

MAPEO DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL A PARTIR DE DATOS ASTER EN EL PORFIDO DE Cu - Mo EL INFIERNILLO, MENDOZA. ARGENTINA.

Inés Di Tommaso* & Nora Rubinstein**

* SEGEMAR, Julio A. Roca 651 piso 8 Sector 1. idito@secind.mecon.gov.ar

** CONICET – UBA nora@gl.fcen.uba.ar

Resumen

Una escena del sensor ASTER (Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) que consta de tres subsistemas independientes, (VNIR) visible e infrarrojo cercano con tres bandas, (SWIR) infrarrojo de la onda corta con seis bandas y (TIR) infrarrojo termal con cinco bandas, se usó para caracterizar el área de alteración del pórfiro El Infiernillo.

El Infiernillo, pórfiro de cobre y molibdeno se localiza al sur del Macizo de San Rafael, en el centro de la Provincia de Mendoza, Argentina. Se aloja y esta genéticamente relacionado con el volcanismo de arco pérmico gondwánico. La zona de alteración tiene una forma oval aproximadamente 3 km x 2km, con rumbo NNE. Consta de un pequeño tapón de cuarzo central con abundante hematita rodeado por una intensa zona cuarzo-inyectada con alteración potásica.

El exterior del halo fílico se encuentra bien desarrollado con intensa alteración blanquecina que consiste de silicificación diseminada y en venas, sericitization y piritización. Las anomalías de Cu y Mo son aproximadamente coincidentes y se localizan entre la zona silicificada y el halo filico. En la parte exterior de la zona de alteración, afloran pequeñas venas epitermales con pirita, arsenopirita, galena y calcopirita, esfalerita y electrum en ganga de cuarzo.

A partir de una escena ASTER nivel 3A radiancia a sensor, se aplicaron técnicas de procesamiento digital en los subsistemas (VNIR+SWIR), cociente de bandas y métodos de mapeo espectral permitió caracterizar las asociaciones de minerales de alteración.

El análisis del espectro de reflectancia (VNIR+SWIR), detecto absorciones en la banda 6 2.20 μm y en la banda 7 2.26 μm . Los datos de muestras de campo medidos con el espectro radiómetro GER 3700 mostró una buena correlación con los datos del ASTER.

La absorcion 2.20 μm , se debe al enlace Al-hidroxilo, y señala la presencia de minerales de arcilla (Al-illita, montmorillonita) mientras los 2.26 μm , se debe al enlace Fe-hidroxilo, detectándose jarosita.

Abstract

The Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, with three visible and near infrared (VNIR) bands, six short wave infrared (SWIR) bands and the five thermal Infrared (TIR) bands were used to characterize the Infiernillo porphyry deposit alteration area.

The Infiernillo porphyry copper (molybdenum) deposit is located in the San Rafael Massif, south - central part of the province of Mendoza, Argentina. It is hosted by and genetically related to Lower Permian Gondwanan volcanism, which represent a magmatic arc tectonic setting. The alteration zone has an oval shape about 3 km x 2km in size, with NNE strike. It consists of a small

central quartz plug with appreciable hematite surrounded by an intense quartz-injected zone with local pervasive potassic alteration. Outwards there is a well-developed phyllic halo with intense bleaching which consists of pervasive and in veins silicification, sericitization and pyritization. Cu and Mo anomalies are approximately coincident and are located between the silicified zone and the phyllic halo. In the outer part of the alteration zone, small epithermal polymetallic veins with pyrite, arsenopyrite, galena and minor chalcopyrite, sphalerite and electrum mineralization in quartz gangue crop out.

From Level 3A radiance at sensor, digital processing techniques such as (VNIR+SWIR), band ratio and spectral mapping methods were used for discriminating hydrothermal alteration minerals.

A round zoning pattern was clearly observed in VNIR+SWIR band combination. Spectral analysis of the surface reflectance SWIR detects 2.20 μm and 2.26 μm absorptions. Field data and samples spectroscopy analysis obtained by GER 3700 spectral radiometer showed good correlation with ASTER data. The 2.20 μm absorptions, due to Al-hydroxyl, point out to the presence of clay minerals (Al-illite, smectite) and sericite while the 2.26 μm , due to Fe-hydroxyl, resulted from jarosite.

Introducción

ASTER es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. En 1999 el instrumento se lanzó a bordo del satélite TERRA de la NASA. ASTER es un sensor multispectral que cubre la región espectral desde el visible e infrarrojo cercano VNIR al TIR infrarrojo termal del espectro electromagnético.

El instrumento consta de tres subsistemas independientes con un total de 14 bandas. El subsistema VNIR obtiene imágenes ópticas (0.52-0.86 mm) con una resolución espacial de 15 m. La capacidad de estereoscópica a lo largo de la dirección de la órbita *along track* también se lleva a cabo en VNIR con la banda 3B. El subsistema de SWIR obtiene imágenes ópticas con seis bandas (1.6 - 2.43 mm) y una resolución espacial de 30 m. El subsistema TIR obtiene imágenes ópticas con cinco bandas (8.125 - 11.65mm) y una resolución espacial de 90 m (Tabla 1). El ancho de barrido del sistema óptico es 60 km, pero una función de puntería lateral cubre la distancia de 172 km entre las órbitas vecinas (Fujisada et al., 2001).

Subsistema	Numero Banda	Rango espectral μm	Resolución espacial
VNIR	1	0,52-0,60	15m
	2	0,63-0,69	
	3N	0,76-0,86	
	3B	0,76-0,86	
SWIR	4	1,60-1,70	30m
	5	2,145-2,185	
	6	2,185-2,225	
	7	2,235-2,285	
	8	2,295-2,365	
TIR	9	2,360-2,430	90m
	10	8,125-8,475	
	11	8,475-8,825	
	12	8,925-9,275	
	13	10,25-10,95	
	14	10,95-11,65	

Tabla 1

Las imágenes multispectrales se han usado con éxito para detectar alteración hidrotermal especialmente desde el lanzamiento de Landsat Thematic Mapper TM, instrumento al que se adicionaron dos bandas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético donde muchos minerales de arcilla tienen su espectro de absorción de diagnóstico (Hunt, 1977).

El datos del ASTER se ha usado en varios estudios mineralógicos y litológicos (Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2003; Ninomiya et al., 2002; Ninomiya, 2004) con los resultados buenos.

El depósito de El Infiernillo se localiza al sur del Macizo de San Rafael en la parte central de la provincia de Mendoza, a la Latitud de 34°40'S y

Longitud de 68°48'W, Argentina. Se interpretó como un pórfiro de Cu-Mo (Fuschini 1968) se aloja rocas piroclásticas del Pérmico Inferior. Tiene un halo de alteración evidente con venas epitermales polimetálicas localizadas en la parte exterior a él.

Esta contribución describe una evaluación de una escena ASTER libre de nubes, del 4 de diciembre de 2002, enfocada en la detección de minerales de alteración. La escena Nivel 3A ortorrectificada, radiancia a sensor procesada por el Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) de Japón. El área del estudio tiene una superficie de 15 x 15 km.

Marco Geológico

El Macizo de San Rafael se localiza en la parte central sur de la Provincia de Mendoza, Argentina (Fig.1). Una síntesis de las unidades aflorantes comienza con escasos afloramientos Precámbricos con rocas metamórficas, granitos, aplitas y pegmatitas del Proterozoico Superior. Durante el Ordovícico y Siluriano, sedimentos carbonáticos y del clásticos se depositaron en un margen pasivo y luego metamorforizados por la Orogenia Famatiniana. La sedimentación marina continuó en el Devonico Inferior y Pérmico y finalizó con la Fase Orogenica San Rafael que plegó los depósitos y marca el principio de magmatismo del gondwanana. Este ciclo magmático produjo un volumen importante de volcanitas y piroclastitas de gran extensión areal.



Fig. 1 Mapa de ubicación del Pórfiro El Infiernillo, Provincia de Mendoza. Argentina.

Pueden diferenciarse dos eventos diferentes dentro de la sucesión volcánica que se conoce como el Grupo de Choiyoi. La más baja del Pérmico Inferior constituida por andesitas y dacitas, ignimbritas riolíticas de baja sílice y rocas sedimentarias asociadas. El Pérmico Superior - Triásico Inferior esta compuesto por ignimbritas riolíticas, diques andesíticos, lavas andesíticas y basaltos alcalinos (Kleiman 1999).

El pórfiro Infiernillo forma parte del Grupo Cochicó que es la parte inferior del Grupo Choiyoi. La zona de alteración tiene una forma oval aproximadamente 3 km x 2km en tamaño y rumbo NNE. El centro consiste en un tapón de cuarzo pequeño con apreciable hematita, rodeado por una intensa zona con cuarzo-inyectado y con alteración potásica. El exterior del halo filico tiene una intensa alteración blanquecina y silicificación diseminada y en venas, sericitization y piritization.

El Cu y las anomalías de Mo son aproximadamente coincidentes y se localizan entre la zona de silicificación y el halo fílico.

En la parte exterior de la zona de alteración afloran pequeñas venas epitermales polimetálicas con piritita, arsenopiritita, galena y calcopiritita y en menor proporción esfalerita y mineralización de electrum en ganga de cuarzo.

Datos ASTER

Utilizando la escena ASTER nivel 3A ortorrectificada, radiancia a sensor se realizó la siguiente rutina de procesamiento. La amplia resolución radiométrica de las 14 bandas de ASTER permiten con la utilización de diferentes combinaciones de banda, caracterizar cualitativamente un área de alteración, como rutina metodológica se trabaja con los subsistemas VNIR+SWIR en 30m resolución espacial.

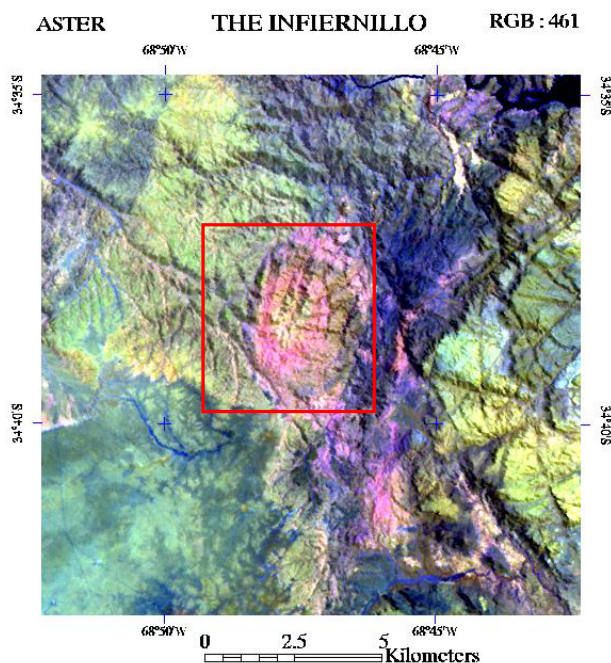


Fig. 2 . RGB:461 halo de alteración del pórfiro El Infiernillo.

Combinación de bandas

De las diferentes combinaciones de banda, se ha seleccionado la composición color RGB: 461 (fig. 2), ella muestra en halos concéntricos las diferentes zonas de alteración del pórfiro El Infiernillo.

El análisis de los diferentes colores de la RGB:461 nos permite inferir que: el magenta del halo externo se debe a una fuerte absorción de la B6 (2.20µm.) en este rango espectral absorben los minerales de arcilla debido al enlace Al-OH. El amarillo del núcleo del pórfiro se debe a una fuerte absorción de B1 (0.55µm) en este rango espectral tenemos la absorción debida a procesos electrónicos del catión Fe³⁺ (Hunt y Salisbury, 1970).

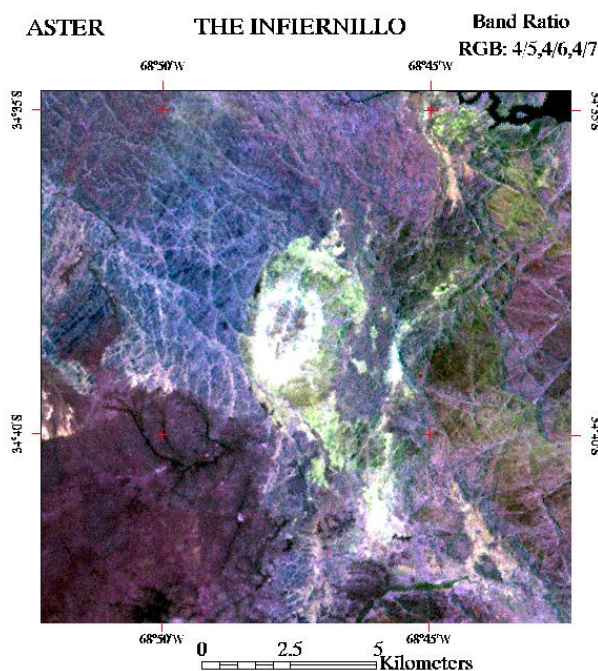


Fig. 3. Cociente de bandas en RGB: 4/5, 4/6, 4/7

Cociente de bandas

El cocientes de banda es una herramienta cualitativa para la detección de áreas alteradas, los cocientes 4/5, 4/6 y 4/7 dispuesto en una composición RGB muestran en blanco al halo de alteración externo debido a respuestas de todas las bandas. Las B5 y B6 por absorción de los enlaces de Al-OH y la banda 7 por el enlace Fe-OH.

Este análisis cualitativo nos permite inferir y corroborar con los estudios geológicos del área que el núcleo del pórfiro es rico en mineral de hierro y el halo externo presenta abundante alteración argílica, con presencia de minerales con enlaces Fe-OH como ser jarosita.

Para caracterizar cuantitativamente se utilizan técnicas de análisis espectral.

Como trabajamos con una escena VNIR+SWIR hay que tener en cuenta que

en el rango del visible los rasgos espectrales se relacionan mayormente con los procesos electrónicos (estado de valencia, entre otros) de los metales de transición tal como el Fe y en el infrarrojo de onda corta los principales rasgos o firmas espectrales se relacionan con las vibraciones de los enlaces catiónicos (principalmente Al, Fe, Mg) con grupos OH⁻, CO₃²⁻ y SO₄²⁻ (Hunt y Salisbury, 1970).

A pesar del ancho de banda, ASTER ha demostrado ser una herramienta útil en la detección de asociaciones de minerales de alteración debido a que los principales picos de absorción de estos minerales han sido considerados para el diseño del rango espectral de ASTER, las técnicas de mapeo mineral a partir de la similitud espectral *spectral matching* son métodos cuantitativos diseñados para imágenes hiperespectrales, que pueden ser aplicado a ASTER con validez semi-cuantitativa pues muchas mezclas y asociaciones pueden presentar un rasgo similar, pero teniendo en cuenta estas limitaciones se ha demostrado buenos resultados (Kruse et al., 2002; Rowan, et.al., 2003).

Normalización de los Datos Digitales

Para la utilización de técnicas de mapeo a partir de similitud espectral, *spectral matching* los datos ASTER deben ser normalizados entre los valores máximos y mínimos de la escena, ya sea con datos espectrales de campo, o en su defecto, con datos de la propia imagen.

Los productos ASTER estándar incluyen imágenes de reflectancia a superficie nivel 2B. Por otro lado al no contar con estos productos, se pueden obtener imágenes de reflectancia relativa teniendo en cuenta los siguientes conceptos:

El sistema ASTER ha sido calibrado de forma tal que los números digitales DN están en relación lineal con la reflectancia (Yamaguchi y Naito, 1999).

Para el diseño de los detectores de los subsistemas VNIR y SWIR, y con el objeto de evitar la saturación de blancos brillantes, el máximo de radiancia corresponde al 70% del valor de reflectancia (Aster User's Guide, 2001). Otro elemento a tener en cuenta es el *offset*, valor aditivo variable en cada banda que debe ser removido para la normalización del dato radiométrico.

Sin datos de reflectancia de campo la normalización del valor radiométrico se realiza teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$\text{Reflectancia Relativa} = (\text{Radiancia a sensor} - \text{offset} / \text{Máximo valor}) * 0.7$$

Análisis espectral de la imagen ASTER

El análisis espectral se realizó utilizando ENVI 4.0 y la imagen nivel 3A normalizada a reflectancia relativa, VNIR+SWIR de 30m de resolución espacial, para seleccionar los píxeles de referencia para el mapeo se seleccionó a los más representativos sobre la base del algoritmo de *pixel purity index*, de esa selección se tomó como *endmember* las respuestas que coincidían con las zonas de alteración guardando los espectros como librería espectral y aplicarlos en las técnicas de mapeo.

Se utilizó Spectral Angle Mapper SAM como técnica de mapeo con valor angular de umbral de 0.08 radianes, la Fig. 8 muestra los resultados de la clasificación en rojo superpuesta a la combinación de banda RGB 461 y el gráfico del *endmember* seleccionado.

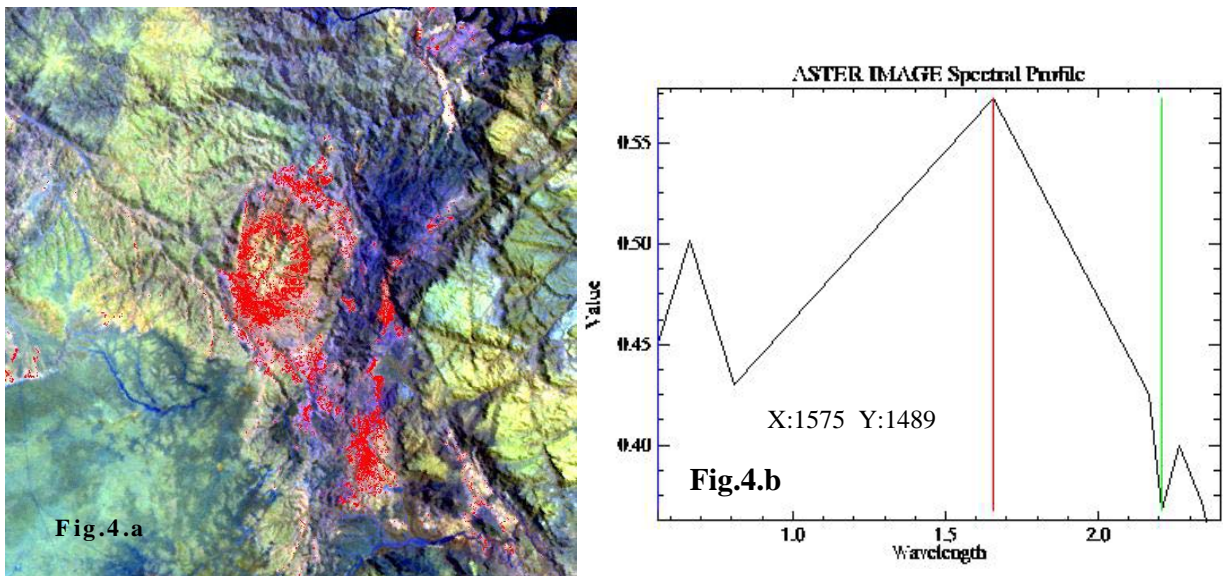


Fig. 4. a Resultado de la clasificación en rojo, sobre RGB 461. **Fig.4.b** Gráfico del espectro de la imagen ASTER de la zona magenta RGB 461, en abscisas la longitud de onda y en ordenadas reflectancia. Se observa una fuerte absorción de 2.20 μm .

El análisis espectral de la Fig. 4 b presenta una fuerte absorción de la B6 (Al-OH) y reflectancia en las B5 y B7 donde la respuesta de la B5 es mayor que la B7, esta firma la presentan

las arcillas montmorillonita e illita y la muscovita (sericita). La absorción en la B3 se debe óxidos de Fe.

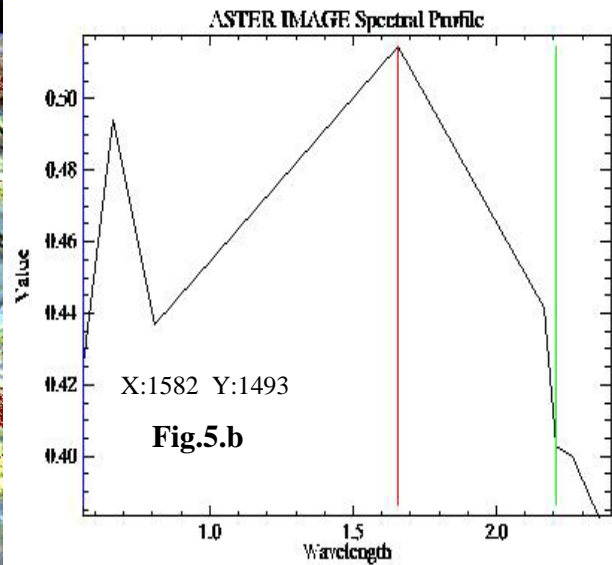
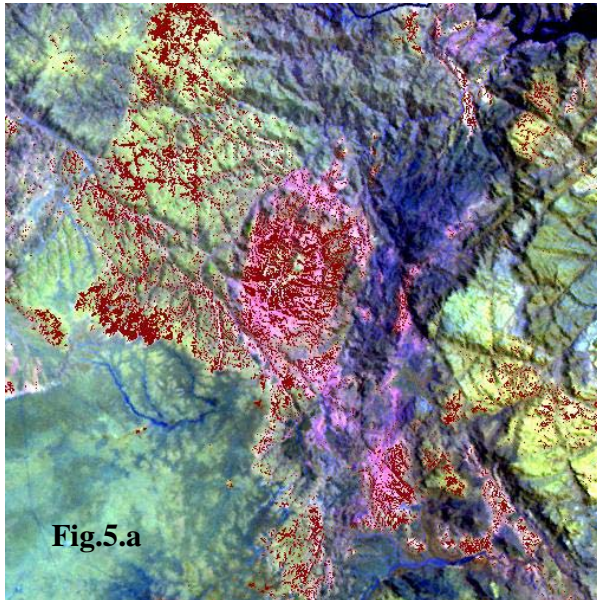
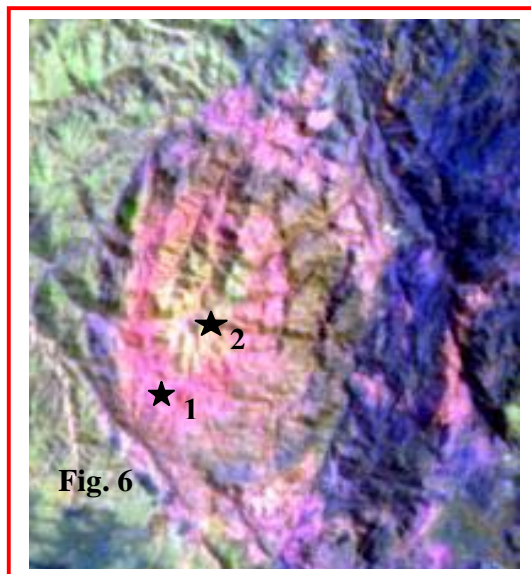


Fig. 5.a. Resultado de la clasificación en rojo oscuro, sobre RGB 461. **Fig. 5.b** Gráfico del espectro ASTER extraído de la zona central en amarillo en la RGB 461. Se observa absorción de la B6 2.20 μm y en la B7 2.26 μm , la absorción de la B3 0.8 μm se debe a óxidos de Fe.

El análisis espectral de la firma de la Fig.5 b se puede interpretar como la firma de una mezcla de arcillas absorción en B6 y reflectancia en B5 (montmorillonita y/o illita) o muscovita, y absorción en B7 (Fe-OH) jarosita.

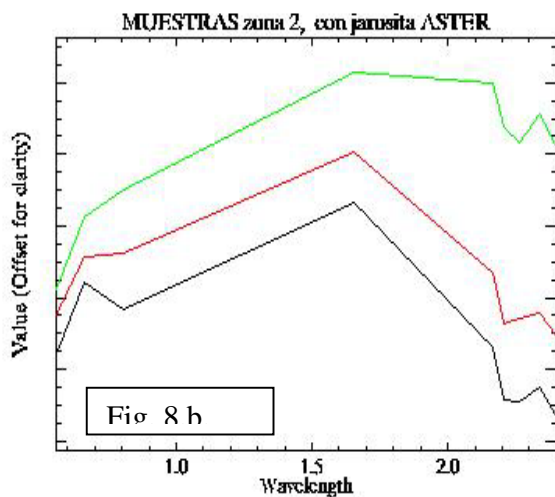
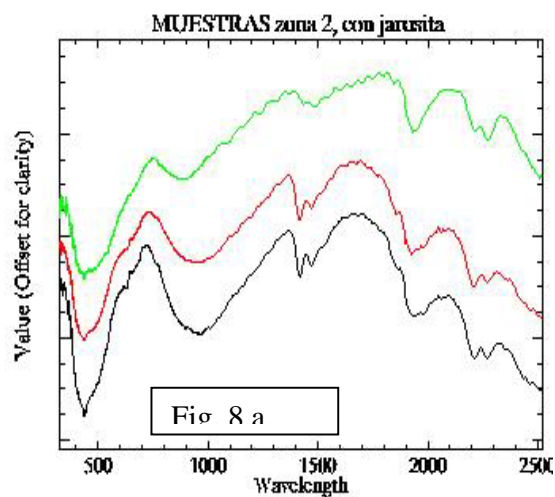
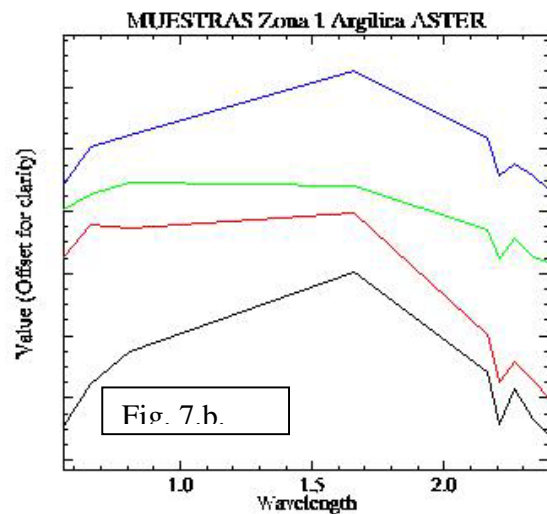
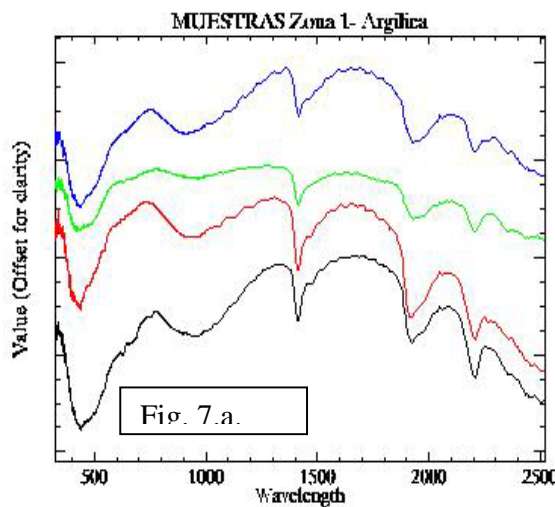
Análisis espectral de muestras de campo



De un total de diez muestras extraídas de la zona de alteración del pórfiro El Infiernillo y medidas con el espectrorradiómetro GER 3700 se seleccionaron las firmas mas representativas de la zona argílica en magenta (Fig.6-1) y del núcleo amarillo (Fig. 6-2).

En la Fig. 7 a se muestran los espectro GER entre los 350 y 2500 nm de la zona 1 de la Fig. 6 y la Fig. 7 b a los mismas respuestas remuestreadas al rango espectral de ASTER.

La Fig.8 a es una selección de mediciones de la zona 2 de la Fig. 6.



De los espectros de reflectancia de la Fig. 7, se detectan absorciones en 2.20 μm correspondiente a una mezcla mayoritaria de arcillas del grupo de la montmorillonita e illita/sericita y la amplia absorción alrededor de los 0.8 μm por óxidos de Fe.

Los espectros de reflectancia de la Fig. 8 presentan absorción característica en 0.8 μm , 2.20 μm y 2.26 μm , en este caso el mineral dominante es jarosita y subordinada la mezcla de arcillas.

Conclusiones

Los datos ASTER permitieron discriminar asociaciones minerales de alteración montmorillonita, illita/sericita y jarosita. La combinación de bandas RGB 461 que involucra los picos de absorción característicos de las vibraciones de los enlaces Al-OH, Fe-OH, y a los procesos electrónicos del Fe permitió discriminar notoriamente al halo de alteración argílica y el núcleo rico en hematita.

El cociente de banda en RGB 4/5, 4/6, 4/7 discrimina el halo de alteración argílica en donde se detecta la presencia de Fe-OH.

El método semi-cuantitativo de análisis espectral y la clasificación a partir de espectros de referencia (*endmembers*) afianzó los análisis cualitativos realizados aplicando metodologías tradicionales.

Referencias

Fuschini, M., 1968. Informe último Área de Reserva N°26. Zona: Infiernillo. Planee Cordillerano, Dirección General de Fabricaciones Militares.

Fujisada, H., Iwasaki, A., Hara, S., 2001,. ASTER Stereo System Performance. Proceedings SPIE Toulouse, v. 4540.

Hunt G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared . Geophysics, 42 (3), 501-513.

Hunt, G. L. y Salisbury, J. W. 1970. Visible and near infrared spectra of minerals and Rocks: I Silicate Minerals. Modern Geology, vol. 1 : 283-300.

Kleiman, L. E., 1999. Mineralogía y petrología del volcanismo permotriásico y triasico del Bloque de San Rafael, Provincia de Mendoza y su relación con las manifestaciones de uranio. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. inédito.

Kruse, F. A., Perry, S. L. y Caballero, A., 2002. Integrated Multispectral and Hyperspectral Mineral Mapping, Los Menucos, Rio Negro, Argentina. Part II: EO-1 Hyperion/AVIRIS Comparisons and Landsat TM/ASTER Extensions.

Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR SWIR data. Proceedings of SPIE, vol. 5234: 180-190.

Ninomiya, Y., 2002. Rock Type Mapping with Indices Defined for Multispectral Thermal Infrared ASTER Data: Case Studies. Proceedings of SPIE, vol. 4886.

Rowan, L. C.; Hook, S. J. y Abrams, M. J. 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 98:1019-1027.

Rowan, L. C. y Mars, J. C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer ASTER data. Remote Sensing of Environment 84: 350-366.

Yamaguchi, Y. y Naito, Ch. 1999. Spectral Indices for Lithologic Discrimination Using the ASTER Swir bands. XIII International Conference on Applied Geologic Remote Sensing. Vancouver, British Columbia, Canada :I-151- I-158.