

**CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA CON IMÁGENES ASTER  
DE DEPÓSITOS TIPO CANDELARIA, CHILE.**

por:  
Julia Novikova

Recibido el 03 de mayo de 2004  
Aprobado el 07 de julio de 2004

## **CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA CON IMÁGENES ASTER DE DEPÓSITOS TIPO CANDELARIA, CHILE**

**Julia Novikova**

CODELCO-Chile, Gerencia de Exploraciones  
Huérfanos 1270, Santiago, Chile.

Fono: (56-2) 690-3768 Fax: (56-2) 690-3790,  
jnovikov@codelco.cl.

### **RESUMEN**

En el presente artículo, se presenta la metodología aplicada a imágenes *ASTER* de la mina Candelaria, localizada en las cercanías de Copiapó, Tercera Región de Chile, cuyo principal objetivo fue evaluar depósitos geológicos tipo Fe-Cu-Au.

### **ABSTRACT**

**ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)** is an imaging instrument that is flying on Terra, a satellite launched in December 1999 as part of NASA's Earth Observing System (EOS). It has 14 bands in 3 spectral regions: visible and near infrared (VNIR), short-wave infrared (SWIR) and thermal infrared (TIR). Also it has stereo mode by the nadir looking band 3N and backward-looking band 3B of VNIR. Because these main characteristics, ASTER data is a power tool to apply in geology.

The study area is Candelaria located in the Chilean Coastal Cordillera about 20 km south of Copiapó, Chile. The Candelaria deposit is located inside the contact metamorphic aureole of the Copiapó Batholith. Thermal metamorphism, metasomatism, and deformation resulted in almost complete replacement of the original mineral assemblages and poor preservation of original rock textures in most places of the deposit. Ore is hosted by biotitized andesitic volcanic rocks, and biotitized and partially skarned volcanoclastic and tuffaceous sedimentary rocks. The Candelaria orebody

predominantly consists of widely spaced polydirectional veins and veinlets of chalcopyrite plus pyrite, along and cutting foliation planes in sheared host rocks, of stringers, and impregnations.

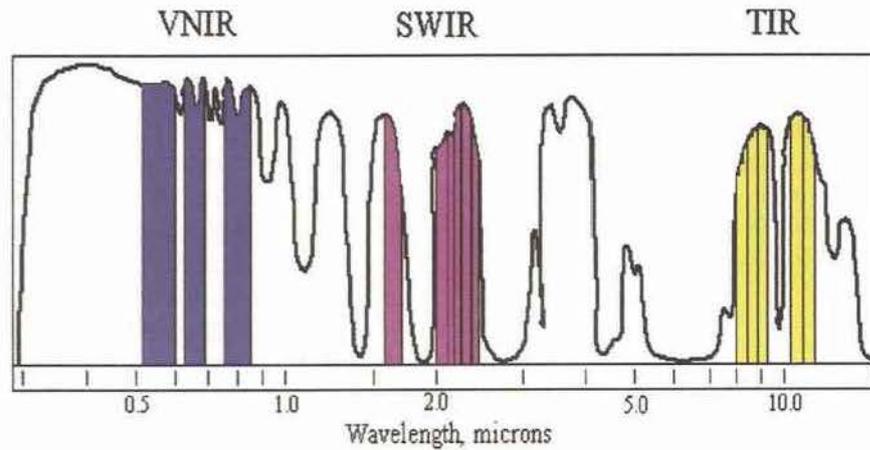
The main objective of this project is to evaluate Fe-Cu-Au type deposits geological mapping with ASTER images. In this work, the first stage results are presented, including satellite data processing and analysis as well as the interpretation. Different processes of VNIR, SWIR and TIR bands let to identify the geological units and allow the rocks and minerals discrimination.

**Palabras clave:** *Remote Sensing, Aster Image, Candelaria, Fe-Cu-Au deposits, band ratio.*

### **INTRODUCCION**

El sensor *ASTER* se encuentra a bordo del satélite *TERRA* que presenta una órbita helio-sincrónica a una altitud de 705 kilómetros, un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre órbitas de 172 Km. Dicho sensor está compuesto por 3 subsistemas, para cada región del espectro electromagnético: *VNIR*, *SWIR* y *TIR*. Cada uno de estos subsistemas presenta características particulares tales como: 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (*VNIR*) con una resolución espacial de 15 metros, 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (*SWIR*) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (figura 1).

Además presenta un telescopio con visual hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3 (banda 3B) lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (*DEM*) por pares estereoscópicos. La tabla 1 muestra las principales características de las bandas *ASTER*.



*Figura 1. Ubicación de bandas ASTER dentro de ventanas atmosféricas.*

Characteristic	VNIR	SWIR	TIR
Spectral Range	Band 1: 0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$ Nadir looking	Band 4: 1.600 - 1.700 $\mu\text{m}$	Band 10: 8.125 - 8.475 $\mu\text{m}$
	Band 2: 0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$ Nadir looking	Band 5: 2.145 - 2.185 $\mu\text{m}$	Band 11: 8.475 - 8.825 $\mu\text{m}$
	Band 3: 0.76 - 0.86 $\mu\text{m}$ Nadir looking	Band 6: 2.185 - 2.225 $\mu\text{m}$	Band 12: 8.925 - 9.275 $\mu\text{m}$
	Band 3: 0.76 - 0.86 $\mu\text{m}$ Backward looking	Band 7: 2.235 - 2.285 $\mu\text{m}$	Band 13: 10.25 - 10.95 $\mu\text{m}$
		Band 8: 2.295 - 2.365 $\mu\text{m}$	Band 14: 10.95 - 11.65 $\mu\text{m}$
		Band 9: 2.360 - 2.430 $\mu\text{m}$	
Ground Resolution	15 m	30m	90m
Data Rate (Mbits/sec)	62	23	4.2
Cross-track Pointing (deg.)	$\pm 24$	$\pm 8.55$	$\pm 8.55$
Cross-track Pointing (km)	$\pm 318$	$\pm 116$	$\pm 116$
Swath Width (km)	60	60	60
Detector Type	Si	PtSi-Si	HgCdTe
Quantization (bits)	8	8	12

*Tabla 1. Características de las bandas de imágenes ASTER.*

### Ubicación y descripción geológica

El yacimiento Candelaria se localiza cerca de la localidad de Tierra Amarilla unos 20 km al sur de la ciudad de Copiapó. Fue descubierto en 1987 por la compañía Phelps Dodge y actualmente se explota mediante rajes abiertos procesando 28.000 toneladas de mineral por día (figura 2).

Los cuerpos mineralizados son del Jurásico Superior a Cretácico Inferior. Los cuerpos mineralizados se extienden aproximadamente por 2.000 m en sentido N-S, con un ancho de 600 m y una potencia acumulada de 350 m.

La mineralización consiste en magnetita, calcopirita y piritita; en parte superior del depósito se presenta pirrotina en vez de piritita. El oro se presenta en granos cuyo tamaño es de pocos micrones en la estructura interna de calcopirita y en menor medida en piritita; los minerales de mena se presentan en venillas, rellenos de brechas y diseminación en rocas volcánicas intensamente alteradas de la Formación Punta del Cobre. Las rocas volcánicas huésped de la mineralización de Candelaria fueron afectadas por una alteración potásica temprana que se caracterizó por una biotización y depositación de magnetita y apatita en las rocas; una etapa posterior de alteración sodico-cálcica caracterizada por la asociación actinolita, escapolita y albita; la alteración sodico-cálcica también fue acompañada tanto por removilización y como por nueva depositación de magnetita. Una etapa retrógrada caracterizada por anfíbola, clorita, epidota y sericita menor afectó el conjunto. En los niveles sobreyacentes al yacimiento Candelaria que corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas neocomianas del Grupo Chañarillo presentan alteración de tipo skarn de andradita-diópsido. El yacimiento Candelaria era el depósito ciego, es decir no estaba expuesto en superficie. En la figura 3 se presenta un bosquejo del modelo geológico simplificado del depósito Candelaria.

A pesar que las asociaciones de alteración de Candelaria son de alta temperatura (450-600°C) y pueden calificarse de "tardimagmáticas" no se ha identificado una fuente ígnea directa (intrusivo) para la mineralización.

### Procesamiento y metodología

Se utilizó la imagen ASTER de Candelaria del nivel 1B (imágenes georeferenciadas). Este nivel no tiene corrección atmosférica y es más recomendable hacerla con algún *software* disponible (como MODTRAN u otro) por la complejidad del algoritmo. En este proyecto se usó el método de corrección simplificada conocido como *Dark Object Subtraction* que se utiliza por muchos modelos de corrección atmosférica para la estimación de la cantidad de aerosoles debido a que los valores para corrección se obtienen a partir de la misma imagen a ser corregida, y no es necesaria ninguna otra información sobre las condiciones atmosféricas. Se asume que ciertas superficies de la imagen actúan como objetos oscuros. Es decir, la energía que llega al sensor en ciertas bandas del espectro debería ser casi nula en esas superficies, siendo la energía recibida en el espectro visible e infrarrojo cercano una contribución de la atmósfera y no del *target*. Por lo tanto, esta técnica consiste en identificar en la escena el valor de píxel más bajo y restar este valor de todos los píxeles en la escena. A partir de la imagen corregida se realizaron distintos procesamientos con el fin de discriminar rocas y minerales de alteración. La combinación de bandas 6,3,1 (RGB) es equivalente a la combinación de bandas 7,4,1 (RGB) de Landsat TM (figura 4).

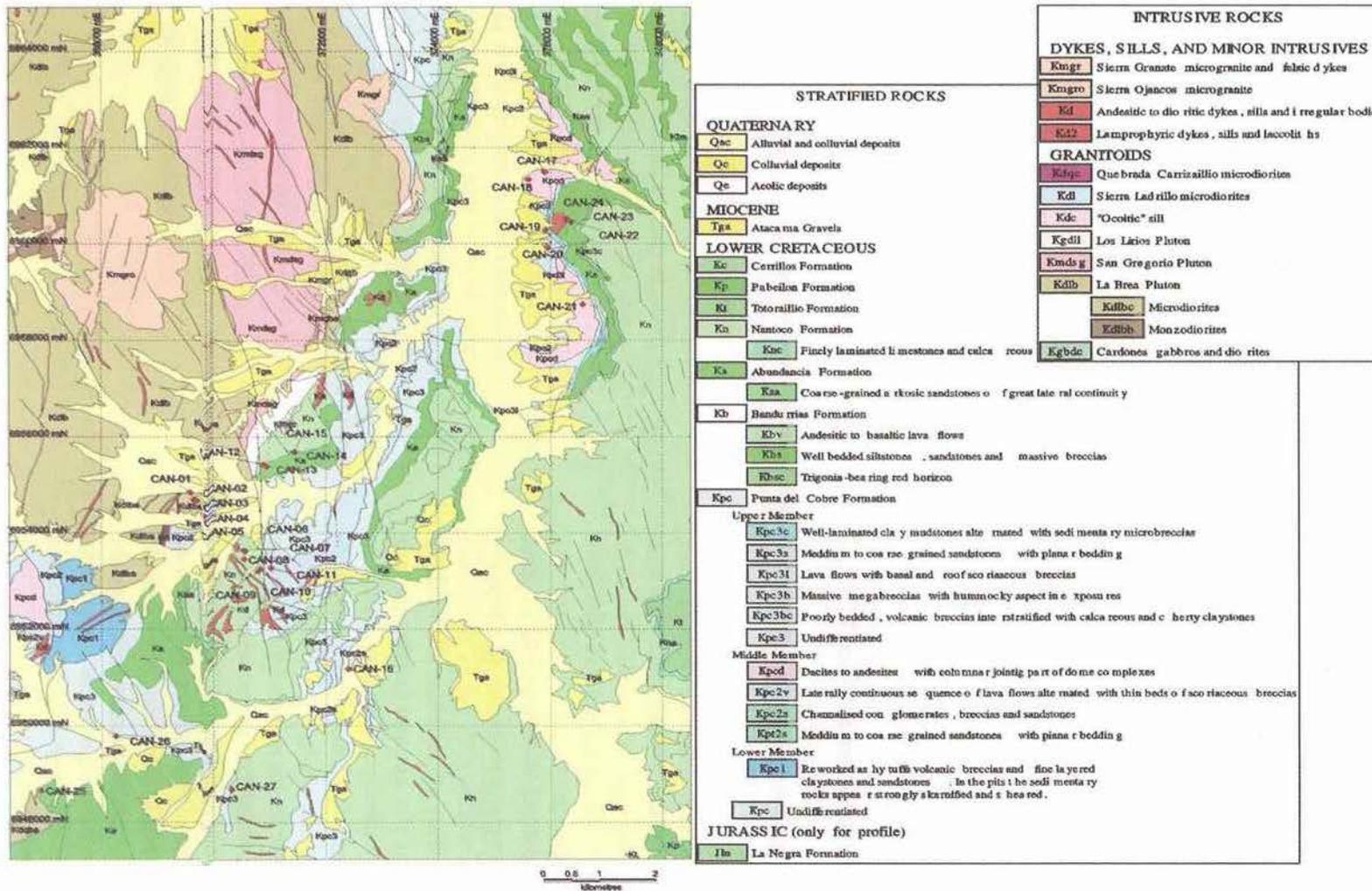


Figura 2. Mapa geológico del sector de Candelaria.

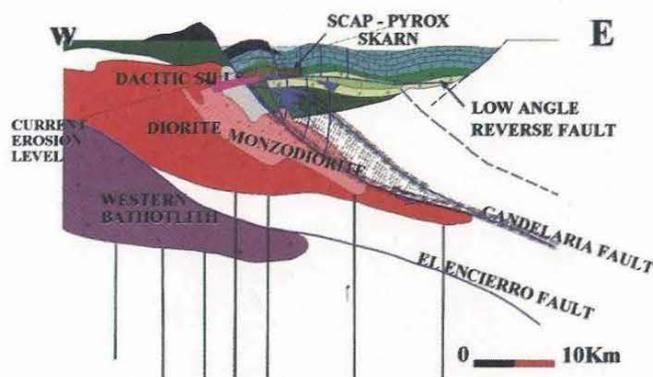


Figura 3. Modelo geológico del depósito Candelaria

Existen muchos métodos para discriminar distintos minerales de alteración basándose en las firmas espectrales usando máximos y mínimos de absorción y de reflectancia característicos en cada región del espectro electromagnético. Debido a que en muchos casos las respuestas espectrales de las rocas son similares, no siempre es posible diferenciar distintos minerales sino más bien los grupos de minerales, especialmente en caso de imágenes multiespectrales. En la figura 5 se muestran patrones espectrales remuestreados a las bandas 1 a 9 de ASTER, de minerales de alteración característicos para depósitos tipo Fe-Cu-Au. Como se puede ver, al resamplearlos a 9 bandas las firmas espectrales se ponen más "cuadradas" y pierden algunas características típicas lo que no hubiera ocurrido si tuviéramos más bandas (como en el caso de un sensor hiperespectral).

Las bandas SWIR se remuestreados a 15 m formando así un set de 9 bandas VNIR y SWIR para los cuales se ocupó el método *Spectral Feature Fitting* de ENVI. El método consiste en comparar las firmas espectrales de cada pixel de la imagen con la biblioteca espectral del laboratorio. En las figuras 6 a 8 se muestran los resultados de este proceso para minerales típicos de alteración tipo Candelaria, tales como óxidos de hierro, magnetita, biotita, actinolita.

En las bandas del infrarrojo térmico se aplicaron las razones de bandas para identificar sílice (B13/B12), granates/piroxeno (B12/B13) y carbonatos (B13/B14).

El resultado final puede ser presentado en forma conjunta como se muestra en la figura 10 para mejor visualización y selección de potenciales áreas de interés para la próxima visita a terreno.

## CONCLUSION

La resolución multiespectral de los datos ASTER permite discriminar óxidos de Fe en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR); magnetita, biotita, clorita/epidota y actinolita en bandas VNIR y del infrarrojo de onda corta (SWIR) usando método de *Spectral Feature Fitting* de ENVI. Skarn (granates, carbonatos) y sílice se detectan con bandas del infrarrojo térmico (TIR) a través de procesos simples (razones de bandas). Como cualquier otro proceso, estos métodos necesitan revisión de los resultados en el terreno.

## BIBLIOGRAFIA

- Abrams, Michael J., Hook, S. (2001). ASTER User Handbook. JPL - NASA.
- Marschik, R. & Leveille, R.A. (1998). The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide coppergold deposits, Chile. *Revista Geológica de Chile* 11: 51-76.
- Ninomiya, Y. (2002). Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multiespectral thermal infrared ASTER data. *International Society for Optical Engineering SPIE* 4710: 191-202.
- Rowan, Lawrence, Abrams, Michael J., and Mars, John C., (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 98 (5): 1019-1027.



Figura 4. Combinación de bandas 6,3,1 (RGB) de Candelaria.

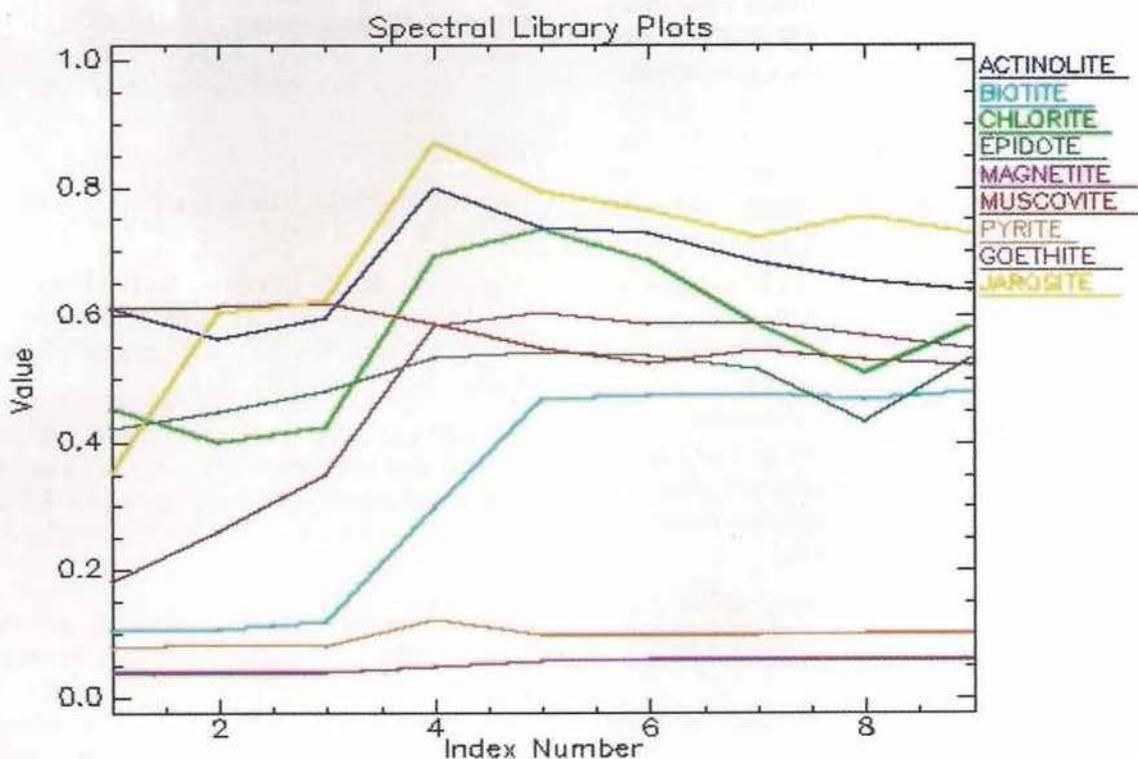
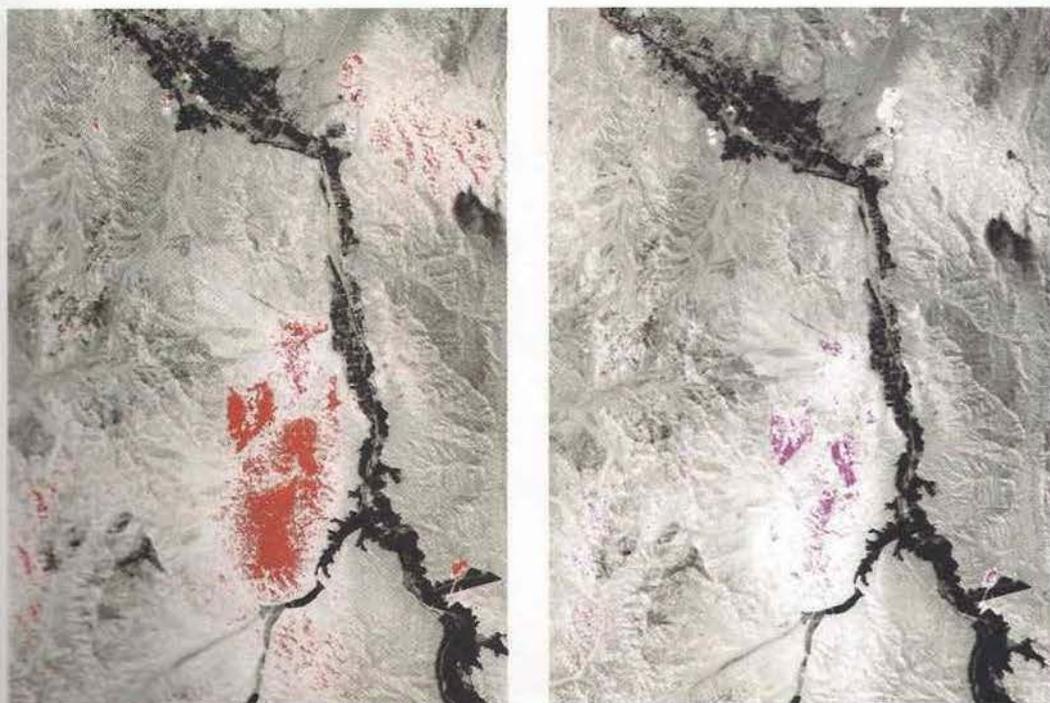


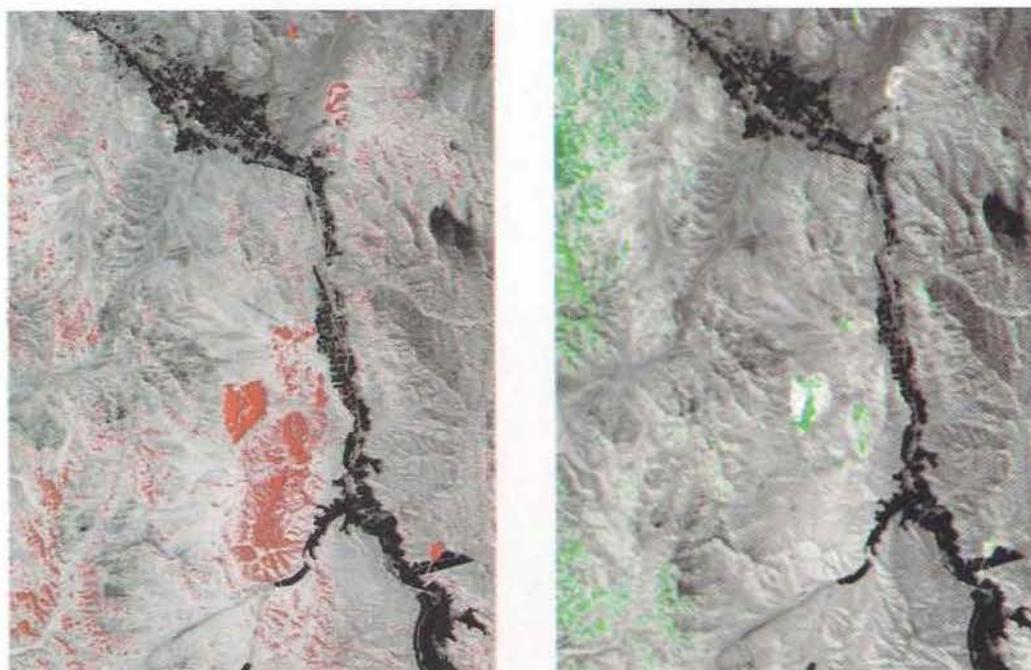
Figura 5. Patrones espectrales remuestreados a las bandas 1 a 9 de ASTER, de minerales de alteración característicos.



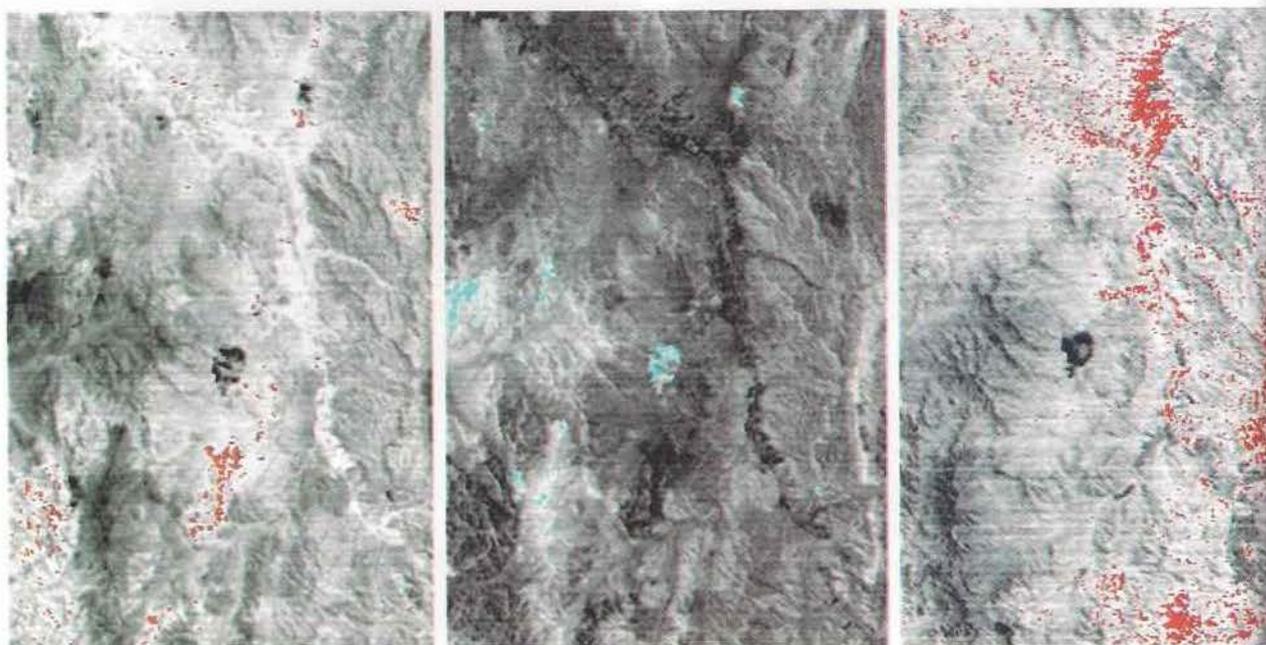
*Figura 6. Óxidos de hierro: jarosita en rojo y goetita en amarillo.*



*Figura 7. Magnetita (izquierda) y biotita (derecha).*



*Figura 8. Actinolita (izquierda) y clorita/epidota (derecha).*



*Figura 9. Granates (izquierda), sílice (centro) y carbonatos (derecha).*