



TELEDETECCIÓN GEOLÓGICA DE LA REGIÓN DE SAN PABLO DE LIPEZ – BOLIVIA

Cáceres, F,¹, Bonino, E¹, & Pirard, E¹.

¹GEOMAC, MICA, Université de Liège, Sart Tilman B52/3, 4000 Liège, Belgique, eric.pirard@ulg.ac.be

1.- INTRODUCCIÓN

La zona, descubierta antes que Potosí (Barba, 1637) hasta los años 90 fue inexplorada; los pocos trabajos realizados por COMIBOL (proyecto JICA – Sugaki, et al., 1986) permitieron identificar algunos yacimientos filonianos. Después de los años 90 nuevos trabajos de exploración emprendidos por compañías privadas condujeron a la identificación de nuevos targets.

El presente trabajo de investigación cubre un área de 5163 km² de la región de San Pablo de los Lípez (figura 1), localizada en el extremo Sud Oeste del territorio boliviano; en razón de su clima árido y de la variabilidad litológica que existe en la zona, la mencionada región ofrece un potencial excepcional para la utilización de las técnicas de teledetección. El trabajo explota imágenes satelitales provenientes de los captores Landsat TM y ASTER, datos de geología regional y algunas observaciones de terreno.

2.- TRABAJOS ANTERIORES

Kussmaul, et al. (1977) utilizan imágenes ERTS con el fin de determinar las estructuras y lineamientos en la zona. Francis & Baker (1978) y Baker (1981) utilizan imágenes Landsat MSS con el fin de identificar los centros y el volumen de las ignimbritas de la región. Knepper & Simpson (1992), realizaron una interpretación de todo el Altiplano boliviano utilizando imágenes Landsat TM, los autores realizaron una interpretación de las imágenes utilizando técnicas de realce espectral y determinaron también zonas de alteración hidrotermal con ratios entre bandas.

La USGS – SERGEOMIN (1997), realizaron una compilación y análisis de la información que existe en la zona, los datos son disponibles con el título Exploration Target Generation Analysis in the Lipez Region, Southwest Bolivia.

3.- GEOLOGÍA

La región se encuentra en la zona Volcánica Central (CVZ) y es el resultado de fases tectónicas y pluto-volcánicas sucesivas que son separadas por periodos cada vez más breves de sedimentación detrítica marina y continental (Francis & Hawkesworth, 1994).

De forma general la región esta cubierta de rocas volcánicas y sedimentarias de edades que varían del Neógeno al presente y se caracteriza por la predominancia de fallas abiertas limitadas por empujes endógenos (Baby, et al., 1997 y Kley, 1999).

3.1.- Estratigrafía

La secuencia estratigráfica en la zona comienza con una serie de turbiditas (figura 1) del Llanverniano al Caradociano Inferior depositadas en una cuenca marina de “avant pais” dentro un contexto subsidente (Lema & Ramos, 1997). Las rocas se depositaron en la fase tectónica sin sedimentaria Oclóyca (Ordovícico Superior); deformadas y metamorizadas por la orogénesis Eohercynica (Devonico Superior – Carbonífero Inferior).

A la secuencia ordovícica sobreyacen, en una discordancia angular, los depósitos marinos superficiales del Cretácico Superior (Fm. El Molino) y una secuencia Cenozoica compuesta de rocas sedimentarias y volcánicas. La serie Cenozoica comienza con las turbiditas de la Fm. Santa Lucia (Lema & Ramos, 1997) del Paleoceno, seguida por facies fluviales sinuosas y meandricas de la Fm. Potoco, las cuales están asociadas a movimientos compresivos del Eoceno (García, 1997). La secuencia sedimentaria continúa con la Fm. San Vicente que esta compuesta por facies de conos de deyección originados dentro de una cuenca compresiva del Oligoceno Superior y facies fluvio-lacustres desarrolladas en cuencas aisladas en el Mioceno Inferior (García, 1997). Esta ultima formación esta intercalada por series volcano-sedimentarias; la serie sedimentaria esta compuesta por los conglomerados de origen fluvial (Fm. Esmoruco), fluvio lacustre y lacustre (Fm. Rodríguez) del Mioceno Inferior, la serie volcánica esta compuesta por aglomerados de las lavas Roldan (Fm. Esmoruco), conglomerados volcanogénicos (Fm. Rodríguez) y depósitos de pómez y conglomerados volcanogénicos de la

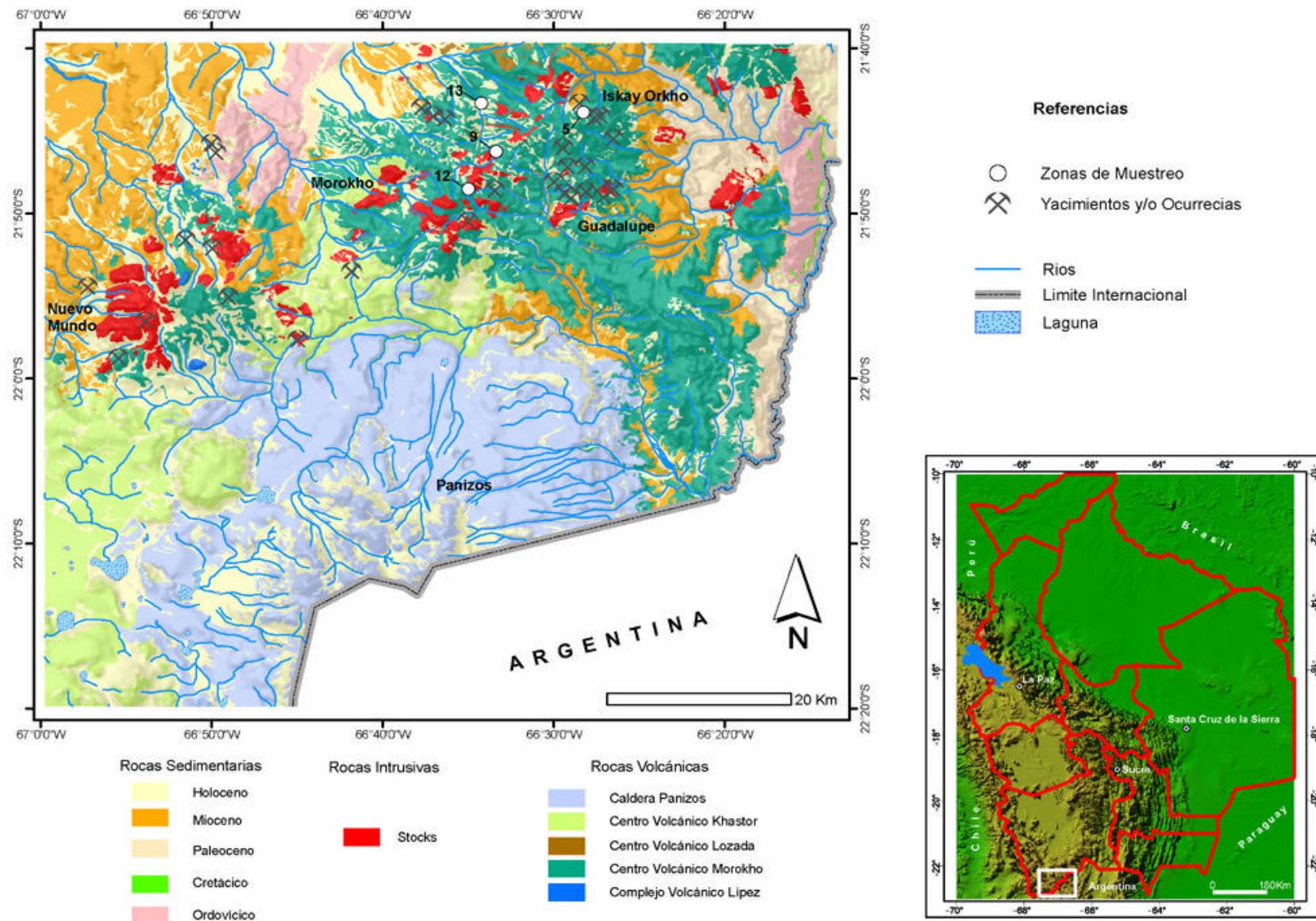


Figura 1 Plano de ubicación - geología simplificada de la zona.



Fm. Churaña Toda la secuencia Cenozoica fue depositada en ± 15 Ma en un contexto de cuenca de “intra montaña de avant país” (Baby, et al., 1990).

La sedimentación es intercalada por una actividad volcánica que comienza con el evento volcánico Roldan (22.01 ± 0.5 Ma [K/Ar], Kussmaul, et al., 1975) que cubre toda la zona. De manera general en la zona se puede diferenciar la actividad de cinco centros volcánicos: el centro volcánico Lipes (actividad entre 16 a 6 Ma), el centro volcánico Khastor (7.6 Ma), Morokho, Lozada y Panizos; Este último centro, es una caldera de tipo “dowsang” con más de 2000 km² de superficie y su actividad abarca el periodo entre 7.8 a 6.5 Ma (Ort, 1993). La composición de las rocas volcánicas varía de andesitas basálticas, andesitas, riolitas y dacitas (este último tipo de rocas son las más comunes). En la zona se puede diferenciar también cuatro cuerpos subvolcánicos porfirídicos: el Stock Guadalupe, Iskhay Orkho, Morokho y Nuevo Mundo. Su composición varía de dioritas a andesitas; todos ellos están ligados a los depósitos minerales que existen en la zona.

Las rocas intrusivas y efusivas pertenecen a la serie calco alcalina con una concentración elevada de K y relacionadas a la subducción de la placa de Nazca con la placa Continental. Este magmatismo es el resultado de la mezcla de magmas Miocenos derivados del manto y la fusión en la corteza inferior con una ascensión posterior a niveles corticales pre-eruptivos (Choque & Mamani, 1997).

3.2.- Geología estructural

Las fallas inversas de dirección N-S a NE-SW que existen en la región aparecieron en la fase Incaica (Oligoceno Superior –Mioceno Inferior), la geometría de las cuales está caracterizada por la presencia de pliegues kilométricos oblicuos de ejes subhorizontales de planos axiales subverticales, testimonio de movimientos desgarre siniestra (Baby, et al., 1990). Los esfuerzos compresivos de esta fase generan frentes de fallas y la actividad magmática que está asociada a una combinación de un movimiento de desgarre y una compresión crustal o a un movimiento de desgarre y una extensión crustal. Los primeros generan los pliegues de dirección NNE-SSW y NW –SE en rocas Eocenas y Miocenas (probablemente ligados a la formación del Oroclino Boliviano), los segundos generan fracturas laterales dentro los niveles crustales superiores, las cuales permiten la actividad volcánica del Mioceno (esfuerzos de tensión por la venida de magmas), en base a esto se desarrollaron también fracturas radiales a sub radiales asociadas a la caldera Panizos y fallas normales (García, 1997).

Los pliegues simétricos afectados por fallas de buzamiento débil en la parte Oeste de la zona son asociados a la fase Quechua (Mioceno Superior), ellos desarrollaron efectos transpresivos y transtensivos dentro la continuación del magmatismo Mioceno, asociados a fallas corticales y a las venidas magmáticas (Choque & Mamani, 1997).

3.3.- Metalogénesis

La zona se encuentra sobre la cintura polimetálica del Altiplano que tiene una extensión de 2000 km de largo por 250 km de ancho, cuya mineralización es determinada por el contenido de Ag – Pb – Zn – Cu – Au y cuyo origen está asociada a la intensa explosión de la actividad magmática y metalogenética endógena del Mioceno Medio y Superior (Heuschmidt & Miranda, 1998). Los yacimientos en la zona pertenecen a dos grandes grupos genéticos:

Los yacimientos filonianos polimetálicos de tipo boliviano (Ludington, et al., 1992) relacionados a intrusiones mesozonales y epizonales, generalmente se presentan sobre la forma de filones o enjambres de filones más pequeños en la cual la mineralización está controlada por fenómenos magmáticos y estructurales. Estos yacimientos contienen una asociación que incluye uno o todos los siguientes minerales: casiterita, wolframita, bismuto nativo, bismutina, esfalerita, galena, pirrotina, pirita, arsenopirita, calcopirita, estibina, estanina, tetraedrita, argentita y oro nativo. A este grupo pertenecen los distritos de Bonete, Morokho, San Antonio, Jaquegua y Santa Isabel (figura 1).

El segundo grupo de yacimientos presentes en la región son los yacimientos (auro) argentíferos epitermales (Ericksen & Cunningham, 1994), los depósitos están asociados al complejo volcánico Neógeno Cuaternario de los Andes Centrales y pueden ser subdivididos en dos familias: sulfato – ácido y sericita – adularia. El segundo grupo está presente en la zona y se caracteriza por la presencia de filones polimetálicos enriquecidos de plata y depósitos de estaño – plata. Generalmente este tipo se encuentra en rocas volcánicas, tobas, domos y stocks de composición andesítica y dacítica del Mioceno. Las estructuras están en relación con fallas locales y los sistemas de fracturas ligadas a fallas regionales o a estructuras volcánicas. La mineralización se encuentra



dentro los filones (de toda dimensión), stockworks, brechas hidrotermales que contienen tetrahedrita, pirargirita, galena argentífera, oro nativo, electrum, pirita aurífera, calcopirita, esfalerita, cobre nativo, bornita, sulfosales de plata. A este grupo pertenece el distrito de Buena Vista.

En la zona son típicos también los yacimientos aluviales auríferos de pequeño volumen, que son explotados de manera temporal. Herail, et al. (1993) determinan los siguientes tipos de placeres: terrazas de curso de ríos relativamente importantes como los ríos San Juan del Oro, Guadalupe, San Pablo y el placer de Marte, conos de deyección formados a pie de los afluentes o afloramientos de mineralizaciones primarias, como por ejemplo Vilader y concentraciones eluviales que son explotadas después de las lluvias como Guadalupe.

En función a la morfología de las partículas y a su composición Ramos & Fornari (1994) y Herail, et al. (1993) diferencian las siguientes fuentes para el oro: los filones de cuarzo en rocas Ordovícicas (por ejemplo Vilader), las tobas, en las cuales el oro fue expulsado durante las fases explosivas del vulcanismo (por ejemplo Guadalupe) y el oro proveniente de filones que se encuentran en rocas volcánicas y dentro sus alteraciones.

4.- DATOS

Todos los datos fueron introducidos dentro un sistema de información geográfica (SIG), esta herramienta fue utilizada para la manipulación, gestión y el análisis de la información. De esta manera se crearon bases de datos con la información geológica, geoquímica, metalogenética, geofísica y los datos de campo.

Todos los datos utilizados en el presente trabajo están disponibles en el mercado y a continuación proporcionamos una breve descripción de los mismos.

Carta geológica Volcan Juriquez – Cerro Zapaleri (Esc. 1:250.000) realizada por el proyecto Cartas Temáticas de SERGEOMIN (1996), archivo en formato DGN.

Levantamiento aeromagnético de la Cordillera Occidental y el Altiplano, trabajo efectuado por GEOBOL – BGM Airborne Surveys Inc. en 1991 sobre una superficie de 25.106 km², datos registrados en formato 1600 bdi SEG BD.

Imagen del satélite Landsat TM 5 adquirida el 31/01/1987 a 13:50:30 horas. La imagen se encuentra en formato NDF y la resolución de los píxeles es de 28.5 m.

Imagen del sensor ASTER, adquirida el 03/11/2000 a 14:46:18 horas. La imagen se encuentran en formato HDF y la resolución de los píxeles es 15, 30 y 90 metros.

Mapas a escala 1:100.000 realizadas entre 1996-1997 por el proyecto Carta Nacional de SERGEOMIN. En el trabajo se utilizaron las hojas: Laguna Corante – Picalto (6227), San Pablo de Lipez (6228) y Esmoraca (6328).

Para la construcción de la base de datos de la geoquímica se utilizó la información que proviene de Avila (1991), Du Bray, et al. (1995) y Kussmaul, et al. (1977). La base de datos metalogenética fue realizada en base de los trabajos realizados por Ahlfeld & Schneider – Scherbina (1964), Appleton, et al. (1989), Sugaki, et al. (1986), Sugaki, et al. (1988) y la USGS - GEOBOL (1992) y la información que proviene de los siguientes banco de datos:

Banco de datos de recursos minerales MRDS (Mineral Resource Data System – GEOBOL).

Base de datos del mapa geológico de San Pablo de Lipez – 6228, SERGEOMIN (1996).

4.1.- Preparación de los datos

Todos los datos en formato Microstation (DGN) fueron transformados a formato de Arcview (SHP) con la creación de su base de datos respectiva. La información topográfica proveniente del IGM, fue también utilizada para la creación de un modelo numérico del terreno (MNT) de la zona estudiada.

Los datos impresos fueron digitalizados de manera automática por el procedimiento descrito a continuación.

En una primera etapa se realizó un escaneo de todas las cartas, las imágenes resultantes fueron registradas en formato TIF (un archivo por cada imagen); todas las cartas fueron ensambladas en una sola imagen. Después se utilizaron las técnicas de análisis de imágenes para eliminar todos los artefactos de la imagen (eliminación de la simbología geológica y geográfica). El resultado de este proceso son dos imágenes, una en blanco y negro con la información geológica y geográfica y la otra imagen a colores con los límites de las formaciones geológicas. El siguiente paso fue la georeferenciación de las imágenes en base a las cartas geológicas 1:100.000, seguido por la digitalización de la imagen a colores de manera automática con un algoritmo de vectorización. Los artefactos creados por este procedimiento fueron eliminados de forma manual;



por ultimo se construyo una base de datos con la información geológica existente dentro los mapas (Cáceres, 2000).

La ortorectificación de la imagen Landsat TM se realizo en base al MNT construido con la información topográfica. Por lo contrario, la imagen ASTER fue ortorectificada en base al MNT construido con las imágenes 3b y 3n del mismo captor. Antes de proceder a la ortorectificación de la imagen ASTER, se realizo una corrección de Crosstalk¹ utilizando el método descrito por Iwasaki, et al. (2002); por ultimo se elimino el efecto atmosférico con el método propuesto por Rowan & Mars (2003).

5.- MÉTODOS Y RESULTADOS

Dado la magnitud del trabajo, en este artículo solamente presentamos los resultados obtenidos en la interpretación de las imágenes satelitales.

5.1.- Análisis espectral

Nueve muestras fueron recolectadas de las zonas detectadas como anómalas en la imagen satelital, principalmente en las zonas de alteración hidrotermal; dentro del muestreo se tomaron en cuenta las rocas (frescas y alteradas) y los suelos, las cuales forman parte de un píxel.

Para mejor interpretar los espectros, en primer lugar se realizo una comparación entre los espectros provenientes de las superficies alteradas y los que resultan del análisis de las superficies frescas. En dicha comparación se pudo constatar que los picos de absorción se encuentran en las mismas longitudes de onda; la única diferencia observable es la pérdida de profundidad del pico (perdida de resolución), la cual esta ligada a muchos factores: tamaño de grano, humedad, etc (Clark, 1999).

Para realizar el análisis espectral se utilizo como medida de comparación la distancia angular (Spectral Angle Mapper), mensura que compara los espectros obtenidos en el terreno con una librería espectral obtenida en condiciones de laboratorio, en nuestro trabajo utilizamos la librería espectral de la USGS.

En la figura 2a y 2b, se puede observar el resultado del análisis que confirma las observaciones realizadas en el terreno y describe mejor el mineral presente en la alteración. Un análisis químico y mineralógico tradicional

puede ratificar las observaciones realizadas con el espectrómetro.

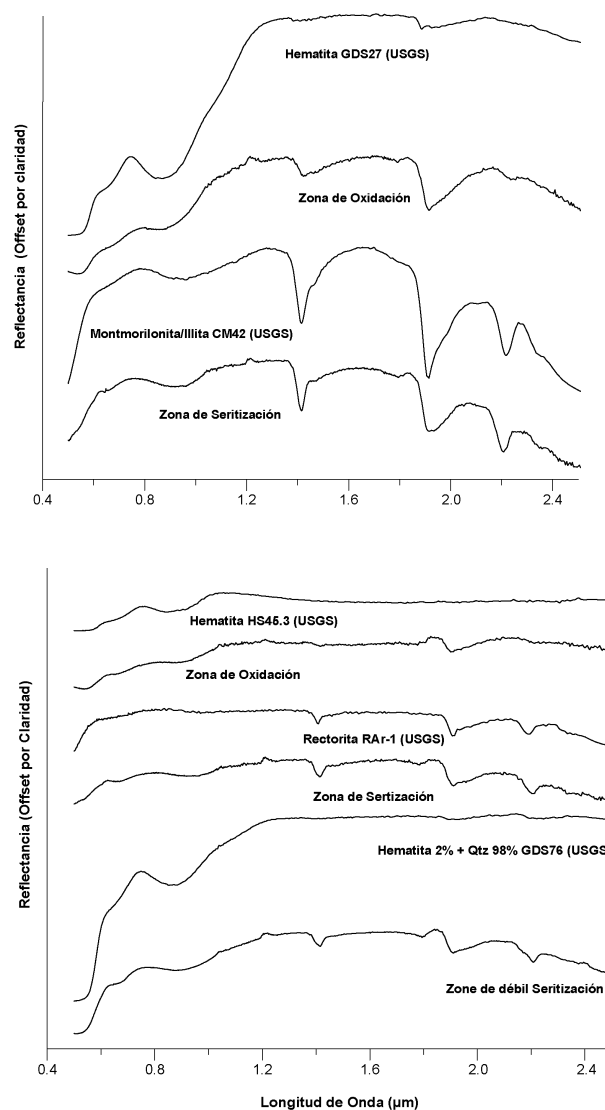


Figura 2 Resultados del análisis espectral

¹ El problema de Crosstalk se debe a un problema instrumental en el subsistema SWIR, la luz incidente en los detectores de la banda 4 es reflejada y llega a los otros captosres por reflexión múltiple, lo cual conduce a la aparición de imágenes fantasmas.



5.2.- Análisis estadístico de las bandas

Para determinar la mejor combinación en un sistema RGB² de los canales a utilizar en la interpretación visual de las imágenes, se calculo el *Optimum Index Factor* (Chavez, et al., 1982); procedimiento que se basa en el calculo de la matriz de correlación de las diferentes bandas. El resultado del análisis proporciona que la mejor combinación es la 2/5/7 para la imagen Landsat TM y la 1/7/8 para ASTER; en estas combinaciones se puede observar un contraste rico en colores. Las combinaciones de bandas elegidas por este método fueron utilizadas para extraer las zonas de alteración hidrotermal y las principales características geológicas como los contactos litológicos y las estructuras.

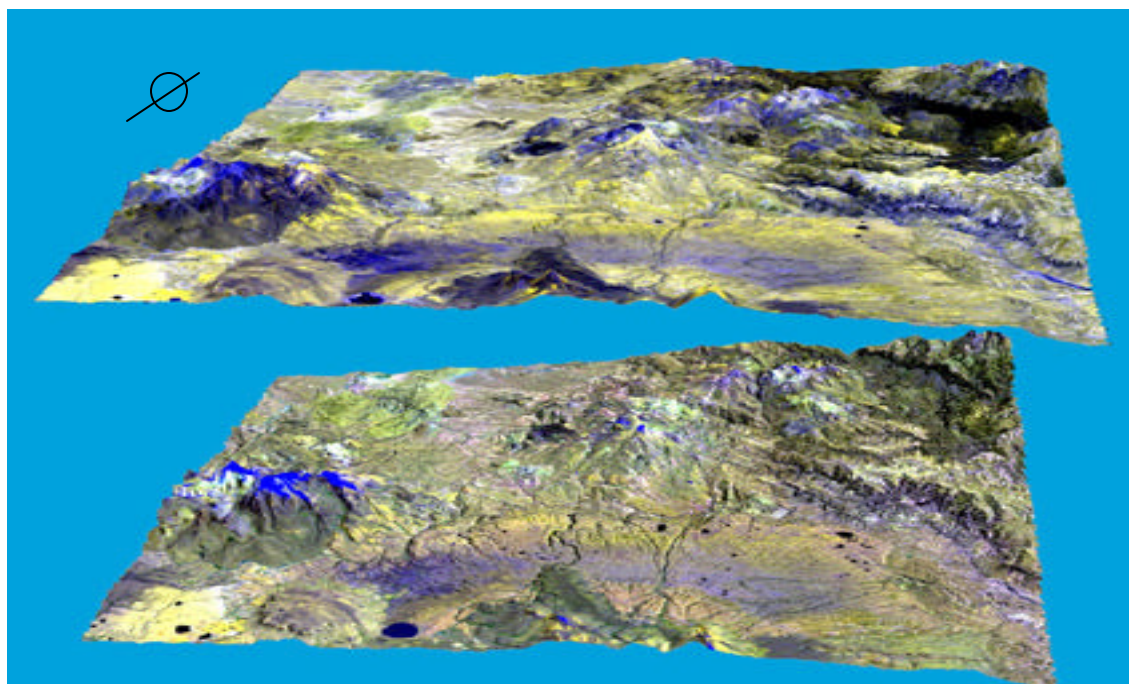


Figura 3 Imagen ASTER (superior) y Landsat TM (inferior) draping sobre un MNT.

La imagen sobrepuesta a un modelo digital del terreno calculado a partir de la información topográfica y las imágenes ASTER, constituye una excelente herramienta para determinar la relación espacial entre las diferentes estructuras geológicas (figura 3).

5.3.- Ratios entre bandas

Un procedimiento básico en teledetección es extraer la información a partir de operaciones simples entre bandas, método especialmente empleado para determinar el contenido de óxidos de hierro y arcillas presentes dentro la imagen.

Los valores por encima de 150 DN en el ratio de los canales 3/1 de la imagen Landsat TM muestran las concentraciones de óxidos de hierro (Sabins, 1999). En la figura 4 se puede observar que las zonas de Bonete, Mesa de Plata y otros yacimientos de la zona están ligados a concentraciones fuertes en óxidos de hierro y que tienen una estrecha relación a las muestras de terreno. Esta concentración es igualmente observada dentro las formaciones volcánicas o dentro de algunas rocas sedimentarias. Sin embargo se puede constatar que los óxidos de hierro disminuyen en la zona norte de la imagen.

Los valores por encima a 145 DN en el ratio de los canales 7/5 de la imagen Landsat TM determinan las concentraciones de hidróxidos presentes en la zona; dichos minerales están presentes dentro las rocas alteradas hidrotermalmente como por ejemplo la alunita y las arcillas, estos valores pueden indicar también la

²RGB abreviación que proviene del ingles Red, Green and Blue, y determina una combinación en un espacio a tres colores similar a la percepción humana.



presencia de piroxenos y carbonatos en la imagen (Sabins, 1999). En la figura 5 se ilustra la relación entre el canal 7/5 de la imagen Landsat TM, dentro la cual se puede observar que no existe ninguna relación particular con alguna formación geológica, por lo contrario los hidróxidos se encuentran presentes en los lagos, sombras y en las zonas con nieve.

Con las imágenes ASTER se utilizo dos tipos de proporciones: los ratios que toman en cuenta dos bandas y las operaciones que toman en cuenta tres bandas. El ratio de los canales 2/1 de la imagen ASTER fue utilizado con el fin de observar el contenido de Fe_3^+ en la zona, en el resultado de esta operación (figura 6) se puede notar una distribución semejante al resultado obtenido con la imagen Landsat TM. Sin embargo la figura ilustra una reducción y una mejor discriminación del hierro en la zona Noroeste y Sudoeste de la imagen.

Las profundidades relativas de absorción en las diferentes bandas pueden ser utilizadas para la formulación de nuevos ratios que tomen en cuenta tres bandas, en la cual por cada absorción característica el numerador es la suma de las bandas en las cuales comienza y termina la absorción y el denominador el canal localizado cerca del pico de absorción (Rowan & Mars, 2003); esta operación incrementa la intensidad de la absorción. En nuestro trabajo utilizamos los picos de absorción de la Al-O-H ($[5+7]/6$) y el CO_3 ($[7+9]/8$). La relación Al-H-O representa a minerales como Al-muscovita, Fe-moscovita y la caolinita, el CO_3 determina el contenido de calcita (caliza). La figura 7 ilustra el contenido de Al-O-H de la zona, el resultado es mucho mejor al obtenido a partir de la imagen Landsat TM (figura 5). Por ejemplo las formaciones Ordovícicas, por su elevado contenido en mica son perfectamente delimitadas, en la figura 7 se puede observar también que las zonas ligadas a mineralización presentan elevadas concentraciones de mica – arcilla (zonas de seritización).

La figura 9 muestra el contenido de carbonatos presentes en la zona, la interpretación de la imagen es más difícil a realizar, ya que las únicas formaciones que presentan este tipo de mineral son las formaciones Cretácicas, que se encuentran en escasa proporción dentro la imagen. Lo único revelador de la imagen es la presencia de carbonatos al lado de las zonas de mica – arcillas, es un riesgo de suponer sin una verificación de terreno que estas zonas están ligadas a zonas de propilitización.

5.4.- Análisis de los componentes principales

La técnica de los componentes principales (PCA) es una herramienta muy utilizada en el análisis de multi-datos correlacionados entre si, la cual permite construir un nuevo set de datos no correlacionados entre si (Sabins, 1999). En este trabajo solamente utilizamos los tres primeros

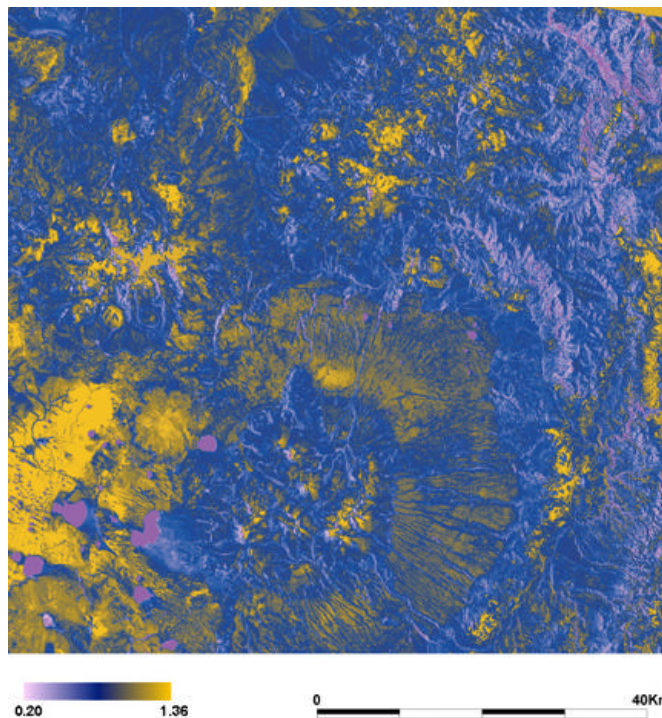


Figura 4 Ratio 3/1 imagen Landsat TM.

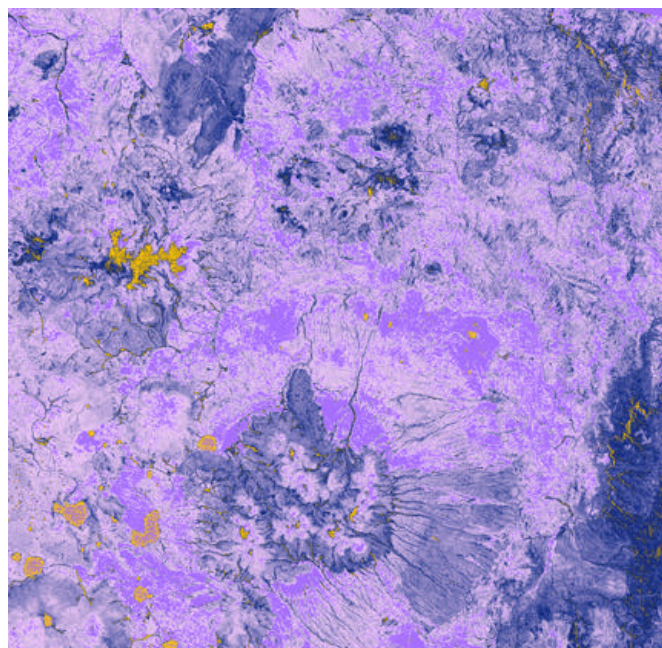


Figura 5 Ratio 7/5 imagen Landsat TM



componentes, que muestran mejor la varianza de una imagen. La figura 9 ilustra los tres primeros componentes de la imagen Landsat TM en falso color (RGB), la figura representa el 98 % del total de información que existe en las 6 bandas de la imagen. El resultado de esta transformación proporciona una máxima variación espectral producida por las diferentes composiciones de rocas y sobre todo determina mejor las zonas de alteración hidrotermal.

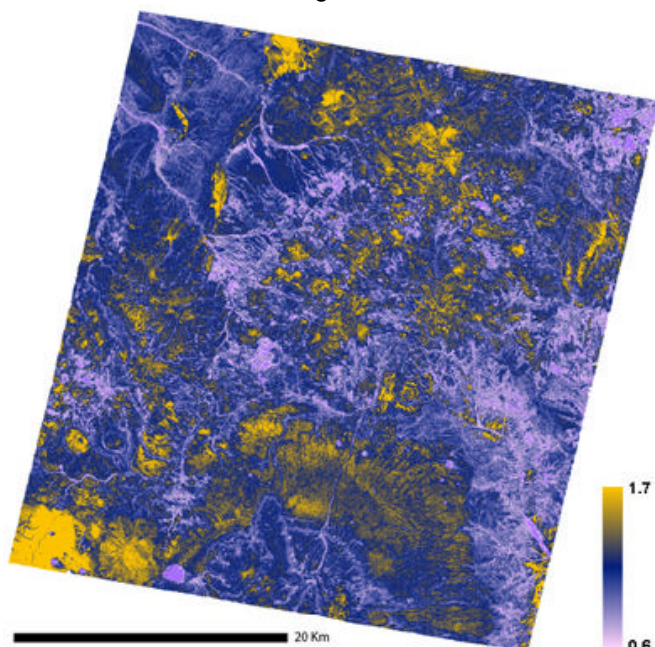


Figura 6 Ratio 2/1 imagen ASTER.

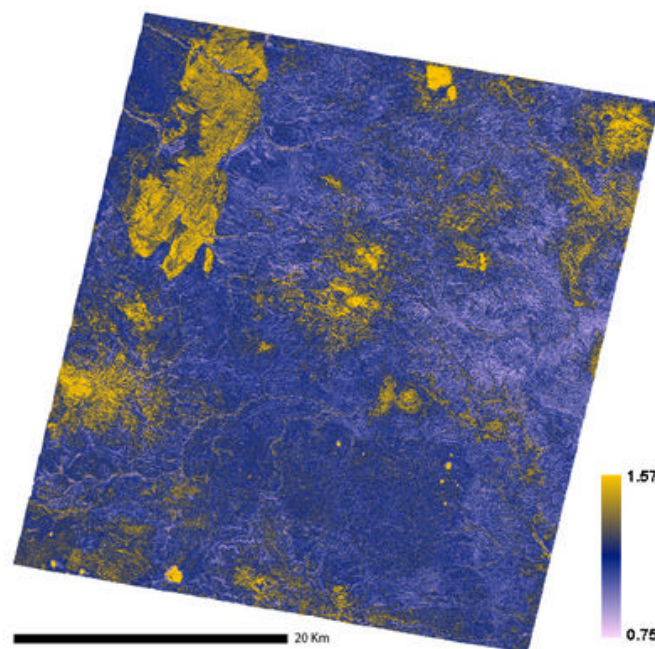


Figura 7 Ratio Al-O-H imagen ASTER.

La figura 10 muestra los primeros tres componentes de la imagen ASTER en falso color RGB, la imagen resultante representa también el 98% de la información existente en los 9 canales. La imagen resultante es mucho más rica desde el punto de vista geológico y puede ser utilizada no solamente para determinar las zonas de alteración hidrotermal, sino también para la interpretación geológica.

6.- CONCLUSIONES

Este trabajo, nos permitió realizar una comparación de la información que se puede obtener utilizando de imágenes Landsat TM y ASTER a partir de tratamientos básicos de teledetección (PCA y relación de canales).

Las zonas con óxidos de hierro pueden ser bien delimitados a partir de las imágenes Landsat TM y ASTER, sin embargo las zonas con contenidos de arcillas y micas son mejor observadas en las imágenes ASTER. Los tres primeros componentes principales de la imagen ASTER en una combinación falso color, puede ser utilizado para interpretar mejor la geología de la zona.

7.- AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al convenio bilateral entre el Commissariat Général aux Relations Internationales de la Communauté Française de Belgique (CGRI) y la Universidad Técnica de Oruro. A David BASTIN, Jorge GUTIERREZ y Desiderio CRUZ por su ayuda en el terreno y a Michel ERRERA del Museo de TERVUREN (MRAC-Bélgica) por su ayuda en el análisis espectral de las muestras.

8.- REFERENCIAS

Ahlfeld, F. & Schneider-Scherbina, A., 1964, Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia, *Departamento Nacional de Geología, Boletín B5: 388p.*

Appleton, J. D., Ridgway, J., Claros, J., Gómez Caballero, A., Rodríguez, W. & Villaseñor, M. G., 1989, Lithogeochemical exploration for silver mineralization in Bolivia, Mexico and Peru, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Sec. B-98: 201-212.*



Avila S., W., 1991, Petrological and tectonic evolution of the Cenozoic volcanism in the Bolivian Western Andes, *Geological Society of America, Special Paper*, 265: 245–258.

Baby, P., Rochat, P., Mascle, G. & Hérail, G., 1997, Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes, *Geology*, 25: 883–886.

Baby, P., Sempere, T., Oller, J., Barrios, L., Hérail, G. & Marocco, R., 1990, Un bassin en compression d'âge Oligo-Miocène dans le sud de l'Altiplano bolivien, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie II, t 311*: 341–347.

Baker, M. C. W., 1981, The nature and distribution of Upper Cenozoic ignimbrite centres in the Central Andes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11: 293–315.

Barba, A. A., 1637, El arte de los metales, Potosí – Bolivia: 300p.

Cáceres, F., 2000, Analyse multidonnées de la region de San Pablo (Bolivie), *MSc Thesis, Universidad de Lieja (Belgique)*, 81p.

Chavez, P. S. Jr., Berlin, G. L. & Sowers, L. B., 1982, Statistical method for selecting Landsat MSS ratios, *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8 (1): 23–30.

Choque, N. & Mamani, H., 1997, Hoja San Pablo de Lipez, 6228, Carta Geológica de Bolivia, Esc. 1:100.000, SGM Serie ICGB-52, Servicio Nacional de Geología y Minería de Bolivia.

Clark, R. N. , 1999, Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences* (eds.) A. N. Rencz, John Wiley and Sons, Inc. New York, USA, 3–58.

du Bray, E. A., Ludington, S., Books, W. E., Samble, B. M., Ralté, J. C., Richter, D. H. & Soria-Escalante, E., 1995, Compositional characteristics of Middle to Upper Tertiary volcanic rocks of the Bolivian Altiplano, *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2119: 30p.

Ericksen, G. & Cunningham, C., 1994, Depósitos metalíferos asociados a los centros volcánicos neógenos-cuaternarios en los Andes Centrales, *Comunicaciones*, 45: 81–86.

Francis, P. W. & Baker, M. C. W., 1978, Sources of two large ignimbrites in the Central Andes: some Landsat evidence, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 81–87.

Francis, P. W. & Hawkesworth, C. J., 1994, Late Cenozoic rates of magmatic activity in the Central Andes and their relationships to continental crust formation and thickening, *Journal of the Geological Society*, 151: 845–854.

Garcia, R., 1997, Hoja Laguna Corante/Picalto, 6227 – 6327, Carta Geológica de Bolivia, Esc.

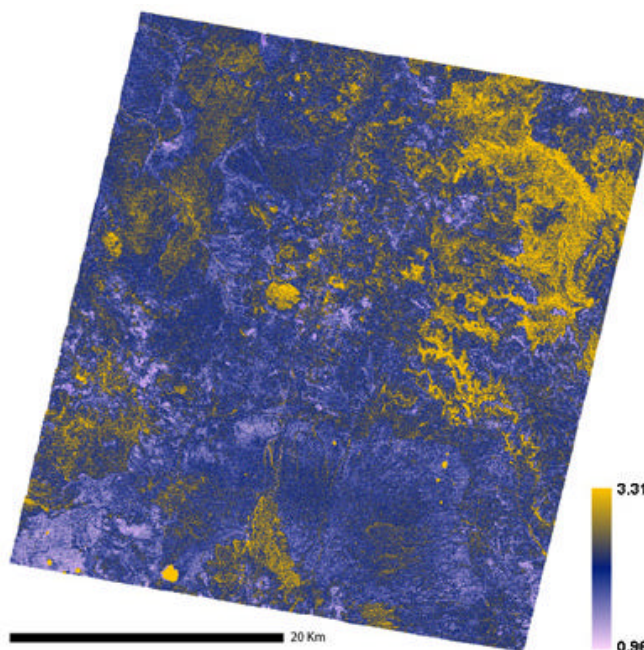


Figura 8 Ratio CO₃ ASTER.

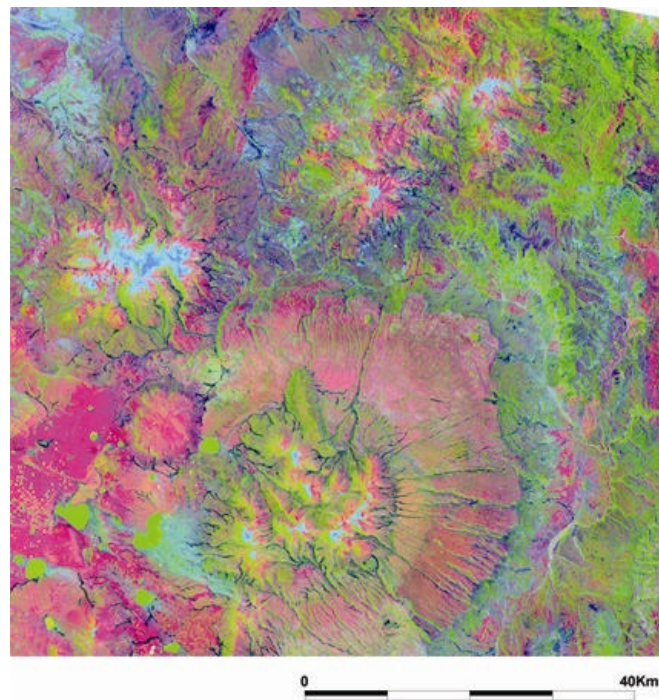


Figura 9 Imagen falso color de los tres primeros componentes principales de la imagen Landsat TM.



1:100.000, SGM Serie I-CGB-42, Servicio Nacional de Geología y Minería de Bolivia.

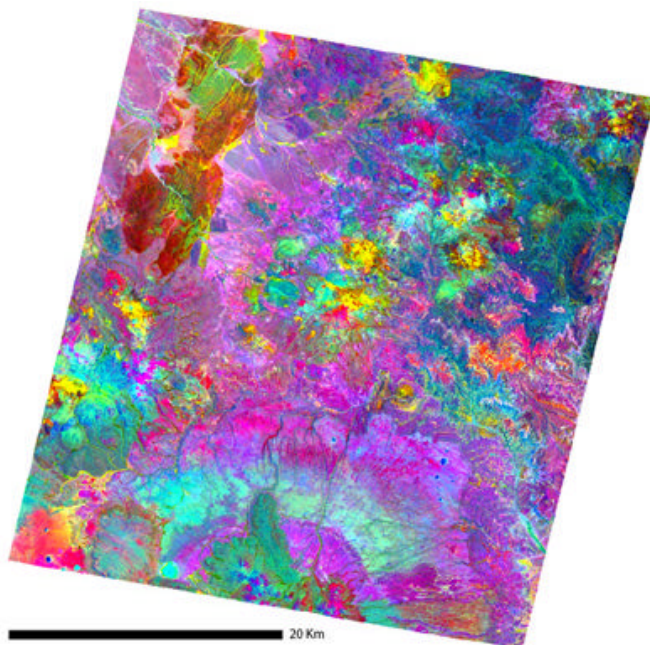


Figura 10 Imagen falso color de los tres primeros componentes principales de la imagen

- Hérail, G., Fornari, M. & Pozzo, I. L., 1993**, Emission d'or particulière au cours des phases de volcanisme explosif du Miocène du Sud de l'Altiplano de Bolivie, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie II*, 316: 1431–1438.
- Heuschmidt, B. & Miranda, V., 1998**, Memoria explicativa, Mapa Metalogenico de Bolivia, Esc. 1:1.000.000, SERGEOMIN: 50p.
- Iwasaki, A., Fujisada, H., Asao, H., Shindou, O. & Akagi, S., 2002**, Enhancement of spectral separation performance for ASTER/SWIR, in *Infrared spaceborne remote sensing. IX, Proceedings SPIE, 4486, Paper No. 4486-06: 42–50*.
- Kley, J., 1999**, Geologic and geometric constraints on a kinematic model of the Bolivian Orocline, *Journal of South American Earth Sciences*, 12: 221–235.
- Knepper, D. H. & Simpson, S. L., 1992**, Remote sensing, in *Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, USGS Bulletin, 1975: 47–55*.
- Kussmaul, S. Jordan, L. & Ploskonka, E., 1975**, Isotopic ages of tertiary volcanic rocks of SW Bolivia, *Geologische Jahrbuch, B14: 111–120*.
- Kussmaul, S. Hörmann, P. K. Ploskonka, E. & Subieta, T., 1977**, Volcanism and structure of southwestern Bolivia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2: 73–111.
- Lema, J. C. & Ramos, W., 1997**, Hoja Esmoraca, 6328, Carta Geológica de Bolivia, Esc. 1:100.000, *Publicación SGM Serie I-CGB-50, Servicio Nacional de Geología y Minería*.
- Ludington, S. Orris, G. L. Cox, D. P. Long, K. R. & Asher-Bolinder, S., 1992**, Mineral deposits models, in *USGS – GEOBOL, Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, USGS Bulletin, 1975: 63–89*.
- Ort, M., 1993**, Eruptive processes and caldera formation in a nested downang-collapse caldera: Cerro Panizos, Central Andes mountains, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56: 221–252.
- Ramos, W. & Fornari, M., 1994**, Problemática de la presencia de oro en los Lipez, *Memorias XI Congreso Geológico de Bolivia – Santa Cruz: 248–259*.
- Rowan, L. C. & Mars, J. C., 2003**, Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sensing of Environment*, 84: 350–366.
- Sabins, F. F., 1999**, Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews*, 14: 157–183.
- Sugaki, A., Kojima, S. & Shimada, N., 1988**, Fluid inclusion studies of the polymetallic hydrothermal ore deposits, in *Bolivia, Mineralium Deposita*, 23, 9–15.
- Sugaki, A. Ueno, H. Shimada, N. Kitakaze, A. Hayashi, K. Sanjines, O. & Velarde, O., 1986**, Geological study on the ore deposits in the Sur Lipez district, Bolivia, *The Science Report of the Tohoku University, Seri III – 16 (3): 327–352*.
- USGS**, (<http://speclab.cr.usgs.gov/>).
- USGS - GEOBOL, 1992**, Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, *U. S. Geological Survey Bulletin, 1975: 365p*.
- USGS – SERGEOMIN, 1997**, Exploration Target generation Analysis in the Lipez Region, Southwest Bolivia, *CDROM*.