaciones en una única imagen. En color verde oliva se aprecia la zona de alteración argilítica avanzada, en tonos verde azulados la zona de alteración argilítica intermedia, y en tonos anaranjados la alteración propilítica.



**Figura 9.** Feature-Oriented Principal Component Analysis de la imagen ASTER. **A)** CP4 del análisis de las bandas 3, 4, 5 y 7 (alunita). **B)** CP4 del análisis de las bandas 3, 4, 6 y 7 (caolinita). **C)** CP3 del análisis de las bandas 1, 3, 5 y 8 (clorita).

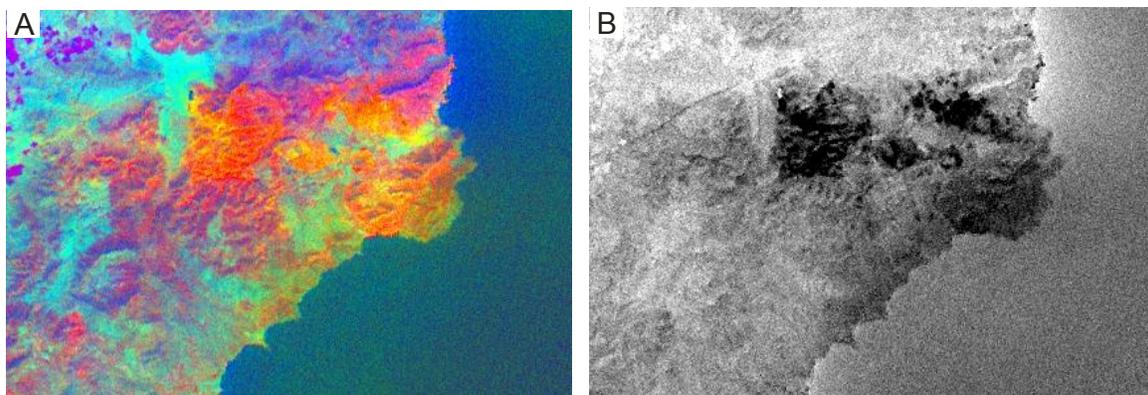
### ***Decorrelation Stretch***

Para discriminar las zonas de alteración en la imagen ETM+ se realizó el DS de las bandas 752. En la imagen resultante (Figura 10) se aprecia con un tono rojizo las áreas con intensa actividad hidrotermal (argilítica intermedia y avanzada) y las zonas con una menor intensidad de alteración (propilítica) presentan tonos anaranjados.



**Figura 10.** Decorrelation stretch aplicado a la combinación 752 de la imagen ETM+

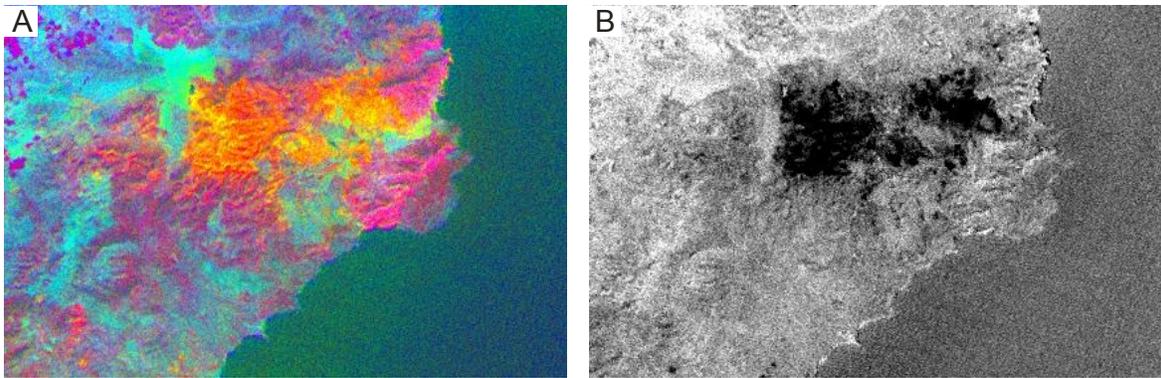
El análisis de la imagen ASTER se basó en el DS de tres combinaciones de bandas, una para cada uno de los minerales seleccionados. Para alunita se utilizó la combinación 457, para caolinita la 467 y para clorita la 578.



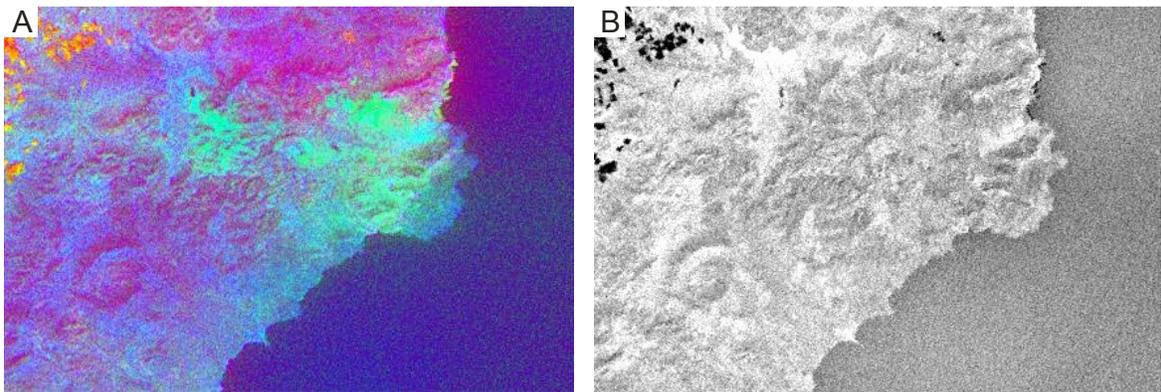
**Figura 11.** A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 457 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.

Los resultados obtenidos para alunita y caolinita son prácticamente idénticos (Figuras 11A y 12A), resaltándose ambas zonas en tonos anaranjados y amarillentos. El DS de la combinación seleccionada para la clorita (Figura 13A) muestra en tonos magenta las zonas susceptibles de estar dominadas por este mineral. Sin embargo, los datos más clarificadores que arroja el DS fueron sin

lugar a dudas las distintas “bandas azules” resultantes en cada uno de los análisis. La banda azul del DS para alunita (Figura 11B) muestra en tonos oscuros las tres regiones anteriormente identificadas como zonas de alteración argilítica avanzada. La banda azul del DS para caolinita (Figura 12B) muestra también tonalidades oscuras en estas tres mismas áreas, aunque dibujando un contorno sensiblemente mayor. Por último la banda azul del DS para clorita (Figura 13B) ofrece una información más imprecisa, aunque las zonas con tonos claros discontinuos en las inmediaciones del yacimiento podrían correlacionarse con el carácter poco pervasivo de la alteración propilítica



**Figura 12.** A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 467 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.



**Figura 13.** A) Decorrelation stretch (DS) aplicado a la combinación 578 de la imagen ETM+. B) Banda azul obtenida en el DS.

## Conclusiones

El análisis de las imágenes de satélite del yacimiento epitermal aurífero de Rodalquilar permite reconocer en el entorno más inmediato del yacimiento tres áreas donde la actividad hidrotermal fue marcadamente más intensa. Las dos áreas más importantes se localizan en las inmediaciones de la caldera de El Cinto y en el margen nororiental de la caldera principal. La de menor intensidad se sitúa al noreste de la localidad de Rodalquilar. Esta información es aportada tanto por la imagen ETM+ como por la imagen ASTER. No obstante, la mayor resolución espectral de ASTER en la región del infrarrojo medio (SWIR) donde la mayoría de los minerales hidrotermales presentan sus singularidades espectrales más evidentes permite reconocer distintos halos de alteración. En concreto se han podido reconocer el halo argilítico avanzado (donde se concentra la mineralización), el margen interno del argilítico intermedio y el halo exterior propilítico. Esta última zona, también detectada con ETM+, no se reconoce tan nítidamente como las anteriores lo que se debe por una parte al carácter poco pervasivo de esta alteración y por otra a la existencia de una asociación mineral más variable a veces no significativamente representada por el mineral seleccionado para dicha alteración en este estudio.

Las imágenes obtenidas con las distintas técnicas empleadas en este estudio son, con independencia del grado de información que han aportado, coherentes entre sí y con el mapa de alteración de Arribas et al. (1995) obtenido a partir de datos de campo.

Se puede deducir por tanto que la aplicación de la teledetección como método de exploración minera puede llegar a ser especialmente exitosa cuando se trabaja con imágenes de moderada a alta resolución espectral, como ASTER, y aplicando métodos, como Band Rationing o cualquier derivada del Principal Component Analysis, que de alguna u otra manera concentren la información geológica generalmente contenida de forma minoritaria en determinadas bandas.

## Referencias Bibliográficas

- Arribas, A. (1993). *Mapa geológico del distrito minero de Rodalquilar, Almería*. IGME (Madrid)
- Arribas, A., Cunningham, C.G., Rytuba, J.J., Rye, R.O., Kelly, W.C., Podwysoki, M.H., McKee, E.H. and Tosdal, R.M. (1995). *Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold alunite deposit, Spain*. *Economic Geology*, 90, 795-822.
- Bedell, R., Crósta, A. and Crunsky, E. (2009). *Remote sensing and spectral geology*. *Reviews in Economic Geology*, VOL: 16.
- Brizuela, A., Aguirre C., y Velazco I. (2007). *Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal*. XII Congreso de la asociación española de teledetección. Ed. Martín 2007. pp 207 – 214.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Kokaly, R.F. and Sutley S.J. (2007). *USGS Digital Spectral Library splib06a*, U.S. Geological Survey, Data Series 231.
- Crósta A. and Moore J.M. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospecting case history in Greenstone belt terrain. 7th Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Proceedings, ERIM, Calgary, 1173-1187.
- Crósta A, and Souza Filho, C.R. (2009). *Mineral exploration with Landsat Thematic Mapper (TM)/Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+): A review of the foundations, characteristics, data processing, and case studies*. *Reviews in Economic Geology*, 16, 59-82.
- Chávez, P.S. Jr., and Kwarteng, Y.A. (1989). *Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using Selective Principal Component Analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, 339–348.
- Fernández Soler, J.M. (1996) El volcanismo calco-alcalino en el parque natural de Cabo de Gata-Níjar (Almería). Estudio volcanológico y petrológico. *Sociedad Almeriense de Historia Natural*, 295pp
- Madani, A. (2008). *Utilization of Landsat ETM+ Data for Mapping Gossans and Iron Rich Zones Exposed at Bahrah Area, Western Arabian Shield, Saudi Arabia*. *JKAU Earth Science*, 20, 35-49.
- Rytuba, J.J., Arribas, Jr, A., Cunningham, C.G., McKee, E.H., Podwysoki, M.H., Smith, J.G., Kelly, W.C., Arribas, A. (1990): *Mineralized and unmineralized calderas in Spain; Part II, evolution of the Rodalquilar caldera complex and associated gold-alunite deposits*. *Mineralium Deposita*, 25, 29-35.

- Sabins, F. (1999). *Remote sensing for mineral exploration*. Ore Geology Reviews, v. 14: p. 157- 183
- Sánchez, J y Olmo, M. (2005). *Cartografía de minerales de alteración hidrotermal en el área de Cabo de Gata, Almería, mediante imágenes ASTER*. Arbelo, M. Teledetección. Avances en la Observación de la Tierra. Universidad de La Laguna, 411-414.
- Saunier, S. and Jackson, J. (2009). Earth Observatory Quality Control. Landsat frequently asked questions. *ESA unpublished documents, GAEL-P247-DOC-001*, 20 pp.
- Sierra, J. y Leal, O. (1968). *El distrito aurífero de Rodalquilar, Cabo de Gata. Geología, Metalogenia, Geoquímica e Investigación Minera, Empresa Nacional ADARO S.A., Informe interno*, 220 pp.
- Thome, K.J. (2001). *Absolute Radiometric Calibration of Landsat 7 ETM+ Using the Reflectance-Based Method*. Remote Sensing of Environment, 78(1–2), 27–38.
- Van der Meer, F. (1999). *Imaging spectrometry for geological remote sensing*. Geologie in Mijnbouw 77:137- 151.
- Van der Meer, F. (2006). *Indicator kriging applied to absorption band analysis in hyperspectral imagery: a case study from the Rodalquilar epithermal gold mining area, SE Spain*. In: International journal of applied earth observation and geoinformation, 61-72.