

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL ÓPTICA Y DE RADAR PARA EL ANÁLISIS GEOLÓGICO Y LA DETECCIÓN DE ÁREAS MINERALIZADAS EN EL SECTOR CENTRAL DEL MACIZO DEL DESEADO, PROVINCIA DE SANTA CRUZ

Daniela MARCHIONNI¹ y Isidoro SCHALAMUK²

¹ Instituto de Recursos Minerales (Universidad Nacional de La Plata - CIC), La Plata. E-mail: dmarchi@inremi.unlp.edu.ar

² Instituto de Recursos Minerales (Universidad Nacional de La Plata - CIC)- CONICET, La Plata. E-mail: ischala@inremi.unlp.edu.ar

RESUMEN

En el sector austral de Argentina, el macizo del Deseado ha despertado un gran interés geológico-minero, en virtud de los numerosos depósitos epitermales de metales preciosos (Au - Ag) que han sido reconocidos en esta comarca, vinculados espacial y temporalmente al volcanismo jurásico del Grupo Bahía Laura. En las investigaciones que lleva adelante el Instituto de Recursos Minerales (INREMI), orientadas a la localización de este tipo de depósitos, la tecnología satelital, incorporada como una herramienta de prospección, ha facilitado la identificación de varios sectores con evidencias de alteración hidrotermal y mineralizaciones asociadas. En esta contribución se presentan los resultados de una investigación basada en la utilización conjunta de imágenes ópticas multiespectrales (TM y ETM+ de LANDSAT, ASTER de TERRA) e imágenes de radar (SAR de ERS-1 y 2 y de RADARSAT-1) para el análisis geológico con fines prospectivos en esta región. Las diversas estrategias de procesamiento digital empleadas han llevado a la identificación de varias áreas de interés geológico-minero, las cuales han sido confirmadas y caracterizadas a través de trabajos de campo de detalle. La evaluación de las distintas fuentes de información utilizadas nos ha permitido examinar los alcances y limitaciones de la incorporación de esta herramienta durante las etapas tradicionales de cartografía geológica y prospección minera, dando lugar al diseño de un diagrama metodológico de trabajo y a la definición de guías de prospección con base en la información satelital.

Palabras clave: *Sensores remotos, prospección minera, alteración hidrotermal, macizo del Deseado.*

ABSTRACT: *Optical and radar spatial remote sensing application for geological analysis and mineralized areas detection in the central part of the Deseado Massif, Santa Cruz province.* The Deseado Massif, located in the southern part of Argentina, is a region of a great geological-mining interest, due to the presence of a numerous precious metals (Au - Ag) epithermal deposits. These deposits are spatially and temporarily related to the Jurassic volcanism of Bahía Laura Group. The investigations guided to the localization of this kind of deposits, developed by the Institute of Mineral Resources (INREMI), incorporating the satellite technology as a prospecting tool. This methodology allowed the identification of several sectors with hydrothermal alteration evidences and associated mineralizations. The results of a research based on the use of multispectral (LANDSAT-TM and ETM+, TERRA-ASTER) and radar images (ERS-1 and ERS-2 SAR and RADARSAT-1 SAR) for the geological analysis with prospective goals, are presented in this contribution. The diverse digital processing strategies that have been employed, conducted to the identification of several areas with geological-mining interest, which have been confirmed and characterized through detailed field works. The evaluation of the different information sources that have been used, allowed us to examine the benefits and limitations of the incorporation of this tool during the traditional stages of geological cartography and mining prospecting. It also conducted to the design of a work methodological sequence and to the definition of prospecting guides based on the available satellite imagery.

Keywords: *Remote sensing, mineral prospection, hydrothermal alteration, Deseado Massif.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente son numerosos los sistemas de teledetección que ponen a disposición una gran variedad de imágenes de utilidad en la cartografía geológica y en la prospección minera y, de hecho, las mis-

mas son utilizadas sistemáticamente desde las etapas iniciales de los programas de prospección y exploración regional. En las últimas décadas, se ha registrado un gran crecimiento en cuanto a la disponibilidad y calidad de los datos y a los métodos de procesamiento, gracias al rá-

pido avance de la tecnología espacial y la informática. En tal sentido, en los últimos años se observa una tendencia general al aumento de la resolución espectral, espacial y radiométrica de los sensores, la que es acompañada, por lo general, de una disminución en el área de cobertura

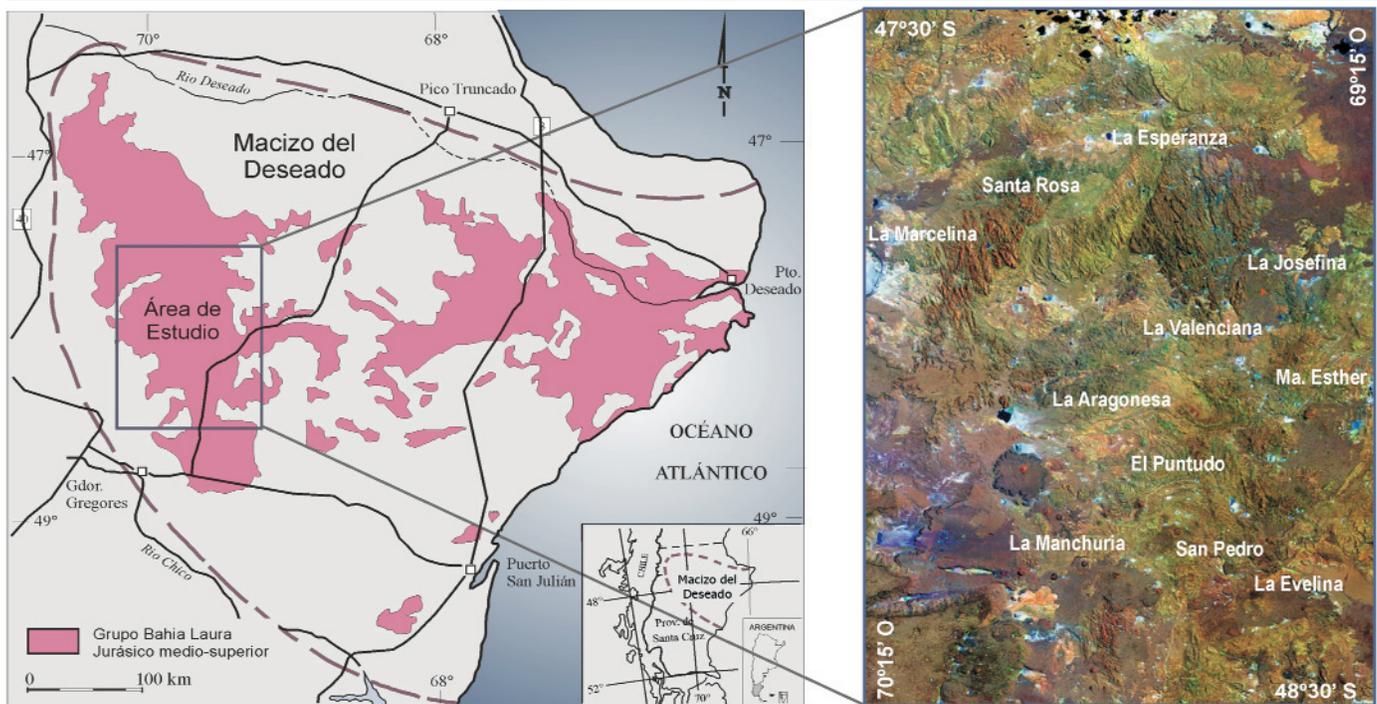


Figura 1: a) Mapa de ubicación general del área de estudio dentro del contexto regional del macizo del Deseado; b) Distribución de las áreas piloto y algunas estancias de referencia sobre la imagen LANDSAT-TM (RGB: 741).

de las imágenes y un aumento en el volumen de los datos digitales. El lanzamiento de una nueva generación de sensores a bordo de satélites -multiespectrales, hiperespectrales y de radar- y el fácil acceso a estas fuentes de información, ofrece al geólogo una poderosa herramienta de prospección. Sin embargo, la efectividad del uso de las imágenes radica en la selección adecuada de las mismas en términos de resolución de los sensores, en relación con los objetivos geológicos planteados, las características de los blancos y la escala de trabajo.

Las imágenes ópticas multiespectrales, con cobertura espectral en las longitudes de onda del visible y del infrarrojo de onda corta y térmico (TM y ETM⁺ de LANDSAT, ASTER de TERRA), son utilizadas frecuentemente para detectar la existencia de rocas afectadas por procesos hidrotermales en distintos ambientes geológicos, si bien no todas las áreas de alteración hidrotermal están vinculadas a depósitos minerales de interés económico y no todos los depósitos son puestos en evidencia por la presencia de áreas de alteración. En los casos en que las rocas

alteradas hayan quedado expuestas en superficie por la acción de procesos erosivos o tectónicos, las imágenes multiespectrales constituyen una herramienta de gran utilidad para su detección, dado que las áreas afectadas se ponen de manifiesto como anomalías espectrales, las que pueden constituir valiosos indicadores superficiales de la presencia de concentraciones minerales. Por su parte, las imágenes de radar (ERS/SAR y RADARSAT/SAR), adquiridas en el rango de las microondas, dada la geometría de observación de los sistemas de radar (observación lateral), aportan información esencial para el análisis geomorfológico y estructural, contribuyendo a la localización de áreas favorables.

El objetivo de esta contribución es precisamente, presentar los resultados de una investigación realizada en el sector central del macizo del Deseado, orientada a optimizar la utilización de las imágenes de satélite y los procedimientos de análisis digital para explotar al máximo sus potencialidades en la cartografía geológica con fines prospectivos, teniendo en cuenta tanto la búsqueda de litologías aptas y

anomalías espectrales como la utilización de criterios morfológicos y estructurales.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector central del macizo del Deseado entre los 47°30' y 48°30' de latitud sur y entre los 69°15' y 70°15' de longitud oeste, cubriendo una superficie de cerca de 10.000 km² (Fig. 1a) El clima de esta región es continental riguroso y semiárido, con escasa pluviosidad y precipitaciones nivales abundantes durante los meses de invierno. Es característica la presencia de vientos persistentes e intensos, provenientes principalmente de los cuadrantes oeste y noroeste. Estas condiciones climáticas no permitieron el desarrollo de una cubierta vegetal importante, por lo que el desarrollo de los suelos se ha visto limitado, dominando los suelos esqueléticos, pedregosos-arenosos, donde el horizonte húmico está poco desarrollado o ausente. La presencia de suelos maduros y evolucionados es excepcional y está restringida a los mallines, sectores muy reducidos, con mayor con-

tenido de humedad y materia orgánica. La vegetación dominante, típica de ambientes semidesérticos, es la estepa arbustiva xerófila, en la que predominan los arbustos achaparrados, adaptados al clima árido ventoso, que se presentan muy esparcidos, dejando un gran porcentaje de suelo desnudo. La vegetación está constituida por matas áfilas, con hojas reducidas o espinosas y por especies en cojín. Las especies dominantes son: mata negra, cola piche, molle y coirón. La red de drenaje está poco integrada y la mayoría de los cauces son de régimen efímero. En muchos casos los cursos de agua desembocan en pequeñas cuencas endorreicas, que alojan lagunas poco profundas, de carácter temporario.

Geología local

En el macizo del Deseado se han registrado, a lo largo de toda su historia geológica, importantes episodios volcanogénicos, los que han dado lugar a la formación de un extenso plateau de rocas piroclásticas y volcánicas de naturaleza bimodal, de edad jurásica y a amplios mantos y mesetas de basaltos cenozoicos. En el área de estudio (Fig.1b), el 90% de la superficie corresponde a las unidades volcanogénicas mesozoicas y cenozoicas, entre las cuales las unidades volcánicas y volcániclasticas jurásicas ocupan un 70% y las unidades volcánicas efusivas de edad terciaria y cuaternaria un 20%. El 10 % restante de la superficie es ocupada por materiales sedimentarios terciarios, relleno moderno y rocas del basamento.

El volcanismo extensional jurásico representa el acontecimiento geológico más importante de la comarca. Está representado por el complejo volcánico-piroclástico-sedimentario del Grupo Bahía Laura (Lesta y Ferello 1972) del Jurásico medio a superior, integrado por las Formaciones Bajo Pobre, Chon Aike y La Matilde. La Formación Bajo Pobre (Lesta y Ferello 1972), compuesta por andesitas, dacitas y basaltos, constituye lomas bajas redondeadas muy dispersas, remanentes de antiguas coladas desmembradas por procesos erosivos. En sus ni-

veles superiores se intercala con la Formación Chon Aike (Echeveste *et al.* 2001), de gran desarrollo superficial, constituida principalmente por mantos de ignimbritas, acompañadas por facies lávicas y algunos cuerpos subvolcánicos de composición riolítica a riolacítica. Los depósitos ignimbriticos, que componen la mayor parte de los afloramientos, varían en la proporción y composición de los cristaloclastos y fragmentos líticos y en el grado de soldamiento. Se presentan también lapillitas, tobas laminadas fosilíferas y tufitas, de Formación La Matilde (Stipanovic y Reig 1957). Por su parte, las efusiones basálticas cenozoicas, se han emplazado en niveles topográficos distintos y alternan con materiales sedimentarios terciarios. El Basalto Cerro del Doce (Panza 1982) del Eoceno medio, con su mayor desarrollo en el sector nor-oriental del área, ocupa los altos topográficos, dando lugar a frecuentes casos de inversión de relieve. El Basalto Strobel, del Mioceno medio, forma una extensa meseta continua en el extremo sud-occidental del área (Panza y Marín 1998) y el Basalto Cerro Tejedor (Sacomani 1984), del Mioceno superior-Plioceno inferior, constituye la meseta y cerro homónimos. Las efusiones basálticas más modernas están representadas por el Basalto La Angelita (Panza 1982), del Plioceno superior-Pleistoceno inferior, que presenta una gran distribución areal y forma extensos mantos que ocupan los bajos topográficos.

Geomorfología

El intenso volcanismo que caracteriza la historia geológica de la región imprimió a esta comarca una morfología particular. Su relieve es dominado por un paisaje serrano muy irregular, con desniveles topográficos pronunciados provocados por acción fluvial, labrado en las unidades piroclásticas y volcánicas jurásicas. La reconstrucción del relieve jurásico es muy difícil debido al importante grado de erosión que presentan los depósitos de esa edad. Como geofomas propias del paisaje volcánico jurásico se identificaron

coladas piroclásticas, mantos tobáceos y campos lávicos. Asociados a estos últimos, se reconocieron algunos domos lávicos y formas relicticas de la erosión: diques de lava y conductos de emisión. La presencia de materiales tobáceos depositados en ambientes lagunares someros, con improntas vegetales bien conservadas y calizas estromatolíticas asociadas, indica la presencia de antiguos bajos de carácter local que, en ocasiones, coinciden con las áreas deprimidas más modernas.

Por el contrario, en toda la región, se observa un importante grado de conservación de las morfologías volcánicas asociadas a las efusiones basálticas cenozoicas. En los sectores donde dominan las coladas basálticas de edad terciaria, el paisaje es mesetiforme, donde depósitos más antiguos se presentan coronados por extensas coladas de basaltos terciarios sobre elevados, con contornos irregulares y laderas escalonadas, acompañadas por frecuentes depósitos de remoción en masa. Se observan también distintos niveles de coladas basálticas encauzadas y cerros mesa o testigo, como formas relicticas de la erosión. En relación con las efusiones basálticas cuaternarias, se observa un paisaje llano, de amplias planicies cubiertas por extensos mantos y escoriales basálticos, cuya continuidad es interrumpida por la presencia de conos volcánicos (conos de escoria) y ventanas lávicas. Es llamativa la gran concentración de conos volcánicos cuaternarios en el sector sur del área. Gran parte de estos aparatos volcánicos se distribuyen a lo largo de una faja de orientación ONO-ESE de unos 25 km de ancho (Marchionni y Tessone 2009).

Mineralizaciones

El macizo del Deseado es potencialmente rico desde el punto de vista metalogénico, como lo indican los antecedentes de depósitos epitermales de metales preciosos que han sido reconocidos en esta región y que se consideran vinculados al volcanismo ácido jurásico del Grupo Bahía Laura (Schalamuk *et al.* 1997). Los

episodios efusivos póstumos de este volcanismo fueron acompañados por una intensa actividad hidrotermal que propició la circulación de fluidos silíceos con concentraciones anómalas de metales preciosos, los que precipitaron formando depósitos y manifestaciones minerales. En líneas generales, la depositación de rellenos silíceos estuvo relacionada preferentemente a la tectónica regional (Fernández *et al.* 1996), si bien las estructuras de cuarzo detectadas no responden a los sistemas de fracturación más regionales, sino que suelen responder a fracturas más locales, en algunos casos producidas por fenómenos volcánicos, como el emplazamiento de domos lávicos (Tessone y Del Blanco 1998). En el área de estudio se pueden mencionar los distritos de La Josefina, La Valenciana, La Manchuria, La Esperanza, La Marcelina y San Pedro, entre los más importantes.

Las mineralizaciones epitermales se hospedan fundamentalmente en las unidades volcanoclásticas del Grupo Bahía Laura: principalmente en lavas e ignimbritas de la Formación Chon Aike, secundariamente en los niveles basalto-andesíticos de la Formación Bajo Pobre y, en forma más aislada, en tobas y lapillitas de Formación La Matilde. Las rocas de caja se encuentran afectadas por distintos tipos de alteración hidrotermal, donde predomina la silicificación, acompañada por sericitización, argilización (caolinita, illita y montmorillonita) y, en las rocas básicas, propilitización. Se han identificado depósitos geotermales de tipo *hot-spring* (Berger 1985, Silberman 1982) provocados por la descarga de fluidos hidrotermales en superficie, asociados a la presencia de brechas hidrotermales, a la formación de *sinter* silíceos y a zonas de intensa silicificación o de venillas en *stock-work*. El estilo de las mineralizaciones de mayor profundidad es esencialmente vetiforme, con un fuerte control estructural donde las direcciones preferenciales son ONO, E y N-, con desarrollo de texturas bandeadas, macizas y brechosas y es acompañado por brechas, *stockworks* y disseminaciones asociadas. Los contenidos



Figura 2: Propuesta metodológica planteada para el análisis geológico con fines prospectivos del área de estudio. Los círculos blancos señalan las metodologías utilizadas para la validación de la información espectral y textural de las imágenes.

de oro y plata de estas mineralizaciones son variables, con una aparente tendencia al predominio de plata (Schalamuk *et al.* 2002). Sobre la base de las características geológicas y metalogénicas de sus depósitos, el macizo del Deseado fue definido por Schalamuk *et al.* (1999) como una provincia auroargentífera, con mineralización epitermal de baja sulfuración (Hedenquist 1987) o adularia-sericitica (Heald *et al.* 1987).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología seguida en esta investigación se basó en el análisis integrado de la información proveniente de imágenes ópticas multispectrales e imágenes de radar, complementado con la utilización de modelos digitales de elevación. Para la extracción de la información geológica se recurrió tanto al análisis digital como a la interpretación visual de los datos. La metodología desarrollada puede condensarse en cuatro ejes temáticos básicos con objetivos particulares (Fig. 2): a) discriminación y carteo de unidades litológicas, b) reconocimiento de morfologías de origen volcánico, c) identificación de rasgos lineales con significado estructural y d) detección

de áreas de alteración hidrotermal. Cada línea de investigación seguida requirió de la aplicación de metodologías de análisis específicas sobre distintos tipos de imágenes y de la implementación de procedimientos de validación de campo particulares, incorporando nuevos criterios de análisis a los geológicos tradicionales: criterios espectrales (radiometría de campo) y texturales (rugosidad de superficie) para las imágenes ópticas y de radar, respectivamente (Marchionni *et al.* 2007).

Durante las distintas etapas de la investigación se realizaron distintos análisis numéricos y estadísticos, algunos de los cuales fueron descartados y otros desarrollados con mayor profundidad, de acuerdo con los objetivos planteados inicialmente. Fueron seleccionadas varias áreas piloto con un alto o mediano grado de conocimiento, sobre las cuales se experimentaron las distintas metodologías de análisis: La Josefina (Moreira 2005), La Manchuria (Tessone 1999), La Valenciana (Del Blanco *et al.* 2004) y La Esperanza (Mykietiuik 2006). Aquellas metodologías que se mostraron más efectivas en el análisis de las áreas piloto fueron repetidas en otros sectores no conocidos o con un menor grado de conocimiento. De esta manera la información

obtenida pudo ser extrapolada a otros sectores del área de estudio, permitiendo la identificación de anomalías espectrales, algunas de las cuales fueron confirmadas por trabajos de campo de detalle como áreas de alteración hidrotermal, a veces vinculadas a estructuras mineralizadas.

Los trabajos de campo consistieron en el reconocimiento geológico de las unidades observadas y un muestreo expeditivo para análisis petrológico de las unidades litológicas, mineralógico de las alteraciones (por difracción de rayos-X) y geoquímico de las áreas mineralizadas y de sus rocas de caja, para la detección de elementos metálicos. Mediante la superposición y cruce de las distintas fuentes de información se definieron los principales rasgos geológicos, estructurales y morfológicos del área de estudio y se obtuvo una cartografía geológico-estructural a escala regional que sintetiza la información extraída de las imágenes y el conocimiento de campo sobre algunos sectores (Escala 1:200.000). También se generó una cartografía de mayor detalle sobre los sectores seleccionados como de mayor interés geológico-minero (1:50.000). A escala de reconocimiento, se consiguió una visión global del área de estudio en el contexto general del macizo del Deseado (1:500.000).

Imágenes utilizadas

Fueron utilizadas dos imágenes TM (*Thematic Mapper*) del satélite LANDSAT-5 de coordenadas WRS: 229/093 y 229/094 y dos imágenes ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) del satélite LANDSAT-7, de iguales coordenadas. Fue incorporada también una imagen del satélite argentino SAC-C, adquirida por el instrumento MMRS (*Multispectral Medium Resolution Scanner*). Esta imagen, dado su ancho de barrido, alcanza a cubrir la superficie del Macizo del Deseado en su totalidad. Para la realización de algunos análisis específicos en el Infrarrojo Térmico, se incorporaron dos imágenes adquiridas por el instrumento ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission And Reflection Radiometer*) del satélite TERRA.

CUADRO 1: Resolución espectral y espacial de las imágenes ópticas multispectrales utilizadas.

Satélite/cámara	Bandas	Rango espectral	Píxel
SAC-C / MMRS	1	0,48-0,50 μm (azul)	175 m
	2	0,54-0,56 μm (verde)	
	3	0,63-0,69 μm (rojo)	
	4	0,795-0,835 μm (NIR)	
	5	1,55-1,70 μm (SWIR)	
Satélites / sensores	Bandas	Rango espectral	Píxel
LANDSAT-5 / TM	TM 1	0,45 – 0,52 μm (azul)	30 m
	TM 2	0,52 – 0,60 μm (verde)	
	TM 3	0,63 – 0,69 μm (rojo)	
	TM 4	0,76 – 0,90 μm (NIR)	
	TM 5	1,55 – 1,75 μm (SWIR)	
	TM 7	2,08 – 2,35 μm (SWIR)	
	LANDSAT-7 / ETM+	ETM 8	
Satélite / sensor	Bandas	Rango espectral	Píxel
TERRA / ASTER (TIR)	B 10	8,125-8,475 μm (TIR)	90 m
	B 11	8,475-8,825 μm (TIR)	
	B 12	8,925-9,275 μm (TIR)	
	B 13	10,250-10,950 μm (TIR)	
	B 14	10,950-11,650 μm (TIR)	

En el Cuadro 1 se detallan las principales características de las imágenes utilizadas, las cuales involucran la posibilidad de discriminar distintos tipos de cubiertas geológicas (resolución espectral) y la capacidad de registrar información de detalle (resolución espacial).

Las imágenes de radar utilizadas en esta investigación fueron tomadas por distintos sistemas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que operan en el rango de las microondas, en banda C ($f= 5,3 \text{ Ghz}$, $\lambda=5,66 \text{ cm}$). Se utilizaron dos imágenes SAR de los satélites europeos ERS-1 y 2, de polarización vertical semejante VV, en órbitas descendente y ascendente, con 23° de inclinación del haz de radar. También se programó la adquisición de dos pares estereoscópicos de imágenes SAR del satélite canadiense RADARSAT-1, de polarización horizontal semejante HH. El par ascendente S2 (24° - 31°) - S6 (41° - 46°) y el par descendente S3 (30° - 37°) - S7 (45° - 49°). Estos pares estereoscópicos permitieron la generación de un modelo digital de elevación de mediana resolución (30 m). Fue incorporado también el MDE de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), de baja resolución (90 m), cubriendo el macizo del Deseado en su totalidad. Para aplicacio-

nes más locales se generó un modelo de elevación de alta resolución (15 m), a partir de la digitalización de curvas de nivel. Con las imágenes disponibles y los modelos digitales de elevación se generó un banco de datos digitales georreferenciado para lo cual las imágenes MMRS de SAC-C y LANDSAT-TM y ETM+ fueron rectificadas geoméricamente y georreferenciadas. Para las imágenes SAR de RADARSAT se realizó una corrección geométrica en tres dimensiones (ortorectificación) para compensar las distorsiones provocadas por la geometría de observación lateral del radar en relación con la topografía del terreno. Para ajustar el rango de valores digitales de las imágenes a una escala radiométrica absoluta, se realizó la calibración radiométrica y corrección atmosférica de las imágenes LANDSAT-TM y ETM+, acompañadas por una corrección topográfica, a través de las cuales fueron obtenidas imágenes de radiancia aparente y reflectancia de superficie. Estas conversiones permitieron relacionar la información extraída de las imágenes con la proveniente de las medidas de radiometría de campo, para la caracterización espectral de litologías y alteraciones. Por su parte, las imágenes RADARSAT/SAR fueron convertidas a imágenes

nes de brillantez (\square) y retrodispersión (\square), para poder caracterizar cuantitativamente las distintas unidades litológicas. Las tareas de procesamiento digital de las imágenes se realizaron con los programas PCI de Easi/Pace V.6.3 y GEOMÁTICA de PCI Geomatics V.8.2. Para la calibración radiométrica y corrección atmosférica fue utilizado el programa REFLECT del *Département de Géographie de l'Université de Montréal* (Cavayas 2001).

Técnicas de análisis empleadas

Se analizaron las posibilidades de discriminación de las distintas facies litológicas asociadas al volcanismo jurásico y magmatismo cenozoico, tanto desde el punto de vista de sus respuestas espectrales como de sus características texturales. La discriminación y el carteo de unidades litológicas se realizó sobre las composiciones en falso color de LANDSAT RGB: 741 y 541, sobre las cuales se trazaron transectas espectrales para observar los pasajes entre las distintas unidades. El amplio rango composicional de las unidades litológicas del área, desde ácidas hasta básicas, facilitó su discriminación, pudiendo distinguirse claramente las unidades piroclásticas y volcánicas jurásicas de las unidades efusivas cenozoicas. Dentro del primero de estos grupos, la discriminación de distintas facies se tornó más compleja dadas las grandes similitudes composicionales, debiéndose recurrir a criterios texturales. En las unidades cenozoicas de composición basáltica, las variaciones espectrales observadas fueron suficientes para la discriminación de unidades provenientes de distintos ciclos efusivos, siendo reforzada esta diferenciación por sus características texturales. En este sentido, las imágenes de radar permitieron diferenciar sectores de distinta microtopografía dentro de unidades efusivas espectralmente homogéneas y coladas basálticas de edades diferentes. Para mejorar la observación y caracterización de las morfologías volcánicas asociadas a las unidades geológicas analizadas, se emplearon los MDE y distintas estrategias de visualización en tres di-

mensiones tales como pares y productos estereoscópicos y vistas en perspectiva. Con el objeto de favorecer el reconocimiento de lineamientos y rasgos estructurales, fueron aplicadas sobre las imágenes de radar, distintas técnicas de extracción automática de rasgos lineales (filtrados espaciales y de frecuencias). En el dominio espacial fueron aplicados filtros direccionales de detección de líneas y de bordes. Los mejores resultados fueron obtenidos con los filtros de detección de líneas de tipo *spike* y *top hat* que permitieron detectar lineamientos y sutiles afectando a unidades basálticas, que no habían sido observados en las imágenes originales (Marchionni *et al.* 2000). En el dominio de las frecuencias espaciales fueron aplicados filtros selectivos (filtros de paso-bajo, paso-alto y paso-banda) en el espacio de Fourier, que permitieron observar las direcciones dominantes de la región y aislar las frecuencias espaciales vinculadas a los patrones estructurales. Los tratamientos realizados sobre las imágenes de radar se desarrollan con mayor profundidad en Marchionni y Cavayas 2010. Este análisis fue complementado con la interpretación visual de los pares estereoscópicos de imágenes SAR -en modo ascendente y descendente- para realizar la cartografía estructural a nivel regional. Para la identificación de anomalías espectrales que pudieran ser indicativas de la presencia de áreas de alteración hidrotermal se utilizaron distintos tratamientos numéricos y estadísticos sobre las imágenes multiespectrales LANDSAT TM y ETM⁺ y ASTER de TERRA. Previamente se generó una biblioteca de firmas espectrales, para caracterizar espectralmente las alteraciones conocidas del área de estudio. Se realizaron observaciones radiométricas de campo con un espectroradiómetro GER-SFOV (*Simple Field Of View*), con una cobertura espectral de 0,4 a 2,6 μm , tanto sobre rocas frescas como sobre rocas que mostraban distintos tipos y grados de alteración, hidrotermal y/o supergénica. A partir de estas lecturas fueron construidas curvas de reflectancia para la caracterización espectral de

las unidades litológicas seleccionadas y de las áreas de alteración identificadas. Esta información fue utilizada para analizar las relaciones entre las propiedades físicas de las unidades litológicas y sus firmas espectrales y para facilitar la búsqueda de áreas de características espectrales particulares sobre las imágenes (Marchionni *et al.* 2002a). La respuesta espectral de las alteraciones hidrotermales del área y las posibilidades de discriminación de las mismas sobre las imágenes fueron analizadas en detalle.

Dadas las características geológicas y geomorfológicas de la zona de estudio, la cartografía geológica de la misma se ha visto favorecida por la observación regional. En los sectores de mayor interés geológico-minero, se realizó sobre las imágenes LANDSAT-ETM⁺ una transformación orientada al mejoramiento de la resolución espacial a través de una transformación en el espacio de color RGB-IHS-RGB, utilizando la composición color RGB: 741 como imagen de entrada y la banda pancromática como canal de intensidad, obteniéndose así una imagen multiespectral con una resolución espacial mejorada (con un píxel de 15 m en lugar de 30). Esta transformación permitió preservar la información espectral de los datos originales y llevar la escala de visualización de las imágenes de 1: 50.000 a 1.25.000.

ÁREAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

Caracterización espectral

La respuesta asociada a la presencia de alteraciones ha sido investigada por varios autores mediante espectros de campo y laboratorio (Rowan *et al.* 1977, Hunt y Ashley 1979) y más recientemente, a través de mediciones de campo realizadas con espectrómetros portátiles de la serie PIMA (Thompson *et al.* 1999). En las rocas alteradas, los principales rasgos diagnósticos se relacionan con la presencia de concentraciones anómalas de iones OH⁻ y Fe⁺³ los que pueden estar indicando la presencia de alteración hidrotermal o su-

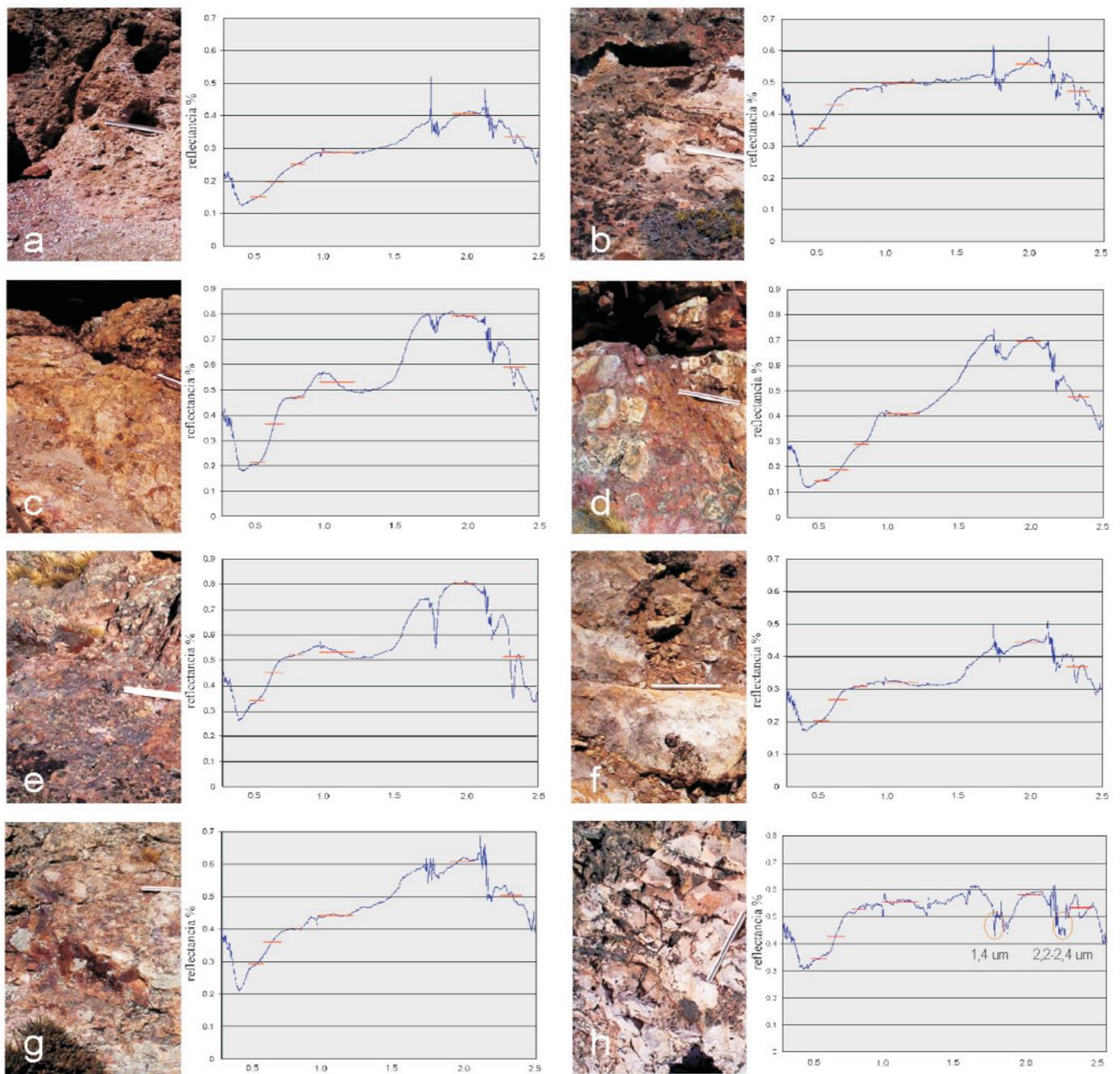


Figura 3: Respuesta espectral de algunas rocas volcánicas jurásicas que han sufrido distintos procesos de alteración hidrotermal: áreas de La Josefina (a-b-c), La Manchuria (d-e), La Marcelina (f-g) y María Esther (h): a) Ignimbrita poco argilizada, b) Ignimbrita muy argilizada, c) Ignimbrita con oxidación, d) Toba brechada con oxidación, e) Lava con fuerte argilización y oxidación, f) Ignimbrita con leve argilización y oxidación, g) La misma roca con silicificación sobre impuesta y h) Toba intensamente silicificada (se indican algunos rasgos de absorción característicos de la sílice). Los segmentos horizontales indican la reflectancia promedio calculada para los intervalos espectrales de LANDSAT.

pergénica. Según Buckingham y Sommer (1983), la respuesta registrada depende de los rasgos espectrales de los materiales presentes en los primeros 30 μm (Fe^{+3}) o 50 μm (iones OH^-) de la superficie. Para caracterizar las alteraciones del área de estudio, se utilizaron las mediciones de cam-

po realizadas “in situ” con el espectro-radiómetro. Para su análisis, las alteraciones observadas fueron agrupadas en aquellas que responden básicamente a fenómenos de oxidación, argilización o silicificación (de reemplazo masivo o de relleno en vetas y *stockworks*). En líneas generales, las

rocas que fueron sometidas a procesos de alteración hidrotermal muestran una curva espectral más irregular en el infrarrojo cercano y de onda corta (bandas TM4, TM5 y TM7 de LANDSAT) que las rocas frescas, las cuales muestran una respuesta bastante homogénea en ese espectro.

En particular, la presencia de arcillas, silicatos laminares y minerales hidratados, en las rocas que han sufrido argilización, genera rasgos de absorción característicos en el infrarrojo medio (Fig. 3 a-b) con un descenso pronunciado en la intensidad de la respuesta hacia longitudes de onda más largas (TM7), que contrastan con una respuesta más elevada en el intervalo que corresponde a la banda TM5 y manteniendo la forma de la curva espectral para las otras longitudes de onda. La presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (limonitas) genera rasgos característicos en el visible, infrarrojo cercano y medio, dando a la curva de reflectancia de las rocas que han sufrido oxidación una forma particular (Fig. 3 c-d), con un aumento de la respuesta en la región del infrarrojo medio (TM5 y TM7) y una pendiente importante entre esta región y la del infrarrojo cercano (TM4). En el visible, estas rocas se caracterizan por una respuesta más elevada en el rojo (TM3) que en el verde (TM2) o azul (TM1). En el caso de que ambos tipos de alteración coexistan en una roca, se presentarán los rasgos distintivos diagnósticos de ambos tipos de alteración (Fig. 3 e-f). Por su parte, la presencia de silicificación masiva causa un aumento general en la intensidad de la respuesta respecto de la roca fresca, pero sin modificar sustancialmente la forma de la curva espectral (Fig. 3 f-g). Este aumento relativo de la reflectividad se hace más notable en el infrarrojo medio correspondiente a la banda TM5. En los casos en que la silicificación coexista con otro tipo de alteración, la respuesta elevada de la sílice puede enmascarar el efecto que debería provocar la presencia de otras alteraciones.

Métodos de detección

Desde los primeros trabajos de Rowan *et al.* (1977) y Abrams *et al.* (1977), los cocientes entre bandas han sido empleados en distintos ambientes geológicos como estrategia de base para la exploración minera (Kaufmann 1989, Kruse 1989, Spatz y Taranik 1994, entre otros). En el área de estudio, fueron generados distintos co-

CUADRO 2: Matriz de correlación y estadísticas de las bandas utilizadas para el ACP selectivo para la detección de arcillas y de óxidos.

Banda	TM1	TM 4	TM 5	TM 7	ACP de arcillas	
Media	82.8975	49.1107	86.7180	50.5775		
Desvío St.	10.4490	8.8423	14.6238	8.9670		
	Vectores propios				Valor propio	Varianza
PC 1	+40,968	+40,919	+69,526	+42,583	410.4802	85.23 %
PC 2	+82,176	+21,195	-49,536	-18,548	57.7831	12.00 %
PC 3	-35,759	+86,817	-09,826	-32,978	8.9010	1.85 %
PC 4	+17,029	-18,418	+51,144	-82,189	4.4661	0.93 %
Bandas	TM1	TM 3	TM 4	TM 5	ACP de óxidos	
Media	82.8975	49.1178	49.1107	86.7180		
Desvío St.	10.4490	9.8433	8.8423	14.6238		
	Vectores propios				Valor propio	Varianza
PC 1	-43,800	-45,173	-41,532	-65,696	419.8993	84.30 %
PC 2	+61,857	+35,273	+06,919	-69,869	65.3227	13.11 %
PC 3	+59,478	-37,025	-65,866	+27,444	9.5940	1.93 %
PC 4	-26,788	+73,105	-62,360	+07,015	3.2975	0.66 %

cientos entre bandas para las imágenes LANDSAT, con el objeto de detectar áreas de alteración, que puedan ser puestas en evidencia por la coexistencia de minerales portadores de OH- (arcillas) y óxidos e hidróxidos de hierro (limonitas). Para detectar la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, fue realizado el cociente TM3/TM1, que tiene en cuenta la fuerte absorción de estos minerales en la región azul del espectro (TM1), que contrasta con una respuesta más elevada en la región del rojo (TM3). Sin embargo, en el espectro visible, estos minerales se pueden confundir con otros minerales fuertemente coloreados, por lo cual se realizó también el cociente TM5/TM1, que introdujo la información del infrarrojo medio (TM5), donde los óxidos e hidróxidos de hierro tienen una respuesta más elevada. Para la detección de minerales del grupo de las arcillas, que presentan una importante absorción para el infrarrojo medio de TM7 que contrasta con una mayor respuesta en el infrarrojo medio de TM5, fue utilizado el cociente TM5/TM7. En este cociente, las áreas con arcillas tienen respuesta similar a las áreas con vegetación, por lo cual, para poder discriminar la presencia de vegetación fue realizado el cociente TM4/TM3, donde las áreas con vegetación adquieren tonos más claros. Este efecto es provoca-

do por la respuesta de la vegetación, que es mayor en el infrarrojo cercano (TM4) que en el rojo (TM3). Para enmascarar su presencia fue generado el cociente inverso (TM3/TM4), donde la vegetación aparece más oscura.

Las imágenes de cociente fueron combinadas para la generación de composiciones color, algunas de las cuales mostraron una gran efectividad en la discriminación de áreas alteradas y no alteradas. En la Fig. 4 se ilustran algunos resultados para el área piloto de La Esperanza (Marchionni y Mykietiuik 2005). En la composición color RGB: 3/1, 5/1, 5/7 (Fig. 4a), las áreas de alteración son resaltadas con tonos blanquecinos al adicionarse el efecto generado por los tres canales (rojo, verde y azul), mientras que las áreas con mayor concentración de arcillas aparecen en tonos azulinos y aquellas con presencia de óxidos de hierro en tonos amarillentos, efecto generado por la influencia de los canales rojo y azul. En la composición color RGB: 5/7, 5/1, 4/3 (Fig. 4b), las alteraciones son resaltadas con tonos amarillos, producto de la adición del color rojo, que corresponde a los valores más elevados para el cociente de arcillas y del verde, cuyos niveles digitales más elevados indican la presencia de óxidos de hierro. Como alternativa para la identificación de las áreas argilizadas, se

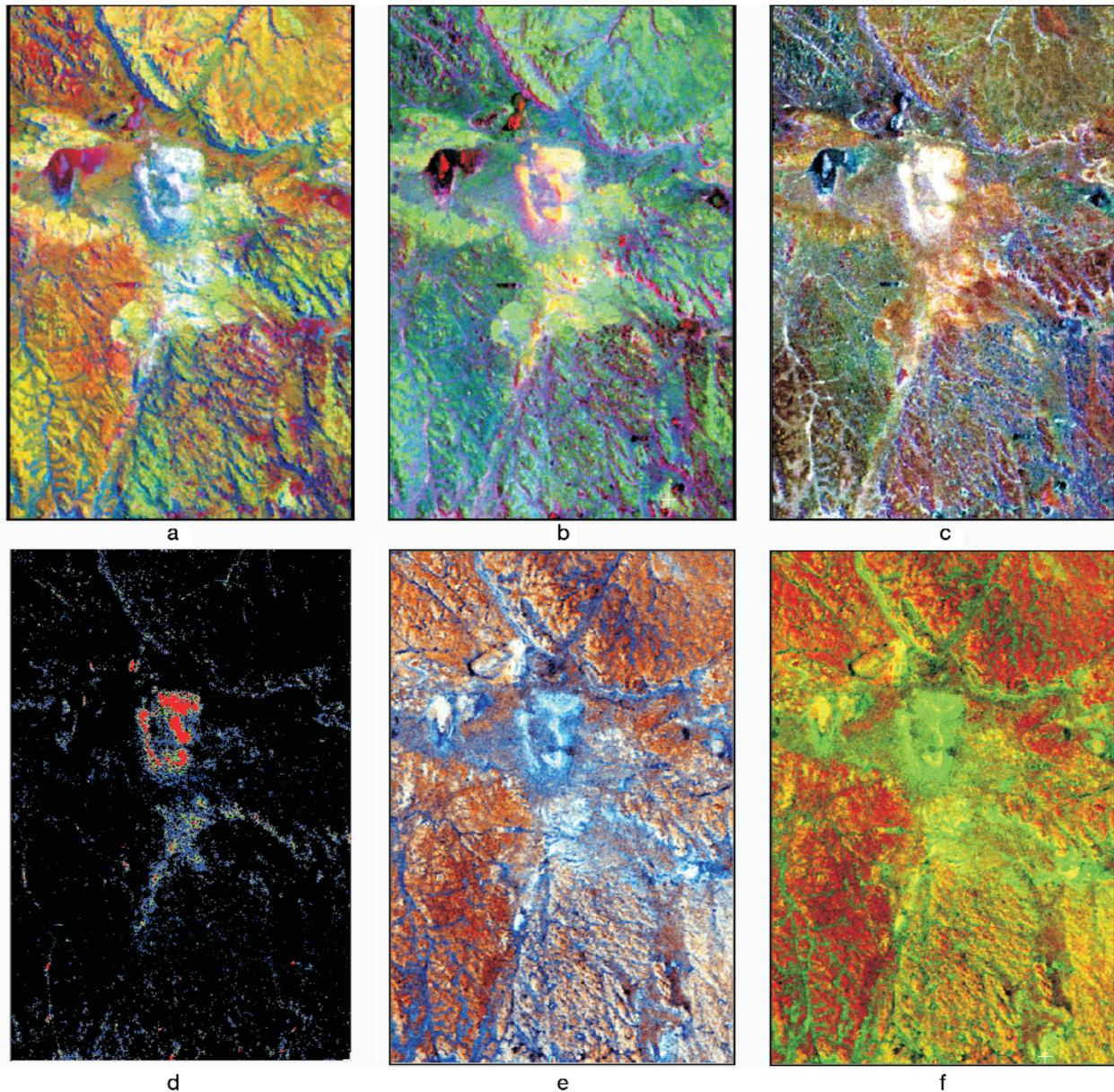


Figura 4: Aplicación de cocientes entre bandas y componentes principales selectivas para el área piloto de La Esperanza: a) Composición color de cocientes RGB: 3/1, 5/1, 5/7 y b) Composición color de cocientes RGB: 5/7, 5/1, 4/3; c) Transformación RGB-IHS-RGB entre la composición color 751 y el cociente 5/7, d) Segmentación de densidades del cociente TM5/TM7, e) Composición color de imágenes de componentes RGB: “Fe”, “OH”, “OH+Fe”, f) Composición color de imágenes de componentes RGB: “Fe”, “OH”, “ND=0”.

realizó una transformación en el espacio de color RGB-IHS-RGB, utilizando la composición color RGB 751 o 741 como imagen de entrada y el cociente TM5/TM7 como canal de intensidad. La imagen resultante conserva el color de la imagen de referencia, realizándose las áreas de alteración con tonalidades más claras (Fig. 4c). Para diferenciar zonas con distinta intensidad de alteración, se realizó una segmentación de densidades (*den-*

sity slicing) sobre algunos de los cocientes (TM5/TM1 y TM5/TM7), utilizando los valores estadísticos de media y desvío estándar para la definición de los intervalos de segmentación (Fig. 4d).

Para la búsqueda de blancos prospectivos, fue aplicada también la técnica de Selección de Componentes Principales Orientadas a Rasgos (Crosta y McMoore 1989, Loughlin 1991), que se basa en la selección de cuatro bandas de entrada

para los ACP (análisis de componentes principales) y en el análisis de los valores de los *eigenectores* (peso y carga), para predecir cuáles componentes van a concentrar la información relacionada a las firmas espectrales teóricas de los blancos que se están buscando y si estos blancos serán señalados con píxeles oscuros o claros (Cuadro 2). Fueron utilizadas las bandas TM1, TM4, TM5 y TM7 para la detección de arcillas y las bandas TM1,

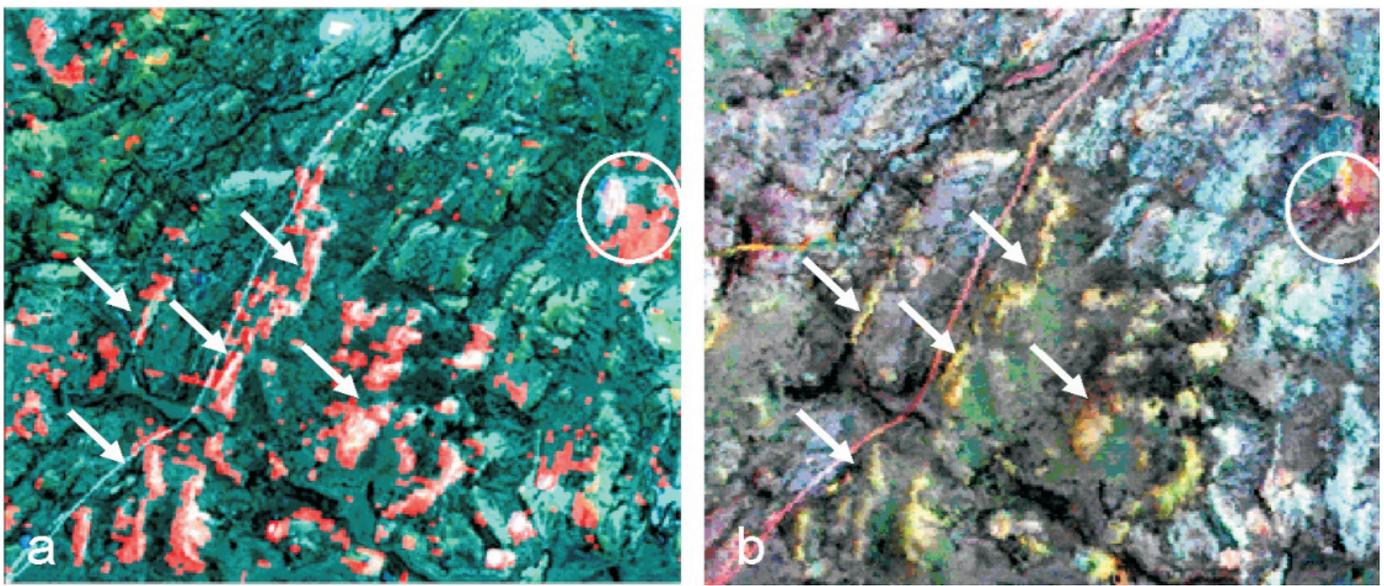


Figura 5: Identificación de áreas silicificadas en imágenes ópticas multispectrales (área de María Esther): a) Composición color de ASTER (RGB: SI, B2, B1), donde SI es la imagen de Índice de Sílice (B13/B12) segmentada. Las áreas de $ND > 1.25$ aparecen en rojo, b). Composición color RGB: 457 de la imagen LANDSAT-TM. Las flechas señalan las áreas silicificadas y los círculos depósitos de playa próximos a cuerpos de agua.

TM3, TM4 y TM5, para la detección de óxidos de hierro. En el primer caso las bandas TM2 y TM3 fueron omitidas para reducir la respuesta de los óxidos de hierro y en el segundo, la omisión de la banda TM7 se realizó con la intención de evitar la respuesta de los minerales del grupo de las arcillas. Sobre la base de los resultados de las matrices de correlación entre las bandas utilizadas y las nuevas componentes, fueron retenidas las componentes que indicarían más claramente la presencia de arcillas: “imagen de OH” y limonitas: “imagen de Fe” y con ellas fue generada una nueva imagen de adición, imagen de OH + Fe”. Estas imágenes fueron combinadas entre sí para la generación de composiciones color (Figs. 4e y 4f). Las áreas más interesantes desde el punto de vista prospectivo, que fueron reveladas por esta metodología, mostraron una gran coincidencia con las áreas observadas en las imágenes de cocientes.

Identificación de áreas silicificadas

Los minerales del grupo de la sílice, en general, presentan un comportamiento espectral más característico en el infrarrojo térmico que en el infrarrojo cercano y medio. Por lo cual, para la detección de áreas silicificadas se utilizaron las ban-

das del infrarrojo térmico de las imágenes ASTER de TERRA. Los niveles digitales de estas bandas expresan los valores de radiancia a nivel del sensor, los cuales guardan una relación directa con la emisividad de las rocas de la superficie. Para estas imágenes fueron aplicados los índices de cuarzo (QI) y contenido en sílice (SI), definidos por Ninomiya (2002) y Ninomiya y Fu (2002). Los mejores resultados fueron obtenidos luego de la aplicación del índice de sílice ($SI = B13/B12$). En la imagen de índice de sílice, los tonos más claros señalan las silicificaciones más conspicuas. Esta imagen fue segmentada para aislar los sectores de mayor valor de índice, con un umbral de 1.25 de SI (Fig. 5a). Hay que señalar que, si bien las áreas silicificadas se manifiestan claramente en la imagen de índice de sílice, algunos sectores de las imágenes que corresponden a zonas deprimidas ocupadas por cuerpos de agua y depósitos de playa, ofrecen una respuesta similar. Por otra parte, la baja resolución de estas imágenes en el infrarrojo térmico (90 m) sólo ha permitido detectar por este medio las silicificaciones de mayor extensión superficial.

Como alternativa fue generada una composición en falso color, a partir de las tres

bandas del infrarrojo de LANDSAT (RGB: 457), sobre la base del análisis espectral realizado para las áreas que han sufrido procesos de reemplazo o relleno silíceo (mantos silíceos, filones de cuarzo, brechas silicificadas, *stockworks*). Estas áreas mostraron un aumento generalizado en la intensidad de la respuesta en el dominio del infrarrojo cercano y medio. Esta composición puso de manifiesto claramente la presencia de algunos de los sectores silicificados conocidos los que aparecen en tonos amarillos (Fig. 5b). Sin embargo, en algunos casos, materiales diferentes tales como afloramientos de tobas, lavas ácidas e ignimbritas muy soldadas mostraron respuestas similares. Teniendo en cuenta las limitaciones de las imágenes utilizadas en la identificación de áreas silicificadas, se ha buscado una herramienta alternativa para la detección de estas áreas, a partir de la utilización de las imágenes de radar.

Dado que la presencia de sílice provoca en las rocas hospedantes un aumento generalizado de la resistencia a la erosión, las estructuras de relleno y los cuerpos de reemplazo silíceo pueden constituir resaltos topográficos, cuya detección puede verse favorecida en las imágenes de radar por su expresión morfológica positiva (Fig. 6a). Los cuerpos tabulares (vetas y filones) ge-

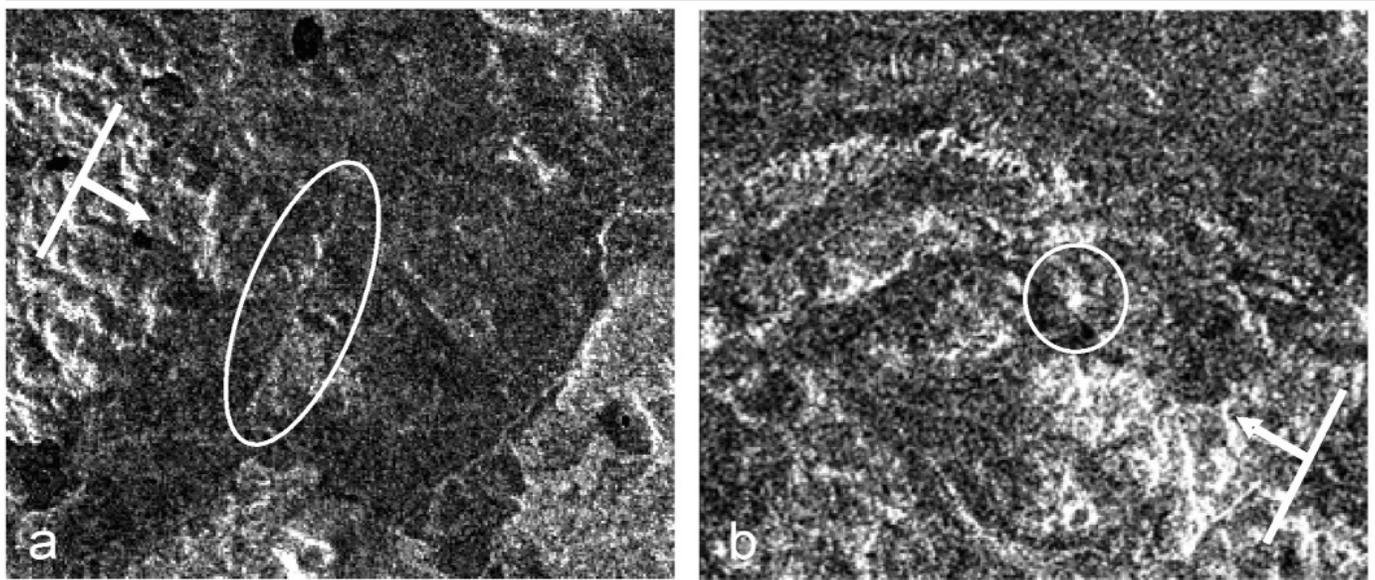


Figura 6: Visualización de afloramientos intensamente silicificados en imágenes SAR de RADARSAT-1: a) estructura silicificada del área de La Manchuria, (Tessone *et al.*, 1996) en la imagen S2 (ascendente, mirada a la derecha), b) brecha hidrotermal silicificada en el área del cerro Puntudo en la imagen S3 (descendente, mirada a la izquierda).

neran un efecto de doble rebote (*double bound*), que intensifica la intensidad de la señal recibida por el radar. Una minuciosa observación de las imágenes de radar permitió detectar la presencia de rasgos positivos lineales y puntuales asociados a sectores silicificados, cuya detección es favorecida por su configuración geométrica y expresión morfológica. La visibilidad de estos rasgos dependerá de la relación que exista entre la dirección de iluminación del haz de radar y la dirección de las estructuras, así como de la relación entre el ángulo de incidencia del haz del radar y la inclinación de las mismas. Cuando el ángulo de aspecto es adecuado estos cuerpos se manifiestan en las imágenes de radar como líneas claras muy delgadas. Existe también otro tipo de rasgos que provocan reflexiones muy intensas y pueden ser identificados en estas imágenes, no obstante sus reducidas dimensiones. Se trata de afloramientos intensamente silicificados, de algunas decenas de metros de diámetro, de forma circular o subcircular, que aparecen sobre elevados por encima del nivel de las rocas encajantes. Estos rasgos están probablemente vinculados a las áreas de emisión o salida de los fluidos hidrotermales y pueden ser reconocidos en las imágenes de radar como “puntos” más brillantes (Fig. 6b).

ÁREAS PROSPECTADAS

Sobre la base de los análisis realizados en el sector central del Macizo del Deseado, fueron detectados numerosos sectores con anomalías espectrales algunas de las cuales fueron confirmadas a través de trabajos de campo y laboratorio, como áreas de alteración hidrotermal (Marchionni 2007). Algunas de estas áreas se encuentran estrechamente vinculadas a la presencia de mineralizaciones de oro y plata. Se trata por lo general de áreas de argilización y/o silicificación, asociadas a fenómenos de oxidación supergénica. Estas alteraciones se reconocieron tanto en afloramientos de lavas como en brechas, aglomerados volcánicos, tobas e ignimbritas. En la Fig. 7. se ilustran algunos de los productos generados para la detección de alteraciones. Las principales características de los sectores reconocidos, se describen a continuación.

La Marcelina-Santa Rosa

Esta zona se compone básicamente de extensos mantos de ignimbritas de edad jurásica, atravesados, de sudoeste a noreste, por una extensa colada de basaltos cuaternarios. Las unidades geológicas dominantes son las ignimbritas jurásicas y

algunos asomos de materiales tobáceos, asociados a depósitos calcáreos masivos y estromatolíticos, restringidos al sector central. Estos últimos, relacionados espacial y temporalmente al volcanismo jurásico, constituyen el primer hallazgo comprobado de estructuras carbonáticas de origen algal en esta provincia geológica (Marchionni *et al.* 1999). Al oeste del área afloran sedimentitas continentales de edad miocena.

Predominan en esta zona los reemplazos silíceos masivos, afectando a ignimbritas, lapillitas y brechas hidrotermales, en el sector sud-occidental del área y a tobas laminadas y depósitos calcáreos, en el sector central. También aparece cuarzo de relleno formando venillas y *stockworks* y relleno de brechas tectónicas, las que en ocasiones se resuelven en vetas, como ocurre en proximidad a la estancia Santa Rosa. En este sector las estructuras de cuarzo tienen una orientación N y NE y se emplazan en un área de silicificación, argilización y leve propilitización. Al noreste de la estancia La Marcelina ha sido identificada una brecha hidrotermal silicificada, rodeada por un halo de alteración (argilización, sericitización), con delgadas venillas de cuarzo y geodas, que estaría indicando una zona de descarga de fluidos

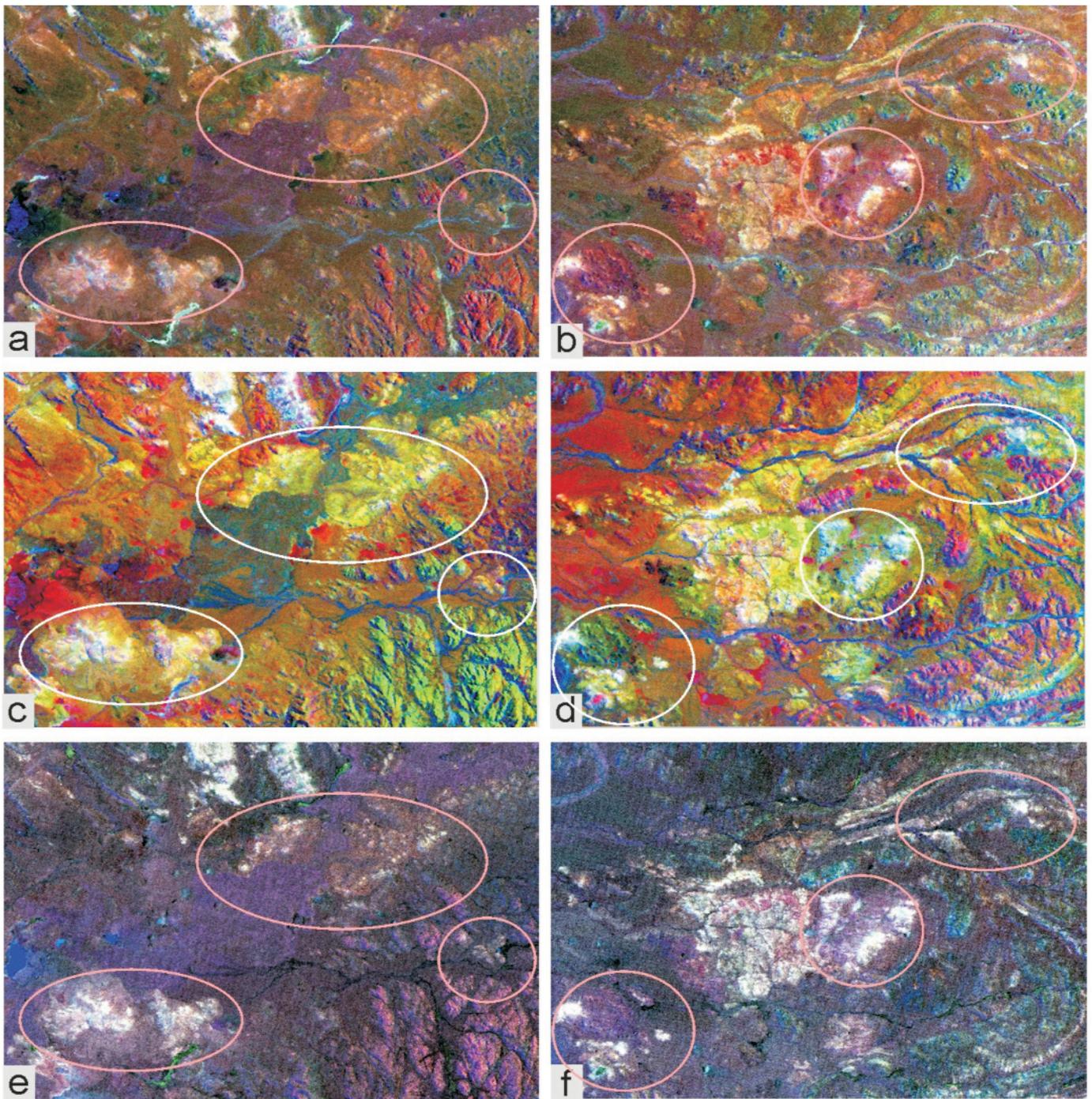


Figura 7: Imágenes de las áreas prospectadas donde se señalan las “anomalías espectrales” que fueron confirmadas por los trabajos de campo como áreas de alteración hidrotermal. Las imágenes de la izquierda corresponden al área de La Marcelina-Santa Rosa y las de la derecha al área de La Aragonesa-El Puntudo. a y b) Producto de fusión entre la composición color de LANDSAT RGB: 751 y el cociente 5/7, c y d) Composición color de cocientes RGB: 3/1, 5/1, 5/7, e y f) Producto de fusión entre la imagen LANDSAT y la imagen de adición de componentes “OH + Fe”.

hidrotermales de tipo *hot spring*. En algunos sectores, ubicados al norte del área, las anomalías espectrales detectadas fueron confirmadas en el campo como alteraciones, pero no hidrotermales sino de origen diferente (meteórico o deutérico).

La Aragonesa-El Puntudo

En esta región se observan básicamente extensos mantos de ignimbritas y campos lávicos, acompañados por una gran variedad de rocas volcánicas: brechas volcánicas, depósitos de oleadas pi-

roclásticas, depósitos de bloques y cenizas y tobas de caída. Las ignimbritas presentan una gran heterogeneidad habiendo sido reconocidas más de una docena de unidades diferentes. Las lavas aparecen bien representadas, especialmente las

de composición riolítica, mientras que las lavas andesíticas están más restringidas. Aparecen algunos asomos de sedimentitas continentales miocenas, al oeste. En el extremo sudoeste se presenta una amplia meseta coronada por basaltos pliocenos y un cono volcánico (cerro Tejedor). En el sector central se destaca la presencia de una estructura periclinial semi-circular, constituida por mantos ignimbríticos y asociada a un bloque aislado basculado y a una megabrecha, que respondería a sectores con taludes muy abruptos. Esta estructura, con un radio de curvatura de unos 5 km, se compone de varios anillos concéntricos y en su interior se ha interpretado la presencia de fallas anulares directas. Podría vincularse esta estructura a la presencia de un aparato volcánico de grandes dimensiones en parte colapsado y decapitado por la erosión.

Las alteraciones reconocidas en esta zona se distribuyen en una faja de orientación NE-SO y comprenden: silicificación, bajo la forma de reemplazos y rellenos silíceos (vetas, venillas y *stockworks*), que afectan a lavas, tobas e ignimbritas. Se destaca la presencia de mineralizaciones vetiformes asociadas a sistemas de fracturas, con cuarzo como relleno, las que son acompañadas por una alteración argílica de las rocas hospedantes y por la presencia de delgadas venillas de sílice. Las vetas se concentran en el sector central del área, con una orientación dominante NNE, aunque también las hay N y NO. En ocasiones tienen trayectorias algo curvas. En el sector del cerro Puntudo se determinó la presencia de una brecha hidrotermal cementada por sílice amorfa, atravesada por venillas de cuarzo en *stockwork* y con geodas. En esta zona es frecuente la tinción limonítica de algunas brechas silicificadas y la presencia de limonitas en *baxworks*, reemplazando a cristales de pirita.

San Pedro-La Evelina

Las unidades geológicas más extendidas de esta zona consisten fundamentalmente en lavas de edad jurásica, de composición ácida a intermedia, a las que se aso-

cian algunos cuerpos dómicos y subvolcánicos. Se presentan también varios niveles de ignimbritas, aglomerados volcánicos y algunos asomos de materiales tobáceos, de distribución saltuaria. Los mantos de ignimbritas más orientales, inclinan al sudeste, al igual que los mantos de tobas suprayacentes. Al este del área, coronando esta secuencia volcanoclástica, han sido identificados relictos de un conglomerado de origen fluvial de probable edad jurásica-cretácica. En la zona sur se desarrolla una amplia planicie basáltica de edad cuaternaria, con conos volcánicos asociados y, en el sector central, algunas mesetas basálticas y coladas encauzadas.

En esta zona se han reconocido silicificaciones de relleno y reemplazos silíceos masivos. Se presentan además fajas de venillas y *stockworks* y probables *sinters*. El rasgo más destacado es la presencia de mineralizaciones metalíferas de carácter vetiforme que se distribuyen en el sector central del área, alojadas en su mayoría en lavas ácidas e intermedias. Estas mineralizaciones observan una textura bandeada, dada por la alternancia de óxidos de hierro y manganeso, calcedonia y ópalo y representan una tipología de depósito poco frecuente en esta región (Marchionni *et al.* 2002b). Las rocas hospedantes de las mineralizaciones presentan alteración argílica y propilitización moderadas. Las tareas de reconocimiento de campo llevaron a la identificación de las mineralizaciones vetiformes del sector central, las cuales no habían sido puestas en evidencia en las imágenes, tratándose de estructuras de poco espesor encajadas en rocas muy poco alteradas. Sin embargo en este sector es llamativa la presencia de varios lineamientos curvos sub-paralelos que comienzan con una orientación ONO-ESE al sur y se abren hacia el norte en dirección NNO, direcciones que coinciden localmente con las mineralizaciones identificadas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La utilización conjunta de imágenes ópticas multiespectrales (LANDSAT-TM y

ETM⁺, ASTER de TERRA) e imágenes de radar (ERS/SAR y RADARSAT/SAR) a través de la aplicación de técnicas de procesamiento digital e interpretación visual ha sido una herramienta muy efectiva para el análisis geológico con fines prospectivos en el área de estudio. La posibilidad de identificar áreas de alteración hidrotermal sobre las imágenes y la capacidad de discriminar alteraciones de características diferentes (distinto tipo y grado de alteración), estuvo supeditada a la resolución espectral y espacial de los sensores que han intervenido en la adquisición de las imágenes (número, ancho y ubicación de las bandas espectrales, tamaño del píxel). El aspecto quizás más crítico fue la resolución espectral de los sensores, dado que determina la capacidad de discriminar las unidades litológicas más aptas para albergar las mineralizaciones y la posibilidad de diferenciar distintos tipos o grados de alteración.

Los trabajos geológicos con fines prospectivos, a escala regional llevados adelante en esta investigación, se vieron favorecidos por una adecuada solución de compromiso entre la resolución espectral y espacial de las imágenes. Para nuestros propósitos resultaron muy apropiadas las imágenes LANDSAT-TM y ETM⁺, utilizadas en combinación con los pares estereoscópicos de imágenes de radar (RADARSAT/SAR). Las primeras facilitaron la discriminación y carteo de unidades litológicas de amplio rango composicional y gran extensión superficial y permitieron la detección de áreas de alteración hidrotermal. La escasez de una cubierta vegetal importante en el área aseguró un más adecuado análisis de la información proporcionada por estas imágenes. Por su parte, las imágenes de radar aportaron información esencial para el análisis geomorfológico y la cartografía estructural. Las metodologías de análisis utilizadas para la búsqueda de anomalías espectrales -composiciones color, cocientes entre bandas y componentes principales selectivas orientadas a rasgos-, aplicadas sobre las imágenes ópticas multiespectrales, fueron muy efectivas en la búsqueda ex-

peditiva de blancos prospectivos, observándose una gran coincidencia entre las anomalías espectrales detectadas y las áreas de alteración reconocidas. La metodología empleada para estimar la intensidad de alteración -segmentación de densidades de las imágenes de cociente- fue también muy efectiva, observándose una gran correspondencia entre las áreas señaladas como de mayor intensidad de alteración y aquellas que se presentaron como más prometedoras desde el punto de vista prospectivo.

Entre los productos de alteración que pueden estar presentes en el área, los minerales del grupo de las arcillas y minerales hidratados (portadores de OH) y los óxidos e hidróxidos de hierro (portadores de Fe⁺³), estos últimos vinculados a la alteración supergénica de sulfuros de hierro (pirita), han sido los más diagnósticos para su uso en la prospección con imágenes LANDSAT, dado que sus rasgos espectrales característicos pueden ser percibidos en estas imágenes. La presencia de silicificaciones, no obstante el incremento en la respuesta general de las rocas afectadas, no genera rasgos espectrales diagnósticos en los intervalos espectrales de estas imágenes, dificultado su identificación.

En aquellos sectores donde los depósitos epitermales hallados se asocian a los niveles más superficiales del sistema geotermal, las áreas argilizadas se han manifestado como los blancos más prospectivos, con las imágenes utilizadas. El nivel de erosión alcanzado facilita la observación de las variaciones espectrales provocadas por la presencia de alteraciones hidrotermales. Las alteraciones propias de niveles más profundos, asociadas a la presencia de estructuras vetiformes son mucho más estrechas y difíciles de detectar que las anteriores. En este sentido, las imágenes de radar han enriquecido el conocimiento de estas áreas, facilitando la observación de resaltos topográficos lineales o puntuales de reducidas dimensiones asociados a vetas, silicificaciones y conductos de salida de fluidos hidrotermales.

Cabe señalar que, dadas las características de las áreas estudiadas, donde las altera-

ciones argílicas y silíceas están muy relacionadas y las pátinas limoníticas son frecuentes, las imágenes utilizadas no permitieron, en la mayoría de los casos, discriminar y/o especificar las alteraciones encontradas. Tampoco se han podido diferenciar *a priori* las anomalías espectrales indicativas de la presencia de una alteración de tipo hidrotermal, de las anomalías espectrales que corresponden a alteraciones producidas por otros fenómenos (meteóricos o deutéricos). En las imágenes LANDSAT-TM y ETM⁺ no ha sido posible individualizar y delimitar efectivamente las áreas silicificadas, dada la respuesta uniforme de la sílice en el rango espectral cubierto por estas imágenes. Tampoco ha sido clara la identificación de estas áreas sobre las imágenes ASTER de TERRA debido a su baja resolución espacial en el dominio del infrarrojo térmico. Teniendo en cuenta estos aspectos, las imágenes multiespectrales fueron utilizadas para la identificación de anomalías espectrales, hasta tanto fueran verificadas por trabajos de campo de detalle para definir si están o no indicando la presencia de áreas de alteración hidrotermal.

Si bien la resolución espectral de las imágenes LANDSAT-TM y ETM⁺ es insuficiente para diferenciar adecuadamente el tipo y grado de alteración, el área de cobertura de estas imágenes y su alta disponibilidad, que cuenta con una cobertura global de todo el planeta, las califica como una fuente de información invaluable que hace posible la obtención de datos de alta calidad sobre cualquier zona de interés. En los últimos años las imágenes ASTER del satélite TERRA, se están convirtiendo en la herramienta de exploración más utilizada. Estas imágenes combinan una cobertura superficial interesante con una elevada resolución espacial en el visible -necesaria para los trabajos de mayor detalle- y un mayor número de bandas espectrales en el infrarrojo de onda corta y en el térmico, permitiendo discriminar asociaciones minerales particulares, características de los distintos tipos de alteraciones.

Podemos concluir que los resultados al-

canzados por esta investigación alimentan las expectativas de hallazgo de cuerpos mineralizados de interés económico en otros sectores del Macizo del Deseado o en otros ambientes de características geológicas similares al estudiado, a través de la utilización de imágenes espaciales apropiadas y de la aplicación de técnicas adecuadas de procesamiento digital.

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes TM y ETM⁺ de LANDSAT-5 y 7, MMRS de SAC-C y ASTER de TERRA utilizadas en esta investigación fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) en el marco del proyecto "Validación terrestre de la información satelitaria para la detección de zonas de interés geológico-minero en la Patagonia Extra-andina". Las imágenes SAR de RADARSAT-1 forman parte de un conjunto de datos que fueron proporcionados por Radarsat Internacional y el Centro Canadiense de Teledetección (CCRS) en el marco del Programa Universitario del Programa GlobeSAR2. Las imágenes SAR de ERS-1 y ERS-2 fueron provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA). Las mediciones radiométricas de campo fueron realizadas con instrumental de la CONAE y con la colaboración de los Ing. Guillermo Ibáñez y Miguel López. Las tareas de campo contaron con el permanente apoyo de la empresa FOMICRUZ S. E. y de su personal profesional y técnico.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Abrams, M. J., Ashley, R., Rowan, L., Goetz, A. y Kahle, A. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μm . *Geology* 5: 713-718.
- Berger, B. R., 1985. Geologic-geochemical features of hot-spring precious-metal deposits. *United States Geological Survey, Bulletin* 1646: 47-53.
- Buckingham, W. F. y Sommer, S. E., 1983.

- Mineralogical characterization of rock surfaces formed by hydrothermal alteration and weathering. Application to Remote Sensing. *Economic Geology* 78: 664-674.
- Cavayas, F., 2001. REFLECT. Département de Géographie de l'Université de Montréal.
- Crosta, A.P., y McMoore, J.M. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone Belt terrain. Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology (ERIM) Proceedings 1173-1187, Calgary.
- Del Blanco, M., Cábana, M.C. y Correa, M.J. 2004. Descripción de testigos de perforación, área La Valenciana, provincia de Santa Cruz, Argentina. FOMICRUZ S. E., Informe, (inédito), 8 p., La Plata.
- Echeveste, H., Fernández, R., Bellini, G., Tessone, M., Llambías, E., Schalamuk, I., Piccirillo, E. y De Min, A. 2001. Relaciones entre las formaciones Bajo Pobre y Chon Aike (Jurásico medio a superior) en el área Estancia El Fénix-Cerro Huemul, zona centro-occidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(4): 548-558.
- Fernández, R.R., Echeveste, H., Echavarría, L. y Schalamuk, I. 1996. Control volcánico y tectónico de la mineralización epitermal del área de La Josefina, Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 41-54, Buenos Aires.
- Heald, P., Foley, N.K., y Hayba, D.D. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia sericite type. *Economic Geology* 82: 1-26.
- Hedenquist, J.W. 1987. Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal system in the circum-Pacific basin. En Horn, M.K., (ed.) 4° Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Singapore, 1986: American Association of Petroleum Geologists, Transactions: 513-524.
- Hunt, G.R. y Ashley, R.P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology* 74: 1613-1629.
- Kaufmann, H. 1989. Image processing strategies for mineral exploration in arid areas by use of TM data. Workshop on Earthnet Pilot Project on Landsat Thematic Mapper Applications Proceedings, ESA Special Publication 111-125.
- Kruse, F.A. 1989. Spectral mapping with Landsat Thematic Mapper and imaging spectroscopy for precious metals exploration. Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology Proceedings: 17-28, (ERIM), Calgary.
- Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región Extraandina de Chubut y Norte de Santa Cruz. En Leanza, A.F. (ed.) *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias: 601-653, Córdoba.
- Loughlin, W.P. 1991. Principal Component Analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57: 1163-1169.
- Marchionni, D. 2007. Caracterización volcánico-tectónica y detección de áreas mineralizadas en el Sector Central del Macizo del Deseado (Provincia de Santa Cruz). Aplicación de la Teledetección espacial óptica y de radar. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata, (inédito), 317 p., La Plata.
- Marchionni, D. y Cavayas, F. 2010. Utilización de imágenes de radar (ERS Y RADARSAT) para la discriminación litológica y la cartografía estructural del sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(4): 576-591.
- Marchionni, D. y Mykietiuik, K. 2005. Mapeo de alteraciones hidrotermales con imágenes LANDSAT en el área de Estancia La Esperanza. Macizo del Deseado, Santa Cruz. Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 577-584.
- Marchionni, D. y Tessone, M. 2009. Cartografía geológica y reconocimiento de áreas de alteración hidrotermal con imágenes LANDSAT-TM en el área de La Manchuria, Macizo del Deseado, Patagonia Argentina. En Neves Epiphanyo J.C. y Soares Galvão, L. (eds.) 14° Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Anais: 3269-3276.
- Marchionni, D., Cavayas, F. y Del Blanco, M. 2007. Implementación de una metodología de validación de campo de datos ópticos y de radar para aplicaciones geológicas en Patagonia Extraandina. 12° Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 1 p., Mar del Plata.
- Marchionni, D., Cavayas, F. y Rolleri, E. 2000. Potentiel de Détection des Traits Structuraux d'un Territoire Semi-Désertique sur des Images RADARSAT: Le cas du Macizo del Deseado, Argentina. Proceedings, CEOS-SAR Workshop, October 1999, 479-484, Toulouse.
- Marchionni, D., Ibañez, G. y del Blanco, M. 2002a. Field radiometry data generation for the detection of geologic targets in Patagonia Extraandina, Argentina. 29° Simposio ISRSE, CD Actas TS-3.1, 4 p., Buenos Aires.
- Marchionni, D., de Barrio, R., Tessone, M., Del Blanco, M., y Echeveste, H. 1999. Hallazgo de estructuras estromatolíticas jurásicas en el macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. (Nota breve). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 54(2):173-176.
- Marchionni, D., Tessone, M., Del Blanco, M., Curci, M. y Etcheverry, R. 2002b. Estudio de inclusiones fluidas de la mineralización epitermal de San Pedro-La Evelina, Macizo del Deseado, Santa Cruz. 6° Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas: 247-252, Buenos Aires.
- Mykietiuik, K. 2006. Vulcanismo y alteración hidrotermal en el prospecto de metales preciosos del área de Estancia La Esperanza, Macizo del Deseado, Santa Cruz. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata, (inédito), 245 p., La Plata.

- Moreira, P. 2005. Geología y Metalogénesis del Distrito La Josefina, Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata, (inédito), 360 p., La Plata.
- Ninomiya, Y. 2002. Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared ASTER data: case Studies. Proceedings of SPIE, vol. 4886. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology II, pp. 123-132.
- Ninomiya, Y. y Fu, B. 2002. Quartz index, carbonate index and SiO₂ content index defined for ASTER TIR data. Journal of Remote Sensing Society of Japan 22: 50-61.
- Panza, J.L. 1982. Descripción de las Hojas 53e Gobernador Moyano y 54e Cerro Vanguardia. Servicio Geológico Nacional, (inédito), 197 p., Buenos Aires.
- Panza, J.L. y Marín, G. 1998. Hoja Geológica 4969-I Gobernador Gregores, provincia de Santa Cruz. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 239: 1-104, Buenos Aires.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H. y Ashley, R.P. 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. Geophysics 42: 522-535.
- Sacomani, L. 1984. Ciclos basálticos cenozoicos del sector centro-occidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Nacional, Informe preliminary, (Inédito), 14 p., Buenos Aires.
- Schalamuk, I.B., Zubia, M.A., Genini, A. y Fernández, R.R. 1997. Jurassic epithermal Au-Ag deposits of Patagonia, Argentina. Ore Geology Review. Elsevier (Ed.): Vol. 12, (3): 173-186.
- Schalamuk, I. B., de Barrio, R. E., Zubia, M., Genini, A. y Echeveste, H., 1999. Provincia auroargentífera del Deseado, Santa Cruz. En: Recursos Minerales de la República Argentina Zappettini, E. (Ed.), Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 35 2: 1177-1188, Buenos Aires.
- Schalamuk, I.B., de Barrio, R.E., Zubia, M.A., Genini, A. y Valvano, J. 2002. Mineralizaciones auro-argentíferas del Macizo del Deseado y su encuadre metalogénico. En Haller, M.J. (ed.) Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz, 15° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 4(2): 679-713, Buenos Aires.
- Silberman, M.L. 1982. Hot-spring type, large tonnage, low-grade gold deposits. United States Geological Survey Open File Report 82-795.
- Spatz, D.M. y Taranik, J.V. 1994. Exploration for copper-molybdenum-gold porphyry deposits using multispectral and hyperspectral aerospace remote sensing techniques. Publicación SELPER 10 (3-4): 41-52.
- Stipanovic, P. y Reig, A.O. 1957. El Complejo Porfírico de la Patagonia Extraandina y su fauna de anuros. Acta Geológica Lilloana 1: 185-297, Tucumán.
- Tessone, M. 1999. Mineralizaciones epitermales en el área de La Manchuria, Santa Cruz. En Zappettini E.O. (ed.) Recursos Minerales de la República Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1225-1230, Buenos Aires.
- Tessone, M. y Del Blanco, M. 1998. Mineralización epitermal en domos riolíticos de la Formación Chon Aike, Sector Central del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica, Actas 3: 94-99, Buenos Aires
- Tessone, M., Del Blanco, M y Marchionni, D. 1996. Mineralización epitermal de Veta Speme, Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. 3° Reunión de Mineralogía y Metalogénesis, Actas IN-REMI, Publicación 5: 231-235, La Plata.
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L. y Robitaille, A.J. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy. SEG Newsletter 39: 1-27.

Recibido: 13 de Noviembre, 2009

Aceptado: 25 de Marzo, 2010