

RECONOCIMIENTO DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL CON EL SENSOR ASTER, EN EL CURSO MEDIO DEL RÍO SANTA CRUZ (31°40'S), PROVINCIA DE SAN JUAN

Daniel J. PÉREZ¹, Patricio E. D'ODORICO BENITES^{1,2} y Marta C. GODEAS³

¹ Laboratorio de Tectónica Andina, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. E-mail: daniel@gl.fcen.uba.ar

² ArPetrol Argentina S.A. E-mail: p.dodorico@arpetrol.com

³ Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). E-mail: mgodea@mecon.gov.ar

RESUMEN

La utilización del sensor ASTER (*Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*) permitió la identificación de diversos depósitos de alteración hidrotermal, indicando que la aplicación de técnicas espectrales en regiones con buena exposición de afloramientos, permite la identificación de diversas litologías asociadas a dichos depósitos. En el presente trabajo se han probado diferentes métodos para identificar y generar un mapa de zonas con alteración hidrotermal mediante el uso de escenas ASTER. Estas áreas usualmente contienen grandes cantidades de minerales arcillosos susceptibles de ser detectados con imágenes multiespectrales. Diversos autores han desarrollado diferentes procedimientos para clasificar y generar un mapa de estos minerales de origen hidrotermal. Entre las más simples, las combinaciones y cocientes de bandas han probado ser herramientas muy efectivas para detectar blancos. Los índices litológicos buscan reforzar la respuesta espectral de este grupo de minerales mediante productos y cocientes de bandas. Estas técnicas no implican una corrección integral de la escena ASTER. Otras técnicas empleadas en este estudio requieren de un procesamiento más profundo, especialmente cuando se trabaja con datos espectrales. Las mismas incluyen la clasificación SAM (*spectral angle mapper*) y la transformación MNF (*minimum noise fraction*) para separar el ruido y reducir los requisitos posteriores para procesar la imagen. Los espectros utilizados en este trabajo fueron obtenidos con muestras de campo con un espectrómetro de reflectancia SWIR (*short wave infrared*) y mediante la derivación de sus escenas. Los métodos de clasificación han sido probados en áreas de mineralización conocida, como Los Pelambres, El Pachón y Altar; y en otros sectores en la región del río Santa Cruz como Carnicerías y La Coipa; en el sector sudoccidental de la provincia de San Juan. Los resultados de este trabajo se presentan en forma de imágenes de asociación de minerales e índices litológicos.

Palabras clave: *Sensores remotos, ASTER, alteración hidrotermal, Cordillera frontal, San Juan, Mioceno.*

ABSTRACT: *Reconnaissance of hydrothermal alteration with the ASTER sensor, in the middle course of Río Santa Cruz (31°40' S), province of San Juan.* The advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) was used to identify different deposits of hydrothermal alteration which indicates that several important lithological groups can be mapped in areas with good exposure by using spectral-matching techniques. Different methods are tested in order to identify and map zones with hydrothermal alteration minerals using the ASTER dataset. These areas are often referred to having large quantities of clay minerals which can be detected using multispectral imagery. Several authors have developed different procedures to map these hydrothermal minerals. Among the simplest ones, band combinations and band ratios have proven to be very useful tools for identifying targets. Lithology indexes point to reinforce the spectral response of this group of minerals working with band products and ratios. So far, these techniques do not need a full image correction. Other methods here employed require further processing of the ASTER scene, especially when spectral data are used. These techniques include spectral angle mapper (SAM) classification and minimum noise fraction (MNF) transforms to segregate noise and reduce computational requirements. Spectral data used in this paper were collected from field samples using SWIR (short wave infrared) reflectance spectroscopy and derived from the scene itself. These mapping methods have been tested in areas of known hydrothermal alteration occurrences, e.g. Los Pelambres, El Pachón and Altar, and in other sector of Santa Cruz region like Carnicerías and La Coipa; all of these at the south westernmost part of San Juan province. The result of this work is here presented as a series of images showing lithology indexes and an expected mineral assembly.

Keywords: *Remote sensing, ASTER, hydrothermal alteration, Cordillera Frontal, San Juan, Miocene.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de imágenes satelitales se ha constituido en una importante herramienta para generar un mapa litológico preliminar. Entre los datos más utilizados para estas tareas se encuentran las imágenes ASTER (*Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*), frecuentemente empleadas en la identificación de minerales y generación del mapa geológico en general. El reconocimiento de zonas con minerales de alteración hidrotermal es una aplicación particular de los sensores remotos multiespectrales, cuyo principal objetivo en este caso es el reconocimiento de depósitos comercialmente explotables. Diversos autores utilizaron este tipo de imágenes en la identificación de minerales de alteración hidrotermal, tales como Kruse (1993), Souza Filho *et al.* (2003), Hewson (2003) y Ducart *et al.* (2006), Ninomiya (2002, 2004); Rowan *et al.* (2003) y Rowan y Mars (2003).

ASTER es un sensor multiespectral a bordo del satélite EOS (*Earth observing system*) - TERRA que forma parte del sistema de observación terrestre de la NASA. El satélite posee una órbita heliosincrónica a 705 km de altura. El ancho de barrido es de 60 km y la distancia entre órbitas es de 172 kilómetros. El sensor tiene una resolución espectral que va desde 0,520 hasta 11,650 (μm) micrómetros, distribuida en 14 bandas que a su vez se agrupan en tres subsistemas independientes. Estos subsistemas son el VNIR (*visible and near infrared*) con tres bandas (1-3) (0,52 a 0,86 μm) y una resolución espacial de 15 m, el SWIR (*short wave infrared*) con seis bandas (4-9) (1,6 a 2,43 μm) y una resolución espacial de 30 m y, por último, el TIR (*thermal infrared*) con cinco bandas (10-14) (8,125 a 11,65 μm) y una resolución espacial de 90 metros. Además el sensor cuenta con un telescopio adicional que tiene una resolución espectral igual a la banda 3 y que está orientado 27,7° hacia atrás, obteniéndose de este modo las bandas 3N (nadir) y 3B (hacia atrás), con las que se construye el par estereoscópico a partir del cual se genera el modelo digital de elevación (DEM) de

cada escena (Fujisada 1995, ERSDAC 2001), (Cuadro 1).

El área de estudio se sitúa en el sector sudoccidental de la provincia de San Juan, en el departamento de Calingasta, a unos 80 kilómetros al oeste de la localidad de Barreal (Fig. 1). Abarca desde el paralelo 31°27'S hasta 31°40'S y desde el meridiano 70°23'O hasta 70°31'O, cubriendo una superficie total de aproximadamente 980 kilómetros cuadrados. La comarca se caracteriza por su relieve montañoso, con alturas que superan los 4500 m s.n.m.. Los principales valles son surcados por cursos de agua permanentes, el más importante de los cuales es el río Santa Cruz. La zona se caracteriza por la presencia de numerosas manifestaciones con alteración hidrotermal asociadas, algunas de ellas en explotación o en prospección. Como ejemplo se puede citar Los Pelambres, Pachón y Altar (Sillitoe 1973, Fernández *et al.* 1974 y Almandoz *et al.* 2005). El presente trabajo es una aplicación de las técnicas de clasificación y generación del mapa litológico, previamente desarrolladas por otros autores.

La escena ASTER utilizada en el presente estudio fue obtenida de la base de datos de la NASA, a través de la página web <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims-welcome/>, sitio oficial del EOS (*Earth observing system*), mediante la CONAE (*Comisión Nacional de Actividades Espaciales*). La metodología de trabajo se basó en la comparación de las respuestas de algunas áreas de mineralización conocidas con las respuestas de blancos en zonas de interés, previo al trabajo de campo. Durante la campaña se extrajeron ocho muestras de los blancos en algunas zonas de interés, que posteriormente fueron estudiadas por espectrometría de reflectancia. Los espectros obtenidos fueron utilizados como referencia para generar el mapa a partir de la escena ASTER.

GEOLOGÍA

La comarca está emplazada en el sector norte de la faja plegada y corrida de La Ramada, forma parte de la Cordillera

CUADRO 1: Características de las bandas de los subsistemas VNIR, SWIR y TIR.

Subsistema	Banda No.	Rango Espectral m (micrometro)	Resolución Espacial
VNIR	1	0.52 - 0.60	15 m
	2	0.63 - 0.69	
	3N	0.78 - 0.86	
	3B	0.78 - 0.86	
SWIR	4	1.600 - 1.700	30 m
	5	2.145 - 2.185	
	6	2.185 - 2.225	
	7	2.235 - 2.285	
	8	2.295 - 2.365	
	9	2.360 - 2.430	
TIR	10	8.125 - 8.475	90 m
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

Principal y Cordillera Frontal y se ubica en el extremo sur del segmento de subducción subhorizontal (*flat slab*) (Cahill e Isacks 1992).

La geología (Fig. 1) de la comarca está dominada por un basamento ígneo compuesto por cuerpos intrusivos granodioríticos y coladas piroclásticas. Sobre este basamento, de edad triásica, se apoya en discordancia una sucesión sedimentaria de origen marino somero y continental, la que presenta una participación creciente de material piroclástico hacia la sección superior. La unidad aflorante más reciente es una volcanita miocena de composición básica a intermedia.

El basamento del área está formado por una sucesión de rocas piroclásticas ácidas del Grupo Choiyoi, las que son intruidas por el Batolito Pico Los Sapos, de composición dominante granodiorítica a granítica, con miembros más básicos subordinados en abundancia.

La sucesión sedimentaria mesozoica se inicia con la unidad de *synrift* de la Formación Rancho de Lata (Álvarez 1996), constituida principalmente por conglomerados y brechas mal seleccionadas, pelitas negras lacustres y rocas piroclásticas con líticos tobáceos y riolíticos. En discordancia angular se apoya la Formación Los Patillos (Álvarez 1996) de edad jurásica inferior a media (Ramos y Ál-

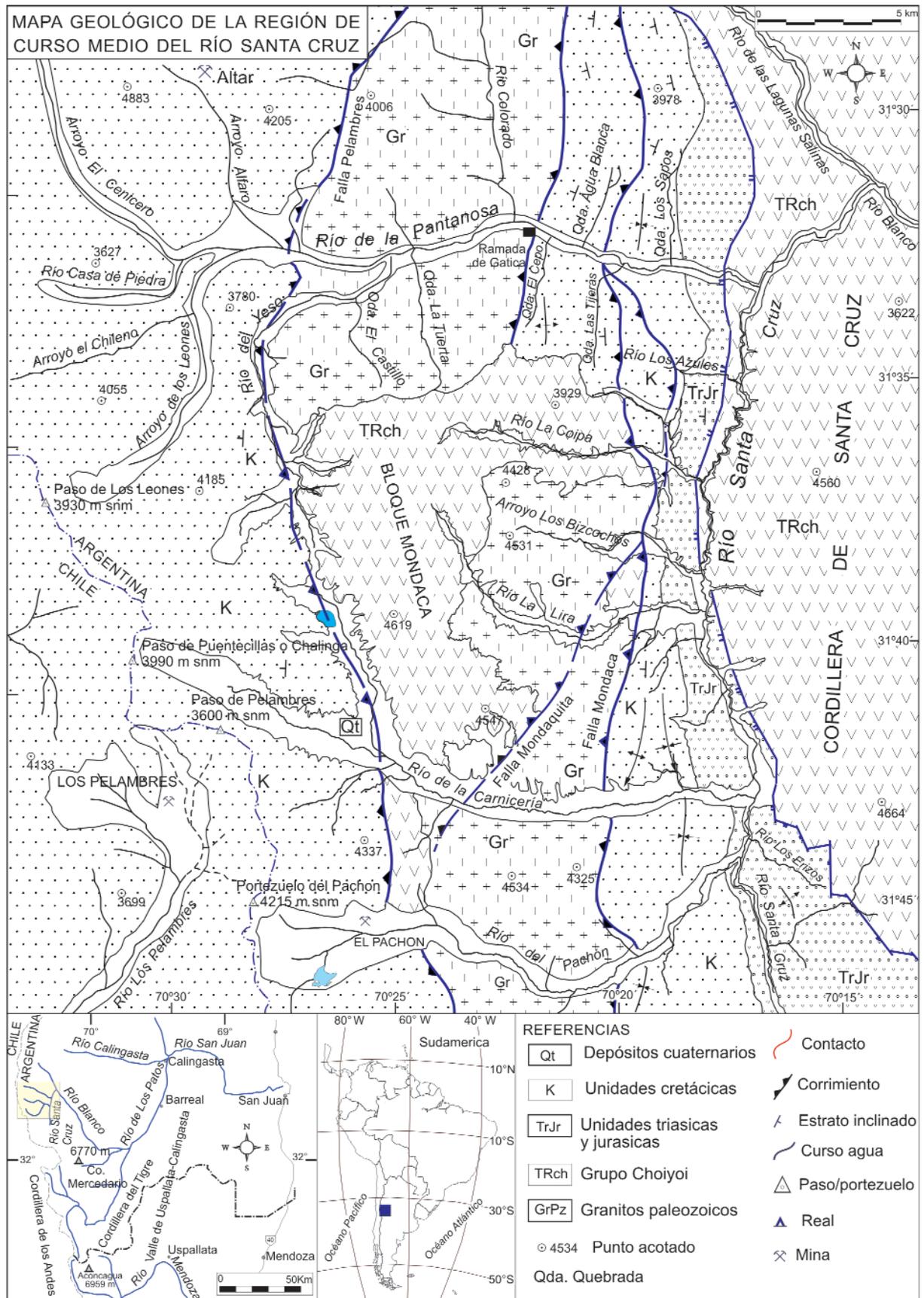


Figura 1: mapa geológico y de ubicación del área de estudio.



Figura 2: Combinación de bandas RGB: 654, con las zonas de alteración en color azul claro; y ubicación de las muestras extraídas estudiadas con espectrometría de reflectancia.

varez 1999). La misma está constituida por areniscas y calizas bioclásticas y oolíticas de origen marino somero. Por encima se halla un nivel de brechas calcáreas de pocas decenas de metros de espesor, pertenecientes a la Formación La Manga, de edad caloviana inferior a oxfordiana media-superior. Estas dos últimas de ambiente de postrift (Álvarez 1996). Sin relación estratigráfica se encuentra la Formación Auquilco constituida por yesos con textura sacaroide y localizada sobre la falla Pelambres en el río Carnicería. Sobre la Formación La Manga y en discordancia, continúan los depósitos continentales del Jurásico superior de la Formación Tordillo, bien representados en la comarca e integrada por areniscas, sabulitas y conglomerados rojizos de origen continental, desarrollados en una cuenca de intraarco, asociados a un régimen extensional y que marcan la culminación del ciclo jurásico en la región (Cristallini y Ramos 1996).

Continúan las secuencias cretácicas con depósitos volcánicos y volcanoclásticos continentales de la Formación Cristo Redentor. Están formados por una alternancia de coladas andesíticas, ignimbritas

dacíticas, conglomerados clasto-sostenidos y areniscas rojas. Estos depósitos se disponen en una faja que bordea la margen occidental del río Santa Cruz, formando amplios anticlinales y sinclinales con rumbo septentrional, extendiéndose sobre el límite argentino-chileno hasta aproximadamente los 37°LS. Los depósitos terciarios con poco desarrollo corresponden a un pórfiro dacítico vinculado con un halo de alteración hidrotermal y a la mineralización de los yacimientos de El Pachón y Los Pelambres (Fernández *et al.* 1974). Otras zonas de alteración han sido identificadas y localizadas en el terreno, en la ladera occidental de la cordillera de Santa Cruz, en el río La Coipa, y en el río de la Carnicería (Fig. 2). Una cuarta zona de alteración hidrotermal, denominada Altares (Fig. 2), ha sido identificada también en el extremo noroeste de la zona de estudio, y que corresponde a un sistema de mineralización de alta sulfuración vinculado a un sistema de pórfido cuprífero (Almandoz *et al.* 2005). La estructura de la región se caracteriza por presentar dos estilos bien definidos, los cua-

les se habrían desarrollado durante el Mioceno superior. Uno es de piel fina (*thin skinned*) y habría sido el responsable de la fuerte deformación en la cobertura sedimentaria mesozoica, formando anticlinales y sinclinales en las secuencias cretácicas del Cordón del Yunque y del Límite. El segundo es de piel gruesa (*thick skinned*), y muestra una deformación que afecta a los bloques de basamento de la cordillera de Santa Cruz la que es levantada por una falla de alto ángulo ubicada al este de dicha cordillera (D'Odorico *et al.* 2006). La porción central de la comarca en estudio, o bloque Mondaca es levantada por la falla Mondacuita, de alto ángulo, por sobre los estratos mesozoicos previamente descritos. El estilo de piel fina puede verse en el río Carnicería, mediante el corrimiento Pelambres de bajo ángulo, que afecta la Formación Los Pelambres, previamente deformada, la que constituye una estructura fuera de secuencia (Figs. 1 y 2).

DEPÓSITOS MINERALES EN LA REGIÓN

Dentro de la zona bajo estudio se encuentran tres áreas de mineralización y alteración hidrotermal, las cuales están actualmente en prospección o en explotación. Estas áreas son Altar, El Pachón y Los Pelambres (Sillitoe 1973, Fernández *et al.* 1974 y Almandoz *et al.* 2005). Dentro de este estudio, dichas zonas de alteración son utilizadas como punto de comparación para generar el mapa de alteraciones de otros sectores utilizando los datos del sensor ASTER.

En el extremo noroccidental del área bajo estudio se encuentra el prospecto Altar, sistema epitermal de alta sulfuración asociado a un pórfido cuprífero (Almandoz *et al.* 2005). En la parte central del prospecto aflora un cuerpo intrusivo cuarzo diorítico de edad miocena que lleva sobreimpuesto una intensa alteración potásica caracterizada por biotitas reemplazadas por sericita, cristales de ortoclasa y cantidades menores de anhidrita, turmalina y magnetita diseminada. Sobre este cuerpo intrusivo se desarrolla un intenso *stockwork* de cuarzo, piri-

ta, calcopirita y bornita. La zona potásica se vio posteriormente afectada por dos pulsos de alteración fílica, con calcosina, digenita, covellina y bornita asociadas en una primera fase, mientras que el segundo pulso produjo removilización parcial del cobre. La superficie con alteración argílica es reducida y se halla en una posición topográfica más elevada respecto de la zona fílica. La roca de caja, formada por flujos andesíticos, se encuentra afectada por un halo externo de alteración propilítica.

Por otro lado, en el sector sudoccidental de la comarca se desarrolla un importante sistema de alteración y mineralización asociado a dos pórfiros cupríferos, Los Pelambres, sobre territorio chileno (Sillitoe 1973) y El Pachón (Fernández *et al.* 1974). El primero está integrado por un complejo intrusivo tonalítico que alberga la mayor parte de la mineralización, con andesitas y diques aplíticos subordinados. Las dataciones radimétricas obtenidas sobre biotitas hidrotermales arrojan edades levemente inferiores a 10 Ma (Reich *et al.* 2003). El pórfiro cuprífero El Pachón se encuentra aledaño a Los Pelambres y en territorio argentino. Está formado por pórfiros dioríticos - granodioríticos y diques dacíticos - tonalíticos que en su conjunto intruyen a la Formación Los Pelambres (equivalente a la Formación Juncal de edad cretácica). La alteración potásica se desarrolla preferencialmente sobre las rocas porfíricas, en las cercanías del contacto con la roca de caja. Asimismo, la alteración fílica afecta fuertemente a los plutones, dando como resultado una paragénesis de sericita - piritita - sílice. El halo propilítico afecta marginalmente a los intrusivos, siendo sus efectos más notorios en la roca de caja, formada por volcanitas de composición intermedia y tobas ácidas. Por último, la alteración argílica aparece como resultado de un proceso de lixiviación asociada a un probable enriquecimiento supergénico (Fernández *et al.* 1974).

Adicionalmente, durante las labores de campo se identificaron dos zonas con alteración visible, previamente no mencionadas específicamente por la bibliografía

CUADRO 2: Mineralogía obtenida por espectrometría de reflectancia.

Muestra	Litología (original)	Composición
23-06	Ignimbrita riolítica	Illita 60%, 20% caolinita, 20% cuarzo
30-06	Riolita	Cuarzo 60%, 40% illita-esmectita
30-06a	Granodiorita	Cuarzo 60%, 40% illita-esmectita
31-06	Granodiorita	Cuarzo 60%, illita 40%, trazas de jarosita
31-06a	Granodiorita	Cuarzo 80%, illita-esmectita 20%, trazas de caolinita
37-06	Riolita	Cuarzo 60%, illita-esmectita 40%
38-06	Dacita	Illita 90%, chamosita 10%
39-06	Dacita	Illita 100%

existente. En el presente trabajo estos dos sectores se los denomina como zona de interés 1 y zona de interés 2, ésta última posiblemente vinculada genéticamente con el pórfiro cuprífero Los Pelambres (Fig. 2 y posteriores). Algunas muestras de campo empleadas para este estudio fueron tomadas en estas áreas de interés.

SENSOR ASTER

Diferentes técnicas de procesos con datos digitales satelitales, como composiciones color RGB, clasificación supervisada y cocientes de bandas, pueden discriminar minerales en rocas con alteraciones hidrotermales. Además y mediante la aplicación de muestreos y espectros con PIMA (*portable infrared mineral analyzer*) (Cuadro 2), se puede obtener información para ser aplicada luego en procesos de datos de imágenes, lo cual permite identificar zonas de alteración hidrotermal.

La región del río Santa Cruz y en general de Cordillera Frontal a estas latitudes, es árida y con poca o nada cobertura vegetal, lo cual favorece ampliamente el uso de datos satelitales en la identificación de minerales asociados a depósitos con interés económico. En el presente trabajo se aplicaron varias y diferentes técnicas de procesamiento de datos satelitales con la finalidad de identificar y realizar el mapa de diferentes unidades geológicas además de las zonas de alteración hidrotermal.

Usualmente, para aplicar técnicas de identificación de alteración hidrotermal se utilizan los subsistemas VNIR y SWIR, con una resolución espacial de 30 m y nueve bandas que cubren el rango espectral 0,520 – 2,430 (µm) micrómetros.

Preprocesamiento de la imagen

En el presente trabajo se utilizó una escena ASTER con un procesamiento nivel 1B (L1B), el cual lleva incorporado coeficientes radimétricos y geométricos en un archivo adjunto. Adicionalmente, este producto se proyecta sobre un mapa rotado y georeferenciado, preservando la resolución del instrumento (ERSDAC 2001).

Sin embargo el procesamiento L1B no lleva ninguna corrección del efecto *Crosstalk* (Iwasaki *et al.* 2005). Este fenómeno consiste en la pérdida de señal por reflexión de fotones desde la banda 4 hacia las bandas 5 y 9, causando que la respuesta de estas últimas sea mayor a la real. Si bien este efecto se produce en todas las bandas del subsistema SWIR, es más intenso en las dos bandas mencionadas porque están físicamente más cerca de la banda 4 en el sensor. La corrección se realizó usando programa ERSDAC Crosstalk® 3, de libre acceso.

Los valores digitales de ocho bits de cada banda fueron transformados en valores de radiancia en la atmósfera superior. Este procedimiento, que evita pérdida de información, puede ser realizado utilizando la siguiente ecuación general:

$$\text{Rad}_i = \text{UCF}_i \times (\text{DN}_i - 1)$$

En donde Rad_i es la radiancia de una banda, UCF_i es el coeficiente de transformación (unit conversion factor) y DN_i es la reflectancia expresada como un valor digital de ocho bits. Los factores de conversión son provistos por la NASA en cada meta archivo que acompaña a la imagen procesada a nivel L1B. Una vez efectuadas estas correcciones, puede comenzar el trabajo de interpretación de la



Figura 3: Combinación de bandas RGB para los cocientes 4/5, 4/6, 4/7. En este caso, los blancos aparecen de color blanco o blanco verdoso. (Zona de Interés 1: La Coipa y río Santa Cruz. Zona de Interés 2: La Carnicería.)

escena con combinaciones, cocientes e índices de identificación litológica.

La radiación solar reflejada que detecta el sensor debe necesariamente atravesar la atmósfera, que está constituida por gases y polvo. Estos elementos producen un debilitamiento y distorsión de la respuesta debido a la absorción selectiva de algunas longitudes de onda en particular con respecto a otras, que llegan con mínimas perturbaciones hasta el sensor. Estos fenómenos pueden suprimirse aplicando una corrección atmosférica (Green *et al.* 1993) en la que se tiene en cuenta un modelo de atmósfera (para este estudio el modelo es *mid-latitude summer*), el efecto de los aerosoles (despreciables en este caso) y la humedad ambiental media. El propósito de este procesamiento es que las condiciones bajo las cuales son obtenidos los espectros en la imagen sean iguales a las condiciones de laboratorio donde se obtienen las curvas de espectrometría de reflectancia. En este estudio, la corrección atmosférica se realizó con el software comercial ENVI Flaash®.

Combinaciones y cocientes de bandas

Las combinaciones de bandas constituyen el método más simple y rápido para localizar zonas con presencia de minerales arcillosos. Para este trabajo se ha empleado la combinación RGB: 654. Las arcillas presentan una fuerte absorción en las bandas 5 y 6, asociada a la vibración del enlace Al-OH en el rango 2,160 a 2,200 (μm) micrómetros (Hunt y Salisbury 1970, Pontual *et al.* 1997). La reflectancia en la banda 4 de ASTER es más elevada, ya que no tiene asociada ninguna absorción característica de las arcillas. Por este motivo, en la combinación de bandas expuesta las zonas con minerales arcillosos se ven en diferentes tonos de azul (Fig. 2).

Las combinaciones de cocientes de bandas constituyen otra herramienta para detectar áreas con presencia de minerales arcillosos. El método consiste en realizar el cociente entre una banda en donde las arcillas presentan picos de reflectancia (alto DN o *digital number* asociado) y otra banda en donde las arcillas tienen picos

de absorción (bajo DN asociado). De este modo, se busca reforzar la respuesta de aquellos píxeles que reúnan estas condiciones. La combinación RGB: 4/5, 4/6, 4/7 utilizada en este trabajo da como resultado una imagen en donde las zonas con alteración aparecen de color blanco, debido a la alta respuesta en los tres cocientes (Fig. 3). Como se mencionó anteriormente, el enlace Al-OH de las arcillas produce picos de absorción en las bandas 5 y 6, mientras que en la banda 7 la reflectancia es baja debido al enlace Fe-OH (Pontual *et al.* 1997).

Índices de identificación litológica - SWIR

La identificación de minerales de alteración puede realizarse aprovechando las características de absorción en determinadas regiones del espectro, coincidentes con algunas bandas del sensor ASTER. Algunos autores han planteado el uso de índices litológicos para lograr tal fin. En particular, Ninomiya (2004) ha utilizado índices para reforzar la respuesta de aquellas áreas con presencia de minerales de alteración. Dichos índices fueron utilizados en el presente estudio con la finalidad de identificar diversas áreas las cuales contienen arcillas de origen hidrotermal (Zonas de interés 1 y 2 en la figura 4a). El primero de los índices queda definido por la siguiente ecuación:

$$OHI_a = \frac{\text{banda}_4 \times \text{banda}_4}{\text{banda}_6 \times \text{banda}_6}$$

Los minerales como la montmorillonita, caolinita, alunita y las micas presentan una absorción muy definida en la banda 6, mientras que en las bandas 4 y 7 tienen una reflectancia moderada. Según el autor (Ninomiya 2004) la detección de minerales sensibles a este índice se produce cuando se cumple la condición $OHI_a > 4,05$. La figura 4a es un mapa de este índice, en donde se observa que los mayores valores (colores naranja y rojo) están asociados al prospecto Altar y a los pórfiros cupríferos Los Pelambres y El Pachón. Del mismo modo, se puede inferir la presencia de montmorillonita y mi-

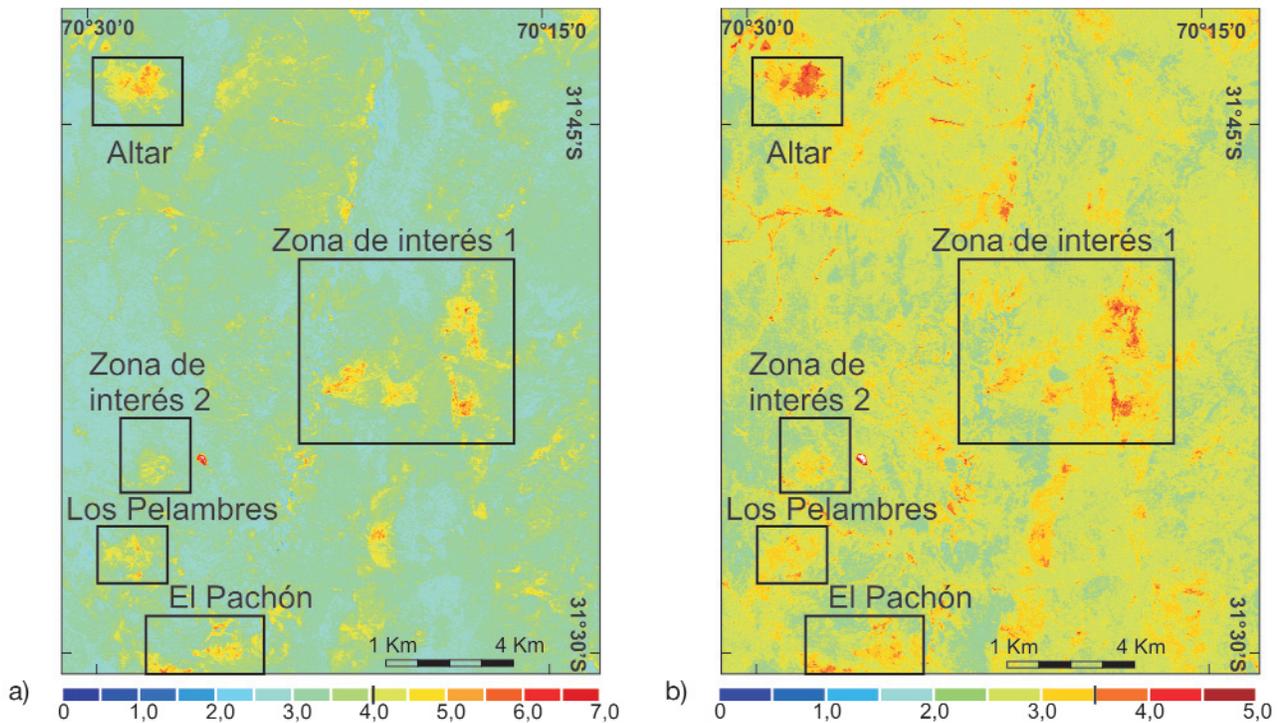


Figura 4: a) Índice OHIa en la zona de estudio. Las respuestas más intensas están asociadas al prospecto Altar y a la Zona de Interés 1. Véase en la escala de colores el umbral establecido por Ninomiya (4 para el índice OHIa); b) Índice OHIb en la misma área, donde los valores más altos se hallan los mismos sectores. Véase en la escala de colores el umbral establecido por Ninomiya (3,5 para el índice OHIb).

cas en las Zonas de interés 1 y 2 debido a los altos valores de este índice en estos sectores. El segundo índice utilizado en la identificación de minerales de alteración es similar al primero, pero detecta aquellos minerales con un pico de absorción centrado en la banda 5, de modo que la ecuación para este nuevo índice se define como:

$$OHI_b = \frac{\text{banda}_4 \times \text{banda}_7}{\text{banda}_5 \times \text{banda}_8}$$

Dentro del grupo de minerales susceptibles de ser detectados con este índice están la pirofilita, la caolinita y la alunita. Se puede definir la presencia de uno o más de estos minerales si se cumple que $OHI_b > 3,5$. La figura 4b es el resultado de la aplicación de este segundo índice sobre la escena ASTER. Nuevamente se observan altos valores por encima del umbral establecido asociados a las áreas de mineralización conocida, así como a la zona de interés 1.

Un tercer índice hace uso de un rasgo espectral único de la alunita, una absorción muy fuerte y definida que se centra en la

banda 8, por lo cual Ninomiya (2004) ha definido el índice de alunita como:

$$ALI = \frac{\text{banda}_7 \times \text{banda}_7}{\text{banda}_5 \times \text{banda}_8}$$

No obstante, la identificación de este sulfato mediante la aplicación del índice ha dado resultados negativos. Por este motivo se infiere que las zonas de alteración estudiadas no exhiben cantidades significativas de alunita que puedan ser detectadas con este método.

ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA

La espectrometría de reflectancia es una técnica de identificación de minerales basada en la emisión de radiación electromagnética en la región del espectro infrarrojo cercano (SWIR). Dentro de este rango, algunos iones y enlaces metal-ión tienen absorciones muy definidas que permiten reconocer su existencia dentro de la muestra analizada (Litvak y Godeas 2003). La mayoría de estos iones y enlaces se encuentran en los minerales de al-

teración hidrotermal, por este motivo el método es de amplia aplicación en la búsqueda de áreas mineralizadas.

Dentro del área de estudio se han seleccionado algunos puntos de extracción de muestras para ser estudiadas con espectrometría de reflectancia SWIR. La elección de estos puntos se hizo sobre la base de las imágenes de combinaciones de bandas y cocientes de bandas. Se extrajeron un total de ocho muestras (Fig. 2), que fueron posteriormente estudiadas con un espectrómetro PIMA (*portable infrared mineral analyzer*) de reflectancia SWIR (Fig. 7). El cuadro 2 es una síntesis de las interpretaciones de las muestras estudiadas. La espectrometría de reflectancia SWIR es un método semicuantitativo

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS ASTER

La técnica para identificación de minerales y litologías utilizada en este trabajo fue desarrollada inicialmente para trabajar con imágenes hiperespectrales, aunque su uso luego se hizo extensivo a las

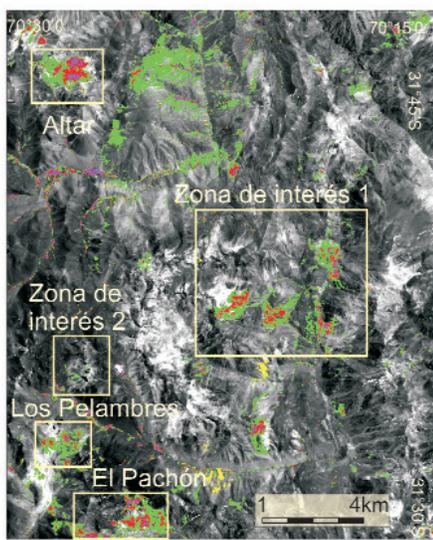


Figura 5: Resultado de la clasificación SAM sobre el área de estudio, utilizando los espectros de campo. Los colores del mapa resultante se corresponden con los colores de los espectros de la figura 8. Los blancos de alteración han sido identificados satisfactoriamente, con excepción de la zona de interés 1.

escenas multispectrales, con resultados satisfactorios (Crosta *et al.* 2003 a y b). Dichas técnicas de trabajo requieren un procesamiento adicional sobre la imagen que consiste en eliminar los efectos de la atmósfera sobre la radiación incidente y reflejada.

Clasificaciones con el método SAM (spectral angle mapper)

La técnica SAM es un método de comparación automática entre los espectros de cada píxel de la escena y un conjunto de espectros de referencia (Kruse *et al.* 1993). Estos últimos pueden ser extraídos de una base de datos espectrales o pueden obtenerse con muestras de campo en un laboratorio. El algoritmo básico permite tratar los espectros como vectores en un espacio *n*-dimensional, en donde *n* es el número de bandas incluidas en la clasificación. Cada vector espectral tiene asociado una dirección y un módulo; éste último proporcional a la iluminación solar. La comparación se realiza en términos de la diferencia angular (llamado ángulo espectral) entre los vectores de la imagen y de referencia. La diferencia an-

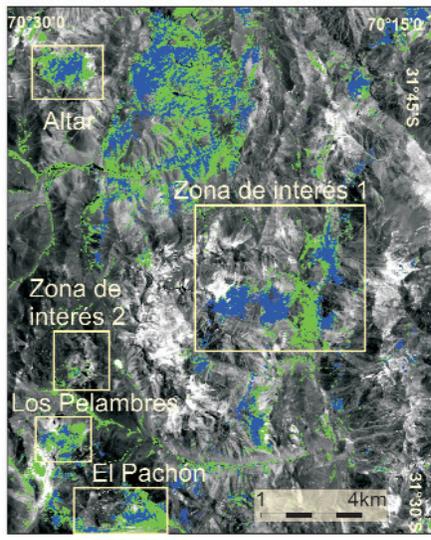


Figura 6: Clasificación SAM de la escena, utilizando los espectros o *endmembers* extraídos de la imagen. Los colores del mapa resultante se corresponden con los colores de los espectros de la figura 9. Se observa que al este del prospecto Altar hay una amplia zona donde la clasificación ha sido positiva. Sin embargo, estos afloramientos, correspondientes a una granodiorita triásica, no han sido identificados como blancos por los otros métodos empleados en este trabajo.

gular entre dos vectores espectrales puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}} \right)$$

En donde *t* es el espectro de estudio y *r* el espectro de referencia. El número *n* representa el número de bandas estudiadas y α es el ángulo entre vectores. El método no es sensible a la iluminación solar, ya que compara ángulos y no módulos. Por este motivo, todas las iluminaciones son tratadas igualmente por el algoritmo. El resultado del método es una imagen de clasificación SAM y un número *n* de imágenes *rule* que muestran la distancia angular entre cada espectro de la imagen y el espectro de referencia, medida en radianes. Los píxeles más oscuros representan una diferencia angular menor, y por lo tanto una mayor similitud entre espectros (Ducart *et al.* 2006).

Para este trabajo se han utilizado los espectros de campo como referencia para aplicar esta técnica de clasificación espec-

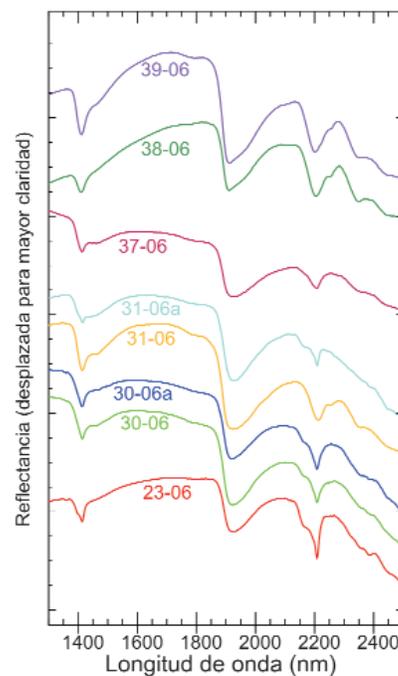


Figura 7: Espectros de reflectancia de las muestras estudiadas, su interpretación se puede ver en el cuadro 2.

tral, mientras que el valor angular máximo de similitud entre vectores es 0,10 radianes. La figura 5, es el resultado de la clasificación SAM con los espectros de campo. Los espectros de campo, medidos con el espectrómetro de reflectancia SWIR, fueron re-muestrados para la resolución del sensor ASTER (Fig. 8). Se han tomado como válidos sólo aquellos espectros que se identificaron sobre las áreas de alteración conocidas. La clasificación positiva en otros sectores de la escena, principalmente en los afloramientos del Batolito Pico Los Sapos, podría indicar la existencia de una asociación de minerales compatible con la meteorización de granitoides. Se ha observado la ocurrencia de minerales del grupo de las arcillas en las secciones delgadas estudiadas para esta unidad litológica.

Identificación de minerales con espectros de la imagen

Para el presente estudio se utilizó una técnica adicional en la identificación de alteración, en la cual se utiliza el método SAM pero usando espectros de referencia extraídos de la propia escena ASTER.

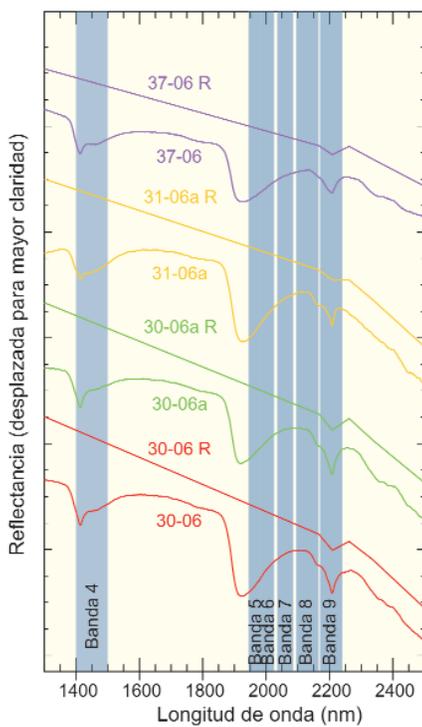


Figura 8: Espectros de campo utilizados para la clasificación SAM (figura 6) re-muestrados a la resolución del subsistema SWIR de ASTER (muestra 30-06 en rojo; muestra 30-06a en verde; muestra 31-06a en amarillo; muestra 37-06 en azul). Los colores indicados de las curvas corresponden a la figura 5. Los espectros re-muestrados se indican con letra "R".

Para ello se emplearon las bandas 4 a 9 del subsistema SWIR y el asistente de clasificación espectral de ENVI®, denominado *ENVI Spectralbourglass wizard*, basado en el flujo de trabajo propuesto por Kruse (1999).

El primer paso es una transformación estadística tipo MNF (*minimum noise fraction*) para determinar la dimensionalidad inherente a los datos y separar el ruido (Green *et al.* 1988). El proceso utiliza dos transformaciones en cascada, basadas en el análisis de componentes principales (PCA). La primera transformación reescala y remueve la correlación entre bandas del ruido. El resultado de este primer paso es información en donde el ruido tiene varianza unitaria y no tiene correlación entre bandas. La segunda transformación es un análisis de componentes principales común, que reduce la dimensionalidad de los datos. El producto de este proceso es un conjunto de imágenes,

en donde la información espectral útil se agrupa en las primeras bandas, mientras que las últimas bandas tienen asociadas mucho ruido y poca información, y por lo tanto pueden ser descartadas. En base a este último análisis del método, es que para el presente estudio, de las seis bandas MNF determinadas por el asistente, sólo se tomaron las cinco primeras, ya que son las que sólo tienen información. La búsqueda y selección de los espectros de referencia que serán utilizados en la clasificación posterior se realiza con un algoritmo denominado índice de píxel puro (*purity pixel index* - PPI) (Boardman *et al.* 1995). Este es un medio para separar los píxeles que son mezclas de aquellos píxeles espectralmente más puros. Estos últimos usualmente pueden ser expresados como mezclas de *endmembers*. Mediante la iteración de proyecciones *n* dimensionales y un valor de umbral, el algoritmo PPI determina cuantas veces cada píxel fue registrado como extremo en las múltiples proyecciones. Usualmente, los píxeles más puros corresponden a sustancias espectralmente únicas, como pueden ser los minerales. Para este trabajo, se utilizaron las primeras cinco bandas MNF y 12.000 proyecciones, estableciendo como valor umbral 2,5 DN (siendo el valor unitario de DN un desvío estándar respecto de la media de los píxeles). La identificación y selección de los píxeles más puros y extremos fue asistida con la herramienta *n-Visualizer*® de ENVI®. Como resultado de este proceso de selección, se obtuvieron siete espectros o *endmembers*.

Los espectros obtenidos con el algoritmo PPI y la herramienta de visualización fueron posteriormente empleados en una clasificación SAM. La distancia angular máxima de similitud entre vectores espectrales fue establecida en 0,10 radianes. Aunque se utilizaron los siete *endmembers*, solamente dos probaron ser identificables en forma efectiva sobre las áreas de alteración conocidas y las zonas de interés 1 y 2 (Fig. 6). Por este motivo, los restantes cinco espectros fueron descartados para obtener la imagen definitiva. La composición mineralógica de estos

dos espectros puede ser estimada mediante un análisis cuidadoso de los picos de absorción y reflexión. Para ello, los dos *endmembers* usados para clasificar la imagen fueron comparados con los espectros de referencia de la base de datos espectrales del USGS (Clark *et al.* 1993). De este modo, el espectro n-D Class 3 está dominado por caolinita, mientras que el espectro n-D Class 4 estaría compuesto principalmente por Illita y cantidades menores de muscovita (Fig. 9).

CONCLUSIONES

El uso y análisis de datos del sensor multiespectral ASTER en la zona de estudio, ha permitido realizar el levantamiento de la geología y estructura, y además también realizar la identificación de zonas con presencia de minerales de alteración, susceptibles de ser detectados con este sensor. La combinación de bandas RGB: 654 incluye los picos de absorción más

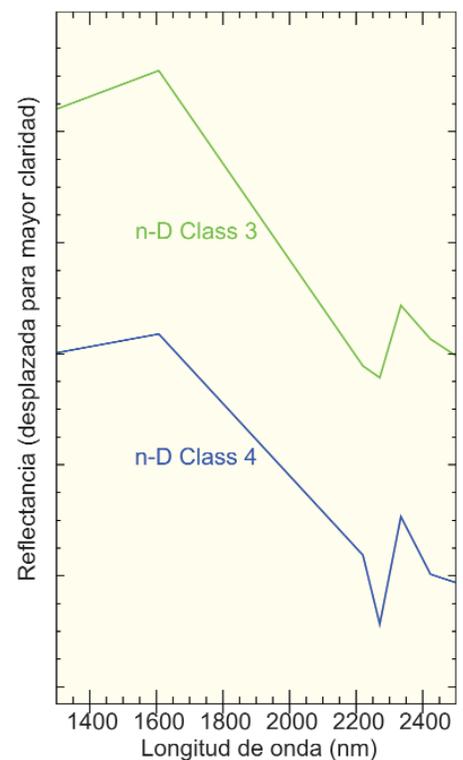


Figura 9: Espectros de referencia utilizados para la clasificación SAM de la figura 6. De los siete obtenidos originalmente, sólo dos mostraron una detección sobre los blancos de alteración. Para la interpretación, véase el texto.

característicos de las arcillas, principalmente en el rango 2,160 – 2,200 (µm) micrómetros, donde absorbe el enlace metálico Al-OH. Por este motivo, la combinación ha resultado efectiva para reconocer blancos de alteración en las zonas de interés 1 (ríos Santa Cruz, La Coipa) y 2 (río de la Carnicería). Del mismo modo, el cociente de bandas RGB: 4/5, 4/6, 4/7 refuerza las respuestas de los picos de absorción de las arcillas, por ello también resulta útil para reconocer blancos. Los índices han resultado parcialmente exitosos para identificar minerales arcillosos en la zona de trabajo. Presentan una fuerte respuesta en el prospecto Altar, El Pachón y la zona de interés 1 (ríos Santa Cruz, La Coipa). En Los Pelambres y la zona de interés 2 (río de la Carnicería) las respuestas fueron más débiles y en particular con el índice OH1b no alcanzaron a superar el valor de umbral establecido por Ninomiya (2004) como base de identificación. El índice de alunita ALI no arrojó resultados positivos en ninguna porción de la imagen, hecho que puede interpretarse como la ausencia de este mineral en cantidades significativas. El uso de espectros de campo fue útil para determinar la composición básica de las arcillas que constituyen los blancos de alteración. A partir del análisis de esta imagen se concluye que estas áreas en particular se hallan dominadas por mezclas de sílice y arcillas del grupo de la illita-esmectita. La discriminación en halos concéntricos sugiere además que la illita-esmectita podría tener distintos grados de cristalinidad, a pesar de que las muestras presentan la misma proporción entre esta arcilla y el cuarzo. Por otro lado, la clasificación realizada con los espectros obtenidos de la escena podría indicar la presencia de caolinita en el sector externo, mientras que los núcleos de alteración podrían estar efectivamente constituidos por illita y cantidades subordinadas de muscovita. Sin embargo, la identificación de minerales con el método de los *endmembers* derivados, no ha sido certero en la identificación de las áreas con alteración hidroter-

mal. De los siete espectros extraídos con este método, sólo dos corresponden a mezclas de minerales arcillosos. Por otro lado, la clasificación ha incluido amplias zonas donde afloran las granodioritas triásicas, inmediatamente al este del prospecto Altar. Estas zonas no han sido identificadas como blancos por ninguna otra técnica de reconocimiento empleada en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros por la lectura crítica del texto. A Río Tinto Exploration, por su apoyo en las tareas de campo. Contribución parcialmente financiada con fondos del Subsidio UBACYT X812, Universidad de Buenos Aires.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Almandoz, G., Zulliger, G. y Marquez-Zavalía, F. 2005. Altar: mineralización de alta sulfuración vinculada a un sistema de pórfido cuprífero, San Juan, Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 369-376.
- Álvarez, P.P. 1996. Los depósitos triásicos y jurásicos de la Alta cordillera de San Juan. En Ramos, V.A., Aguirre Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M.I., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F.X. y Pérez, D.J. (ed.) Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24(5): 59-137, Buenos Aires.
- Alvarez, P.P. y Ramos V.A. 1999. The Mercedario rift system in the principal Cordillera of Argentina and Chile (32° SL). Journal of South American Earth Sciences 12: 17-31.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A. y Green, R.O. 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1: 23-26.
- Cahill, T. e Isacks, B.L. 1992. Seismicity

and Shape of the Subducted Nazca Plate. Journal of Geophysical Research 97(B12): 17503-17529.

- Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J., King T.V.V. y Calvin, W.M., 1993. The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns, U.S. Geological Survey Open File Report 93-592, 1340 p., Washington.
- Cristallini, E.O. 1996. La faja plegada y corrida de La Ramada. En: Ramos, V.A., Aguirre Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M.I., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F.X. y Pérez, D.J. (ed.): Geología de la región del Aconcagua, SEGEMAR, Anales 24: 349-385, Buenos Aires.
- Cristallini, E.O., Kay, S.M. y Ramos, V.A. 1994. Las volcanitas cretácicas y terciarias de la Cordillera del Límite Argentino - Chileno a los 32° latitud Sur. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1311-1315.
- Cristallini, E.O. y Ramos, V.A. 1996. Depósitos continentales cretácicos y volcanitas asociadas. En: Ramos, V.A., Aguirre - Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M.I., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F.X. y Pérez, D.J. (ed.): Geología de la región del Aconcagua. SEGEMAR, Anales 24: 231-273, Buenos Aires.
- Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., Ducart, D.F., Azevedo, F. y Brodie, C. 2003a. Alteration mapping for gold exploration in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery. En ASPRS Annual Conference, Proceedings, 05-09/05/2003, Anchorage.
- Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., Azevedo, F. y Brodie, C. 2003b. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal components analysis. International Journal of Remote Sensing 24(21): 4233-4240.
- Ducart, D.F., Crósta, A.P., Souza Filho, C.R. y Coniglio, J. 2006. Characterizing surficial alteration at Los Menucos epithermal district, Patagonia, Argentina, using shortwave

- infrared spectrometry and ASTER multispectral images. *Economic Geology* 101(5): 981-996.
- D'Odorico P., Sequeira N. y Pérez, D.J. 2006. Geología del curso medio del río Santa Cruz, Andes principales (31°45' LS) San Juan, Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 193-196, Antofagasta.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) 2001. ASTER User Guide, part I, 47 p., Tokio.
- Fernández, R., Brown, F. y Lencinas, A. 1974. Pachón, un nuevo pórfido cuprífero argentino. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 77-89.
- Fujisada, H. 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering* 2583: 16-25.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P. y Craig, M.D. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26(1): 65-74.
- Green, R.O., Conel, J.E. y Roberts, D.A. 1993. Estimation of aerosol optical depth, and additional atmospheric parameters for the calculation of apparent reflectance from radiance measured by the Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer. En *Fourth Annual Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 93 - 26, Proceedings*: 1: 83-86.
- Hewson, R.D., Mah, A., Dunne, M. y Cudahy, T.J. 2003. Mapping mineralogical and structural relationships with satellite-borne ASTER and airborne geophysics at Broken Hill. En *ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition, Adelaide, Extended Abstracts*, doi:10.1071/ASEG2003ab072.
- Hunt, G.R. y Salisbury, J.W. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate Minerals. *Modern Geology* 1: 283-300.
- Iwasaki, A., y Tonooka, H. 2005. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43: 2747- 2751.
- Kruse, F.A. 1999. Visible and infrared: sensors and Case Studies. En: Rencs, A.N. (ed.), *Capítulo 11, Remote Sensing for the Earth Sciences*, John Wiley & Sons, 567-611, New York.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebreicht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., y Goetz, A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- Litvak, V.D. y Godeas, M.C. 2003. Espectrometría de reflectancia: metodología y aplicaciones. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Económica* 14: 42-48.
- Ninomiya, Y. 2002. Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. *International Society for Optical Engineering, Proceedings of SPIE*, 4710: 191-202, Bellingham.
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE*, 5234: 180-190, Bellingham.
- Pérez, D.J. y Ramos, V.A., 1996. El basamento prejurásico. En Ramos, V.A., Aguirre-Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M.I., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F.X. y Pérez, D.J. (ed.) *Geología de la región del Aconcagua, SEGEMAR, Anales* 24: 27-58, Buenos Aires.
- Pontual, S., Merry, N.J. y Gamson, P. 1997. *Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration: G-MEX Manual Practical Applications Handbook*, AusSpec International, 1: 1-169, Victoria.
- Reich, M., Parada, M.A., Palacios, C., Dietrich, A., Schultz, F., y Lehmann, B. 2003. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: metallogenic implications. *Mineralium Deposita* 38: 876-885.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J. y Mars, J.C. 2003. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada using the Advanced Spaceborne Thermal Emissivity 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, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 84: 350-366.
- Sillitoe, R.H. 1973. Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology* 68: 1-10.
- Souza Filho, C.R., Tapia Calle, C.H., Crósta, A.P. y Xavier, R.P. 2003. Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hydrothermal alteration zones at the Quellaveco porphyry-copper deposit, southern Perú. *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Proceedings Annual Conference 2003*: 1- 12, Anchorage.

Recibido: 13 de Noviembre, 2009

Aceptado: 25 de Marzo, 2010