

APLICACIÓN DE DATOS ASTER PARA EL MAPEO DE LA HOJA GEOLÓGICA ANDALGALÁ, CATAMARCA, ARGENTINA.

Cintia Marquetti, Raúl Becchio, Raúl Seggiaro y Kioharu Nakashima

Servicio Geológico Minero Argentino

cmarqu@geosatar.gov.ar

Palabras clave: ASTER, SWIR, alteración hidrotermal, índices, clasificaciones, Catamarca

RESUMEN

La Hoja Andalgala se localiza en la provincia de Catamarca, Argentina y se extiende desde los 27° 20' a 27° 40' de latitud sur y de 66° 00' a 66° 30' de longitud oeste.

El estudio está enmarcado dentro del Proyecto GEOSAT-AR, convenio binacional entre Japón y Argentina. El objetivo del presente trabajo es mostrar la utilización de los datos ASTER para el mapeo geológico regional a escala 1:100.000 y para el estudio de las áreas de alteración hidrotermal asociadas a los depósitos minerales del Distrito Minero del Cerro Atajo y Filo Colorado.

ASTER cubre una amplia región espectral con 14 bandas, desde el visible al infrarrojo térmico, con una alta resolución espacial, espectral y radiométrica.

El subsistema VNIR obtiene imágenes del visible e infrarrojo cercano (0.52-0.86 µm) en tres bandas con una resolución espacial de 15 metros, además tiene una banda adicional que permite visión estereoscópica y la generación del modelo digital de terreno de cada escena. El subsistema SWIR registra la información en 6 bandas del infrarrojo de onda corta (1.600-2.430 µm) con una resolución espacial de 30 metros. El subsistema TIR obtiene datos en 5 bandas de la región del infrarrojo térmico (8.125-11.65 µm) con una resolución espacial de 90 metros.

Las imágenes ortorrectificadas se proyectaron en Posgar 94, zona 3 y se seleccionó la combinación RGB 3 2 1 como las más adecuadas para el mapeo de distintas unidades geológicas.

La combinación RGB 4 6 9 se utilizó para la identificación de zonas de alteración hidrotermal debido a que, en general, los minerales que componen las alteraciones argílicas, presentan una firma espectral características, con picos de absorción en las bandas 5 (alunita, caolinita) y 6 (caolinita, montmorillonita, etc.) y reflectancia en la banda 4.

Se realizaron cocientes de bandas, índices espectrales y clasificaciones para realizar el mapeo de las zonas de alteración hidrotermal del Cerro Atajo, Cerro Blanco y Filo Colorado.

Con la finalidad de resaltar diferentes litologías, estructuras y áreas de alteración del sector norte de la carta geológica se ajustó el realce de la imagen mediante la técnica de *saturation stretch* y *decorrelation stretch*.

ABSTRACT

The Andalgala chart is located in the Catamarca Province, NW Argentina. It extends from 27° 20' S to 27° 40' S of latitude and from 66° 00' W to 66° 30' W of longitude.

The study was focused on the technical aspects of ASTER data for geological mapping at 1:100.000 scale and hydrothermal alteration associated with mineral deposits into the Cerro Atajo and Filo Colorado Mining Districts.

ASTER data use 14 bands that covers a width spectral range between the visible and thermal infra red that provide an spatial, spectral and radiometric high resolution.

The VNIR subsystem is used to get images from visible to near infrared (0.52–0.86 μm) using 3 bands with spatial resolution of 15 m, although has an additional band that can be possible the stereoscopic vision and the generation of digital elevation models. The SWIR subsystem obtain information from 6 bands in short wave infrared (1.600–2.430 μm) with 30 m spatial resolution. The TIR subsystem has response in 5 thermal infrared bands (8.125–11.65 μm) with 90 m spatial resolution.

All the images have been projected in Posgar 94, zone 3. The RGB 3 2 1 combination was choose to map different geological units. The RGB 4 6 9 combination was used to identified hydrothermal alterations zones because, generally, the argillic minerals has a characteristic spectral feature, with absorption responses in band 5 (alunite - kaolinite) and band 6 (kaolinite - montmorillonite, etc.) and reflection responses in band 4.

Bands ratios, spectral index and classifications were applied in the hydrothermal alteration mapping of Cerro Blanco and Filo Colorado areas.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto GEOSAT-AR, convenio binacional entre el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) y la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). El área de estudio es la carta 2766-27, Andalgalá, localizada en la provincia de Catamarca, Argentina. La misma se extiende entre los 27° 20' a 27° 40' de latitud sur y 66° 00' a 66° 30' de longitud oeste. El objetivo es el mapeo geológico regional a escala 1:100.000 y el estudio de las zonas de alteración hidrotermal vinculadas a los depósitos minerales del Distrito Minero Farallón Negro, Cerro Atajo, Mina Capillitas, Agua Rica y Filo Colorado con datos satelitales de ultima generación. Se ha generado el modelo digital del terreno (DEM) y la orto rectificación de cada una de las imágenes ASTER, con las cuales se confecciono el mosaico que cubre la hoja Andalgalá (figura 1)

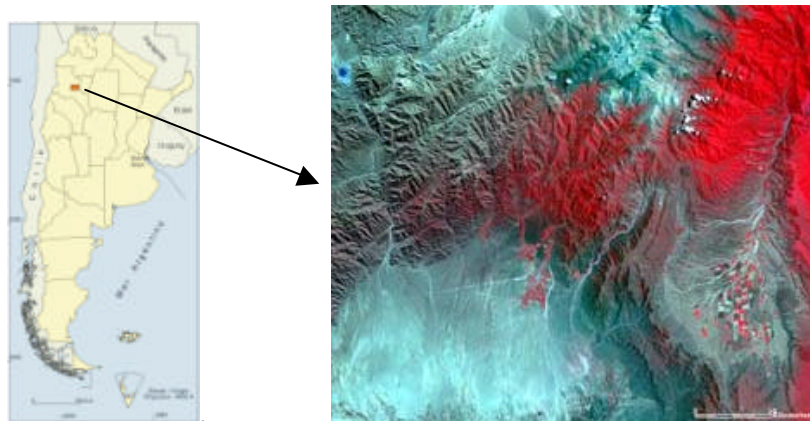


Figura 1: Mosaico de imágenes ASTER, cubriendo el área de la Hoja Andalgalá. RGB 3 2 1

En el área existen varias problemáticas que son los puntos principales a resolver en el mapeo geológico, como por ejemplo, discriminación de facies graníticas en áreas con cubierta vegetal alta; relaciones entre secuencias volcánicas, intrusivos graníticos y lineamientos estructurales; tipificación de zonas de alteración; aspectos geomorfológicos glaciares; diferenciación de rocas

metamórficas de grado medio a alto entre otros. En el sector norte de la hoja Andalgalá se encuentran las zonas de alteración objeto de estudio vinculadas a los depósitos minerales de Bajo de la Alumbraera, el Cerro Atajo y Cerro Blanco, la mina Capillitas, el pórfido Agua Rica y Filo Colorado.

En el presente trabajo se muestran las técnicas de procesamiento y análisis de datos ASTER para estas áreas a fin de identificar nuevas zonas de alteración. La combinación RGB 3 2 1 se toma como base para la interpretación geológica y se le aplica la técnica de *saturation stretch* (figura 2), aumentando el contraste de la imagen, brindando así mayor realce para la diferenciación de las unidades. Se han recuadrado las áreas que a continuación se describen.

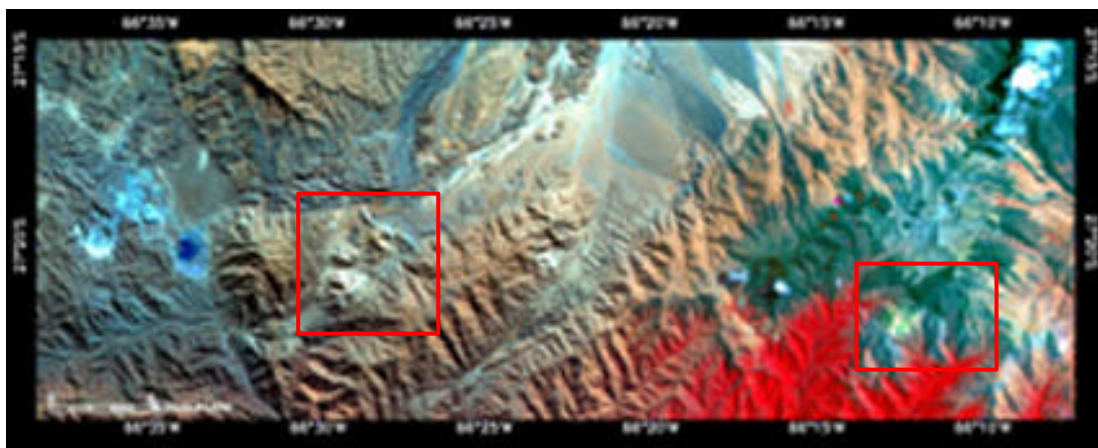


Figura 2: Imagen ASTER RGB 321 Saturation Stretch de las áreas Bajo La Alumbraera-Andalgalá: ubicación de Cerro Atajo y Filo Colorado

DATOS Y METODOLOGÍA

Para el proyecto Andalgalá se procesaron imágenes ASTER nivel 1B, las cuales fueron utilizadas en un principio para realizar el mapeo geológico preliminar. Luego se obtuvieron y procesaron las imágenes nivel 1A, las cuales fueron orto rectificadas a partir del modelo digital del terreno. Para cubrir el área de la hoja geológica se necesitaron 4 imágenes, realizándose el mosaico VNIR.

En una segunda etapa se realizó la conversión de los datos en números digitales a reflectancia relativa. Este paso es fundamental para poder comparar firmas espectrales recolectadas en el terreno y las obtenidas desde los píxeles de la imagen.

4, 5, 6, 7, 8 Y 9

Con las bandas SWIR de ASTER se pueden discriminar minerales de alteración a partir del análisis de sus firmas espectrales, de esta forma podemos realizar mapas de distribución de zonas de alteración argílica, argílica avanzada, filica y propilitica (tabla 1).

La Alunita tiene absorción en 2160nm (Banda 5).

La Montmorillonita, Illita y Sericita tienen Absorción en la banda 6 (2200 nm), reflejando la presencia de Al-OH.

Estos minerales tienen Reflectancia en las Bandas 5 y 7.

La Jarosita se puede detectar por el contenido de Fe-OH con una Absorción en 2260nm (Banda 7).

La calcita y la clorita tienen una fuerte Absorción en 2330 nm (Banda 8) debido a la presencia de CO₃, Mg-OH.

Se realizaron combinaciones de bandas, cocientes de bandas, índices espectrales y clasificaciones de los minerales de alteración que se encuentran en los depósitos minerales conocidos como Cerro Atajo y Filo Colorado. Las clasificaciones se realizaron con *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Spectral Feature Fitting* (SFF).

ABSORCION (1 μ m=1,000 nm)				
	l	ASTER	MINERAL	ALTERACIÓN
Al-OH	2160nm	banda 5	alunita	alteración argílica avanzada alteración argílica y fílica
	2200nm	banda 6	montmorillonita, illita, sericita	
Fe-OH	2260nm	banda 7	jarosita	zonas de oxidación
CO ₃ , Mg-OH	2330nm	banda 8	calcita, clorita, (epidoto)	alteración propilítica
	2400nm	banda 9		

Tabla 1: Tipos de alteración hidrotermal y bandas ASTER para la detección de los minerales presentes

En el terreno se reconocieron las distintas unidades geológicas, se recolectaron muestras localizadas con puntos GPS y se chequearon las áreas de alteración midiendo las muestras con el espectro radiómetro GER 3700 y POSAM.

GEOPROCESAMIENTO

En el sector norte de la hoja Andalgalá en una faja restringida aproximadamente E-W, se encuentran importantes zonas de alteración hidrotermal, objeto de estudio de GEOSAT-AR, vinculadas a los depósitos minerales de, el Cerro Atajo y Blanco, Capillitas, el pórfiro Agua Rica y Filo Colorado y un poco mas hacia el oeste el pórfiro de Cu -Au de Bajo de la Alumbrera, actualmente en explotación.

.En el presente trabajo se presentan las técnicas de procesamiento y análisis de las zonas de Cerro Atajo - Cerro Blanco y Filo Colorado. A partir de este ultimo se pudieron definir posibles áreas hacia el NE del mismo, teniendo en cuenta las conclusiones que surgen de la comparación de los resultados aquí presentados. Para este caso se realza la utilidad de estas técnicas tendiendo en cuenta el muy difícil acceso a estas zonas, por encima de los 5000 m de altitud.

Área del Distrito Minero Cerro Atajo

El distrito minero Cerro Atajo esta ubicado a 60 km al NW de la localidad de Andalgalá, provincia de Catamarca y comprende a los cerros Atajo y Blanco (figura 3). La geología de este distrito aurífero (Peralta, 1999) esta conformada por un basamento ígneo – metamórfico del Paleozoico Inferior. Las metamorfitas son gneises y migmatitas en donde se emplazan cuerpos graníticos equigranulares a porfíricos, del Batolito Capillitas. En relación discordante en la parte inferior y por falla en la superior, se encuentran secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias

mio – pliocenas. Las unidades inferiores están conformadas por sedimentitas continentales, areniscas y limolitas rojas con intercalaciones de bancos calcáreos, equivalente parcialmente a la Formación Morteritos. La sección superior esta conformada por importantes secuencias volcanosedimentarias y volcánicas del Complejo Volcánico (González Bonorino 1950). Los Cerros Blancos y Atajo están conformados por numerosos diques y cuerpos lacolíticos de composición dacítica a riolítica en menor grado, instruidos en el límite Mioceno – Plioceno. Tanto los cuerpos intrusivos como la roca de caja están afectados por procesos de alteración hidrotermal y mineralización epitermal polimetálica (Peralta, 1999)



Figura 3: Mapa geológico del área de interés

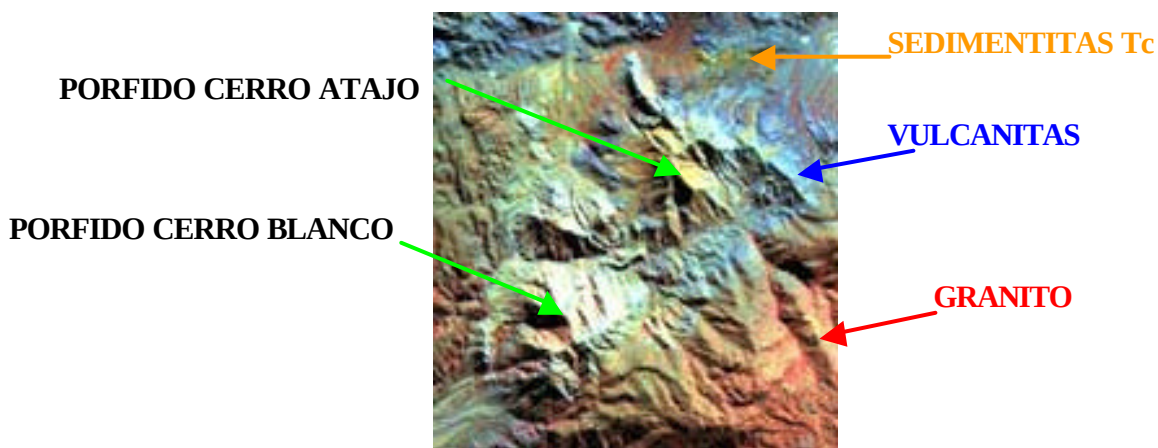


Figura 4: Imagen ASTER RGB 321 Saturation Stretch de Cerro Atajo y Blanco

Mediante el procesamiento de *saturation stretch* RGB 3 2 1 (figura 4) se pueden discriminar distintos miembros de la Formación Morterito (Mioceno), compuesta por una secuencia inferior de areniscas rojas, limolitas con niveles de bancos calcáreos y una secuencia mas alta, donde las sedimentitas aparecen intercaladas con rocas volcánicas del Complejo Volcánico Farallón Negro.

El terciario clástico se observa de color amarillo mientras que las secuencias con distinta participación de componentes volcánicos y volcanoclásticos aparecen en color y tonos azules-violáceos. Por otro lado es posible diferenciar las rocas metamórficas de alto grado, de las facies graníticas (porfírica – equigranular). Las metamorfitas tienen colores similares a los granitoides pero con tonos más oscuros. Los intrusivos de diques y lacolíticos de composición dacíticos son evidenciados por una coloración amarillenta a blanquecina. Son notables también los distintos sistemas estructurales del área, conformados por grandes fallas con rumbo E-W y NE – SW y otras menores de rumbo NW – SE que controlan parcialmente el emplazamiento de la mineralización

La mineralización consiste en depósitos polimetálicos de oro-plata-cobre, con stockworks y brechas anómalas en oro donde las zonas de alteración están controladas por un sistema de fajas afectando a rocas andesitas y a los pórfidos del Cerro Atajo y Blanco (Peralta, 1999).

El esquema general de alteración hidrotermal está representado por un núcleo silicificado con alunita rodeado por alteración argílica (Peralta, 1999). En la imagen RGB 4 6 9 (figura 5a) se observan las zonas de alteración en color blanco y magenta debido a que los minerales que componen las alteraciones argílicas, presentan una firma espectral característica con reflectancia en la banda 4 (Red) y absorción en la banda 6 (Green).

COCIENTE DE BANDAS

Los cocientes de bandas son muy utilizados para la detección de zonas de alteración hidrotermal y la discriminación de distintas litologías, donde se pueden contrastar o realzar las diferencias entre los máximos y mínimos de reflectancia. En el numerador colocamos la banda en la cual existe el máximo de reflectancia y en el denominador la banda correspondiente a la absorción.

En base al análisis de las firmas espectrales se realizó el cociente de bandas RGB 3/1, 4/6, 7/5 (figura 5b) donde podemos ver las zonas de alteración argílica en color verde y una diferenciación dentro de las mismas en color blanco-amarillo.



Figura 5a: Imagen ASTER RGB 4 6 9

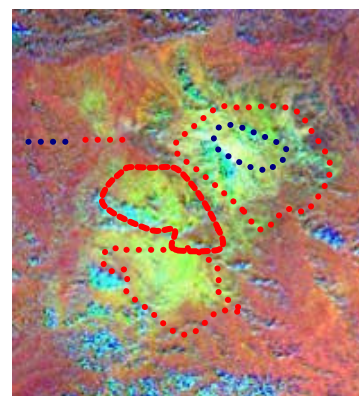


Figura 5b: Zoom Imagen ASTER cociente de bandas RGB 3/1 4/6 7/5 — zonas de alteración

Los óxidos de Fe tienen reflectancia en la banda 3 y absorción en la banda 1. La forma de la curva puede variar de acuerdo al contenido en Fe, pero una alta respuesta en el índice 3/1 indicaría la presencia de zonas de oxidación.

El cociente 4/6 está relacionado con la alteración argílica, dando alta la respuesta del color verde (G) en los lugares con illitas, caolinitas, montmorillonitas y/o muscovitas, ya que todos estos minerales tienen absorción en 2.208 nm (b6).

CLASIFICACIONES

Se realizaron clasificaciones utilizando *Spectral Angle Mapper* (SAM) para muscovita y caolinita, mientras que la illita fue clasificada con el método de *Spectral Feature Fitting* (SFF). Los espectros standard para clasificar el sector fueron tomados de la base de datos espectral es del USGS y se han elegido illita sp5, caolinita-esmectita sp5 y muscovita sp8.

Se puede observar un halo de alteración en la zona NE del Cerro Blanco, donde se ha clasificado muscovita, caolinita-esmectita e illita (figura 6a, b y c) en la misma zona. En las zonas de alteración pueden existir mezclas entre estos minerales, donde las illitas, probablemente originadas a partir de muscovitas, pueden ser alteradas a caolinitas por la acción de aguas ácidas (Pirajno, 1992). Este pasaje hace más dificultosa la detección de estos minerales, formando una mezcla que tiene características espectrales muy similares en los rangos de las bandas del SWIR en ASTER.

En el Cerro Atajo también resultan clasificados los tres minerales.

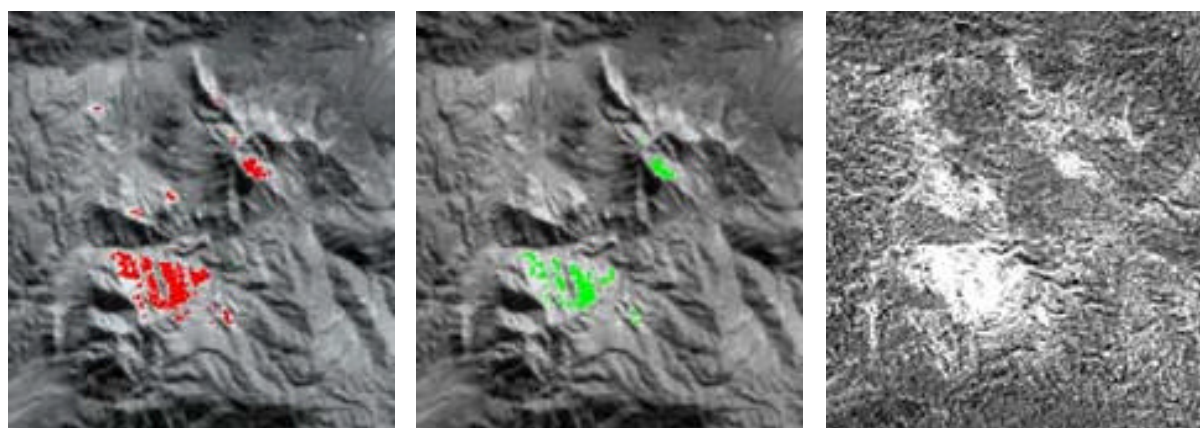


Figura 6: Clasificación SAM del Distrito Minero Cerro Atajo
 a muscovita sp8 ■ b cao-esm sp5 ■ Clasificación SFF illita sp5

Área del Filo Colorado

El Filo Colorado se localiza en la sierra del Aconquija al norte de la localidad de Andalgá, aproximadamente 5 km al oeste del prospecto Agua Rica (pórfiro de Cu- Au, epitermal). Es un prospecto correspondiente a un pórfiro de Cu-Mo, con una zona central de alteración potásica,

un halo de alteración filica y externamente granitos limonitizados. Tiene una fuerte silicificación y argilitización (Guillou, 1999). Es un área de muy difícil acceso, aproximadamente 5000 m de altitud. Las rocas donde se emplazan los intrusivos, en general diques de composición dacítica, son granitoides del Batolito de Capillitas y metasedimentitas del Complejo Metamórfico de Aconquija.

Se seleccionó la combinación de bandas RGB 3 2 1, con la aplicación de la técnica de *saturation stretch* (figura 7) y RGB 8 3 1 con *decorrelation stretch* (figura 8). En ambos casos se puede observar claramente el área de alteración hidrotermal en forma de halo con zonación, que correspondería a disposición de las alteraciones filica y/o argílica.

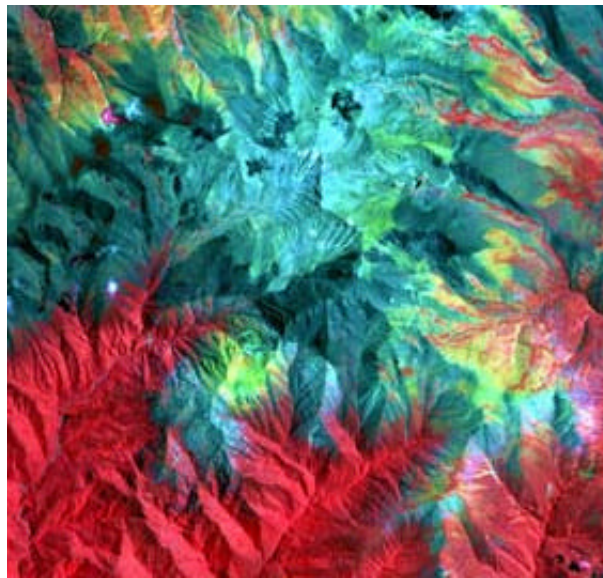


Figura 7: Imagen ASTER RGB 3 2 1 Saturation Stretch del Filo Colorado

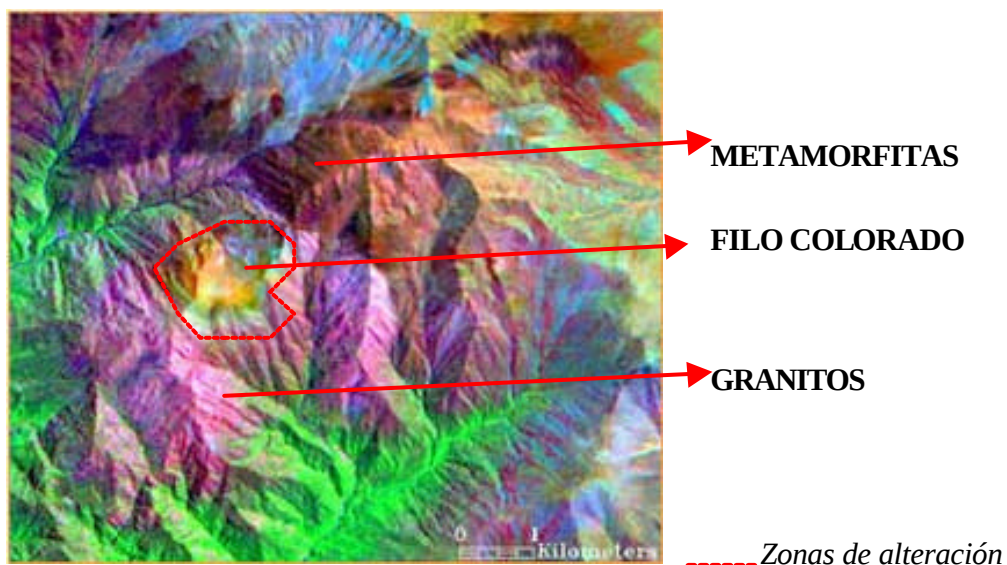


Figura 8: Imagen ASTER RGB 8 3 1 Decorrelations Stretch del Filo Colorado

COCIENTE DE BANDAS

Con las bandas del SWIR se realizaron diferentes cocientes de bandas a partir de la evaluación de los picos de absorción y reflectancia de los minerales de interés. Los resultados de las relaciones existentes entre las bandas 5, 6 y 7 de ASTER son muy importantes, debido a que podemos aproximarnos ajustadamente a un mapeo preliminar de zonas de alteración argílica, arílica avanzada y filica, debido a que la alunita presenta absorción en la banda 5 mientras que las arcillas en la banda 6. En el caso de la caolinita la banda 7 tiene mayor reflectancia que la banda 5, en cambio en la illita y la sericita la relación es diferente, siendo muy pareja la reflectancia entre estas bandas (Graham y Salisbury, 1970).

Con la combinación RGB 4/5 4/6 4/7 se detecto el halo de alteración en color blanco y aparecen áreas anómalas con respuesta similar al noreste del Filo Colorado (figura 9).

Se aplicó el índice $(b5+b7)/b6$ (Marín et al., 2004) donde b5 es la banda 5, b6 la banda 6 y b7 la banda 7 de ASTER. La zona de alteración aparece color blanco, por la alta respuesta del índice (figura 10). Esto hace suponer la presencia de illita o muscovita (sericita), ya que, como se explico anteriormente, estos minerales tienen reflectancia en las bandas 5 y 7 y absorción en la banda 6. Se localizan también otras áreas con anomalía que en principio se corresponderían con las áreas detectadas en la figura anterior.



Figura 9: Imagen ASTER cocientes RGB 4/5 4/6 4/7

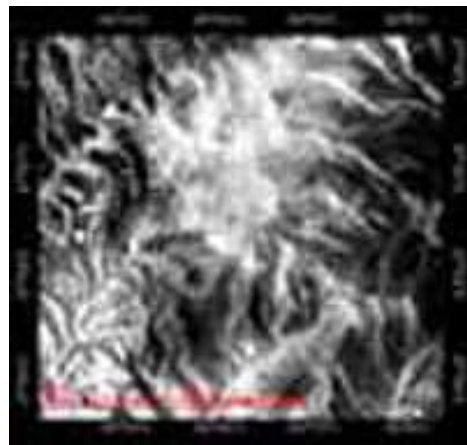


Figura 10: Imagen ASTER índice $(b5+b7)/b6$

CLASIFICACIONES

Con la firma espectral de un píxel correspondiente a la zona de alteración de Filo Colorado, podemos realizar una clasificación supervisada mediante la utilización de *Spectral Angle Mapper* y de esta forma extrapolar los resultados a áreas vecinas que no han sido exploradas hasta la actualidad en forma sistemática. Como se vio anteriormente, hacia el este y noreste del Filo Colorado existen zonas que presentan una respuesta espectral similar a las de la zona de alteración de Filo Colorado.

La firma espectral tomada desde la imagen de reflectancia relativa de la zona del halo es muy similar a la firma de muscovita sp8 (USGS).

En la clasificación además de clasificarse Filo Colorado, se identifican también las zonas anómalas detectadas con los índices (figura 11).

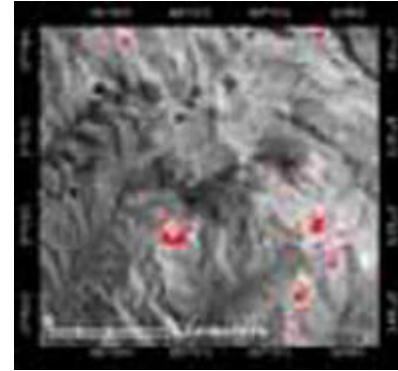


Figura 11: Clasificación SAM

■ Zonas con sericita

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con la combinación de bandas RGB 321 *saturation stretch* se separaron los dos miembros del terciario de la Formación Morterito, el Terciario bajo, compuesto por areniscas rojas y el Terciario alto, donde las sedimentitas continentales aparecen intercaladas con niveles volcánicos.

Con la utilización de los cocientes de bandas se detectaron las zonas de alteración hidrotermal en el Distrito Minero Cerro Atajo y se clasificaron illita, muscovita y caolinita-esmectita. El tipo de alteración hidrotermal podría corresponder a zonas fílicas y argílicas.

Los resultados de los cocientes y las clasificaciones tienen una correlación positiva con los datos de campo. Los píxeles clasificados como zonas de alteración hidrotermal coinciden con las zonas de muestreo en el terreno y las firmas espectrales tanto de la imagen como de las muestras medidas con el espectrómetro certifican esta correspondencia.

Hacia el sureste de la falla Lavadero las muestras de campo presentan una firma espectral que puede interpretarse como una mezcla de arcillas y carbonatos, pero estos píxeles no han resultado clasificados, los píxeles no reflejan la mezcla, mientras que las firmas espectrales de terreno muestran absorción en la banda 6 y la banda 8 (característica de los carbonatos). Esto puede deberse a que las arcillas son mas reflectivas obliterando la respuesta de los carbonatos en la imagen, o simplemente porque se encuentran en mayor proporción que estos últimos.

En el área de Filo Colorado las zonas de alteración descritas en la bibliografía se representan mediante un halo de muy buena definición, mapeado con los distintos procesamientos. En los procesamientos aquí aplicados no ha sido posible detectar la alteración potásica del núcleo y el anillo correspondería a la zona de alteración fílica (cuarzo-sericita). Esta interpretación surge del

análisis de los cocientes y el resultado de la clasificación de la firma espectral tomada de la imagen de reflectancia relativa, la cual se asemeja a una muscovita (sericita).

Finalmente podemos extrapolar el análisis de los resultados a nuevas áreas anómalas al este y noreste del supuesto sistema porfirico de Cu - Mo, las cuales son interesantes ya que responden a los cocientes y a la clasificación como posibles zonas de alteración hidrotermal con características espectrales semejantes a las del Filo Colorado.

La metodología aquí aplicada, se considera una herramienta de sumo valor sobre todo para el área del Filo Colorado y sus alrededores, teniendo en cuenta su inaccesibilidad y la escasez de estudios de exploración de base llevado en esta región.

Por otro lado la validez del método mediante el muestreo y mediciones de campo realizadas en un área con mayor cantidad de trabajos de exploración y de geología de base, como la de Cerro Atajo – Cerro Blanco, permiten extrapolar esta metodología a aquellas área sin exploración. De esta forma se podrían definir nuevos blancos exploratorios de zonas de alteración, mediante la utilización de datos ASTER, abarcando una amplia región a escala regional, metodología aún no aplicada en forma sistemática en la región de estudio.

Las diferentes técnicas de procesamiento de los datos ASTER aquí aplicadas han sido utilizadas en forma efectiva en la discriminación de unidades del basamento Paleozoico (granitos, metamorfitas de bajo grado y alto grado) y del Terciario Superior (secuencias sedimentarias, volcanosedimentarias, volcánicas, cuerpos intrusivos ácidos), como así también en la identificación de lineamientos estructurales y separación de depósitos modernos (conos aluviales, terrazas, depósitos glaciares, de avalancha, etc)

Agradecimientos

En primer lugar deseamos expresar nuestro agradecimiento al SEGEMAR y JICA, por permitir la publicación de estos resultados y el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Para el trabajo de campo ha sido muy importante el generoso y cálido apoyo brindado por la familia Llampá en su totalidad, tanto en la mina Santa Rita como en Andalgalá. Se agradece también el apoyo brindado por la empresa Agua Rica S. A.

BIBLIOGRAFÍA

- Gonzalez, Bonorino, F. 1950., Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Asociación Geológica Argentina, Revista, 5 (3): 81 –110. Buenos Aires.
- Graham, R. y J. Salisbury, 1970. Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks. Silicates Minerals. Modern Geology, Vol. I, p. 283-300.
- Guillou, J., 1999. El pórfido cuprífero Filo Colorado, Catamarca. Recursos Minerales de la Republica Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1653-1657, Buenos Aires.

- Marín, G., K Ueda, S. Castro Godoy, A. Leanza, C. Herrmann, K. Nakashima, I. Di Tommaso y C. Marquetti, 2004. Identificación de arcillas con datos ASTER en un sector de la Cuenca Neuquina, Argentina. XI Simposio Internacional SELPER, Santiago.
- Peralta, E., 1999. Distrito Aurífero de Cerro Atajo, Catamarca. Recursos Minerales de la Republica Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1493-1494, Buenos Aires.
- Pirajno, F., 1992. Hydrothermal Mineral Deposits. Spring-Verlag, Berlin.