



Naturalis

Repositorio Institucional
<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar>

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Naturales y Museo



Validación de las metodologías de detección de alteraciones hidrotermales a partir de imágenes multispectrales en áreas ya exploradas del sector central de Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz.

Benenati, Nicolás

Licenciado en Geología

Dirección: Marchionni, Daniela

Co-dirección: Tessone, Mario

Facultad de Ciencias Naturales y Museo
2019

Acceso en:

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/id/20190821001678>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



Naturalis

Repositorio Institucional
FCNyM - UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



Validación de las metodologías de detección de alteraciones hidrotermales a partir de imágenes multiespectrales en áreas ya exploradas del sector central de Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz.

Alumno: Nicolás Benenati

Director: Dra. Daniela Marchionni

Co director: Lic. Mario Tessone

Trabajo Final de la Licenciatura en Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo Universidad Nacional de La Plata, Argentina

2019

RESUMEN

Una de las actividades económicas primarias más importantes a nivel mundial, considerada la madre de las industrias, es la minería, la cual involucra la exploración y extracción de elementos metálicos o no metálicos. Todo proyecto minero tiene la capacidad de generar un rendimiento industrial o financiero capaz de sostener las economías tanto regionales como provinciales, siendo la minería la actividad que brinda a la sociedad los materiales, minerales y metales que precisa. De tal manera podemos afirmar, sin lugar a dudas, que la humanidad necesita minerales para continuar desarrollándose. De igual manera, es muy importante que la minería de hoy sea sustentable, es decir compatible con la preservación ambiental.

Las tareas de prospección y exploración de recursos minerales son de gran importancia para localizar y dimensionar los yacimientos; complementar estas tareas con herramientas geomáticas de percepción remota tiene un valor fundamental y nos ayuda a identificar y caracterizar áreas de probable interés minero. Es por esto que este trabajo tiene el fin de validar el uso de estas herramientas en la exploración minera a través de la aplicación de distintas metodologías de análisis de imágenes de satélite y su confrontación con datos de campo pre-existentes. En las etapas tempranas de la exploración o investigación, la información obtenida de estas imágenes facilita al geólogo las tareas de cartografía y exploración minera. En etapas más avanzadas, en donde se tiene información previa de campo, este conocimiento permitirá ajustar las metodologías de procesamiento y asegurar una mejor interpretación de los resultados.

El Macizo del Deseado presenta un potencial metalogénico importante, por lo que constituye una región estratégica para la realización de trabajos de investigación y ha despertado gran interés por parte de empresas mineras. La elaboración de este Trabajo Final de Licenciatura se realizó en la porción central del Macizo del Deseado, región dominada por una actividad volcánogénica de edad Jurásica, que generó un extenso plateau de rocas piroclásticas y volcánicas de composición ácida e intermedia, y presencia de amplios mantos y mesetas de basaltos cenozoicos. Vinculados a este volcanismo jurásico se han hallado numerosos sectores con presencia de mineralizaciones epitermales, asociadas a áreas de alteración hidrotermal.

Las áreas de estudio elegidas comprenden las zonas de La Manchuria, La Aragonesa-El Puntudo, San Pedro-La Evelina y la zona de Estancia La Esperanza. El Instituto de Recursos Minerales (INREMI) ha realizado exploraciones e investigaciones minero-metalogénicas en estas zonas y alrededores, y existen distintos trabajos de su autoría, los cuales fueron utilizados como datos bibliográficos, así como también Tesis Doctorales realizadas en estas áreas. El objetivo de estas exploraciones fue el hallazgo de metales preciosos (oro y plata). Teniendo en cuenta que la detección de alteraciones hidrotermales en las imágenes de satélite podría indicar, en forma indirecta, la presencia de mineralizaciones epitermales, consideramos al aprendizaje y buen uso de estas herramientas de gran importancia para la prospección y/o exploración de estos metales.

Dentro de este contexto, se llevó a cabo el pre-procesamiento -calibración radiométrica, corrección geométrica y atmosférica- y procesamiento de imágenes Landsat-ETM⁺ y ASTER, utilizando y ajustando distintas técnicas tales como: cocientes entre bandas, generación de imágenes RGB, componentes principales y clasificación digital, para, por último contrastar los resultados obtenidos con los datos bibliográficos y cartográficos de campo, y corroborar así su alcance o potencial para la prospección. Previamente a este análisis, se presenta una breve descripción de las características geológicas del Macizo del Deseado y de las áreas de estudio. Asimismo son abordados los conceptos teóricos y características técnicas de los sensores utilizados y las firmas espectrales de los minerales que resultan de interés en la investigación.

ABSTRACT

One of the main primary economic activities worldwide, considered as the mother of industries, is mining, which involves the exploration and extraction of metallic or non-metallic elements. All mining project has the capacity to generate an industrial or financial performance able to sustain regional as well as provincial economies, being mining the activity that provides to society the materials, minerals and metals it needs. In such way it can be affirmed, without doubt, that the humanity needs minerals to keep on developing. In the same way, it is very important today's mining to be sustainable, which means, compatible with environmental preservation.

Prospecting and exploration activities of mineral resources are important to locate and size the deposits; complementing these tasks with remote sensing geomatics tools, has a fundamental value and helps us to identify and characterize areas of probable mining interest. That is why this report aims to validate the use of these tools in mining exploration through the application of different satellite image analysis methodologies and their comparison with pre-existing field data. In early stages of exploration or research, the information obtained from these images make easier geologist's tasks of cartography and mining exploration. In more advanced stages, in which there is a previous field information, this knowledge allows us to adjust the processing methodologies and ensure a better interpretation of the results.

The Deseado Massif has an important metallogenic potential, therefore, it constitutes a strategic region for carrying out research work and has caught great interest from mining companies. The elaboration of this Final Degree Research was done in the central part of the Deseado Massif, a region dominated by a volcanic activity of Jurassic age which generated an extensive plateau of pyroclastic and volcanic rock of acidic and intermediate composition, and the presence of wide mantles and plateaus of Cenozoic basalts. Related to this Jurassic volcanism, they have been found several sectors with epithermal mineralization presence, associated with hydrothermal alteration areas.

Selected study areas include La Manchuria, La Aragonesa-El Puntudo, San Pedro-La Evelina and Estancia La Esperanza zone. The Mineral Resources Institute (INREMI) carried on mining and metallogenic exploration and research works in these areas and surroundings, and there are numerous reports of its authorship, which were used as bibliographic data, as well as Doctoral Theses in these areas. The goal of the explorations made by INREMI was the discovery of precious metals deposits (gold and silver). Taking into consideration that hydrothermal alterations detection in satellite images could indicate, indirectly, the presence of epithermal mineralization, we consider the learning and good use of these tools of great importance for the prospection and /or exploration of these metals.

Within this context, the pre-processing -radiometric calibration, geometric and atmospheric correction - and processing of Landsat-ETM⁺ and ASTER images was carried out, using and adjusting different techniques such as: band ratios, RGB images composition, principal component analysis and digital classification, to finally compare the results with bibliographic and field cartographic data, and corroborate its scope or potential for prospecting. Prior to this analysis, a brief description of the geological characteristics of the Deseado Massif and the study areas is presented. Likewise, the theoretical concepts and technical characteristics of the used sensors and the spectral signatures of minerals of interest in the research are approached.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	1
3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	2
3.1. La Manchuria	6
3.2. La Aragonesa-El Puntudo	7
3.3. San Pedro-La Evelina	10
3.4. Estancia La Esperanza	11
4. FUNDAMENTACIÓN	13
4.1. Imágenes Landsat-7	15
4.2. Imágenes ASTER	15
4.3. Firmas Espectrales	16
4.3.1. Firmas espectrales en minerales y rocas	17
4.3.2. Región del Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	17
4.3.3. Región del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)	17
4.3.4. Región del Infrarrojo Térmico (TIR)	18
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	22
5.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT 7 ETM+	23
5.1.1. Generación del Mosaico Digital	23
5.1.2. Fusión o " <i>merge</i> " de bandas	24
5.1.3. "Familiarización" con el área de estudio	24
5.1.4. Generación de imagen RGB	24
5.1.5. Corrección por calibración	25
5.1.6. Generación de cociente entre bandas	26
5.1.7. Segmentación de densidades	28
5.1.8. Componentes Principales	29
5.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ASTER	32
5.2.1. Corrección por calibración	32
5.2.2. Generación de cocientes	34
5.2.3. Componentes principales	41
5.2.4. Clasificación "Spectral Angle Mapper" (SAM)	47
6. CONSIDERACIONES FINALES	53
7. CONCLUSIONES	55
8. BIBLIOGRAFÍA	59

INTRODUCCIÓN

En el macizo del Deseado importantes episodios volcanogénicos ocurridos en el jurásico han dado lugar a la formación de un extenso plateau de rocas piroclásticas y volcánicas, representado por el complejo volcánico-piroclástico-sedimentario del Grupo Bahía Laura (Formaciones Chon Aike y La Matilde). Esta región es potencialmente rica desde el punto de vista metalogénico, como lo indican los numerosos hallazgos de depósitos epitermales de metales preciosos que han sido reconocidos y que se consideran vinculados al volcanismo ácido jurásico del Grupo Bahía Laura. 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.

Las imágenes ópticas multiespectrales, con cobertura espectral en el visible, 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 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.

La respuesta espectral de cada roca estará condicionada fundamentalmente por la constitución y proporción de sus componentes minerales (composición química y mineralógica) y por sus arreglos espaciales (características texturales). La presencia de ciertos grupos de minerales -tal es el caso de los minerales de alteración- va a determinar la existencia de rasgos espectrales diagnósticos (bandas de absorción) en las firmas espectrales de las rocas de las que forman parte. Para analizarlos existen bibliotecas de firmas espectrales disponibles tanto en la bibliografía como en las bases de datos que acompañan a los *softwares* de procesamiento digital de imágenes.

En este contexto, se realizó un entrenamiento en las distintas metodologías de detección de áreas de alteración hidrotermal y grupos minerales -a partir de imágenes Landsat y ASTER- las cuales son utilizadas frecuentemente durante las tareas de prospección y exploración. Se ensayaron las distintas metodologías de análisis digital y se contrastaron los resultados obtenidos a partir de las imágenes con los datos de campo y laboratorio de zonas ya exploradas del sector central del Macizo del Deseado en donde han sido reconocidas mineralizaciones epitermales y alteraciones asociadas (La Aragonesa-El Puntudo, La Manchuria, San Pedro-La Evelina, Estancia La Esperanza), para ver si existe o no correspondencia entre las "anomalías espectrales" detectadas y los resultados de estudios previos y así validar la eficacia de las metodologías empleadas.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo pueden resumirse en:

- realizar una práctica en las metodologías de detección de alteraciones minerales con imágenes de satélite en áreas conocidas y cuya información pueda ser utilizada para validación de campo
- llegar a la detección de anomalías espectrales que puedan estar indicando la presencia de mineralizaciones epitermales en un área muy extensa y promisoria de la Patagonia

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

El área de trabajo se encuentra ubicada en el sector centro-norte de la Provincia de Santa Cruz, entre los 47°30' y 48°30' de latitud sur y los 69°15' y 70°15' de longitud oeste, encontrándose en la porción central de la provincia geológica del "Macizo del Deseado", en la región Extrandina de Santa Cruz (Lesta y Ferello, 1972). Se ha destacado el carácter estable de esta región, con denominaciones como cratón, macizo (Feruglio, 1946; Leanza, 1958) o nesocratón (Harrington, 1962), por su naturaleza subpositiva. Forma parte de la Plataforma Patagónica junto con el Macizo Norpatagónico, estable desde el Mesozoico (Cátedra de Geol. Arg., 2017).

La provincia geológica Macizo del Deseado está comprendida entre los ríos Deseado y Chico de Santa Cruz, rodeada de cuencas del Mesozoico-Terciario (del golfo de San Jorge y Austral) y entre la llamada Dorsal del Río Mayo, por el oeste y la costa atlántica, por el este.

Se accede al lugar de estudio a través de la Ruta Provincial N° 12 desde las localidades de Pico Truncado (por el norte) o Gobernador Gregores (por el sur), Figura 1.



Figura 1. Ubicación del área de estudio en la provincia de Santa Cruz.

El Macizo del Deseado representa una extensa unidad morfoestructural donde se ha desarrollado un prolongado vulcanismo Jurásico medio a superior, en un régimen dominado por condiciones extensionales.

Las rocas más antiguas, que constituyen un basamento ígneo-metamórfico, integran la Formación La Modesta, aflorante en las Estancias La Modesta, La Josefina, La Bajada y El Tranquilo. Están representadas por metamorfitas de bajo a medio grado: filitas cuarzo-micáceas, metacuarcitas, calcosilicatos, metavulcanitas mesosilícicas, turmalinita, bancos de óxidos de Fe-Mn (Di Persia, 1962; De Giusto et al., 1980), asignadas a una edad Precámbrico superior-Paleozoico inferior, con edad errocrona Rb-Sr 413 ± 17 Ma (Moreira et al., 2005), edad de máxima sedimentación datada en Zr detrítico de 446 Ma (Moreira et al., 2013) y K-Ar 210 Ma (Di Persia, 1962). El Complejo Río Deseado, de edad Paleozoico inferior, está compuesto por metamorfitas y granitos (Viera y Pezzuchi, 1976; Pezzuchi, 1978). El basamento se encuentra cubierto en relación de discordancia por sedimentitas continentales de las formaciones del Grupo Tres Cerros: La Golondrina (Archangelsky, 1958) y La Juanita (Arrondo, 1972) de edad Pérmica, (etapa de sinrift) y el Grupo El Tranquilo (Di Persia, 1965) de edad Triásica (etapa de sag).

En el Jurásico inferior los cuerpos graníticos de la Formación La Leona (Arrondo, 1972) intruyen al basamento y a las sedimentitas Permo-triásicas, así como a un leucogranito Cámbrico (344 Ma). Estos granitoides pertenecen a la Serie Monzonítica con edad Rb-Sr 203-193 Ma (Varela et al., 1991; Panckhurst et al., 1993). Esta intrusión está relacionada al desmembramiento de Gondwana y al inicio de la apertura del Atlántico (Varela et al., 1991), la cual vino acompañada de los depósitos epi-piroclásticos, con tobas ácidas, limonitas y wackes de la Formación Roca Blanca (Di Persia, 1956; De Giusto, 1956) de edad Jurásica inferior, al igual que la Formación Bajo Pobre, Jurásico medio, que se deposita inmediatamente por encima de la Formación Roca Blanca. La Formación Bajo Pobre se compone de aglomerados volcánicos y coladas andesíticas a basálticas que, en parte se interdigitan con vulcanitas ácidas de la Formación Chon Aike (Echeveste et al., 2001), y acusan edades Ar-Ar de 164-153 Ma (Alric et al., 1995; Feraud et al., 1999).

Durante el Jurásico medio y superior se desarrolló un complejo efusivo volcánico-piroclástico-sedimentario, de composición ácida a mesosilícica, de amplia distribución areal, denominado Grupo Bahía Laura (Lesta y Ferello, 1972). Es éste episodio geológico el que domina arealmente la zona de estudio, integrado por los flujos ignimbríticos y lávicos (de composición riolítica) de la Formación Chon Aike (Stipanovic y Reig, 1957) de edad K-Ar, Rb-Sr y Ar-Ar entre 178 y 152 Ma (Pankhurst et al., 1993; de Barrio, 1993; Feraud et al., 1999) y U-Pb de 168, 163 y 156 Ma (Pankhurst et al., 2000). Este grupo está representado también por las tobas y tufitas de la Formación La Matilde (Stipanovic y Reig, 1957), que conserva un importante registro fosilífero: anuro primitivo *Notobatrachus degiustoi* Reig y flora de *Otozamites sanctaecrucis* Fer. (Stipanovic y Reig, 1955), abundantes impresiones de *Estheria* sp; rastros de mamíferos primitivos *Ameghinichnus patagonicus*, (Casamiquela, 1961); restos de coníferas (*Araucaria mirabilis*, *Pararaucaria patagónica* y *Araucarites sanctaecrucis*), floras fósiles con Pteridofitas y Gimnospermas (*Hausmannia* sp. y *Cladosphlebis* sp.), etc. Estas últimas formaciones, Roca Blanca, Bajo Pobre, Chon Aike y La Matilde, conforman la Provincia Riolítica de Chon Aike (LIP riolítica).

Hacia el Cretácico, hubo un cambio en la subducción de la Placa de Nazca, pasando de una subducción en régimen extensional (velocidad de roll back negativo), hacia una subducción del tipo compresiva dada la apertura del océano atlántico y la migración, con mayor velocidad, hacia el oeste de la placa sudamericana, hace unos 120 Ma aproximadamente. Esto generó la evolución de pequeñas cuencas cerradas, que facilitaron la sedimentación de origen continental en el sector

oriental del área, como las Formaciones Bajo Grande (Di Persia, 1958) con sedimentitas epiclásticas y piroclásticas y Baqueró (Archangelsky, 1967), con un conjunto de piroclásticas y sedimentitas fluviales y lacustres del Jurásico tardío-Cretácico inferior.

A fines del Cretácico comienzan las primeras efusiones basálticas, las que perduran de manera intermitente en el Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno, alternando con sedimentitas continentales de la Formación Sarmiento (Feruglio, 1949,50) del Terciario (Eoceno-Oligoceno), sedimentitas marinas de la Formación Patagonia (Zambrano y Urien, 1970), del Oligoceno superior y sedimentitas continentales de la Formación Santa Cruz (Zambrano y Urien, 1970), del Mioceno medio, cubiertas por coladas basálticas mio-pliocenas. En discordancia sobre las unidades precedentes se apoyan los niveles de gravas pliocenas de la Formación La Avenida (Marín, 1982) y amplios mantos de basaltos cuaternarios.

En síntesis, en la provincia morfoestructural, Nesocratón del Deseado (De Giusto et al., 1980), predominan unidades volcano-piroclásticas con episodios sedimentarios subordinados de edad Jurásica. Vinculadas al vulcanismo ácido jurásico del Grupo Bahía Laura se han detectado varios sectores con evidencias de mineralizaciones epitermales, asociadas muchas veces a áreas de alteración hidrotermal. Gracias a la existencia de numerosos estudios publicados e inéditos por el INREMI así como mapas de detalle, algunos de estos sectores han sido utilizados como validación de campo para esta investigación (Figura 2) y se describen a continuación:

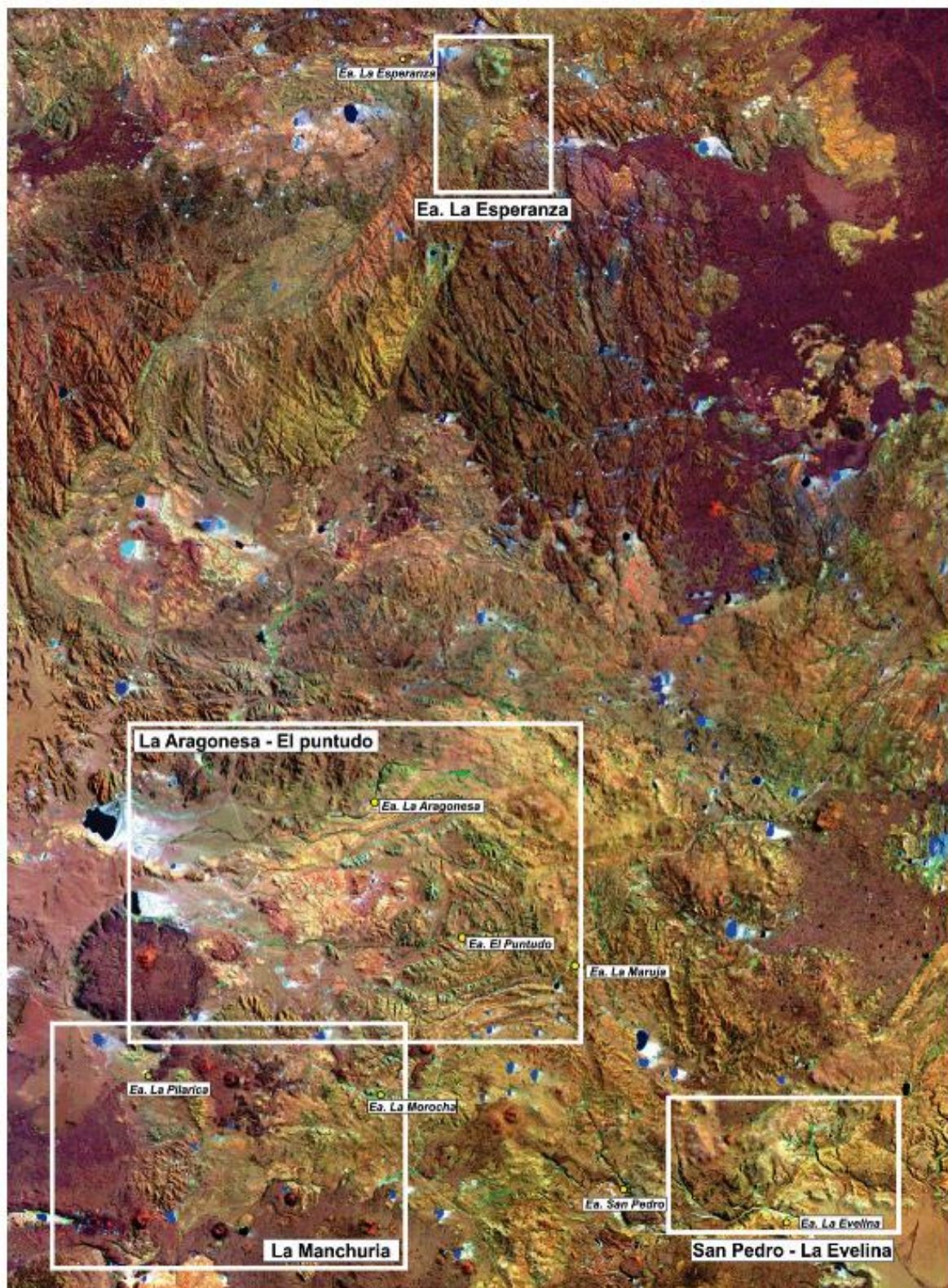


Figura 2: Ubicación de las áreas de trabajo sobre una imagen Landsat (RGB: 741): La Aragonesa-El Puntudo, La Manchuria, San Pedro-La Evelina, Estancia La Esperanza.

3.1. La Manchuria

El área de La Manchuria se sitúa 120 km al norte de la localidad de Gobernador Gregores. Esta zona ha sido de interés económico por parte de la empresa FOMICRUZ S.A. y prospectada por el INREMI. Presenta un dominio volcánico, caracterizado por facies lávicas, de composición básica, intermedia y ácida, así como también facies piroclásticas de flujo y de caída de composición fundamentalmente ácida (Tessone y Del Blanco, 1998). El primer grupo de rocas forman parte de la Formación Bajo Pobre de edad Jurásico inferior a medio, mientras que las facies ácidas corresponden al complejo volcánico-piroclástico-sedimentario del Grupo Bahía Laura del Jurásico medio a superior, representado por las formaciones Chon Aike y La Matilde.

La Formación Bajo Pobre está integrada por andesitas, dacitas y basaltos, los cuales constituyen lomadas bajas redondeadas, que se distribuyen en el sector central y norte del área, mientras que la Formación Chon Aike, de gran extensión areal, está constituida principalmente por ignimbritas, acompañadas por facies lávicas y algunos cuerpos subvolcánicos de composición riolítica. Por último, se presentan brechas, lapillitas y tobas asociadas de la Formación La Matilde (Marchionni y Tessone, 2009; Tessone, 1999).

En el sector septentrional del área se reconocieron basaltos olivínicos terciarios, que se disponen en los altos topográficos circundantes (Tessone, 1999). En la zona se identifican basaltos cuaternarios (Basalto Cerro Tejedor [Sacomani, 1984] Basalto La Angelita [Panza, 1982]) que ocupan los bajos topográficos alcanzando gran distribución areal. Depósitos aluviales recientes cubren los bajos y los cauces de los arroyos (Tessone y Del Blanco, 1998; Marchionni y Tessone 2009; Tessone, 1999).

Se destacan en esta zona 3 sitios de interés minero (Figura 3): Norte, Centro y Sur:

En el sector norte, Tessone et al., (1996b) describe un conjunto de afloramientos discontinuos de rocas silicificadas, compuestas por un cuerpo principal de 50 m de diámetro, el Cerro Turulo, del cual se desprenden tres ramificaciones al SE, NNO y ONO con longitudes de entre 110 y 220 m y hasta 7 m de potencia. El Cerro Turulo está formado por lavas autobrechadas de un domo riolítico-dacítico; en él predomina la silicificación, como reemplazo y en parte relleno. La roca de caja del domo es una ignimbrita cristaloclástica con una importante alteración argílica, con presencia de illita-sericita, jarosita y finas venillas de sílice con limonita. En Marchionni y Tessone (2009) se describen en esta zona alteración propílica, argilización (caolinita-illita) y silicificación que afectan a un cuerpo dómico de composición dacítica y se extienden en una área de unas 10 has. Un rasgo destacable es la intensa silicificación localizada en la zona de intersección de las fracturas de rumbo N 30°O y N 60°O, donde se observan lavas autobrechadas, totalmente reemplazadas por sílice que fueron brechadas hidrotermalmente, con mineralización de oro y plata. La mineralización se localiza en estructuras de reemplazo de cuarzo, calcedonia y relleno de cavidades. Se determinaron anomalías en Au, Pb, As, Sb, Bi y Te.

En el sector central, dominan algunos lineamientos definidos como fracturas, algunas de las cuales están mineralizadas, como el caso de la brecha tectónica mineralizada denominada Veta Speme (Tessone et al., 1996a) emplazada en las ignimbritas de la Formación Chon Aike. Esta estructura se extiende en forma discontinua, con rumbo promedio N 10°-15°, inclinación vertical a subvertical, a lo largo de 3200 m y un espesor entre 0.30 m a 1.50 (Tessone et al., 1996a). Existe una estructura secundaria, paralela a subparalela de la misma, de similares características. La Veta Speme aflora de manera parcial, en parte como una brecha mineralizada, pasando a fajas de

venillas subparalelas a entrecruzadas (Tessone et al., 1996a). Los clastos de la brecha se encuentran argilizados y reemplazados por sílice de grano fino. Los dos procesos de alteración principales identificados corresponden, primero a una silicificación penetrativa que reemplaza parcial o totalmente a la roca de caja, acompañada por una piritización poco extendida, y la otra corresponde a una argilización en los fragmentos pumíceos y a los feldespatos, identificándose illita y esmectitas (Tessone et al., 1996a).

En el sector sur, existen mineralizaciones asociadas a cuerpos dómicos riolíticos (Tessone y Del Blanco, 1998). Estos cuerpos presentan alteración silícica y oxidación importantes, además de piritización y argilización subordinadas. La silicificación está presente en venillas de cuarzo y geodas. La oxidación se encuentra en vetas de hasta 20 cm de espesor, en venillas, pátinas y oquedades, identificándose óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso. La piritización se distribuye repetidamente en domos y en rocas aledañas, mientras que la argilización queda representada por presencia de caolinita e illita-sericita (Tessone y Del Blanco, 1998). Mineralógicamente se reconocieron granos irregulares de oro en cavidades abiertas oxidadas, vinculadas con el cuarzo en las finas venillas. También se determinaron plata nativa y electrum, galena asociada a vetas de óxidos, y de manera subordinada, piritita parcial a totalmente oxidada. En rocas porfíricas de matriz afanítica se reconocieron yeso y baritina, ocupando cavidades (Tessone y Del Blanco, 1998). En este sector denominado Domos del Sur se destaca la oxidación sobre la silicificación.

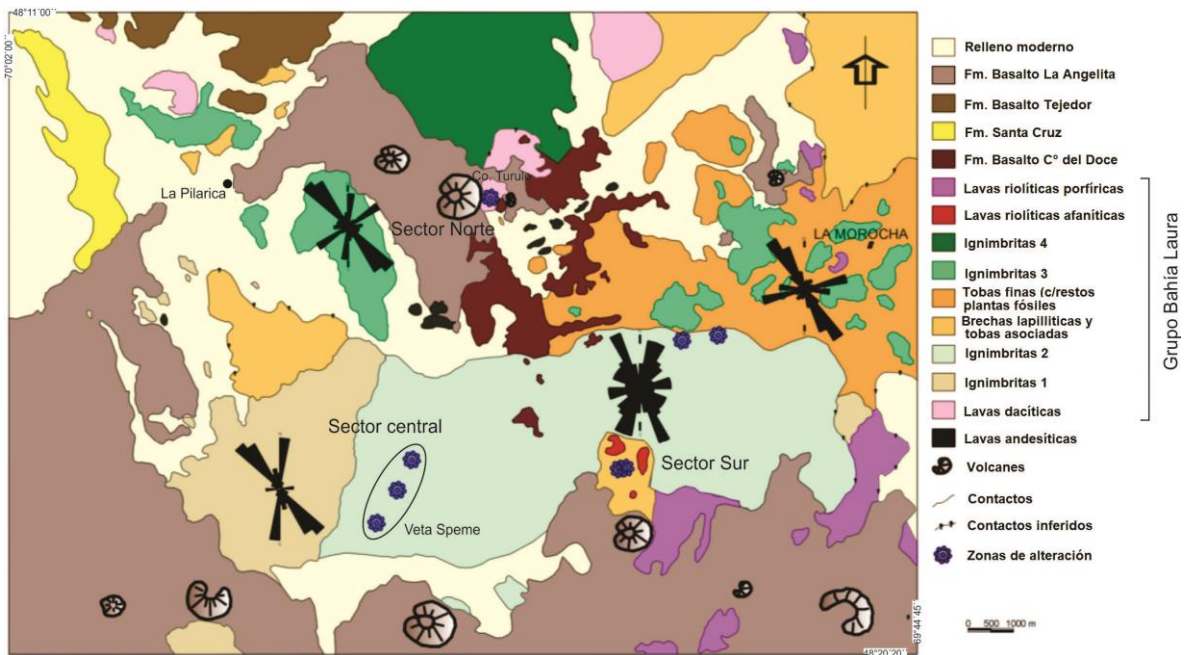


Figura 3: Mapa geológico simplificado del área La Manchuria con ubicación de los sectores mineralizados. Tomado de Marchionni y Tessone, (2009).

3.2. La Aragonesa-El Puntudo

El sector de La Aragonesa-El Puntudo (Figura 4) se sitúa al este-noreste de La Manchuria. Esta zona de interés minero ha sido prospectada por el INREMI para San Jorge Minera S.A. En esta zona las unidades volcánicas y volcánicas del Grupo Bahía Laura -formaciones Chon Aike y La Matilde- ocupan la mayor parte de los afloramientos, mientras que de manera subordinada lo hacen las unidades volcánicas de la Formación Bajo Pobre (INREMI, 2003).

En el extremo sudoeste se destaca una amplia meseta coronada por basaltos cuaternarios asociada a un cono volcánico (Cerro Tejedor). Al noreste de la meseta del Cerro Tejedor se extienden una serie de lomadas de lavas andesíticas que, al este de la ruta, presentan una alteración propilítica importante. Al sur del Cerro Tejedor se reconocieron cuerpos sub-volcánicos (pórfido andesítico) con una alteración clorítica importante (Marchionni, 2007).

Las lavas ácidas se distribuyen de una faja de rumbo NE-SO, de unos 20 km de largo; son lavas de textura microporfírica, por lo general intensamente argilizadas. En la zona de las Lomadas Centrales las lavas son en su mayoría subaflorantes y conforman una serie de elevaciones de morfología suave, cubriendo unos 10 Km² (Marchionni, 2007). Al sur de la Estancia La Aragonesa las lavas presentan una marcada fluidalidad y conforman un domo de base elíptica de rumbo ENE-OSO (Guido et al., 2002), estando apoyadas sobre un manto de vitrófiro de algunos metros de espesor, al que le subyacen niveles tobáceos (INREMI, 2003). Al sudoeste del Cerro Puntudo una serie de lomadas de topografía muy suave exponen lavas muy alteradas, con pátinas limoníticas (Marchionni, 2007). Las lavas del Sector El Peñón forman un manto que inclina hacia el norte, extendiéndose unos 2 km en sentido E-O. Estas lavas están asociadas a una importante silicificación y presentan tinción por óxidos de hierro (INREMI, 2003). Vinculados a los afloramientos de lavas, al sur de las Lomadas Centrales, se presentan brechas de talud formando afloramientos muy extensos y de gran expresión topográfica (Marchionni, 2007).

Se reconocieron una gran variedad de ignimbritas, la denominada "Ignimbrita Verde" es la de mayor importancia prospectiva, por ser la roca de caja de estructuras vetiformes (INREMI, 2003), y conforman una serie de serranías de marcado relieve restringidas al sector central. Las estructuras vetiformes identificadas tienen un amplio desarrollo en dirección NNE-SSO. Otra segunda dirección de lineamiento importante y de carácter regional, es la NO. En dirección N-S, se desarrolla un lineamiento más local, el cual también corresponde a algunas estructuras vetiformes (INREMI, 2003). Lineamientos en dirección E-O se corresponden con la orientación de los sectores silicificados de Lomas Grises y El Peñón. En el sector central se destacan una serie de lineamientos curvos concéntricos, con un radio de curvatura de unos 5 km, cuyo interior se ha interpretado la presencia de fallas anulares directas. Esta estructura semicircular involucra la presencia de ignimbritas muy soldadas y varios asomos de rocas volcánicas (Marchionni, 2007).

La actividad hidrotermal en el área queda expresada tanto en una transformación total o parcial de la roca (alteración) o bien en el relleno de espacios abiertos, en ambos casos producidos por la circulación de fluidos hidrotermales. Las alteraciones reconocibles en el área, comprenden principalmente a: silicificación, en forma de reemplazos y rellenos silíceos (vetas, venillas y stockworks), que afectan lavas, tobas e ignimbritas y, argilización, que acompaña a la roca de caja de las mineralizaciones vetiformes. También se determinaron anomalías geoquímicas de metales preciosos (Au y Ag) asociados a las estructuras vetiformes y en algunas zonas silicificadas, acompañadas por concentraciones normales bajas de metales base (INREMI, 2003).

En el sector oriental del Cerro Tejedor, se presenta una ignimbrita con alteración argílica intensa y parcialmente silicificadas con venillas de cuarzo y formando crestones. Es frecuente la presencia de limonitas en boxworks, reemplazando cristales de pirita (Marchionni y Tessone, 2009).

Al este de las Lomadas Centrales, se registraron cerca de 6 km estructuras de relleno de cuarzo alojadas en la Ignimbrita Verde, destacándose la llamada Veta Larga por su continuidad y longitud, de rumbo general N 30° E. Se compone de un tramo principal de 1600 m de longitud y

espesores variables, al que se suma una extensión sudoccidental (Veta Larga Sur) distanciada unos 800 m siguiendo el rumbo. Cada estructura se compone de un conjunto de vetas y vetillas que forman fajas de hasta 5 m. Las vetas y vetillas están formadas por cuarzo que suele tapizar cavidades con textura en peine o bien en geodas y en ocasiones formando textura brechosa. Gran parte de la Veta Larga presenta pirita oxidada asociada al cuarzo de manera diseminada. Ocasionalmente se observaron manchas de “cobre color” (malaquita) (Marchionni, 2007).

Las lavas que conforman las Lomadas Centrales se encuentran frecuentemente argilizadas y levemente silicificadas. También se presentan silicificaciones en parches y, en algunos sectores, se observaron fantasmas de pirita y pátinas de oxidación (Marchionni, 2007). Alteración del tipo argílica está presente en las lavas de disposición mantiforme hacia el norte.

En varios sectores se han observado silicificaciones afectando a distintas unidades. En el bajo ubicado al noreste del Sector de Vetas, en una ignimbrita brechosa se presentan dos fajas silicificadas a manera de crestones, orientados E-O. Hacia el sur, coronando algunas elevaciones, aparecen sectores muy argilizados, y en relación con estas elevaciones, aflora una brecha volcánica que se encuentra silicificada y con delgados pelos de cuarzo (Marchionni, 2007). Algunos de los mantos de ignimbrita ubicadas al norte de las Lomas Centrales también presentan una fuerte silicificación de tipo masiva (Marchionni, 2007).

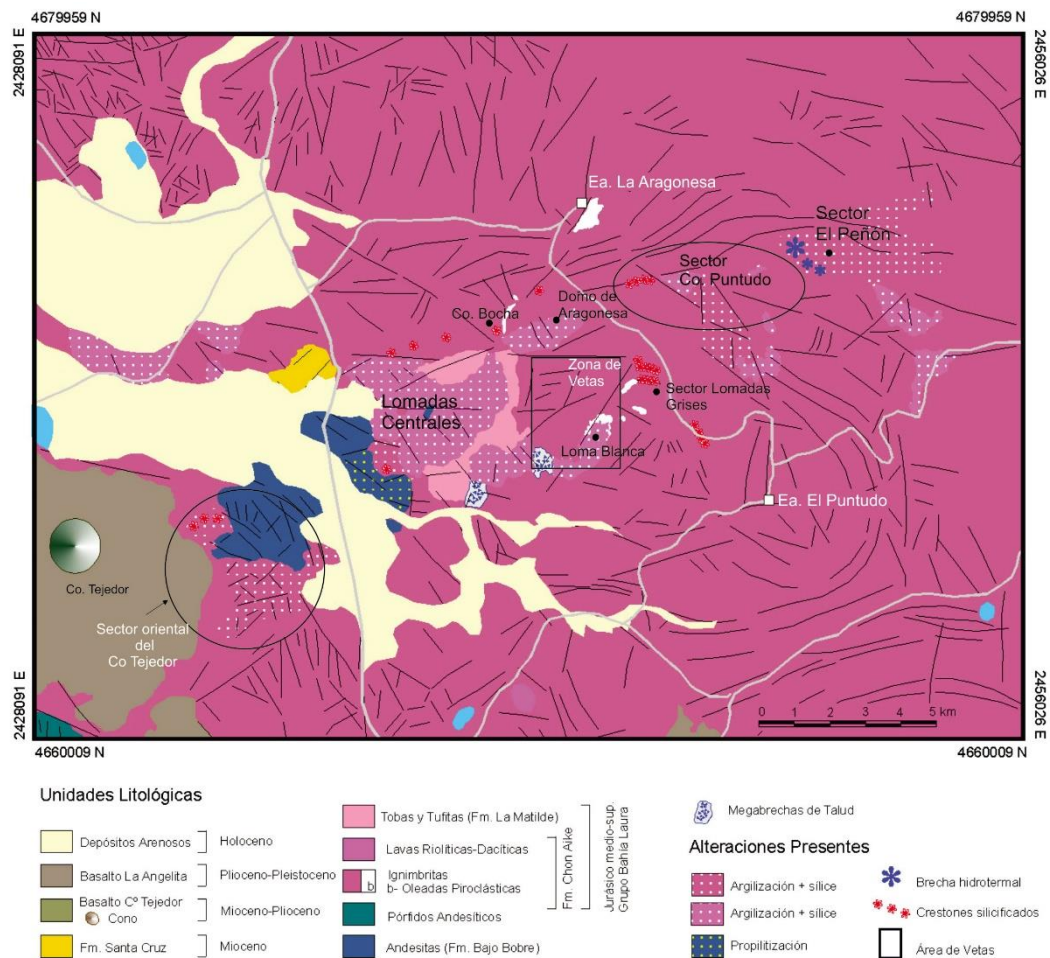


Figura 4: Mapa geológico simplificado del área La Aragonesa – El Puntudo con ubicación de las zonas mineralizadas. Tomado de Marchionni (2007).

3.3. San Pedro-La Evelina

Esta zona, ubicada unos 20 km al este-sudeste de La Manchuria, ha sido de interés económico por parte de la empresa FOMICRUZ S.A. y prospectada por el INREMI (Figura 5).

La unidad litológica de mayor distribución es la Formación Chon Aike en facies lávicas y piroclásticas-sedimentarias. Esta unidad se apoya sobre la Formación Bajo Pobre (INREMI, 2004a) que se distribuyen principalmente en la zona central y meridional del área. Las facies lávicas de Bajo Pobre, de coloración castaño, presentan textura porfírica, fenocristales de plagioclasas y mafitos muy desferrizados en matriz feldespática de grano fino. La fluidalidad se manifiesta en forma mesoscópica en pocos afloramientos del SO y en algunos sectores se observaron texturas brechosas que constituyen la base de una unidad volcano-sedimentaria correspondiente al Matildense (INREMI, 2004a). Las lavas exhiben fluidalidad muy marcada, con escasos fenocristales de cuarzo y feldespatos alcalinos, en matriz vítrea. En otros sectores la unidad es afírica, e incluso vitrofírica. En el sector nororiental del área se destaca la presencia de un domo de unos 300 m de diámetro, con flujo vertical marcado, con facies autobrechadas (INREMI, 2004a).

En la parte sur y sudoeste, se reconocen piroclastitas asignables a la Formación Chon Aike. Se presentan en general en bancos pobremente estratificados, con pseudofluidalidad poco notable. Todas ellas tienen abundantes pómez (INREMI, 2004a). Hacia el margen sur del camino que conduce a las estancias La Evelina y Santa Clara, se desarrollan depósitos de tipo aglomerádico polimíctico, con clastos predominantes de tipo ignimbrítico, así como provenientes de un pórfido dacítico, denominado "Pórfido de San Pedro", emplazado al SO del área (INREMI, 2004a). En el sector centro-norte se observan coladas basálticas de edad cuarteraria (Formación La Angelita), que cubren a las unidades anteriores descriptas (Marchionni et al., 2002).

En el extremo sudoriental, se destacan también las unidades piroclásticas-sedimentarias, asignables a la Formación La Matilde, que se intercalan y/o interdigitan con mantos ignimbríticos de la Formación Chon Aike (Marchionni et al, 2002). Por encima de estas unidades, y en niveles topográficamente distintos, aparece un nivel tobáceo totalmente silicificado que opera como cubierta protectora de los niveles piroclásticos sedimentarios de la Formación La Matilde que lo subyacen (INREMI, 2004a). Por encima, en discordancia erosiva a angular, se desarrolla un conglomerado fluvial polimíctico, con clastos de material principalmente ignimbrítico y lávico, en menor medida de la Formación Bajo Pobre, que podría tentativamente asignarse al conglomerado de base de la Formación Bajo Grande de edad Jurásico alto a Cretácico basal (INREMI, 2004a).

Las alteraciones reconocidas en la zona son de tipo silicificación, presente en vetas, venillas y reemplazos masivos, argilización (esmectita-caolinita) y propilitización.

Las vetas tienen una orientación NO, con inclinaciones variables, desde subverticales, hasta de 65° al este y oeste. Se reconocieron 15 estructuras, de longitudes promedio de entre 100 y 300 m, con máximos de 800 m, que totalizan en conjunto una longitud de 6500 m. Sus potencias comprenden un rango de 1 a 2,5 m con máximos de 5 m. Están integradas por bandas de cuarzo y calcedonia, alternando con óxidos e hidróxidos de manganeso y hierro. Las venillas se alojan en las lavas de la Formación Chon Aike y en el cuerpo dómico mencionado (Marchionni et al., 2002).

Las rocas de caja de estas estructuras están moderadamente alteradas, con presencia de esmectitas (Tessone y Etcheverry, 1998), derivadas de la alteración de feldespatos de la Formación Bajo Pobre y cuarzo-adularia en las proximidades de las estructuras vetiformes. Ha

sido reconocida caolinita en el cuerpo dómico de la Formación Chon Aike, mientras que la alteración de tipo propilítica (clorita-calcita) se ha identificado en la caja de las vetas alojadas en la Formación Bajo Pobre del sector central (Marchionni et al., 2002).

Los minerales descritos en las vetas han sido: pirolusita, criptomelano y posiblemente braunita, entre los de manganeso, además de escasa pirita, hematita y limonitas. Asimismo se identificó baritina como mineral relicto, y pseudomorfos de calcita y baritina. Las venillas están compuestas por cuarzo, acompañado por adularia. Es conspicua la presencia de hidróxidos de hierro (limonitas) y de manganeso subordinados (Marchionni, 2007). Los cuerpos vetiformes presentan bajas concentraciones de metales preciosos (Au y Ag) y elevados valores de Mn, Fe y Ba junto con contenidos significativos de As, Sb, Hg y Tl, que caracterizan a las porciones más someras de un sistema epitermal (Marchionni, 2007).

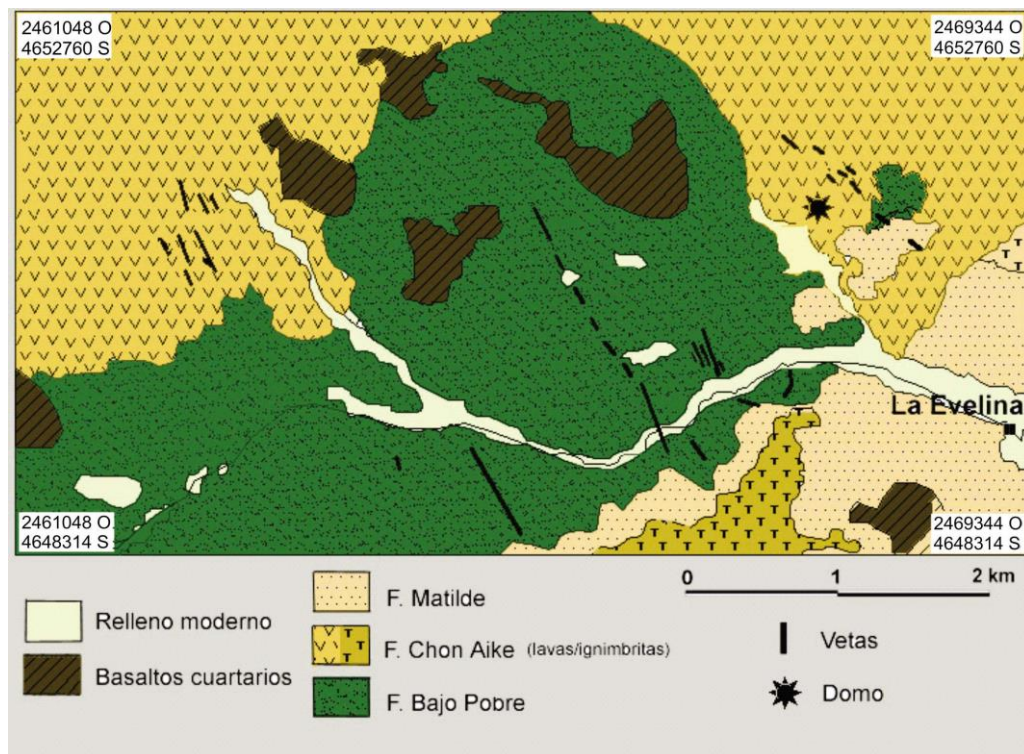


Figura 5: Mapa Geológico simplificado del área San Pedro-La Evelina con la ubicación de las vetas principales. Tomado de INREMI (2004a).

3.4. Estancia La Esperanza

El área de la Estancia La Esperanza (Figura 6) unos 50 km al norte de La Manchuria, se encuentra integrada por distintos depósitos volcanoclásticos pertenecientes a la Formación Chon Aike. En la zona afloran depósitos ignimbríticos de variada características, lavas y sedimentos volcanogénicos (Mykietiuk et al., 2002; Marchionni y Mykietiuk, 2005).

Los depósitos ignimbríticos componen la mayor parte de los afloramientos y se encuentran descritos en Echeveste et al., (1999) y Mykietiuk et al., (2005). Entre estos se destaca la Ignimbrita Gris, que aflora al sudeste del área, con abundantes cristaloclastos de biotita, cuarzo y sanidina. Rodeando la anterior se encuentra la Ignimbrita Valenciana, de composición dacítica, con cristaloclastos de plagioclasas, cuarzo sanidina y biotita. Hacia el oeste aflora la ignimbrita La

Esperanza, abundante matriz y cristaloclastos de cuarzo ahumado, sanidina y biotita. Al sur aflora la Ignimbrita Flecha Negra, muy soldada, con escasos cristaloclastos de cuarzo, sanidina y plagioclasas, con escasa biotita. En el bajo ubicado al este del Cerro Tornillo, aflora la Ignimbrita Pumícea soldada, con escasos cristaloclastos de cuarzo y sanidina y con pómez de gran tamaño. Sobre este depósito se observa material piroclástico de caída y material retrabajado, que además constituye los principales depósitos del cerro Tornillo (Mykietiuk et al., 2005).

Los únicos asomos de lava se encuentran en el Cerro Guanaco y alrededores, donde se encuentran alterados y, en el sur, intruyendo a la Ignimbrita La Esperanza formando un cuerpo semicircular conformado por lavas riolíticas de marcada fluidalidad, interpretado como conducto de efusión de material (Echeveste et al., 1999), y a lavas de composición fenoandesítica, que afloran en el Cerro Guanaco y sus alrededores (Marchionni y Mykietiuk, 2005). Los sedimentos volcanogénicos (tufitas) han sido identificados en el área del Cerro Tornillo, interestratificados con tobas de caída. Los mismos han sido interpretados como parte de una secuencia sedimentaria de ambiente lacustre (Mykietiuk y Lanfranchini, 2004).

En el área se han reconocido tres zonas con alteración hidrotermal, con diferentes etapas evolutivas de las soluciones y con niveles de emplazamiento de relleno hidrotermal: Sector Cerro Tornillo, Cerro Guanaco y Vetas del Sur (Mykietiuk et al., 2002).

En el Cerro Tornillo, afloran depósitos piroclásticos de caída, tobas y tufitas laminadas, ignimbritas, y se caracteriza por la presencia de brechas hidrotermales con controles estructurales, presencia de alteración argílica moderada, extendidos reemplazos silíceos de baja temperatura (Mykietiuk y Lanfranchini, 2004).

El Cerro Guanaco está compuesto por ignimbritas y lavas de composición fenoandesíticas muy alteradas. Asimismo aflora una brecha hidrotermal de ignimbrita y lavas alteradas. En ésta zona domina una alteración argílica avanzada, con illita, pirofilita, dickita y diásporo (Mykietiuk et al., 2002), superpuesta a una alteración argílica generada por fluidos hidrotermales de pH neutro (Mykietiuk et al., 2005). Además, en el sector, aparece una silicificación penetrativa mantiforme de sílice porosa con escasos restos de cristales argilizados, zonas de fracturas verticales con sílice que podrían ser conductos de circulación de fluidos y también se encontraron cuerpos lenticulares rellenos por cristales de cuarzo y por sílice opalina bandeada posterior. Como minerales primarios se han identificado pirita, arsenopirita y antimonita y secundarios como alunita plumbogummita, variscita, jarosita y sarmientita (Mykietiuk et al., 2002).

En cuanto al sector "Vetas del Sur", se caracteriza un conjunto de vetas y vetillas desarrolladas a lo largo de una faja en sentido N-S, las cuales se unen y separan durante su recorrido atravesando ignimbritas alteradas. Estas vetas y vetillas son de cuarzo, con textura en peine y se asocian a delgadas fajas con reemplazos silíceos de aspecto sacaroide. La roca de caja es la Ignimbrita Valenciana, de composición dacítica (Echeveste et al., 1999), la cual presenta alteración argílica y propilítica, de poco desarrollo (Mykietiuk et al., 2002).

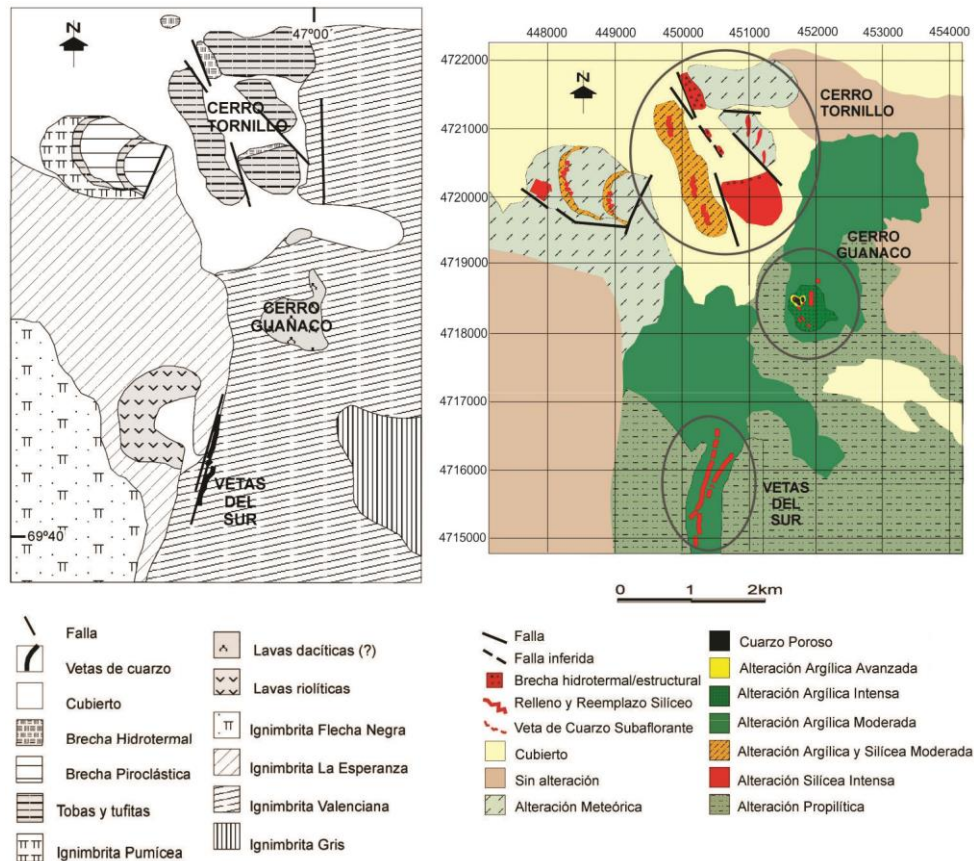


Figura 6: Mapa Geológico simplificado (izq.) y mapa de alteraciones (der.) para el área Estancia La Esperanza, tomado de Mykietiuik et al., (2002) y Marchionni y Mykietiuik, (2005).

4. FUNDAMENTACIÓN

Las alteraciones hidrotermales son un blanco a la hora de realizar una prospección de depósitos de origen hidrotermal con importancia económica, es por ello, que la utilización de imágenes ópticas multiespectrales, en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (GIS), se han vuelto una herramienta fundamental, complementaria al trabajo de campo para dicho fin. Con la implementación de estas técnicas en las etapas tempranas de exploración de depósitos hidrotermales, se consigue delimitar un área más precisa en el campo de probables ocurrencias de minerales de alteración, al igual que el reconocimiento de características estructurales favorables para la formación de yacimientos económicos, como posibles trampas estructurales.

La circulación de fluidos a altas temperaturas, agua, vapor o gas, genera cambios en la composición química y mineralógica de las rocas. Estos fluidos, llamados fluidos hidrotermales, contienen distintos rangos de pH y temperaturas, y a medida que se ponen en contacto con el material circundante, generan un cambio en el equilibrio de estos materiales, llevando a las rocas y minerales a nuevas condiciones de equilibrio, manifestándose en lo que se conoce como alteración hidrotermal. Estos fluidos tienen distintos orígenes, pudiendo ser magmáticos, meteóricos, metamórficos, sedimentarios o mezclas de agua y son capaces de transportar metales en solución y otros compuestos hasta que las condiciones permitan su depositación.

El tipo de alteración hidrotermal está controlada por factores como temperatura -a mayor temperatura mayor alteración, a pH más ácido mayor alteración-, así como también por la permeabilidad de la roca, la duración de la interacción del fluido con la roca, la composición de la roca o la presión (que es capaz de controlar la profundidad de ebullición), el fracturamiento hidráulico, etc., mientras que los procesos que genera la alteración pueden ser: una deposición directa, donde los minerales que se transportan en solución se depositan directamente si la permeabilidad de la roca lo permite, también puede generar reemplazos, que afectan parcial o totalmente a las rocas que sean inestables ante esas nuevas condiciones del ambiente hidrotermal, generándose nuevos minerales estables o metaestables, o puede producirse una lixiviación, donde algunos componentes solubles de las rocas son extraídos por fluidos muy ácidos. A su vez, las alteraciones pueden afectar con distinta intensidad a las rocas, variando el grado de alteración, pudiendo ser débil o poco penetrativa, penetrativa o selectiva.

Existen distintos modelos acerca de la distribución que puede tener una alteración hidrotermal, entre los más característicos está el de la zonación, que puede estar condicionada por gradientes de temperatura por ejemplo. Un modelo conocido es el que propone Ashley (1974) para el *Goldfield mining district* (Figura 7).

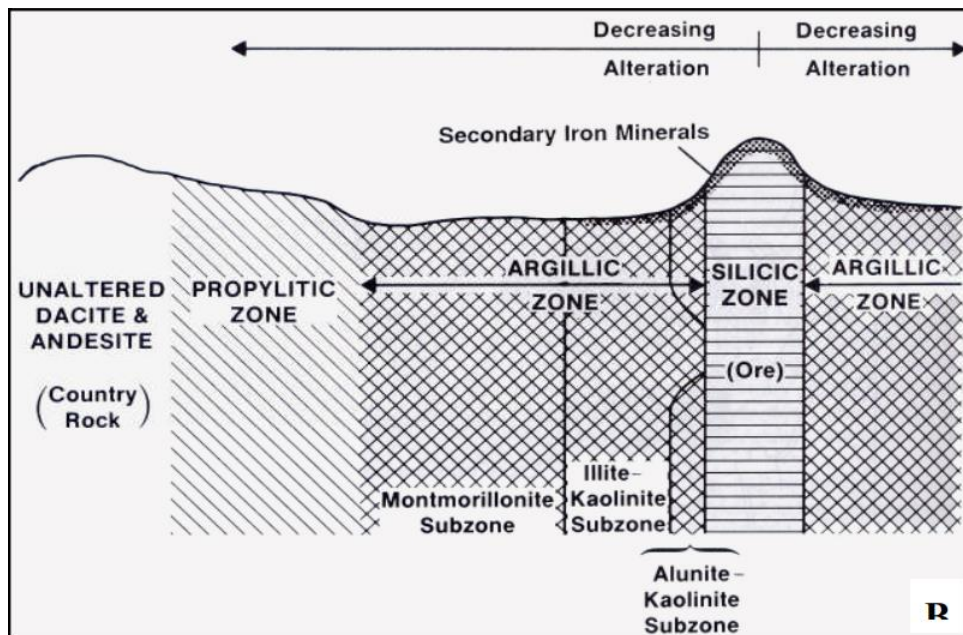


Figura 7. Zonación hidrotermal típica del *Goldfield mining district* (Ashley, 1974).

Si bien en este trabajo se realiza un enfoque en el área de prospección minera, las imágenes satelitales no solo se abocan a esta finalidad, sino también a la detección del estado de la vegetación hasta el monitoreo y clasificación de riesgos en territorios urbanos.

A pesar de la gran cantidad de satélites en órbita y de los distintos tipos de sensores que cada uno tiene, encargados de detectar la radiación electromagnética de los materiales de la superficie terrestre, en este trabajo los sensores utilizados para la detección de zonas de alteración fueron Landsat 7 ETM+ y ASTER de TERRA, los cuales presentan distintas características, pero con ambos se logra una identificación de las zonas de alteración.

Ambos sensores poseen órbitas heliosincrónicas, casi polares, observando distintas zonas de la Tierra, de manera tal que su trazado puede recorrer latitudes decrecientes en el hemisferio norte y aumentar en latitud en el hemisferio sur (órbitas descendentes), y contrariamente, el

trazado puede disminuir en latitud en el hemisferio sur e incrementar en el hemisferio norte (órbitas ascendentes). La órbita ascendente recorre en el lado en sombra de la tierra y la órbita descendente recorre el lado iluminado, permitiendo la adquisición de estas imágenes.

Sea cual fuere el sensor seleccionado para realizar el tratamiento para la prospección de depósitos minerales, las imágenes que se utilicen deben ser tratadas con un pre-procesamiento y ser transformadas en valores de radiancia y/o reflectancia para corregir los efectos atmosféricos, al igual que un proceso de geo-referencia y orto-rectificación. Una vez terminado los pre-procesamientos, se utilizan distintas técnicas de cocientes de bandas, componentes principales y clasificación digital para obtener información de las alteraciones o minerales de interés.

Las técnicas empleadas para obtener esta información tienen su base en el conocimiento de las firmas espectrales de los minerales de alteración, concepto que se explica más adelante.

4.1. Imágenes Landsat-7

El sensor ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), sucesor del sensor TM de Landsat-5, incorporó una octava banda (banda pancromática) entre el rango 0,52-0,90 μm del espectro electromagnético, con una resolución espacial de 15 m, permitiendo obtener información más detallada del terreno. Los avances tecnológicos en Landsat-7 permitieron obtener buenos resultados a una escala de 1:25.000, siendo altamente recomendable su uso en exploración regional ya que su escena cubre un ancho de 185 x 185 km. Las principales características técnicas de estas imágenes se detallan en el Cuadro I.

Satélite	Band N°	Rango Espectral (μm)	Resolución Espacial (m)
Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM ⁺)	1 (azul)	0.45 – 0.52	30
	2 (verde)	0.52 – 0.60	
	3 (rojo)	0.63 – 0.69	
	4 (IR cercano)	0.76 – 0.90	
	5 (IR medio)	1.55 – 1.75	
	7 (IR medio)	2.08 – 2.35	
	6 (IR térmico)	10.4 – 12.5	60
	8 (pancromática)	0.58 – 0.90	15

Cuadro I: Características técnicas del sensor Landsat 7 ETM⁺.

4.2. Imágenes ASTER

El sensor ASTER (*Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) a bordo del satélite TERRA, con una resolución espacial y espectral superior en el dominio del infrarrojo cercano y medio y con la incorporación de varias bandas espectrales en el térmico, se han convertido en la herramienta de exploración más utilizada (Pour y Hashim, 2012). ASTER tiene un mejor aprovechamiento que Landsat para la identificación de minerales de alteración hidrotermal debido a que tiene mejor resolución espectral en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR).

Está constituido por tres subsistemas (telescopios) independientes (Cuadro II): VNIR (visible e infrarrojo cercano), SWIR (infrarrojo de onda corta) y TIR (infrarrojo térmico). Estos tres subsistemas conforman un total 14 bandas con longitudes de onda desde el visible (0.5 μm) hasta el infrarrojo térmico (11.6 μm) (SEGEMAR, 2005).

ASTER consta con un cuarto telescopio en la región del visible-infrarrojo cercano VNIR, que es utilizado en posición vista atrás para generar la visión estereoscópica (ERSDAC, 2007).

Subsistema	Band N°	Rango Espectral (µm)	Resolución Espacial (m)	Niveles de cuantificación
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3b	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
TIR	9	2.360-2.430	90	12 bits
	10	8.125-8.475		
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Cuadro II: Características técnicas del sensor ASTER de TERRA.

4.3. Firmas Espectrales

La interacción existente entre los objetos situados en la superficie de la Tierra y el sensor, nos permite obtener información a distancia de los objetos, áreas o fenómenos, ya sea agua, suelo, vegetación, roca, etc., y a esto es lo que conocemos como teledetección. Esta adquisición de información es posible gracias a la interacción de la radiación electromagnética con los materiales de la superficie terrestre y los sensores que la detectan. Esta radiación electromagnética es un flujo de energía que puede proceder de fuentes externas como la luz solar interactuando con el objeto, como también radiación de los mismos objetos de la superficie terrestre o incluso por el sensor. Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (Chuvienco, 2008).

La principal fuente de energía considerada es la radiación solar, la cual, parte puede ser reflejada por la superficie, parte absorbida o también transmitida a otros objetos. La proporción de la energía incidente que es reflejada, absorbida o transmitida por una superficie, depende de las características de la superficie así como también de la longitud de onda del flujo.

El comportamiento reflectivo de una superficie en las distintas longitudes de onda queda expresado en la signatura o firma espectral. La firma espectral de cada objeto dependerá de factores propios como son: composición química del material, composición mineralógica, arreglos especiales (textura), variaciones locales, tales como grado de meteorización de la roca, desarrollo de suelo, presencia de vegetación, contenido de humedad, etc., y variaciones ambientales como condiciones de iluminación solar, cambios de relieve, condiciones atmosféricas, etc.

4.3.1. Firmas espectrales en minerales y rocas

Para la mayoría de los materiales de la Tierra, los procesos vibracionales atómico-moleculares ocurren en la región del SWIR y TIR (Gupta, 1991). Grupos importantes de minerales muestran características espectrales debido a estos procesos vibracionales como son los silicatos, carbonatos, hidroxilos, fosfatos, sulfatos, nitratos, etc.

Muchas de las firmas espectrales de los minerales y rocas se vinculan con la composición química y estructura cristalina de los mismos. Los rasgos espectrales característicos dependen de los procesos electrónicos que ocurren en su interior, como consecuencia de su constitución aniónica y catiónica (Gupta, 1991; Drury, 1993).

El análisis de la firma espectral de un mineral de interés o el patrón espectral de los minerales de alteración, es de gran utilidad al momento de realizar cocientes entre bandas y para el análisis de componentes principales. Una característica importante a analizar en la firma espectral de un mineral son los rangos espectrales diagnósticos, identificando en que banda hay una mayor absorción, y en cual una mayor reflectancia.

Cada mineral tiene una firma espectral propia, vinculada principalmente a la composición química y estructura cristalina de los mismos, siendo los procesos electrónicos y vibracionales que ocurren en el interior de la estructura cristalina, los factores físicos responsables de generar tal información espectral para la composición de minerales y rocas en la región del visible e infrarrojo cercano (entre 0,4 y 2,5 μm), (Goetz and Rowan, 1981). Esta región se caracteriza por altos valores de reflectancia y absorción en la mayoría de los tipos de rocas y minerales, relacionadas con el color natural de las mismas, siendo condicionadas por presencia de patinas recubriendo su superficie. Este comportamiento también se observa en el infrarrojo de onda corta.

Por otra parte, la región del infrarrojo térmico, la radiación emitida depende de las propiedades físicas volumétricas, donde la información obtenida proviene de los primeros 10 cm de la superficie, independientemente de la presencia de patinas e incrustaciones.

4.3.2. Región del Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)

Las características espectrales en esta región del espectro, están dominadas por las transiciones electrónicas de iones metálicos, como el Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, etc., que exhiben cambios de nivel de energía electrónica. El hierro es el elemento más importante a ser considerado en esta región. El ion ferroso en el Fe-O exhibe una fuerte absorción en las longitudes de onda más cortas por efecto de transferencia de carga, resultando en un descenso de la reflectancia hacia el azul y un ascenso general hacia el infrarrojo, con un máximo entre los 1.3 y 1.6 μm . Asimismo, por efecto del campo cristalino se producen rasgos de absorción a distintas longitudes de onda. El ion Fe^{+3} presenta rasgos de absorción a los 0.4, 0.5, 0.7 y 0.87 μm , mientras que el ion Fe^{+2} presenta absorciones a los 0.43, 0.45, 0.57, 0.55, 1.0 μm y entre 1.8 y 2.0 μm . De estos rasgos de absorción, los más frecuentes para óxidos e hidróxidos de hierro se producen a los 0.87 μm , mientras que para los minerales ferromagnesianos, a los 0.7, 1.0 y 1.8 μm (Gupta, 1991).

4.3.3. Región del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)

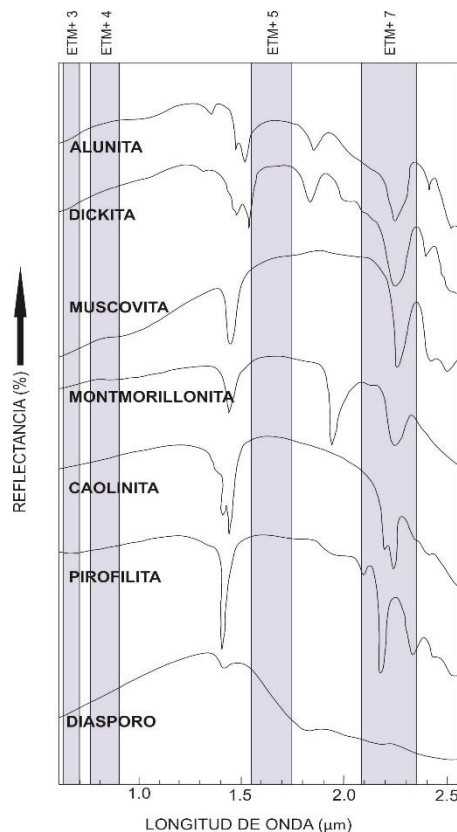
Esta región se distingue por las características espectrales de muchos constituyentes iónicos comunes de minerales como los hidroxilos, carbonatos fosfatos, etc. La localización exacta de los picos puede cambiar por efectos del campo cristalino (Gupta, 1991). Los principales grupos aniónicos cuyas respuestas se manifiestan en esta región corresponden a los iones hidroxilos, que

presentan una banda de absorción por efectos vibracionales alrededor de los 2.77 μm a 2.77 μm y una secundaria a los 1.44 μm .

Cuando los iones OH^- están combinados como Al-OH y Mg-OH (arcillas y silicatos hidratados) se producen rangos de absorción entre los 2.1 y 2.4 μm (a los 2.2 μm para Al-OH y a los 2.3 μm para Mg.OH), (Figura 8). Si ambas combinaciones están presentes, generalmente se genera un pico alto a los 2.3 μm y un pico débil a los 2.2 μm , como en la caolinita. En comparación con esto, la montmorillonita y muscovita exhiben solo una banda de absorción, a los 2.3 μm .

El hierro puede sustituir tanto al Al como al Mg, reduciendo la intensidad de absorción de los 2.2 del Al-OH y de los 2.3 μm del Mg-OH y aumenta la intensidad de la absorción provocada por el Fe entre 0.4 y 1.0 μm .

El grupo mineral de los carbonatos (calcita, magnesita, dolomita y siderita), exhiben rangos de absorción a los 1.9 μm , 2.0 μm , 2.16 μm , y 2.55 μm (todos en la región del SWIR), producidos por la combinación de procesos vibracionales que ocurren en el infrarrojo medio y bandas de absorción suplementarias en el infrarrojo de onda corta. El pico que se presenta a los 1.9 μm puede interferir con el del agua de igual posición y el de los 2.5 μm con el de las arcillas. En los casos de confusión, la presencia de un rasgo de absorción adicional a los 2.35 μm puede ser el diagnóstico de la presencia de carbonatos.



Las moléculas de agua muestran rasgos de absorción a los 3.1 μm , 6.08 μm , 2.092 μm y rasgos suplementarios característicos a los 1.4 μm y 1.9 μm . Los picos bien netos implican que las moléculas de agua se producen en sitios bien definidos y cuando los picos son amplios, significa que no presentan un ordenamiento.

Los silicatos, fosfatos, óxidos, sulfatos, nitratos, etc., no presentan bandas características en la región del SWIR. Sin embargo, las características principales se presentan en la región del TIR.

Figura 8. Rasgos espectrales típicos de los minerales portadores de OH^- (grupo de las micas, arcillas y sulfatos). Adaptado de Rowan et al., 1983 en Gupta, 1991.

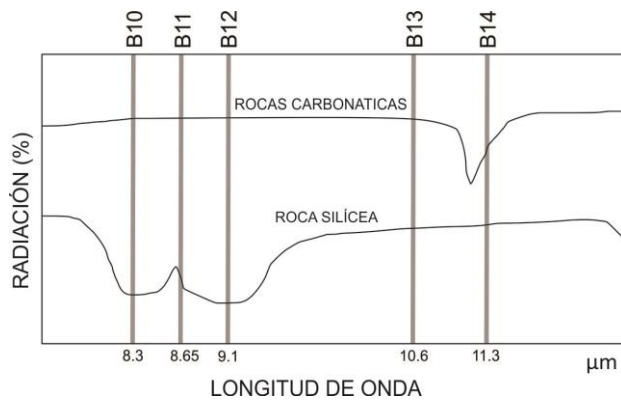
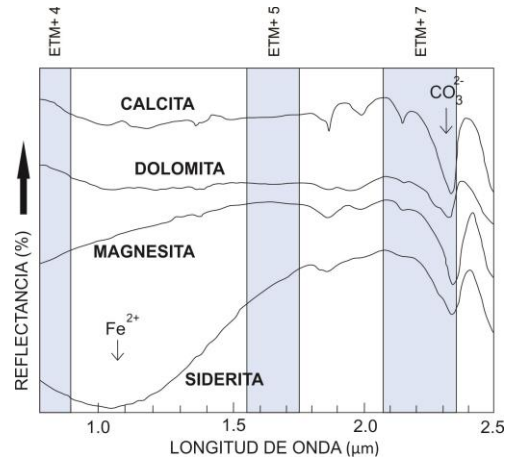
4.3.4. Región del Infrarrojo Térmico (TIR)

En esta región del espectro los rasgos útiles para la teledetección se encuentran entre los límites 8 y 14 μm . El rango del infrarrojo térmico se caracteriza por la presencia de rasgos de absorción característicos de los minerales formadores de rocas. Los rasgos espectrales

fundamentales de esta región se relacionan con la composición aniónica y con el tipo de unión molecular. Las propiedades físicas como el tamaño de partícula y el empaquetamiento pueden producir cambios en el espectro de emisión, registrándose en la intensidad relativa de absorción, pero no en la posición de los rasgos (Gupta, 1991).

Los carbonatos muestran su principal rasgo de absorción alrededor de los 7 μm , por la vibración del anión carbonato y también un rasgo más débil alrededor de los 11.3 μm (Figura 9). Dado que a los 7 μm cae fuera de la ventana atmosférica, que se extiende entre los 8 y 14 μm , este rasgo no puede ser detectado, pero sí el rasgo de absorción de los 11.3 μm , utilizando la banda 13 de ASTER.

Figura 9: Rasgos espectrales de carbonatos tomado de Gupta, 1991.



Los minerales del grupo de la sílice, al igual que los otros tectosilicatos (Figura 10), presentan un comportamiento espectral característico en el infrarrojo térmico (8-12 μm), que responde al tipo de unión Si-O (Ninomiya, 2002).

Figura 10. Espectro de rocas carbonáticas y silíceas para el TIR. Extraído de Ninomiya, 2002.

En la Figura 11 se ilustran las firmas espectrales de los minerales que resultan de interés para esta investigación, las cuales fueron tomadas y analizadas de la *Digital Spectral Library* del software ENVI (biblioteca espectral del USGS).

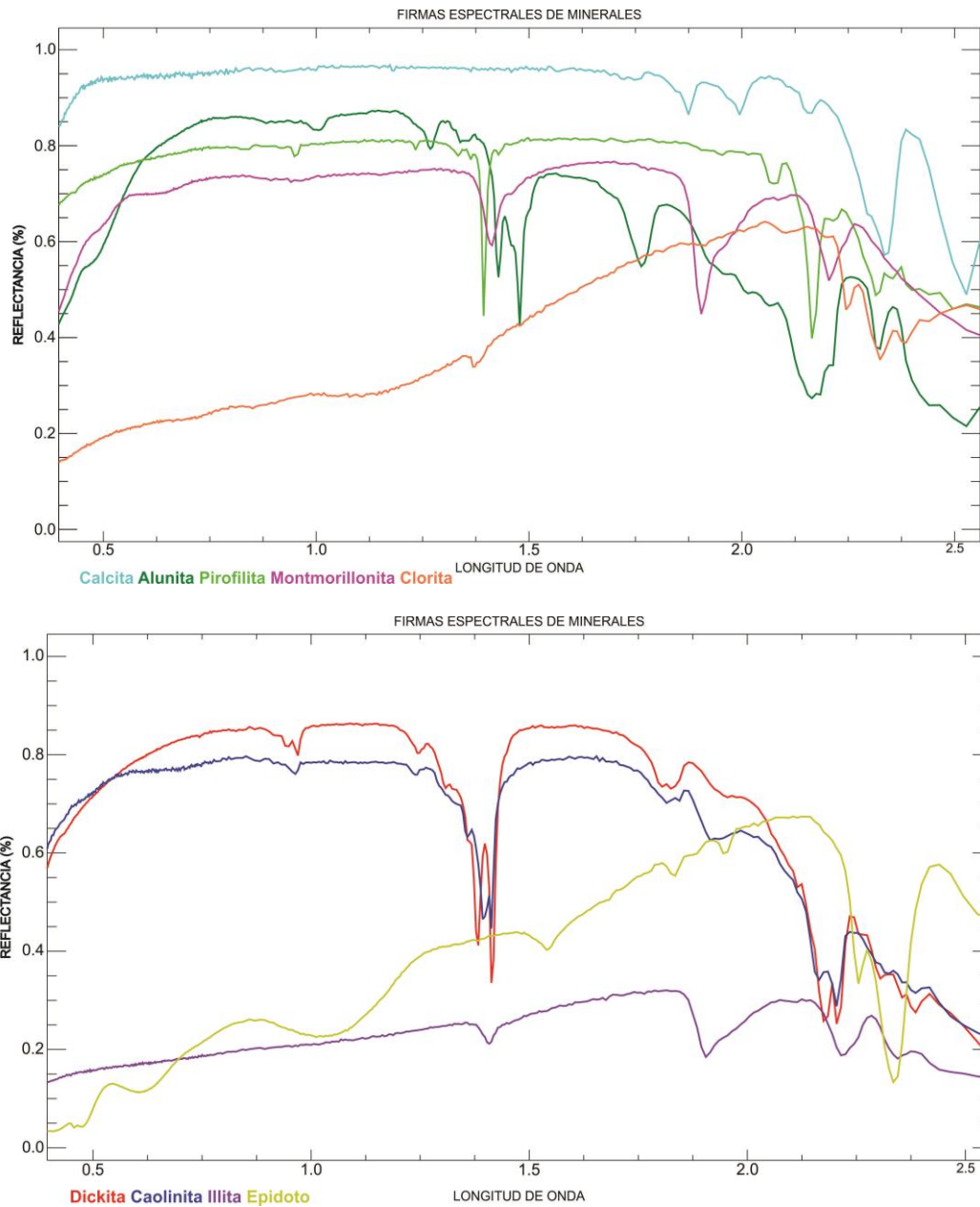


Figura 11. Firmas espectrales de minerales diagn3sticos de las alteraciones, en donde se relaciona el % de reflectividad para cada longitud de onda a lo largo del espectro electromagn3tico.

Estas mismas firmas espectrales fueron re-muestreadas para los intervalos de Landsat 7 ETM⁺ y ASTER, en donde cada punto de inflexi3n refleja el centro de banda de cada canal (Figura 12).

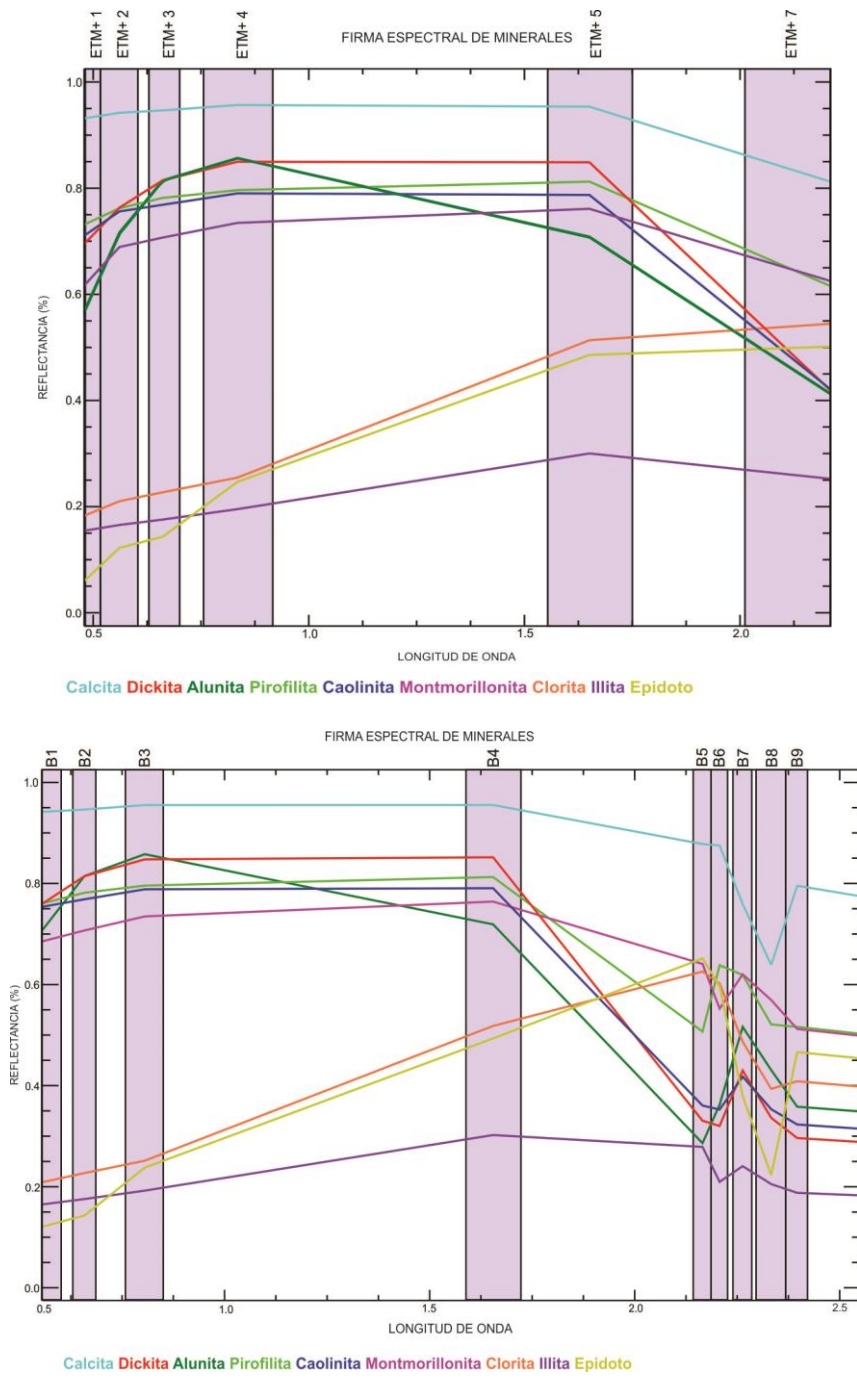


Figura 12. Firmas espectrales de los minerales diagnósticos de alteraciones, re-muestreadas a las bandas de Landsat 7 ETM+ (sup.) y a las bandas ASTER (inf.).

En la gráfica anterior, queda en evidencia la ventaja del sensor ASTER en el infrarrojo de onda corta (SWIR) con respecto al sensor ETM+ de Landsat 7. Dado que el primero tiene 5 bandas que trabajan en esta región del espectro, es capaz de captar las distintas respuestas y variaciones de las mismas de los objetos de la superficie terrestre, en este caso, minerales. Una mayor cantidad de bandas en una porción del espectro, y un intervalo más estrecho de las mismas, favorece una mejor detección de los rasgos espectrales diagnósticos de los minerales.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La primera etapa de desarrollo del Trabajo Final de Licenciatura (TFL) contó con la revisión bibliográfica, cartográfica y la selección de imágenes de la zona de estudio.

En las oficinas del Instituto de Recursos Minerales (INREMI) se procedió a la selección de las imágenes de trabajo iniciándose con la revisión de catálogos de distribución gratuita de imágenes satelitales, seguida de la selección y descarga de las imágenes disponibles para el área del Macizo del Deseado, Santa Cruz.

Con los datos Path y Row se buscaron las imágenes, las cuales fueron descargadas de las páginas GLCF (*Global Land Cover Facility*) y USGS (*United States Geological Service*).

Para cubrir el área de trabajo -que comprende las zonas de La Aragonesa-El Puntudo, La Manchuria, San Pedro-La Evelina y Estancia La Esperanza- fue necesaria la utilización de dos imágenes ETM⁺ del satélite Landsat 7 para poder cubrir la extensión completa del área y tres imágenes ASTER nivel 1T, del satélite TERRA.

Se ingresaron los datos de Path y Row correspondientes, (229/093 para la del Norte y 229/094 para la del Sur), en el sitio web de GLCF y se descargaron dos imágenes Landsat 7 ETM⁺ (bandas multiespectrales y pancromáticas) de diciembre del 2001 y febrero del 2002 respectivamente. No fue necesaria la rectificación geométrica de las imágenes dado que estas ya estaban rectificadas, pero sí la reproyección, dado que estaban en **UTM zona 19 Datum WGS84**, por lo que fueron re proyectadas a **Gauss Kruger Zona 2 Datum WGS84**.

Las características de las imágenes utilizadas se detallan en el Cuadro III.

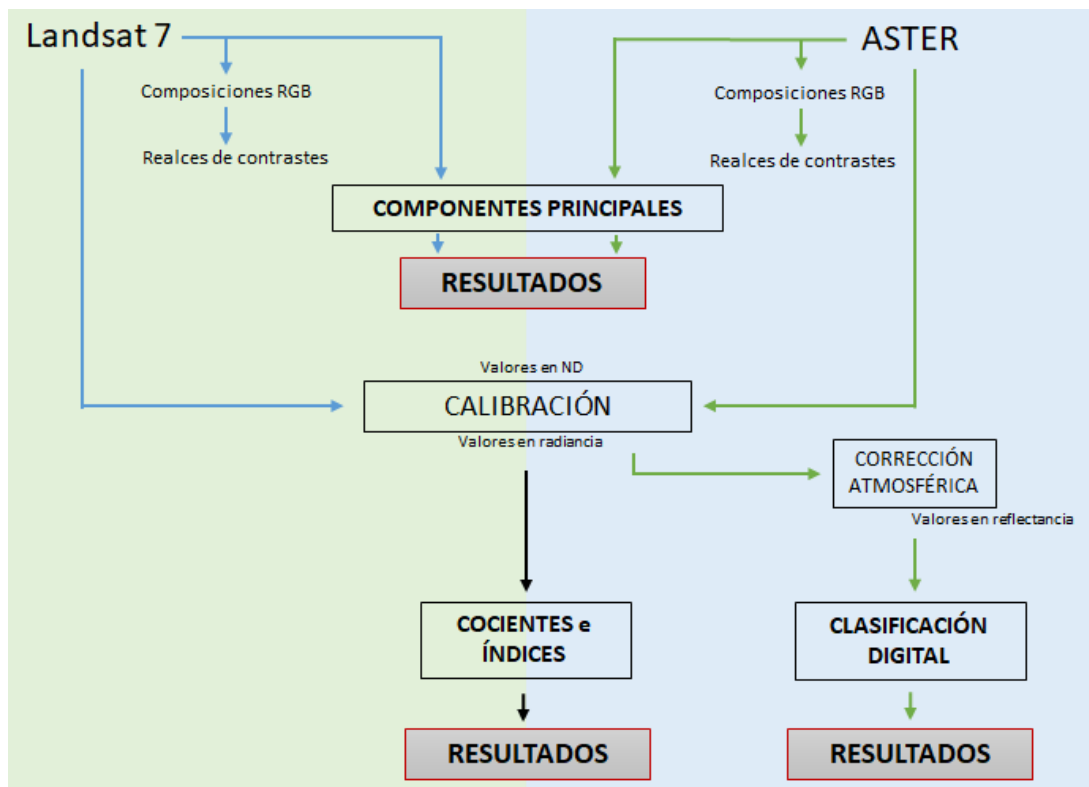
	Landsat 7 (ETM⁺)		TERRA (ASTER L1T)		
Fecha de adquisición	diciembre 2001	febrero 2002	Marzo del 2002		
WRS (Path/Row)	229/093 (norte)	229/094 (sur)			
Ancho de barrido	170 x 198 kilómetros		63 x 74,7 kilómetros		
Tamaño de la imagen	5965 líneas x 6967 píxeles		4980 x 4200	2490 x 2100	830 x 700
Resolución espacial	28,5 metros		15 m	30 m	90 m
Resolución espectral	7 bandas		3 bandas (VNIR)	6 bandas (SWIR)	5 bandas (TIR)
Resolución temporal	14 días		16 días		

Cuadro III: Características de las imágenes ópticas multiespectrales utilizadas.

A su vez, fueron facilitados por el Instituto de Recursos Minerales, el mapa geológico de la Provincia de Santa Cruz de la Secretaría de Minería de Argentina, a una escala de 1:750.000, al igual que las Hojas Geológicas de Destacamento La María y Gobernador Gregores. Tanto el mapa geológico de Santa Cruz como las hojas geológicas fueron georeferenciados y re proyectados a **Gauss Kruger Zona 2 Datum WGS84** mediante el software Global Mapper.

Se decidió trabajar primero con las imágenes Landsat 7 y hacer todo el procesamiento de estas imágenes, para luego poder contrastar o mejorar los resultados con las imágenes ASTER, dado que de estas últimas podemos obtener un mejor resultado en cuanto a tipo de alteraciones se refiere. Con las imágenes Landsat es posible identificar las zonas con arcillas pero debido a la posición y ancho de sus bandas en el infrarrojo cercano, no es posible la identificación clara de los tipos individuales de arcillas. Con las 5 bandas en el SWIR (infrarrojo de onda corta) que presenta el sensor ASTER, si es posible identificar minerales de alteración como dickita, pirofilita, alunita, caolinita, illita-sericita, montmorillonita, etc. Las bandas del TIR (infrarrojo térmico) de ASTER son de gran utilidad a la hora de la identificación de minerales del grupo de la sílice y carbonatos.

Los principales procesamientos realizados se resumen en el siguiente diagrama de flujo:



5.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT 7 ETM*

5.1.1. Generación del Mosaico Digital

El primer paso para el análisis de las imágenes de Landsat 7 consistió en la generación de un mosaico digital para cada una de las bandas de las imágenes norte y sur con el fin de solaparlas dado que las áreas de estudio están presentes en ambas imágenes (figura 13). Dado que la imagen sur presenta una mejor visualización con respecto a la norte, se decidió elegirla como imagen “fijada” (piloto) mientras que la imagen norte se “ajusta” a la sur. Se ejecutó este procedimiento para todas las bandas multiespectrales y pancromática. Como se mencionó anteriormente, la rectificación del mosaico digital no fue necesaria, pero sí la reproyección del mismo.

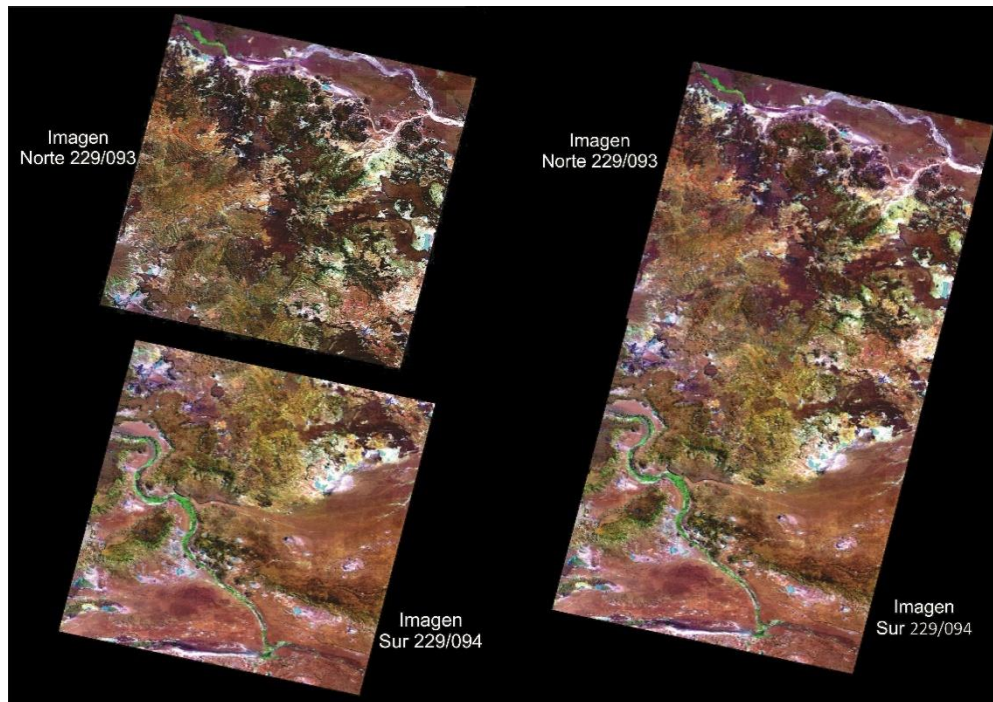


Figura 13: Imágenes Landsat 7 originales Georeferenciadas (izq.) y mosaico digital (der.).

5.1.2. Fusión o "merge" de bandas

Para una mejor visualización del resultado final del mosaico, ya que se contaba con la banda 8 (banda pancromática), la cual cuenta con una resolución espacial mayor, el mosaico fue remuestreado a un pixel de 15 m y se realizó una fusión o "merge" con la banda pancromática para aprovechar la mayor resolución espacial de la misma.

5.1.3. "Familiarización" con el área de estudio

Se llevó a cabo una tarea de reconocimiento del área mediante la interpretación visual de las cartas geológicas y la lectura de trabajos realizados por distintos científicos en distintas regiones del Macizo del Deseado, a modo de reconocer y ubicar los caminos, cerros y estancias, y familiarizarse con las litologías que fueron estudiadas en los trabajos publicados por los mismos profesionales. Con el *software* Global Mapper se generó la toponimia para el área de trabajo.

5.1.4. Generación de imagen RGB

Las imágenes en composición color RGB fueron utilizadas con el objetivo de hacer un reconocimiento del lugar de trabajo, acompañado con la lectura bibliográfica correspondiente.

Se generaron diferentes composiciones color para usar como base en la interpretación geológica del área, preparando distintas combinaciones de bandas, para así ser seleccionadas las combinaciones RGB más apropiadas. Estas fueron: RGB 321 (color real), 531 (falso color) que realza la topografía y 741 (falso color), siendo ésta última la más utilizada dado que es la que mejor permite observar las propiedades geológicas y, en particular, discriminar litologías.

Para una mejor interpretación visual de las composiciones RGB creadas, se aplicaron realces de contraste, mejorando la visualización de las imágenes (Figura 14). En este caso se realizó un realce lineal 2%, el cual produce una mejora en el contraste de la imagen, al llevar los valores mínimo y máximo del histograma a los valores extremos de nivel de gris (negro-blanco).

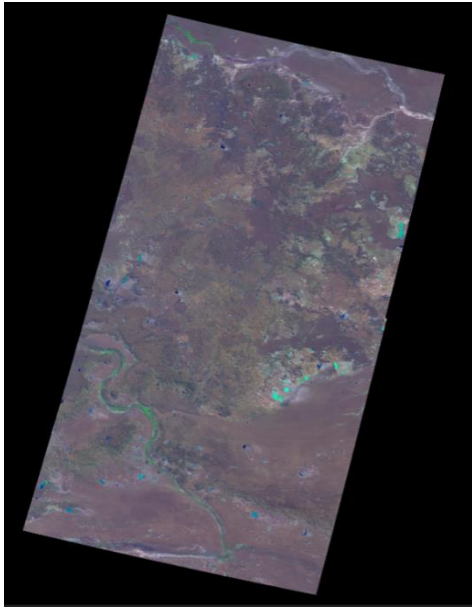


Imagen RGB 741 sin realce



Imagen RGB 741 con realce lineal 2%

Figura 14: Imagen RGB de la zona de estudio que muestra la mejora en la visualización de la misma aplicando el realce lineal 2%.

5.1.5. Corrección por calibración

Antes de generar los cocientes de bandas para analizar alteraciones en el sector de estudio, se procedió a las correcciones por calibración radiométrica de las imágenes Landsat 7.

La calibración radiométrica permite convertir los valores originales de cada pixel (Niveles Digitales o ND) a valores de radiancia. A su vez, se logra remover el efecto de diferente ángulo de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra-Sol, producida debido a las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes. En general con esta corrección se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento captado en la escena. Ya que las imágenes utilizadas en este trabajo son de fechas distintas, es conveniente aplicar la corrección dada las diferencias de valores de radiación solar, buscando minimizar los errores que influyen en el valor radiométrico de cada elemento de la escena.

Para llevar a cabo esta tarea se precisaron los datos del metadata descargados en conjunto con las imágenes, y con ellos, se verificaron y corrigieron datos como: día de adquisición de la imagen, mes y año, elevación del sol (grados) y la banda en cuestión a corregir. Este procedimiento se realizó banda por banda para las dos imágenes 229/093 del Norte y 229/094 del Sur. Una vez corregidas las imágenes, se generó un nuevo mosaico con las imágenes de radiancia.

5.1.6. Generación de cociente entre bandas

La técnica de cociente entre bandas ha sido un método de exploración de depósitos hidrotermales muy utilizada, basada en la respuesta espectral de las características superficiales de los mismos, dado que la ocurrencia de rocas alteradas hidrotermalmente son un “blanco” al momento de prospectar este tipo de depósitos. Las imágenes de cocientes han sido estudiadas en detalle y utilizadas por numerosos autores y empleadas satisfactoriamente en distintos ambientes geológicos, como estrategia de base para la exploración minera (Podwysocki et al., 1985; Kaufmann, 1989; Kruse, 1989; Eiswerth y Rowan, 1993; Spatz y Taranik, 1994; Harris et al., 1998, entre otros).

El mapeo de rocas alteradas hidrotermalmente ha sido posible con el uso de los sensores de los satélites, que pueden detectar las respuestas espectrales de los grupos de minerales típicos de alteración en franjas del espectro electromagnético, como el visible, infrarrojo cercano y medio. Las imágenes del satélite Landsat, son utilizadas para el mapeo de grupos de minerales como arcillas, sulfatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos de Fe, etc.

Para el análisis de zonas de alteración en el área de estudio, se llevó a cabo la metodología de cociente entre bandas, la cual implica una división, pixel a pixel, entre los ND de dos bandas multispectrales, con el propósito de mejorar la respuesta de los minerales y reducir la respuestas de otros materiales o de la vegetación. Con esta metodología se buscó aumentar la respuesta de las arcillas y óxidos.

Los cocientes elegidos para el tratamiento fueron 3/1 y 5/1 para los óxidos e hidróxidos de Fe y 5/7 para los hidroxilos (arcillas). Para detectar la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, se tiene en cuenta la fuerte absorción de estos minerales en la región azul del espectro (ETM⁺¹), la cual contrasta con una respuesta más elevada en la región del rojo (ETM⁺³). (Figura 15a) A su vez, en el infrarrojo medio (ETM⁺⁵), estos minerales también tienen una respuesta elevada, por lo que se utiliza este cociente para su detección (Figura 15b). También en este cociente, la respuesta de los óxidos e hidróxidos de hierro puede ser confundida o enmascarada por la presencia de cuarzo -de respuesta espectral elevada en todo el espectro, particularmente en el infrarrojo medio- o por minerales del grupo de las arcillas.

En el caso de las arcillas, estas tiene respuestas características en el infrarrojo medio, presentan una reflectancia elevada en la banda ETM⁺⁵, contrastando con una importante absorción en la banda ETM⁺⁷ (Figura 15c). También se realizó el cociente de vegetación 4/3 y el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). La respuesta de la vegetación es más alta en el infrarrojo cercano (ETM⁺⁴) y desciende hacia el visible (ETM⁺³) por la absorción de la clorofila y presenta un pico en el verde (ETM⁺²) (Figura 15d).

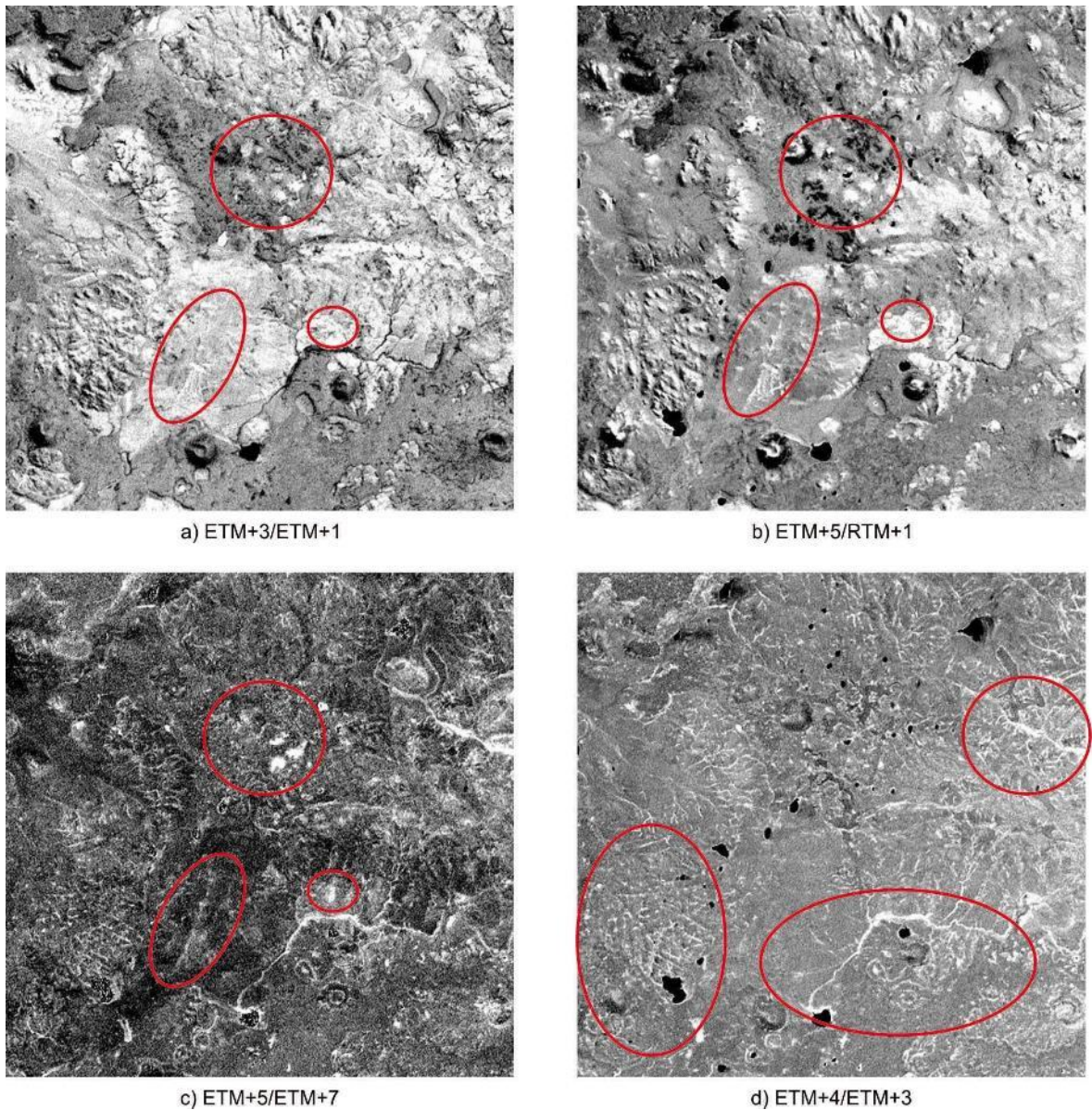


Figura 15. Imagen de los cocientes entre bandas utilizados en el área de La Manchuria para realzar la presencia de óxidos de hierro (a-b), arcillas (c) y vegetación (d). Los materiales que se busca realzar con estos cocientes se ven en las imágenes con tonos más claros.

Luego estas imágenes fueron combinadas para crear una composición RGB para poder visualizar mejor las zonas con alteración hidrotermal, usándose las combinaciones más representativas (Figura 16).

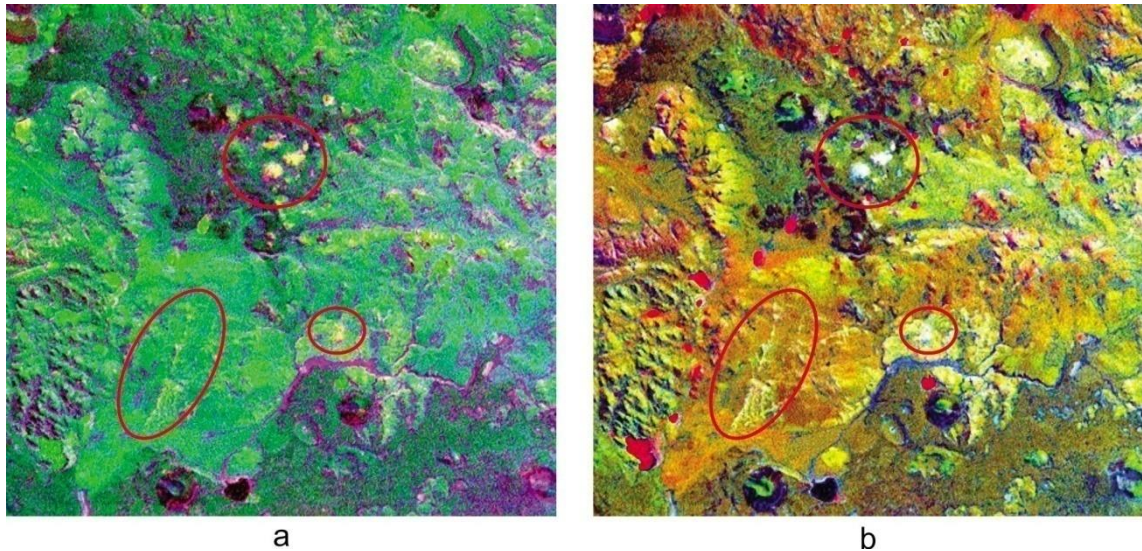


Figura 16: Composiciones color de cocientes entre bandas: a) composición RGB 5/7 – 3/1 – 4/3, las áreas de alteración se visualizan en tonos amarillentos y b) composición RGB 3/1- 5/1 – 5/7, las alteraciones se ven blanquecinas.

5.1.7. Segmentación de densidades

La segmentación de densidades (*Density Slicing*) es una técnica de tratamiento digital que hace posible asignar un color a cada rango de ND en una imagen. Lo que se busca es poner en preeminencia aquellos niveles digitales que caen dentro de un intervalo definido.

El objetivo de la segmentación de densidades fue circunscribir las zonas donde el cociente daba valores más altos, dado que las mismas corresponderían a las zonas con mayor intensidad de la alteración, siendo aplicada la técnica sobre imágenes de Cociente entre Bandas, principalmente 5/7 de las arcillas.

Para ello, se tomó como referencia el trabajo Marchionni y Mykietiuik (2005). A partir del mapeo generado en ese trabajo, se utilizó como área piloto el Cerro Tornillo y Cerro Guanaco de la zona de La Esperanza, identificándose las áreas con alteración argílica.

Se tomaron los valores estadísticos, y así se definió que para valores menores a 1,2649, los píxeles sean resaltados en color azul oscuro, mientras que aquellos píxeles con valores mayores a 1,265, tendrán un color rojo.

El density slicing creado no arrojó buenos resultados visuales por el hecho de que la vegetación tiene rangos de absorción similares a las arcillas, llevando a la confusión en algunas zonas, donde podría pensarse que hay presencia de alteración argílica (Figura 17 a).

Para constatar la presencia de vegetación en esas zonas se generó un NDVI y se buscó en la imagen de cociente de arcilla el umbral de los sectores con vegetación. A posteriori para poder enmascarar la vegetación y eliminar la confusión se utilizó un lenguaje de programación que involucra el cociente de arcilla 5/7 y el valor del umbral (*if (%1>-0.05) then %3=0; else %3=%2; end if;*). Al aplicar esta máscara sólo se visualizan las áreas con alteración (Figura 17b).

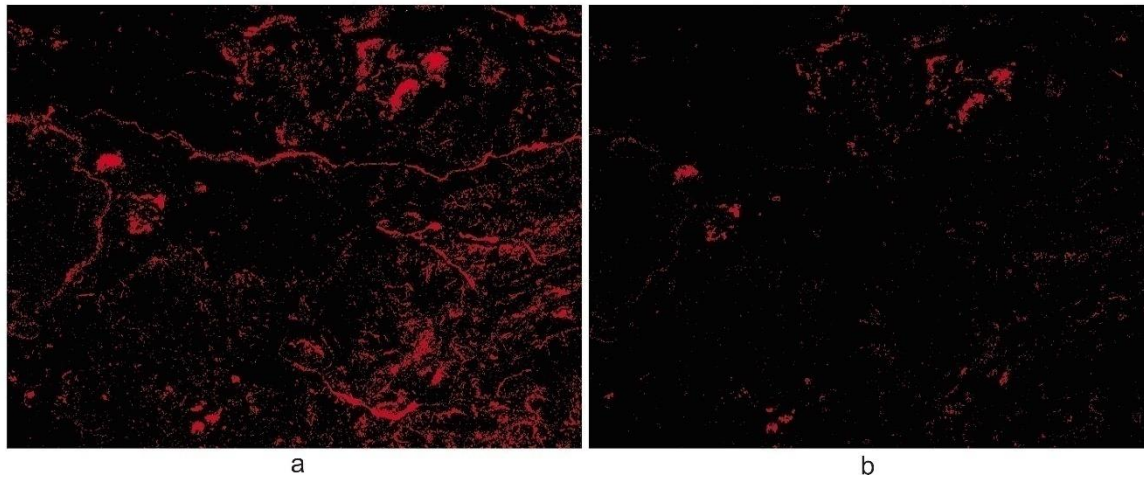


Figura 17. Resultados del *density slicing* aplicado sobre el cociente de arcillas 5/7: a) Se destacan tanto las zonas alteradas al este del Cerro Tejedor como los cursos de agua donde se concentra la vegetación, b) luego de la aplicación de la máscara se destacan sólo las zonas alteradas.

5.1.8. Componentes Principales

El estudio de componentes principales es una técnica de análisis multivalente, que tiene como objetivo principal el de definir una serie de factores que contengan la mayor variabilidad de la imagen original resumida, concentrada en un número reducido de esos factores, las llamadas componentes principales, sin perder una parte significativa de la información original. Es una transformación matemática que genera nuevas imágenes, referidas como componentes o ejes, los cuales son combinaciones lineales de la imagen original. El Análisis de Componentes Principales (ACP) permite al usuario generar un nuevo set de ejes rotados, ortogonales entre si y la nueva imagen no tiene correlación matemática con ninguna otra (Chavez, Jr and Kwarteng, 1989).

A veces, en vez de operar con tantas varianzas como sea posible, el interés está en la información inherente de cada banda. En esos casos, el Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS) tiene que ser usado. La diferencia entre ACP es que éste usa todas las bandas, mientras que ACPS sólo un grupo de ellas. La generación de ACPS para un par de bandas nos da unos resultados visuales interpretativos similares a los cocientes entre bandas. De esta manera, primeramente se realizó el ACP y luego se procedió al ACPS.

Se realizaron las componentes principales con el *software* ENVI. Fueron generados 6 componentes nuevos a partir de la imagen mosaico sin correcciones dado que para trabajar con componentes principales no es necesario la corrección radiométrica previa de las imágenes.

La primer componente (CP1), concentra las propiedades texturales del terreno producto de efecto albedo, y es en esta componente donde se concentra prácticamente toda la información de la imagen, muy similar a una imagen real (Figura 18a).

En el segundo y tercer componente, parece que existe una relación inversa entre ambos, siendo la CP2 la que resalta la respuesta de rocas de composición básica como basaltos mientras que la CP3, rocas de composición más ácidas. (Figura 18b y c).

La CP4 queda registro de la vegetación, adquiriendo una visualización muy similar al cociente de la vegetación 4/3. (Figura 18d).

En la CP5 quedó registrada la menor información de las imágenes, representándose todas las alteraciones, no pudiéndose lograr una diferenciación entre alteración argílica, oxidación o silicificación, todas adquieren las mismas respuestas en este componente. (Figura 18e).

Por último, la CP6, concentra la información residual y el ruido de la imagen. (Figura 18f).

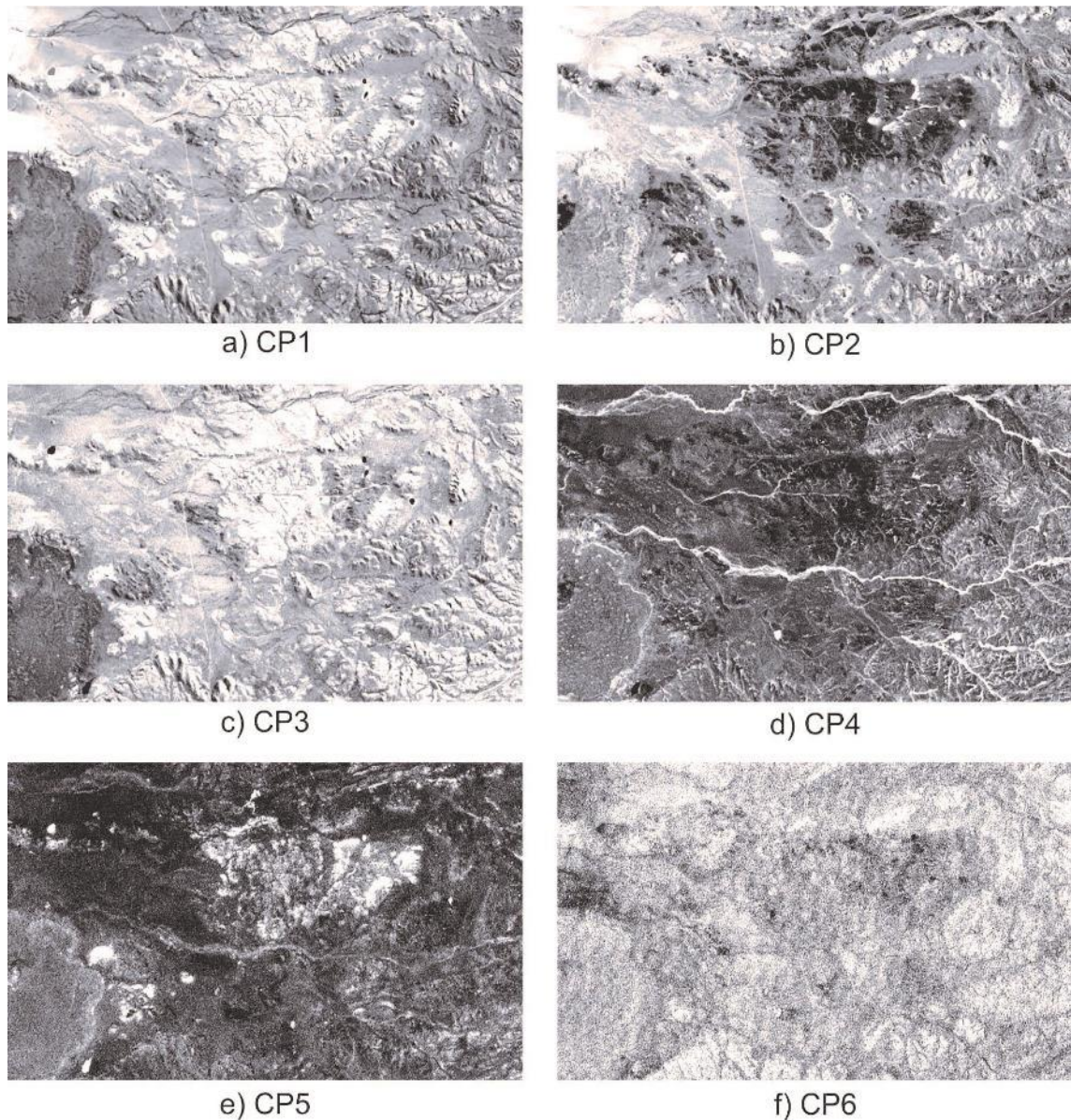


Figura 18: Imágenes de componentes principales en el área de La Aragonesa-El Puntudo.

Dado que el Análisis de Componentes Principales (ACP) no permite visualizar una clara diferencia entre los distintos tipos de alteraciones presentes en el campo, reunidos todos en la CP5, se procedió a realizar la Técnica de Selección de Componentes Principales Orientadas a Rasgos (*Feature Oriented Principal Components Selection*) elaborada por Crosta and Moore (1989). Esta Técnica está enfocada en la identificación de materiales, la cual se basa en el examen de Análisis de Componentes Principales, en cuanto a las cargas o pesos de los eigenvectores

(vectores propios) para decidir en cuál de las Componentes Principales se concentrará la información directamente relacionada con las firmas espectrales teóricas del mineral de interés.

Un aspecto importante de este enfoque es que predice si la superficie del blanco se manifiesta por pixel oscuro o brillante en la componente principal en la cual se concentra esa información. Del análisis detallado de la magnitud y signo de estos pesos, responsables de la variancia estadística asociada a cada componente, se deduce la combinación de bandas que mejor concentre las características de la litología. Todo ello teniendo en cuenta las propiedades espectrales de los minerales (bandas extremas de absorción y reflexión). Loughlin (1991) modificó la técnica Crósta seleccionando series de 4 bandas Landsat TM específicas, aplicando el ACP por separado a cada sub-serie. Se analizan componentes principales diferenciados en grupos o set de 4 bandas, dos de máxima absorción, y dos de máxima reflectancia, de tal manera de aislar y/o resaltar respuestas del terreno tal como alteración de óxidos de Fe y arcillas.

Para ello se definen dos set de bandas, uno para arcillas y otro para óxidos/hidróxidos de Fe. El primer set, comprende las bandas TM1, TM3, TM4 y TM5, cubriendo las respuestas del Fe^{+3} . El segundo set incluye a las bandas TM1, TM4, TM5 y TM7, referidas a la respuesta espectral de los OH^- . Cada uno de estos set es utilizado como entrada para generar componentes principales, y se analiza estadísticamente el vector propio (eigenvector) (Crósta and Rabelo, 1993). De acuerdo con Crosta and Moore, (1989) y Loughlin, (1991) una imagen de componentes principales con un vector propio (eigenvector) con carga moderada a alta, para el diagnóstico de bandas de absorción y de reflexión de un mineral o grupo de minerales con signo opuesto, realza ese o esos minerales. Si la carga es positiva en la banda de reflexión de un mineral, el tono de la imagen será brillante, y si es negativo, el tono de la imagen será oscuro para el mineral en cuestión.

Por lo tanto, la estadística del vector propio en cada ACP identificaría la imagen de la componente principal en el que se carga la información espectral del mineral en examen.

De este análisis estadístico, se obtiene que la CP que contiene cargas moderadas y fuertes para TM1 y TM3, pero con cargas opuestas, en el set TM1, TM3, TM4 y TM5 es llamado "*F Component*" haciéndose referencia al Fe. Lo mismo ocurre para el TM5 y TM6 del set TM1, TM4, TM5 y TM7, el cual es llamado "*H Component*" refiriéndose a los OH^- (Crosta and Rabelo, 1993). En la Figura 19 se ilustran estas componentes para la imagen Landsat 7 ETM⁺ del área de trabajo.

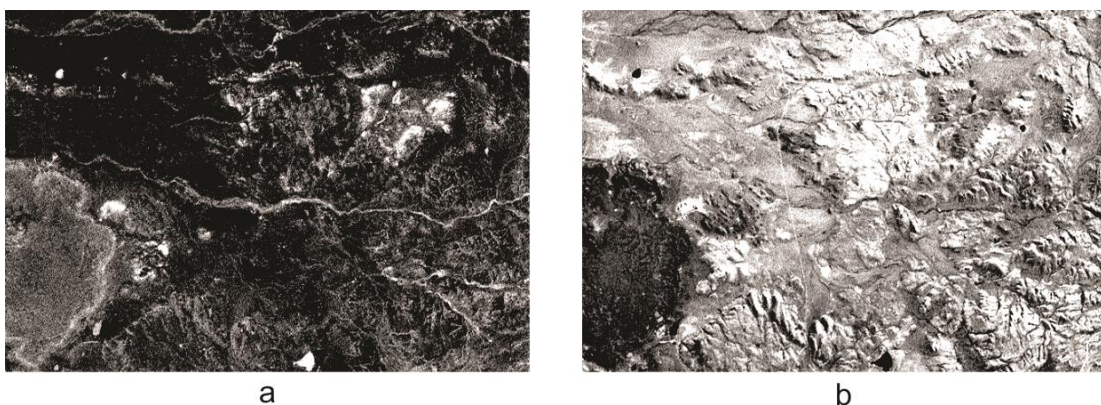


Figura 19: Imágenes de Componentes Principales Selectivas: a) Imagen PC4 de " OH^- " (con la LUT "Look up table" invertida) "*H Component*", b) Imagen PC3 de " Fe " "*F Component*".

El tercer paso es generar una tercer imagen, de adición, para combinarla con F y H en una composición RGB. Esta tercer imagen tendrá pixeles brillantes donde ambas, óxidos/hidróxidos de Fe y oxidrilos, están presentes, la cual es llamada "*H+F Component*" (Crosta and Rabelo, 1993). En la Figura 20 se ilustra esta composición color, en ella los píxeles más brillantes indican zonas en

donde los trabajos de campo han confirmado la presencia de alteraciones hidrotermales, en la mayoría de los casos.

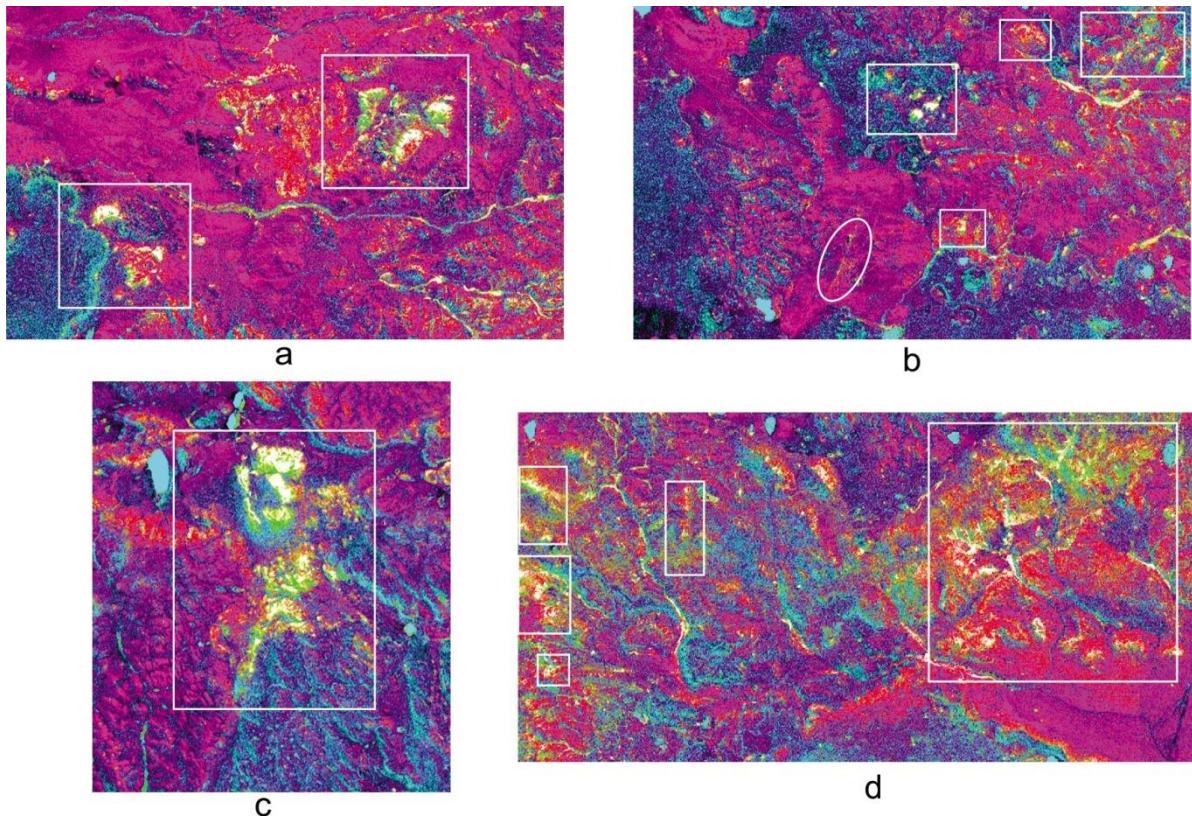


Figura 20: Imágenes de Componentes Principales Selectivas (**R**: F, **G**: H, **B**: F+H): a) La Aragonesa-El Puntudo, b) La Manchuria c) Estancia La Esperanza d) San Pedro-La Evelina.

5.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ASTER

En una segunda etapa del trabajo, fueron utilizadas 3 imágenes ASTER para analizar todas las áreas que ya fueron examinadas con las imágenes ETM⁺. El aumento de bandas espectrales en la región SWIR (dos bandas espectrales para Landsat versus seis bandas espectrales para ASTER) mejora la capacidad de mapeo litológico de superficie (Abrams, 2000; Rajendran, et al., 2012).

De acuerdo con las variaciones extremas de las curvas de reflectancia espectral de los minerales en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y la alta resolución espectral del sensor ASTER, el sensor identifica eficazmente diferentes rocas y minerales en la superficie de la tierra.

5.2.1. Corrección por calibración

El primer paso para el tratamiento de las imágenes fue realizar la calibración de las mismas a partir del metadatos, para convertir los niveles digitales (ND) a valores de radiancia, utilizando los coeficientes de calibración de ASTER y los datos de ganancia de la imagen.

Para ello se utilizó el *Software* ENVI y un lenguaje matemático para la calibración, donde hay que tener en cuenta los conceptos de “*Offset*” y “*Gain*” o ganancia. *Offset* es una señal residual, un valor aditivo, que puede ser ruido electrónico o una señal inducida con el objetivo de

mejorar o realzar las respuestas radiométricas. Ganancia es la pendiente de la relación de señales, también denominada ganancia de transferencia. Un detector ideal debe tener una relación lineal entre la radiación que ingresa y la señal de salida (SEGEMAR, 2005; Castro Godoy y Di Tommaso, 2004).

Al momento de realizar la calibración, los valores de radiancia dependen de la banda espectral y del ajuste de ganancia, pudiendo ser esta última alta, normal o baja (*high, normal o low*, ver Cuadro IV).

Band N°	High Gain	Normal Gain	Low Gain 1	Low Gain 2
1	0.676	1.688	2.25	n/a
2	0.708	1.415	1.89	
3N	0.423	0.862	1.15	
3b	0.423	0.862	1.15	
4	0.087	0.2174	0.2900	0.2900
5	0.0348	0.0696	0.0925	0.409
6	0.0313	0.0625	0.0830	0.390
7	0.0299	0.0597	0.0795	0.332
8	0.0299	0.0417	0.0556	0.245
9	0.0159	0.0318	0.0424	0.265
10	n/a	0.6882	n/a	n/a
11		0.6780		
12		0.6590		
13		0.5693		
14		0.5223		

Cuadro IV. Coeficientes de calibración para las bandas de ASTER en función de sus ganancias (ERSDAC, 2007).

La radiancia se puede obtener de los ND de la siguiente manera:

$$\text{Radiancia} = (\text{valor del ND} - 1) * \text{coeficiente de conversión}$$

$$\text{Coeficiente de conversión} = (W / (m^2 sr * \mu m))$$

A partir del metadata, podemos saber en qué estado de ganancia se han registrado los datos de ASTER, y de esta manera realizar la calibración. En las imágenes utilizadas las ganancias eran: *HIGH* para B1 y B2, *NOR* para las bandas B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14; no hay bandas con ganancias *LOW* en estas imágenes.

Una vez realizada la transformación a radiancia (calibración), se generó el mosaico digital banda por banda (Figura 21), uniendo las 3 imágenes que cubren las áreas en estudio, para luego generar un *Layer Stacking* y dejar listo el procesamiento previo a la generación de cocientes y componentes principales para preparar las imágenes RGB.

Dado que el reconocimiento geológico del área ya fue hecho a partir de las imágenes ETM+, esta etapa se enfocó directamente a generar los cocientes necesarios para detectar las áreas alteradas ya definidas con Landsat y con los trabajos científicos (el procesamiento con cocientes de bandas y la utilización de componentes principales fueron fundamentales a la hora

de identificar alteraciones). Para ello se efectuó la lectura de distintos trabajos científicos, *papers*, publicaciones y “libros” a modo de conocer la metodología a seguir con las imágenes ASTER.

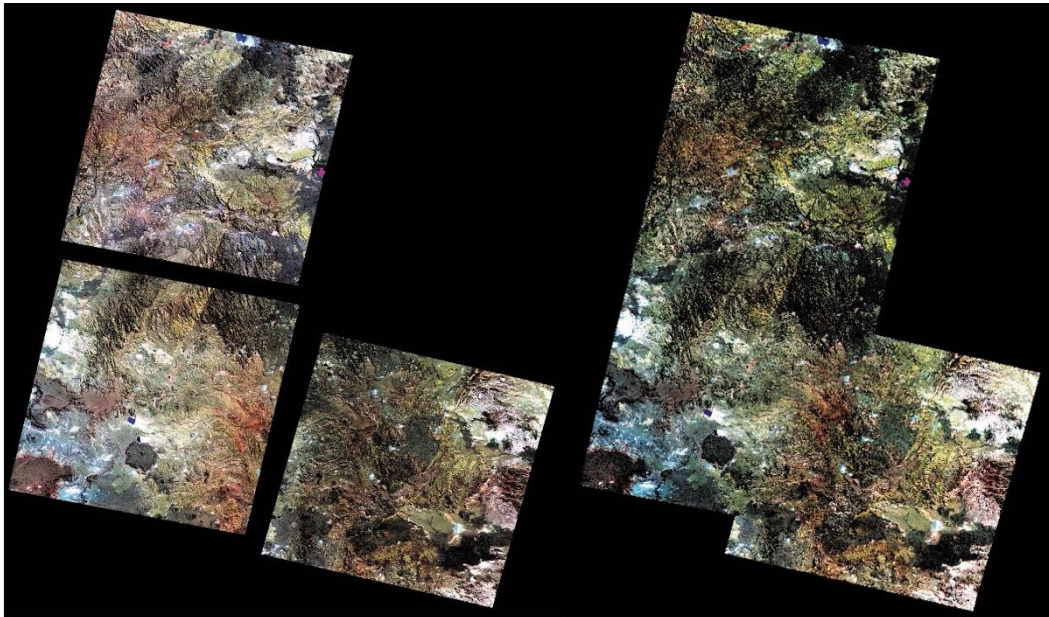


Figura 21. Imágenes ASTER originales georeferenciadas (izq.) y mosaico digital (der.) RGB: 321.

5.2.2. Generación de cocientes

Como ya se mencionó anteriormente, la resolución espectral del sensor ETM⁺ de Landsat permite la identificación de los distintos grupos de minerales principalmente el de los óxidos de hierro y el de los minerales con hidroxilos, pero no permite una buena discriminación entre los distintos minerales, siendo de esta manera sólo útil para definir blancos de alteración.

El sensor ASTER es capaz de dar mayor información gracias a sus 6 bandas en el infrarrojo de onda corta (SWIR), al menor ancho de estas bandas y a las posiciones estratégicas de las mismas para identificar rasgos de absorción distintivos de minerales de alteración con presencia de OH⁻ y otras asociaciones de hidroxilos como M-OH y Al-OH (Hunt, 1977).

ASTER permite identificar grupos de minerales, incluyendo los carbonatos, Al-OH, Fe, Mg-OH, grupos H-O-H y el óxido de Fe (Ninomiya, 2004; Rowan et al., 2006).

Los cocientes utilizados en este informe fueron tomados de distintos trabajos, Tesis y publicaciones científicas, con el objetivo de corroborar la fiabilidad de los mismos al contrastarlos con los datos de campo del área de estudio, datos los cuales fueron tomados de la bibliografía proporcionada por el Instituto de Recursos Minerales (INREMI).

Para ello, con los datos bibliográficos sobre las áreas estudiadas por el INREMI y Tesis doctorales, se determinaron las características de campo más destacables, como minerales, rocas y alteraciones, a modo de corroborar si la respuesta que obtenemos a partir de las composiciones RGB de los cocientes, es fiel a lo descrito en campo por los autores.

En el Cuadro V se resumen estas características en los sectores estudiados.

Sectores		Tipo de rocas	Alteraciones
La Manchuria	C° Turulo	Lavas autobrechadas de un domo riolítico-dacítico	Silicificación dominante (reemplazo-relleno), argilización, oxidación, propilitización
	Domos del Sur	Domo de lavas riolíticas	Importante la oxidación y silicificación; argilización subordinada
	Veta Speme	Brecha tectónica en caja de ignimbritas	Silicificación (reemplazo-relleno) y oxidación
La Aragonesa-El Puntudo	Sector oriental del C° Tejedor	Tobas e ignimbritas alteradas	Argilización intensa, oxidación
	Zona de Vetas	Ignimbritas con vetas y vetillas de cuarzo con textura brechosa	Silicificación (reemplazo y relleno)
	El Peñón	Lavas con escasas vetillas de cuarzo (adularia)	Silicificación fuerte, argilización asociada
	Lomas Grises	Ignimbritas con crestones silicificados y venillas de Qz	Silicificación fuerte y oxidación
	Lomadas Centrales	Lavas riolíticas-dacíticas	Parcialmente silicificadas y argilizadas
	C° Bocha	Ignimbritas con crestones silicificados, brechas cementadas por calcedonia rojiza	Silicificación masiva, argilización suave, oxidación
	Loma Blanca	Oleadas piroclásticas	Silicificación masiva, oxidación y argilización
San Pedro-La Evelina	Zona de Vetas	Vetas de cuarzo-calcedonia y óxidos e hidróxidos de Fe y Mn en caja de lavas andesíticas y en riolitas	Silicificación en vetas, venillas y reemplazos masivos, Argilización (esmectita-caolinita), propilitización
Estancia La Esperanza	C° Tornillo	Tobas y tufitas	Argílica moderada, reemplazos silíceos. Alteración meteórica
	C° Guanaco	Lavas dacíticas (??)	Argílica avanzada, moderada y silicificación penetrativa, propilitica en el entorno
	Vetas del Sur	Ignimbritas con vetas y vetillas de cuarzo	Argilización y propilitización (poco desarrollada). Silicificación restringida a las vetas.

Cuadro V: Características de campo de cada área tomadas de trabajos del INREMI y Tesis doctorales.

Una vez revisados los trabajos realizados en la zona, se procedió a realizar los cocientes correspondientes para corroborar las áreas alteradas.

Óxidos e hidróxidos de hierro tienen importantes respuestas en las bandas del VNIR. Los cocientes 3/1 y 2/1 (Figura 22), permiten identificar su presencia, dado que los patrones espectrales presentan altos valores (reflectancia) en las bandas 2 y 3, y valores de absorción en la banda 1 (SEGEMAR, 2005).

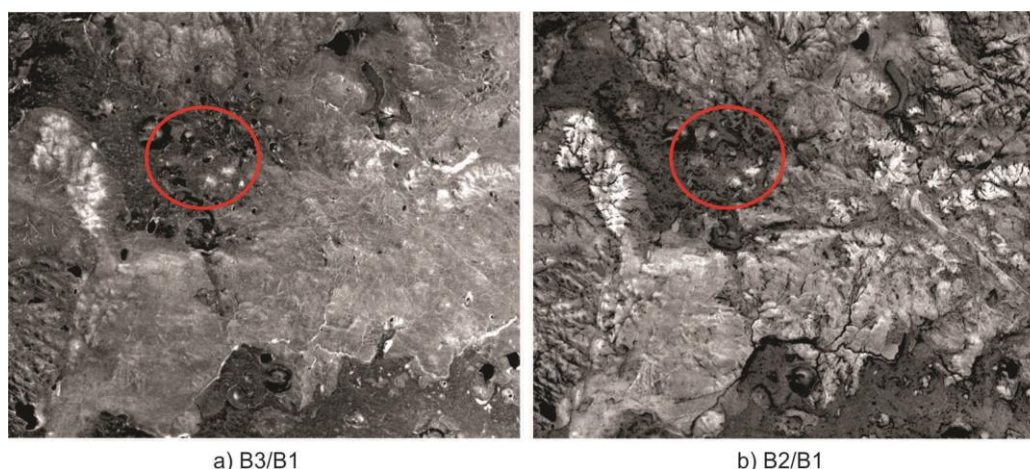


Figura 22: Cocientes entre bandas para óxidos en el área La Manchuria. El círculo rojo señala la zona de Cerro Turulo.

Con las bandas del SWIR de ASTER se pueden identificar distintos grupos de minerales de alteración analizando la firma espectral de cada mineral, de esta manera reconocer alteración argílica, argílica avanzada, fílica y propilítica (SEGEMAR, 2005).

Se han definido distintos cocientes e índices para determinar estos tipos de alteraciones, al igual que los minerales que las caracterizan, a partir del análisis de las firmas espectrales de los minerales realizadas en trabajos como Ninomiya (2004), Yamaguchi and Naito (2003), Rowan et al., (2003), Ducart et al., (2006), Beiranvand and Hashim, (2011, 2012), entre otros. En ellos se identificó que el comportamiento de los minerales alterados del grupo de los hidroxilos (OH⁻) de aluminio, representados por montmorillonita, illita y sericita, se caracterizan por una fuerte absorción en la región de la banda 6 (2,21 μm) y alta reflectancia en las bandas 4 (1,66 μm) y 7 (2,26 μm). La pirofilita, posee una fuerte absorción en la banda 5 (2,17 μm) al igual que la dickita. La caolinita y alunita tienen fuerte absorción en las bandas 5 y 6. Mientras que minerales como jarosita (Fe-OH) tienen fuerte absorción en la banda 7. Por otra parte, La calcita y la clorita tienen una fuerte absorción en la Banda 8 (2,33 μm) debido a la presencia de CO₃, Mg-OH.

En el trabajo de Marquetti et al., (2005) se resume el tipo de alteración hidrotermal y las bandas ASTER que se utilizan para la detección de los minerales presentes (Cuadro VI).

	μm	ASTER	MINERAL	ALTERACIÓN
Al-OH	2,16 2,20	Banda 5 Banda 6	alunita montmorillonita, illita, sericita	argílica avanzada argílica y fílica
Fe-OH	2,26	Banda 7	jarosita	zonas de oxidación
CO ₃ , Mg-OH	2,33 2,40	Banda 8 Banda 9	Calcita, clorita, (epidoto)	propilítica

Cuadro VI. Tipos de alteración hidrotermal y bandas ASTER. De Marquetti et al., (2005).

Por otra parte, aquellos minerales que tienen rasgos espectrales diagnósticos en la región del TIR, como es el caso de los carbonatos (calcita, dolomita) y grupo de la sílice, se caracterizan por una importante absorción en la banda 14 y fuerte reflectancia en la banda 13 (Figura 10), siendo el cociente B13/B14 útil al momento de identificar este grupo de minerales (Ninomiya, 2004).

Por último, el cuarzo, al igual que otras rocas ígneas inalteradas compuestas por silicatos, no muestran características de absorción en la región del VNIR o SWIR, pero sí son muy importantes las características espectrales en el TIR. El cuarzo muestra una fuerte absorción en la región de las bandas 10 (8,29 μm) y 12 (9,07 μm) y mayor reflectancia en la banda 11 (8,63 μm). A su vez, las rocas félsicas con alto contenido de SiO_2 , presentan altos valores de emisividad en las bandas 13 (10,6 μm) y banda 14 (11,3 μm), mientras que rocas con bajo contenido de SiO_2 , como las rocas máficas, tienen mayor emisividad a longitudes de onda más corta (bandas 10, 11 y 12). Es por ello que es útil el cociente B13/B12 para identificar minerales de sílice, siendo también útil el índice de cuarzo $QI=(B11*B11)/(B10*B12)$ (Ninomiya, 2004; Ninomiya y Fu, 2002).

De esta manera, con el conjunto de las 14 bandas de ASTER y con las firmas espectrales de los minerales de interés, se pueden establecer distintos cocientes entre bandas, para así lograr maximizar la respuesta del blanco o alteración a buscar. La siguiente tabla muestra los distintos cocientes utilizados en el trabajo (Cuadro VII).

SUB-SISTEMA	MINERAL / ALTERACIÓN	INDICE	Referencia
VNIR	Óxidos de hierro	B3/B1 y B2/B1	Rowan and Mars, 2003
SWIR	Argílica Avanzada	5/6 – 4/6	SEGEMAR, 2005
	Alunita (diferenciada de caolinita, montmorillonita y clorita)	5/6	SEGEMAR, 2005
	Pirofilita	5/6	SEGEMAR, 2005
	Índice de Caolinita	$(B4*B8)/(B5*B6)$	Beiranvand and Hashim, 2012
	Caolinita (diferenciada de montmorillonita-illita)	$B7/(B5+B6)$	SEGEMAR 2005
	(ALI) Índice de Alunita	$(B7*B7)/(B5*B8)$	Ninomiya, 2004
	(OH1b) ej. Pirofilita, caolinita y alunita	$(B4*B7)/(B5*B5)$	Ninomiya, 2004
	(OH1a) ej. Illita, illita-esmectita, esmectita montmorillonita	$(B4*B7)/(B6*B6)$	Ninomiya, 2004
	Fílica	7/5	SEGEMAR, 2005
	Índice de Arcillas (Illita - Muscovita (sericita))	$(B5+B7)/B6$	Rowan and Mars, 2003
	Alteración Propilítica (Clorita - Epidoto)	5/8	SEGEMAR, 2005
	Índice de Calcita	$(B6*B9)/(B8*B8)$	Ninomiya, 2004
	Índice de Epidoto-Clorita-Anfíbol	$(B6+B9)/(B7+B8)$	CSIRO
	Índice de Carbonato-Clorita-Epidoto	$B7+B9 / B8$	Rowan and Mars, 2003
TIR	Índice de SiO_2	B13/B12	Ninomiya, 2004
	Índice de SiO_2^-	B12/B13	Ninomiya, 2004
	Índice de Carbonatos	B13/B14	Ninomiya, 2004
	Índice de Cuarzo	$(B11*B11)/(B10*B12)$	Ninomiya, 2004

Cuadro VII. Cocientes e Índices de minerales que fueron aplicados en esta investigación.

Además de los cocientes, han sido definidos una serie de índices espectrales (Ninomiya, 2004) apropiados para la identificación de grupos de minerales de alteración que comparten bandas de absorción: el índice OH1a involucra las bandas 4, 6 y 7, siendo útil para la identificación de minerales de alteración que presentan una fuerte absorción en la banda 6 (illita, illita-esmectita y esmectita), mientras que el índice OH1b involucra las bandas 4, 5 y 7 y facilita el reconocimiento de los minerales que poseen una fuerte absorción en la banda 5 (pirofilita, caolinita y alunita). Por su parte, el índice de Alunita (ALI), involucra las bandas 5, 7 y 8 y se utiliza para diferenciar este mineral en particular. Estas características se ven en la Figura 12 en firmas espectrales re-muestreadas en ASTER.

Una vez realizados los cocientes, se eligieron los más representativos y se generaron composiciones RGB para visualizar mejor las zonas de alteración hidrotermal.

En la Figura 23 se ilustran los cocientes realizados para alteración argílica avanzada y alteración propilítica. Entre ellos el que mejor discrimina la alteración argílica es el cociente B4/B6, esto responde claramente a una alta reflectancia de algunos de los minerales de esta alteración en la banda 4 acompañada de mayor absorción en la banda 6 (dickita y caolinita); a diferencia del anterior, el cociente B5/B6 estaría indicando otras especies minerales con una pendiente de reflectancia entre las bandas 5 y 6 (pirofilita y/o alunita) -el uso de las bandas 5 y 6 donde la diferencia de reflectancia no es tan alta hace que el contraste con el entorno sea menor (Figura 12). El cociente B5/B8 realza pequeños sectores donde puede presentarse alteración propilítica: tanto clorita como calcita tienen una alta respuesta en B5 y baja en B8 (Figura 12). Similares resultados se obtuvieron del Índice $(B6+B9)/(B7+B8)$. El Índice Epidoto-Clorita-Anfíbol realza una zona extensa que incluye la alteración argílica moderada, la argílica intensa y la aureola de alteración propilítica que rodea a las anteriores. Esta alteración propilítica se describe en Mikyatiuk, 2006 pp. 121 en donde se mencionan epidoto-clorita-calcita y anfíbol en lavas. En la Figura 24 se han combinado estos cocientes para formar composiciones color

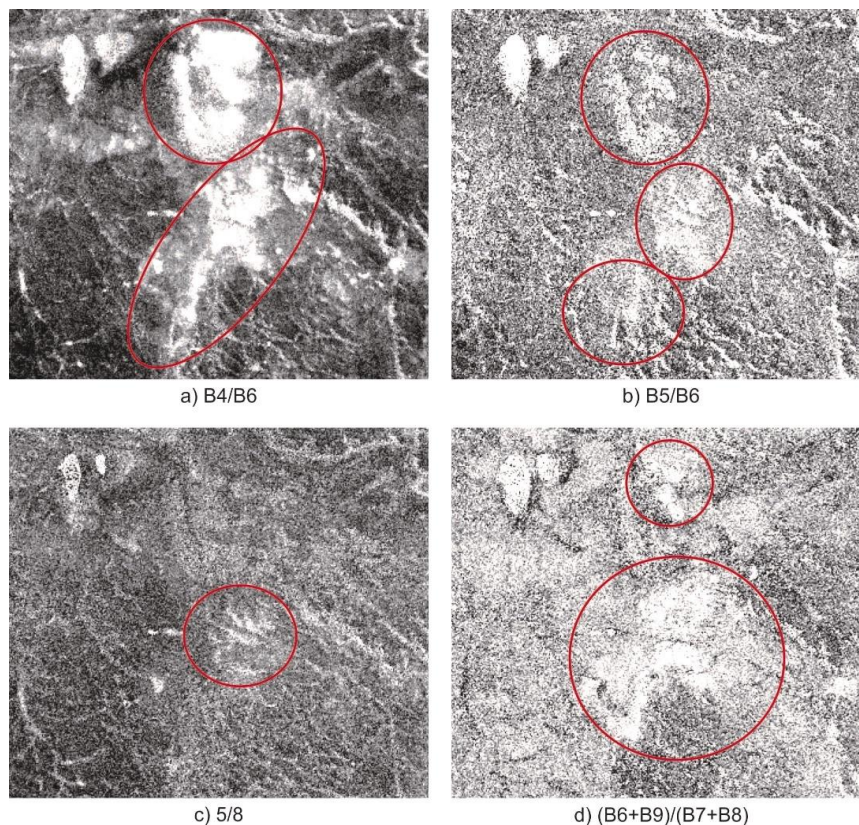


Figura 23: Cocientes entre bandas para imágenes ASTER, área Estancia La Esperanza; a) cociente B4/B6 para alteración argílica avanzada, resalta toda alteración de la zona, b) cociente B5/B6 para alteración argílica avanzada, es más débil la respuesta de los minerales alterados, c) cociente B5/B8 para alteración propilítica, el círculo rojo responde a una zona con esta alteración reconocida en el campo, d) índice de Epidoto-Clorita-Anfíbol $(B6+B9)/(B7+B8)$, tiene mayor respuesta al sur del área, en el C° Guanaco y zona de vetas.

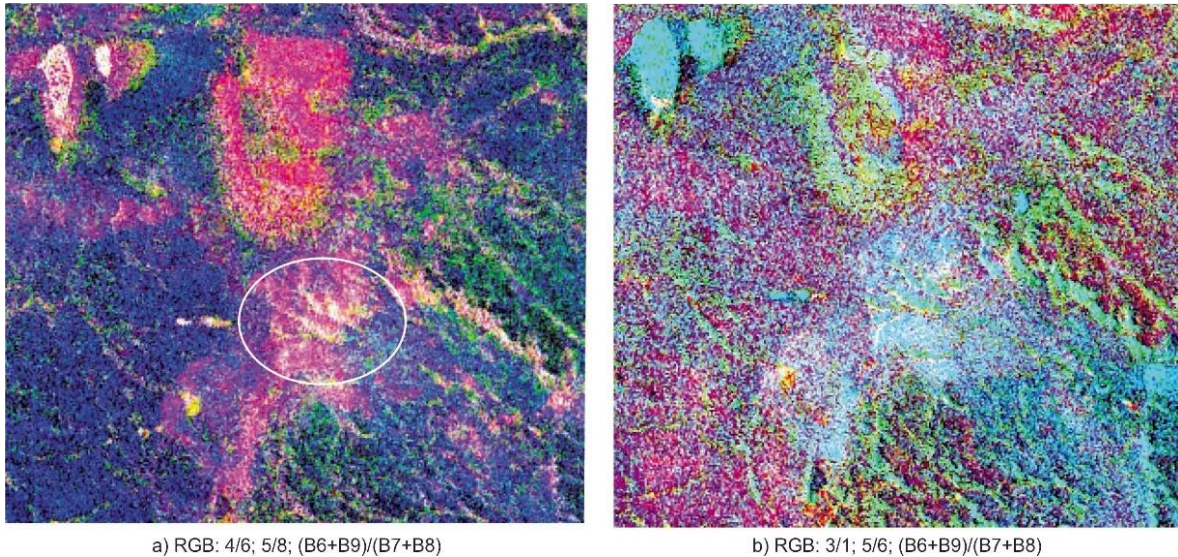


Figura 24: Combinación de cocientes en el área Estancia La Esperanza a) Combinación **R: 4/6 G: 5/8 B: $(B6+B9)/(B7+B8)$** , el color magenta indica alta respuesta en los canales R y G, mientras que la zona blanca señalada con un círculo blanco indica alta respuesta en los tres canales y b) Combinación **R: 3/1 G: 5/6 B: $(B6+B9)/(B7+B8)$** , los colores cian indican alta respuesta en los canales G y B, evidenciando la presencia de alteración propilítica en la zona junto con arcilla. La zona del C° Tornillo adquiere tonos verdes dado que solo hay presencia de arcillas. Como demuestran los trabajos de campo, en esta zona no hay oxidación (no hay aporte del canal rojo).

Para la región del TIR, se realizaron el Índice de cuarzo $(B11*B11)/(B10*B12)$ y el cociente 13/12 de SiO_2 . De ellos el mejor resultado se observó en el cociente 13/12 de SiO_2 . Si bien la definición de estos productos no es muy buena, dado a que la resolución espacial de las bandas 10, 11, 12, 13 y 14 de la región del Infrarrojo Térmico es de 90 m, es decir un pixel en la imagen representa una superficie de 90 m x 90 m en el terreno. Aun así, si se conocen las áreas las cuales presentan alteración, se podrá definir si hay alteración silíceo en ellas. Se ilustran en la Figura 25 los sectores con silicificación que pudieron ser reconocidos con este cociente y que han sido verificados con los datos de campo. Hay otros sectores donde este cociente da valores similares a los de las áreas con silicificación pero corresponden a ignimbritas muy soldadas o a otras formaciones con datos de campo insuficientes.

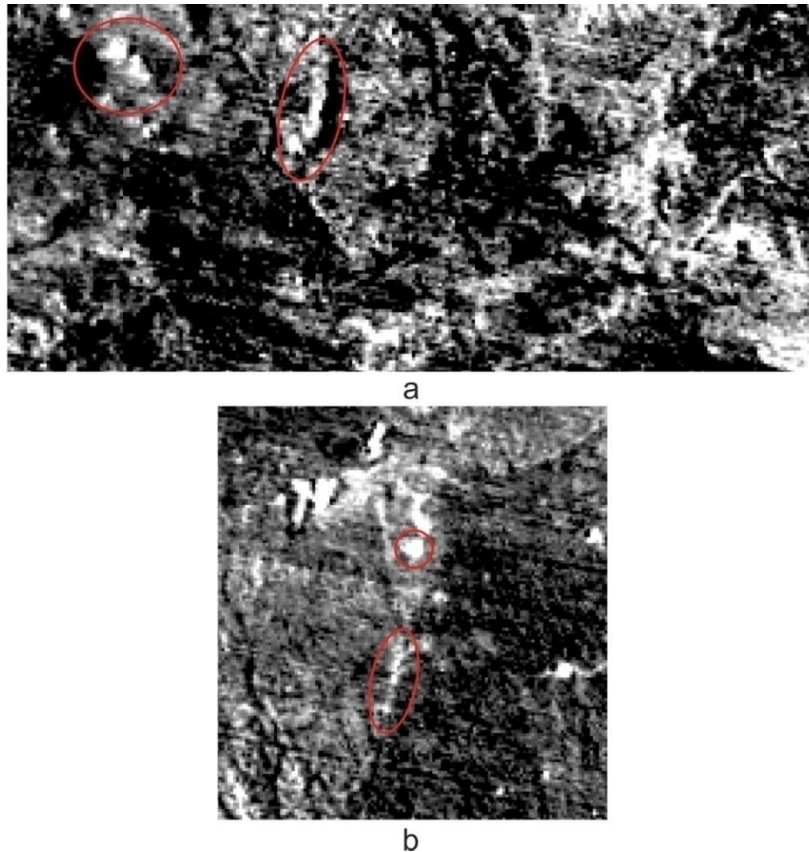
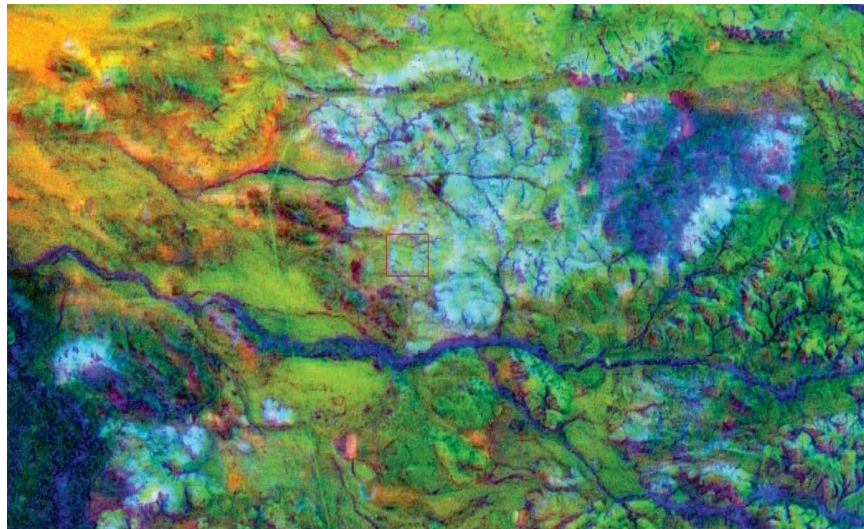
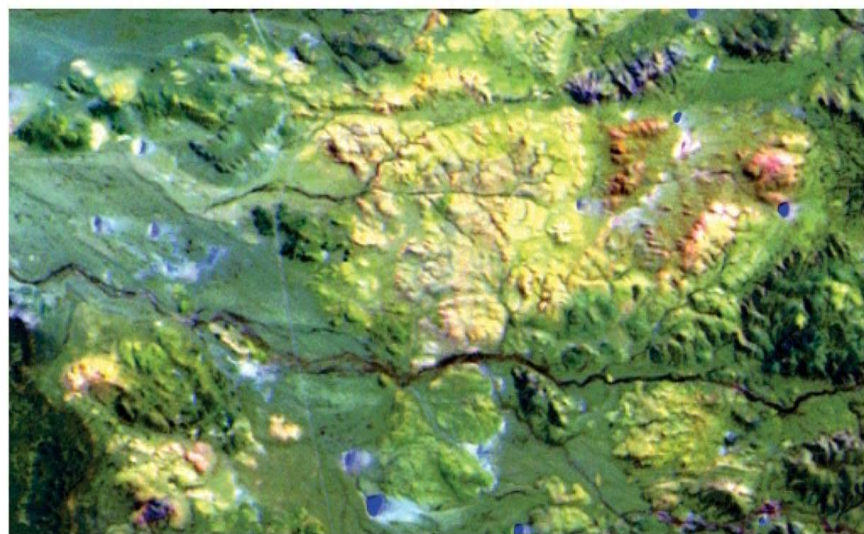


Figura 25: Imagen de cociente 13/12 de SiO_2 en las áreas de a) San Pedro-La Evelina y b) Estancia La Esperanza. Los círculos rojos indican las silicificaciones verificadas con los datos bibliográficos y de campo.

En la Figura 26a se ilustra una composición color para la zona de La Aragonesa-El Puntudo en la cual se han combinado índice de Sílice 13/12, cociente de óxidos y el cociente de arcillas que había dado los mejores resultados. En la Zona de Vetas se observan tonalidades azuladas evidenciando la presencia de alteración argílica (en el canal azul). El sector de las Lomas Centrales y Lomas Blancas así como al E del Cerro Tejedor aparecen en tonos cian (a blanquecino en pequeños sectores) mostrando el aporte de los óxidos (en el canal verde) y alteración argílica (en el canal azul), que son las alteraciones más difundidas en la zona; en algunos pequeños sectores (ej. Lomas Grises y oeste de la zona de vetas) se observan tonos magenta lo que indicaría presencia de sílice junto con alteración argílica. El sector central de las Lomas Centrales y E del Cerro Tejedor aparece en tonos amarillentos a verdosos indicando la presencia de oxidación y silicificación. A título comparativo, en la Figura 26b se ilustra una composición color entre las bandas del SWIR para la misma zona RGB: 461, en donde se observan las áreas argilizadas en magenta y la presencia de óxidos de hierro en amarillo.



RGB:13/12; 2/1; 4/6



RGB: 4 6 1

Figura 26: Zona de La Aragonesa-El Puntudo: a) Combinación de cocientes (sup.): en azules presencia de alteración argílica, en cian óxidos de hierro y alteración argílica, en tonos magenta presencia de silicificación y argilización y en tonos amarillentos presencia de oxidación y silicificación; b) composición Color RGB (inf.): 461: en magenta áreas argilizadas y en amarillo óxidos de hierro.

5.2.3. Componentes principales

Para el análisis de componentes principales en ASTER, se trabajó particularmente sobre las Componentes Principales Orientadas a Rasgos, técnica desarrollada por Crosta and Moore (1989) usando la adaptación propuesta por Loughlin (1991).

Se realizaron las componentes principales con el *software* ENVI. Fueron generados componentes para una serie de minerales (Cuadro VIII) que son diagnósticos para los distintos tipos de alteraciones hidrotermales a partir de la imagen mosaico sin correcciones dado que no es necesario la corrección radiométrica previa de las imágenes.

La técnica de Análisis de Componentes Principales Orientadas a Rasgos (ACPOR) fue aplicada a 7 minerales, tomando los sets de bandas que fueron propuestos en el trabajo realizado

por Crosta et al., (2003), en el cual se seleccionan unos set de bandas del VNIR, SWIR y TIR, donde se presentan los rasgos espectrales claves o diagnósticos de cada mineral, utilizando dos bandas de máxima absorción y otras dos de máxima reflectancia. Se analizan estadísticamente las cargas o pesos de los eigenectores (vectores propios) para decidir en cuál de las Componentes Principales se concentrará la información directamente relacionada con las firmas espectrales teóricas del mineral de interés. En la siguiente tabla (Cuadro VIII) se indican los minerales usados y los set de bandas utilizados para el ACPOR (*Feature Oriented Principal Components Selection*).

Minerales	Alunita	Illita	Dickita	Caolinita + Esmectita	Caolinita	Calcita	Cuarzo
Bandas	1	1	4	1	1	1	10
	3	3	5	4	4	6	11
	5	5	7	6	6	8	12
	7	6	9	9	7	9	13

Cuadro VIII. Minerales utilizados para el ACPOR. Bandas tomadas de Crosta et al., (2003).

Luego de generar las componentes principales, se analizan los datos estadísticos, los cuales son registrados en un cuadro de doble entrada, donde se representan las bandas utilizadas en el ACPOR y las 4 componentes principales creados; a partir de ellos se identifica cuál es la componente que concentra la información del blanco en cuestión, con el mismo criterio que se ha explicado para las imágenes Landsat. Al momento de elegir la componente principal, hay que analizar la firma espectral del mineral que queremos identificar y tener en cuenta la banda en donde dicho mineral se caracteriza por una fuerte absorción, y elegir la componente que tenga la carga del vector propio más alta en esa banda, y buscar otra banda que tenga el vector propio con una carga alta, pero de signo opuesto.

A modo de ejemplo, la dickita tiene alta reflectancia en las bandas 4 y 7 de ASTER, y mayor absorción en las 5 y 9. Las matrices estadísticas quedan expresadas en el Cuadro IX.

DICKITA				
Eigenvector	Banda 4	Banda 5	Banda 7	Banda 9
CP 1	-0.531673	-0.502045	-0.486257	-0.478360
CP 2	-0.663358	-0.252650	0.531714	0.461958
CP 3	0.426925	-0.635988	0.537197	-0.353092
CP 4	0.308246	-0.528808	-0.438469	0.658097
ALUNITA				
Eigenvector	Band 1	Band 3	Band 5	Band 7
CP1	0.614812	0.784322	0.062741	0.053937
CP2	0.051850	0.064018	-0.813669	-0.575461
CP3	-0.786955	0.617009	-0.001274	-0.000463
CP4	-0.004520	-0.006345	-0.577931	0.816048
CALCITA				
Eigenvector	Band 1	Band 6	Band 8	Band 9
CP1	0.992892	0.090918	0.061072	0.046579
CP2	0.109636	-0.949819	-0.233511	-0.176909
CP3	0.046310	0.299267	-0.767919	-0.564442
CP4	-0.000886	-0.004159	-0.593332	0.804946

CAOLINITA + ESMECTITA				
Eigenvector	Band 1	Band 4	Band 6	Band 9
CP1	-0.947991	-0.302936	-0.086961	-0.044501
CP2	0.316922	-0.909803	-0.264970	-0.040114
CP3	0.001666	-0.278339	0.960325	-0.017345
CP4	0.029502	0.054912	-0.002162	-0.998053
CAOLINITA				
Eigenvector	Band 1	Band 4	Band 6	Band 7
CP1	0.945643	0.302210	0.086753	0.083082
CP2	-0.324703	0.890096	0.259127	0.187484
CP3	0.017975	0.142050	0.230893	-0.962386
CP4	-0.002193	-0.310193	0.933818	0.178213
CUARZO				
Eigenvector	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13
CP1	0.526978	0.523121	0.507819	0.436759
CP2	-0.681928	0.135814	0.701638	-0.155671
CP3	0.468917	-0.623381	0.490108	-0.388982
CP4	-0.193352	-0.565062	0.098076	0.796053
ILLITA				
Eigenvector	Band 1	Band 3	Band 5	Band 6
CP1	0.614732	0.784220	0.062734	0.056290
CP2	0.052716	0.065755	-0.729687	-0.678568
CP3	-0.786972	0.616988	-0.000622	-0.000680
CP4	0.000864	0.001223	-0.680897	0.732377

Cuadro IX: Matriz de Componentes Principales para la detección de minerales.

Si analizamos la firma espectral de la dickita (Figura 12), podemos ver que la mayor absorción se encuentra en la región del SWIR, en la banda 5 (2,17 μm), de manera tal, que hay que elegir esa banda para hacer la comparación. La CP3 (Cuadro IX) tiene una carga alta y negativa en la banda 5 (-0.64) y una carga alta y positiva en la banda 4 (+0.43), lo que nos indica que los píxeles que marquen presencia de dickita estarán representados por niveles digitales con valores bajos (oscuros). Para mejorar la visualización del mismo, invertimos la LUT (*Look up table*), de esta manera, el blanco mineral quedará expuesto por píxeles brillantes (Figura 27).

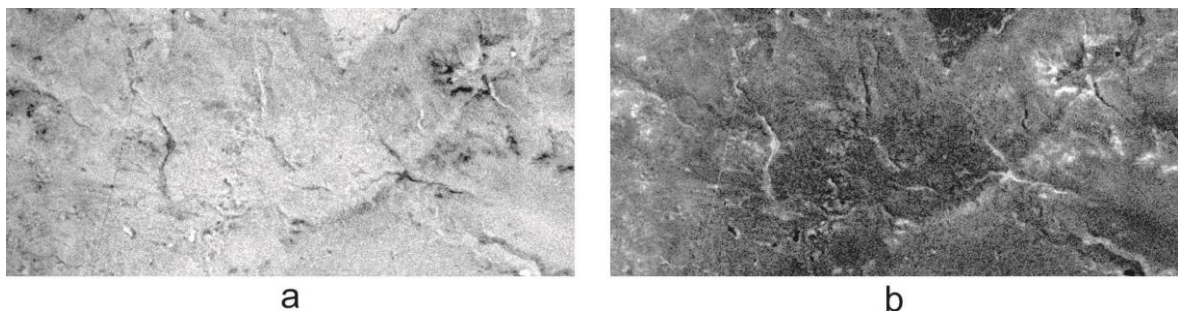


Figura 27: Componentes Principales Orientadas a Rasgos en el área de San Pedro-La Evelina: En a) CP3 para el mineral dickita, donde el blanco se visualiza en tonos oscuros y b) se muestra el mismo componente luego de la inversión de la LUT, el blanco se visualiza en tonos claros.

De esta manera, fueron eligiéndose todas las componentes principales para cada uno de los minerales del Cuadro IX, efectuando todo el procedimiento que se mencionó de ejemplo para el mineral dickita (Figura 27).

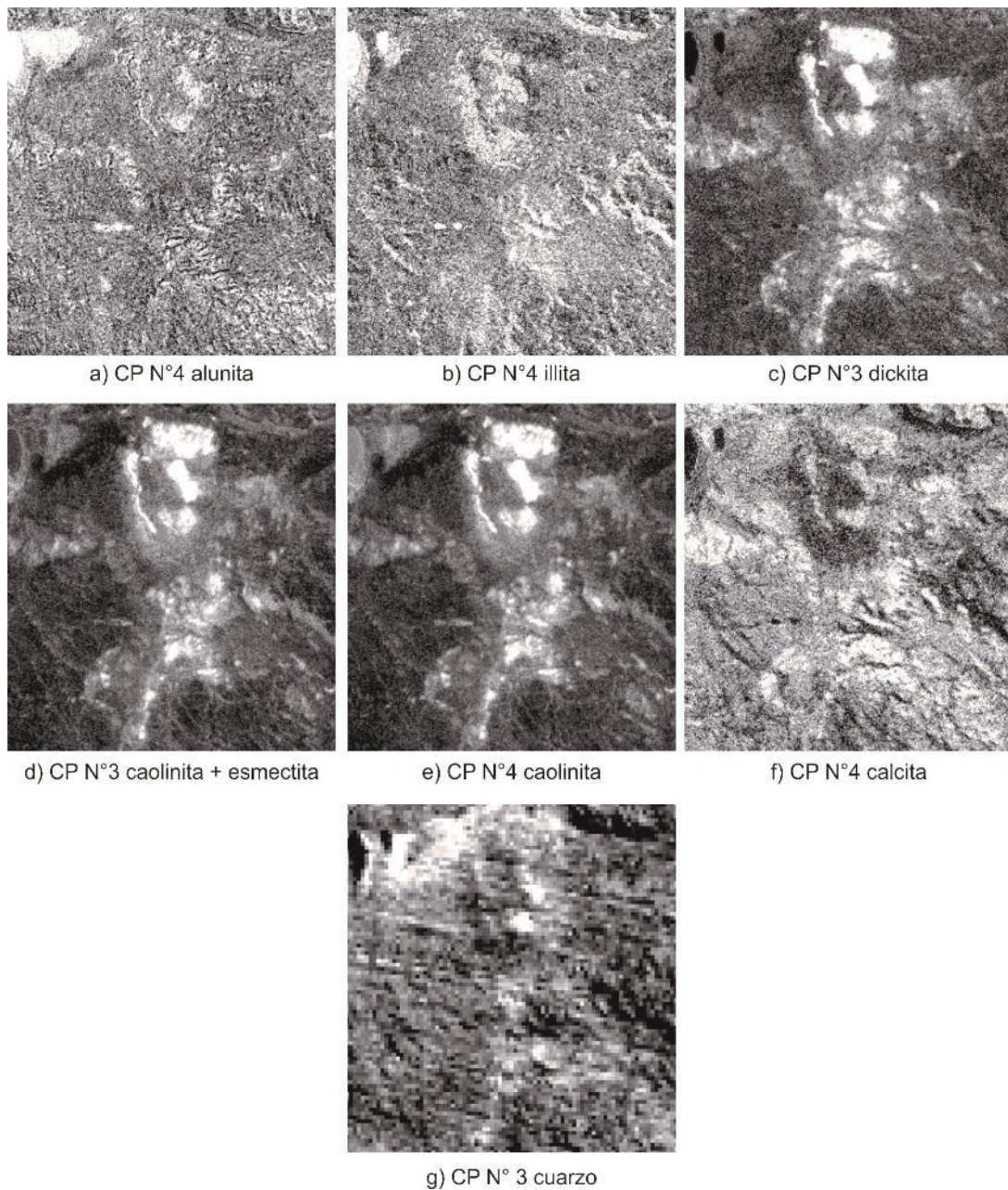


Figura 28: Componentes Principales Orientadas a Rasgos en el área Estancia La Esperanza. En a) CP alunita, b) CP illita, c) CP dickita, d) CP caolinita + esmectita, e) CP caolinita f) CP calcita g) CP cuarzo

Para la zona de Estancia La Esperanza: en la componente principal de la alunita se observa una leve respuesta en la zona de los cerros Tornillo y Guanaco (Figura 28a); en el primero no está mencionada su presencia en la bibliografía, mientras que si se ha descrito su presencia en el Cerro Guanaco. En la componente principal de la illita (Figura 28b), se realzan las zonas del Cerro Tornillo y Cerro Guanaco, coincidiendo con lo descrito en Mykietiuk, (2006). En la componente principal de la dickita (Figura 28c), mineral diagnóstico de la alteración argílica avanzada, se

destaca una clara respuesta, definiendo de manera precisa las zonas alteradas en la Estancia La Esperanza, logrando respuestas muy altas en el Cerro Tornillo, atenuando la respuesta en el Cerro Guanaco y Zona de Vetas. De igual manera con lo ocurrido con la alunita, la dickita no está descrita en la bibliografía, con excepción del Cerro Guanaco. En la componente de la caolinita + esmectita y el de la caolinita (Figura 28d y Figura 28e), se define la presencia de estos minerales en el área, minerales que caracterizan la alteración argílica. La componente de calcita (Figura 28f) da respuestas altas en las zonas del Cerro Guanaco y Zona de Vetas, sectores en los que se describió este mineral como parte de la alteración propilítica, siendo los carbonatos minerales diagnósticos de esta alteración. Por último, la componente del cuarzo (Figura 28g), muestra alta respuesta en la zona del Cerro Tornillo, coincidente con la silicificación intensa que fue descrita en los trabajos bibliográficos de Marchionni y Mykietiuik, (2005).

A partir de las imágenes generadas para las distintas zonas estudiadas, que muestran áreas en donde es más probable que se presente alteración hidrotermal, se procedió a generar composiciones RGB integrando los productos de distintos procesamientos para mejorarla visualización de los blancos. La Figura 29 muestra las combinaciones RGB realizadas con Componentes Principales Orientadas a Rasgos y Cocientes entre Bandas para las áreas de interés.

En esta composición se utilizó en el canal **R**: CP N°4 illita, **G**: CP N°3 dickita y **B**: Cociente 5/6 Pirofilita y/o Alunita. De esta manera, aquellas zonas que se visualicen en tonos amarillentos, implican la participación de los canales rojo y verde, es decir, en zonas donde habría presencia de los minerales illita y dickita, mientras que las zonas que se visualicen en color cian, implican el aporte de los canales verde y azul, es decir, donde exista la presencia de dickita y pirofilita o alunita, minerales diagnóstico de alteración argílica avanzada. De esta manera se puede concluir que en la Figura 29c, en el Cerro Guanaco se confirma alteración argílica avanzada como se describe en la bibliografía. Otro rasgo o característica que se puede resaltar es en el área La Aragonesa-El Puntudo (Figura 29a), dado que en la zona de vetas, en la cual según los datos de campo se describe silicificación, se observan tonos amarillentos por la combinación de illita y dickita, pudiéndose interpretar como una zona argilizada. Lo mismo ocurre en el sector Lomas Grises, ya que se describió en la bibliografía silicificación intensa y oxidación. En el sector Lomas Blancas coincide lo descrito en el campo con lo observado en la imagen, presentando zonas argilizadas. En el resto de las áreas, donde está descrita la alteración argílica, coincide con los resultados de la composición RGB.

Por último, considerando los buenos resultados visuales que se lograron con las componentes principales de Landsat, los llamados "*F Component*" para óxidos de Fe y "*H Component*" para oxidrilos, se procedió a realizar una composición color combinando estos dos componentes de Landsat con el componente principal de cuarzo de ASTER, el cual también dio resultados coherentes con lo descrito en la bibliografía (Figura 30). Aquellas zonas en que los tres tipos de alteraciones (oxidación, argilización y silicificación) están presentes, se visualizan en tonos blancos porque se combinan los tres canales RGB. Las zonas que se visualizan en tonos amarillos, indican la presencia sólo de alteración argílica y oxidación, no habiendo silicificación.

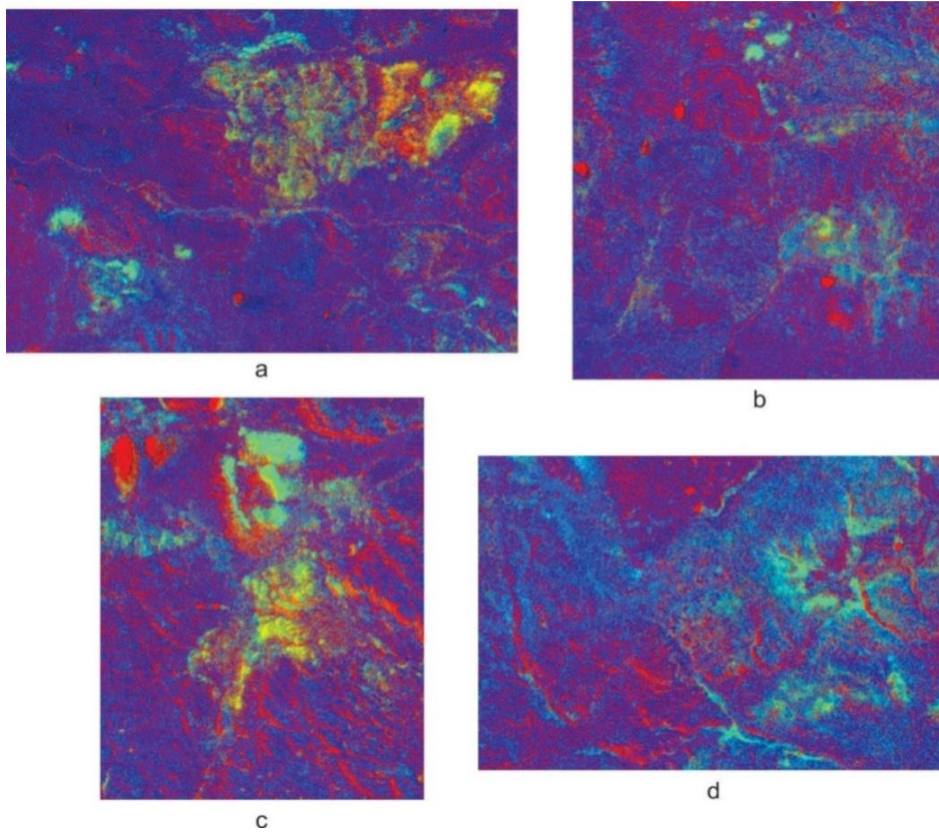


Figura 29: Composición Color **R**: CP N°4 illita, **G**: CP N°3 dickita y **B**: Cociente 5/6 Pirofilita y/o Alunita; a) La Aragonesa-El puntudo; b) La Manchuria; c) Estancia La Esperanza; d) San Pedro-La Evelina

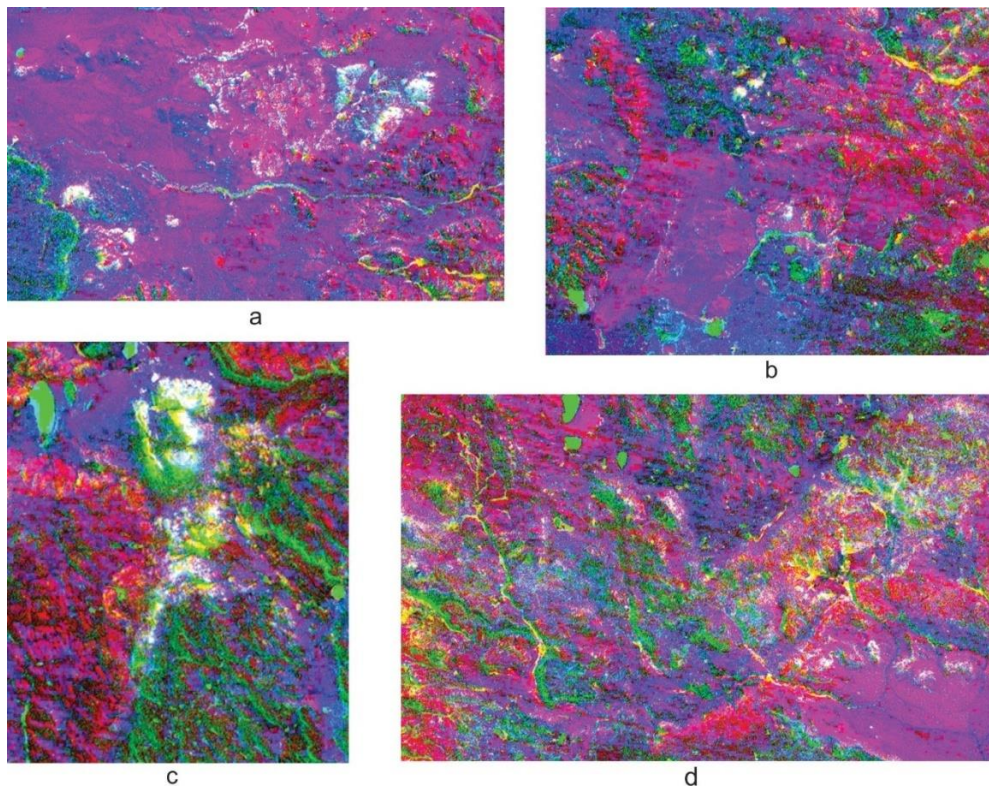


Figura 30: Composición color **R**: CP F Landsat, **G**: CP H Landsat, **B**: CP cuarzo ASTER; a) La Aragonesa-El puntudo; b) La Manchuria; c) Estancia La Esperanza; d) San Pedro-La Evelina

5.2.4. Clasificación "Spectral Angle Mapper" (SAM)

La clasificación SAM es una técnica de procesamiento de imágenes utilizada en distintos trabajos orientados a la prospección minera (CSES, 1992; Kruse et al., 1993, SEGEMAR, 2005) y es definida como un método automatizado para comparar espectros de las imágenes con espectros individuales o con una biblioteca espectral (Figura 31).

Consiste en la determinación de la similitud entre dos espectros: el patrón espectral de cada píxel de la imagen que se está estudiando y el patrón espectral de referencia del mineral de interés (*endmember*). El algoritmo considera a ambos patrones como vectores y determina la similitud espectral entre ellos calculando el ángulo de mejor aproximación (ITT, 2001). SAM compara el ángulo entre el vector del espectro del *endmember* y el vector de cada píxel en el espacio n-D. Los ángulos más pequeños representan coincidencias más cercanas al espectro de referencia.

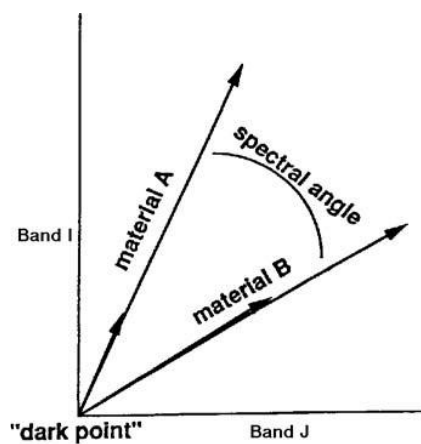


Figura 31. Si consideramos un espectro de referencia y un espectro desconocido a partir de datos de dos bandas, los dos materiales diferentes se representarían en un diagrama de dispersión 2D mediante un punto para cada intensidad de iluminación dada, o como una línea (vector) para todas las intensidades posibles.

El algoritmo SAM toma como entrada una serie de clases de entrenamiento, o espectros de referencia de bibliotecas espectrales. Calcula la distancia angular entre cada espectro en la imagen y los espectros de referencia o los *endmember* en n dimensiones. El resultado es una "imagen de clasificación" que muestra la mejor coincidencia de SAM en cada píxel y una "imagen de regla" para cada *endmember*, que muestra la distancia angular entre cada espectro en la imagen y el espectro de referencia, en radianes. Los píxeles más oscuros en las imágenes de regla, representan ángulos espectrales más pequeños, correspondiendo a espectros de la imagen que se asemejan más al espectro de referencia.

Preparación de la imagen: Para este método, se trabajó con las bandas SWIR de ASTER convertidas a valores de reflectancia a través del método QUAC (*Quick Atmospheric Correction*) de ENVI, el cual permite una corrección atmosférica del visible e infrarrojo cercano al infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR) de las imágenes. A diferencia de otros métodos de corrección atmosférica, QUAC determina los parámetros de compensación atmosférica directamente a partir de la información contenida en la escena (espectros de los píxeles de la imagen), sin información auxiliar. Se basa en el hallazgo empírico de que la reflectancia promedio de una colección de espectros de diversos materiales -como los espectros del *endmember* de una escena-, es esencialmente independiente de la escena, por lo que lo hace un método más rápido que otros, permitiendo la recuperación de valores de reflectancia razonablemente precisos.

Máscara de vegetación: Como ya se mencionó en la etapa de procesamiento de Landsat 7, en el tratamiento digital de segmentación de densidades (density slicing), la vegetación tiene

rasgos de absorción similares a los de las arcillas, grupo de minerales que se caracteriza por rasgos de absorción en el SWIR. Para evitar que la clasificación mapee zonas en la imagen que contengan vegetación, se aplicó, previamente a realizar el método SAM, una máscara de vegetación (Figura 32). Esta máscara es una nueva imagen derivada que nos permite anular o conservar porciones de la imagen original, en este caso en particular, anular la vegetación. Primeramente se generó una imagen de NDVI y se buscó el umbral máximo y mínimo de vegetación, luego se creó la máscara, y se obtuvo una imagen binaria (Figura 32a), donde los píxeles negros tienen valor 0 mientras que los blancos valor 1, de esta manera, cuando aplicamos esta máscara a la imagen original (Figura 32c), los valores en la imagen que coincidan con vegetación serán multiplicados por 0, anulándolos, mientras que el resto de valores serán multiplicados por 1, conservándolos.

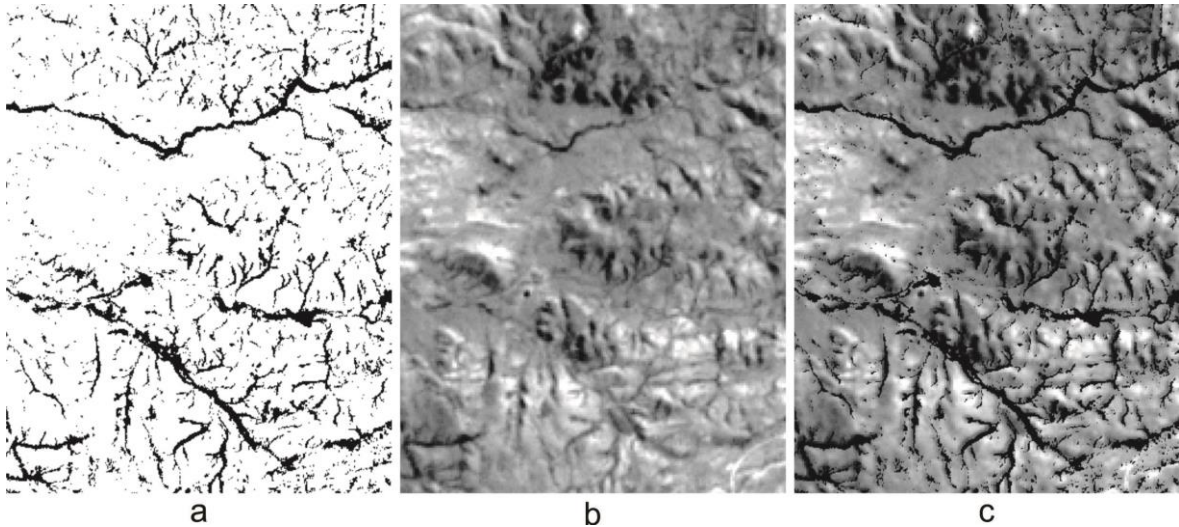


Figura 32: Aplicación de una máscara para la vegetación en una pequeña zona del área de La Aragonesa-El Puntudo; a) máscara de vegetación, píxeles blancos tienen valor 1 y los píxeles negros valor 0; b) imagen original sin máscara; c) imagen original con la máscara aplicada.

Selección de espectros de referencia: Una vez realizada la corrección atmosférica y convertidos los valores de los píxeles a reflectancia y aplicada la máscara de vegetación, se definieron los espectros de referencia a partir de la Biblioteca Espectral del USGS, con los minerales que se intenta identificar. Para el área de trabajo se seleccionaron las firmas de la clorita, epidoto, dickita, pirofilita, caolinita, caolinita + esmectita, illita, montmorillonita, muscovita. Se utilizó la firma de la muscovita como espectro de referencia para identificar sericita, ya que esta no se encuentra en los bancos de la Biblioteca Espectral del USGS. A partir de los espectros de referencia de estos minerales, que van a ser utilizados como Miembros Finales (*endmembers*) de la clasificación, se generó un banco de firmas espectrales remuestreado sólo a los rangos de longitudes de onda del SWIR. Para una correcta clasificación, se procedió a analizar el patrón espectral de los minerales seleccionados, los cuales se representan en la Figura 33.

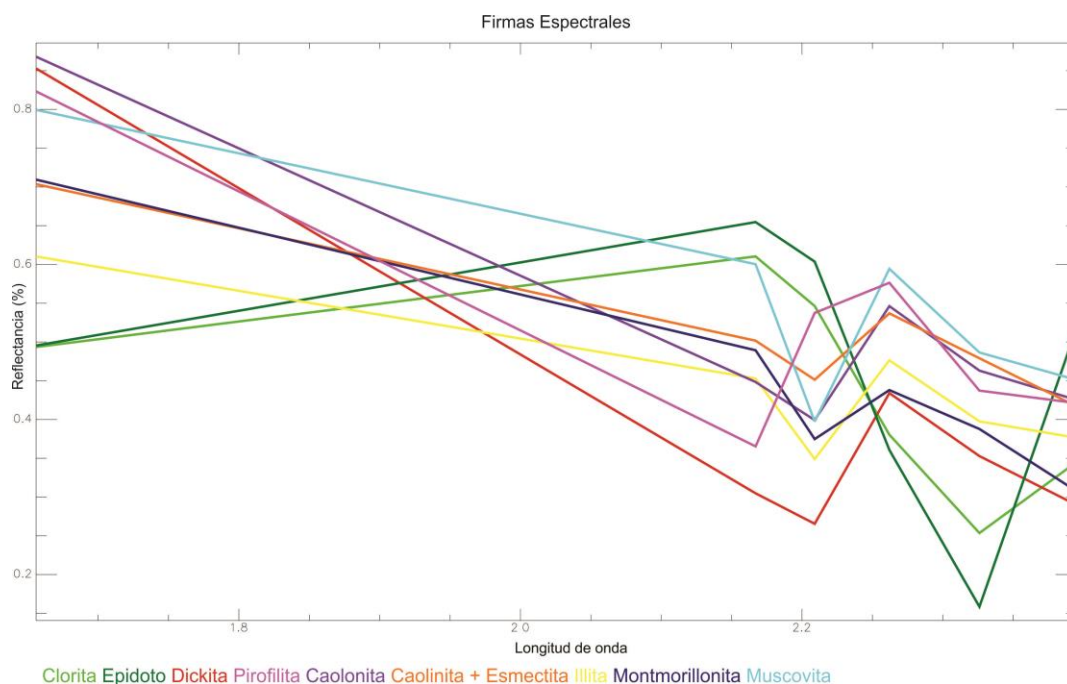


Figura 33. Firmas espectrales remuestreadas para ASTER en el intervalo del SWIR.

Clasificación de la imagen: aplicado el método de clasificación SAM se obtuvieron como resultado dos archivos, uno con la imagen de clasificación SAM -en color- y otro que guarda todas las imágenes de regla que se crearon para cada uno de los minerales de referencia -en grises-. Los minerales que se buscan se visualizarán en las imágenes de regla con tonos oscuros, a diferencia de los Cocientes entre Bandas, que los realzaba en tonos claros.

Post-clasificación: En el siguiente paso, procesamos las imágenes de regla creadas con una post-clasificación, para definir el ángulo, en radianes, y colores más adecuados para visualizar las zonas que contengan el tipo de mineral que buscamos en el área de estudio. Un método sencillo para ello, es crear un *Density Slicing* e ir acotando este ángulo. Este procedimiento se realizó para cada uno de los minerales de referencia, y luego se utilizó el valor máximo del ángulo para la post-clasificación (Cuadro X). En las Figuras 34, 35 y 36 se ilustran los resultados de esta clasificación para las áreas estudiadas.

Minerales	Ángulo máximo en radianes	
	Aragonesa-El Puntudo La Manchuria	Estancia La Esperanza
Clorita	0.173	0.175
Epidoto	0.271	0.269
Dickita	n/a	0.193
Pirofilita	n/a	0.135
Caolinita	0.141	0.110
Caolinita + esmeclita	0.078	0.068
Illita	0.107	0.097
Montmorillonita	0.090	0.079
Muscovita	0.138	0.113

Cuadro X: Ángulos en radianes asignados para cada mineral en la Clasificación SAM.

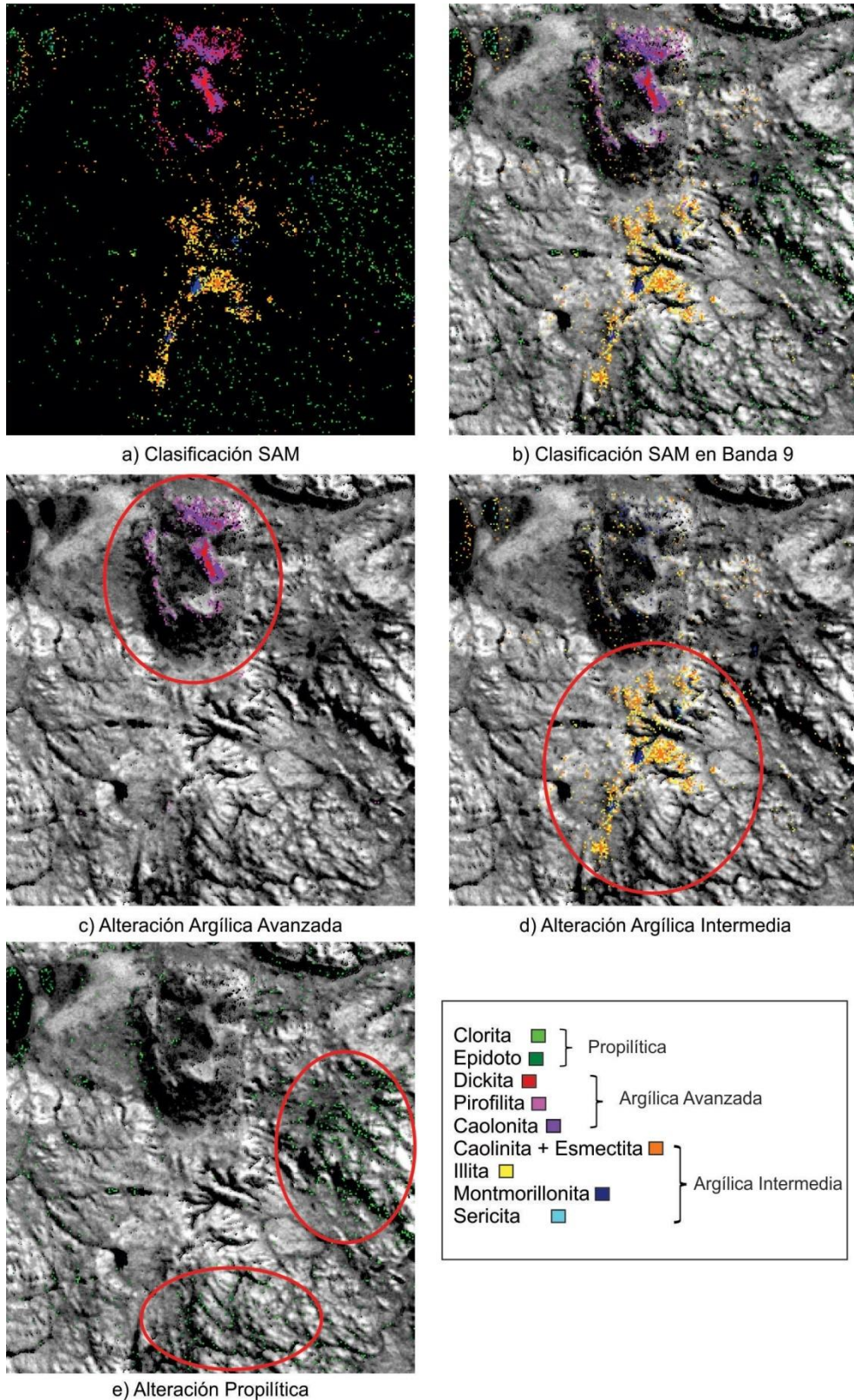


Figura 34. Resultados de la clasificación SAM para el área de Estancia La Esperanza; a) mapeo del método SAM con todos los minerales utilizados; b) resultado SAM visualizado sobre la banda 9; c) mapeo de minerales de alteración argílica avanzada; d) mapeo de minerales de alteración argílica intermedia; e) mapeo de minerales de alteración propilítica.

En la Figura 34a se ilustra el resultado de la Clasificación SAM con los umbrales elegidos. En la Figura 34b se representa este mismo resultado sobre la banda 9, para tener una mejor visualización de los minerales de alteración en la zona de Estancia La Esperanza. En la Figura 34c se muestran los minerales característicos de alteración argílica avanzada (dickita, pirofilita y caolinita); el método de clasificación mapea a estos minerales en la zona del Cerro Tornillo, lo que lleva a pensar que este tipo de alteración está presente en el mismo. Sin embargo, los datos de campo y mapa de alteración hidrotermal en Mykietiuk (2006) no acusan su presencia en esta zona. La Figura 32d muestra el mapeo de la clasificación para minerales de alteración argílica intermedia (caolinita + esmectita, montmorillonita, illita y sericita), limitando su presencia a la zona del Cerro Guanaco y Zona de Vetas. Este mapeo tiene una mejor aproximación a los datos de referencia de campo, principalmente con el mineral illita. Por último, en la Figura 32e se muestran los minerales característicos de alteración propilítica (epidoto y clorita), restringidos a la periferia del Cerro Guanaco y Zona de Vetas, en coincidencia con la información de campo de Mykietiuk (2006).

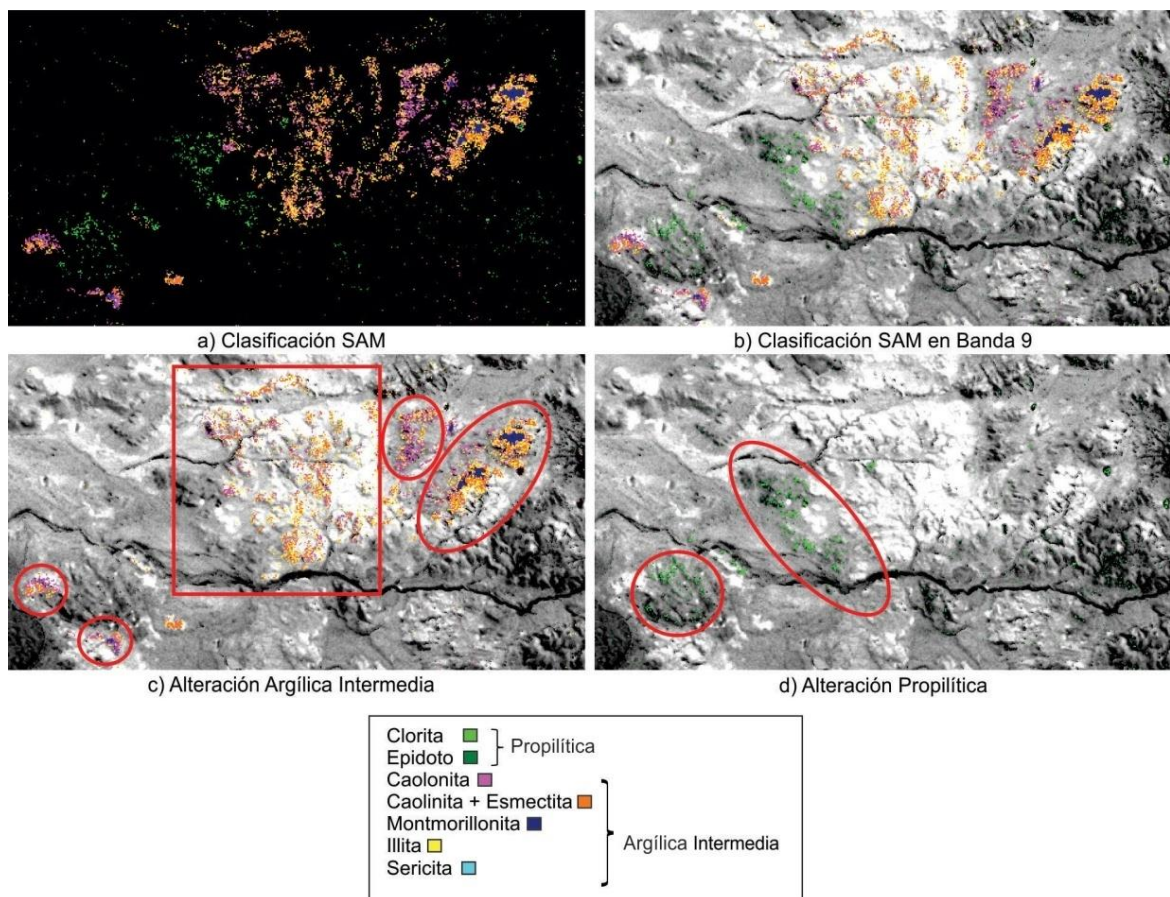


Figura 35. Resultados de la clasificación SAM para el área de La Aragonesa-El Puntudo; a) mapeo por el método SAM con los minerales utilizados; b) resultado SAM visualizado sobre banda 9; c) mapeo de los minerales de alteración argílica intermedia; d) mapeo de minerales de alteración propilítica.

En la Figura 35a se muestran los resultados de la Clasificación SAM para el área de La Aragonesa-El Puntudo. En ésta zona no hay mapas de alteración hidrotermal en la bibliografía del área, sino que se cuenta con mapeos locales de estructuras vetiformes, litologías y menciones de

las alteraciones en el área, por lo que el resultado de la Clasificación SAM no puede ser contrastado adecuadamente. De igual manera, en zonas donde se describieron alteraciones en el campo, el mapeo creado por el método SAM es coincidente con las descripciones bibliográficas en todos los casos (INREMI, 2003; Marchionni, 2007). En la Figura 35b, se ilustra la Clasificación SAM sobre la banda 9. La Figura 35c señala la alteración argílica intermedia (caolinita + esmectita, montmorillonita, illita y sericita), con importante presencia de illita, caolinita y caolinita + esmectita en Loma Blanca y Lomas Grises y en la Zona de Vetas. Al éste del Cerro Tejedor, también se mapean estos minerales de alteración. Por último la Figura 35d está definiendo zonas con presencia de clorita y epidoto, minerales de alteración propilítica, coincidiendo con lo descrito en los trabajos de campo.

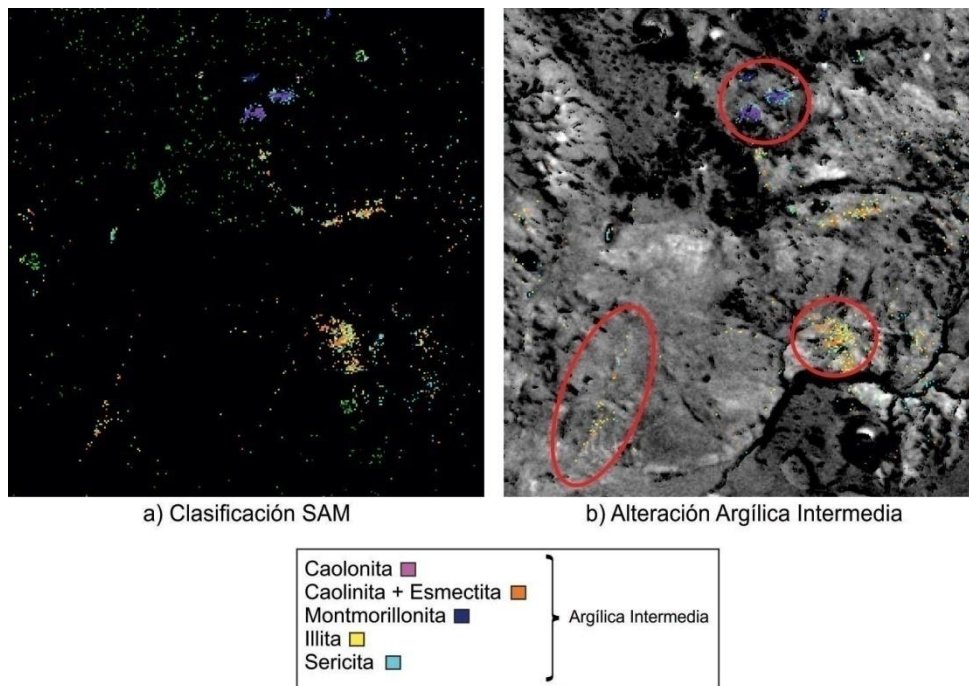


Figura 36. Resultados de la clasificación SAM para el área de La Manchuria; a) mapeo del método SAM con los minerales utilizados; b) mapeo de minerales de alteración argílica intermedia.

En la Figura 36a, se ilustra la Clasificación SAM en el área de La Manchuria, donde se mapearon sólo minerales de alteración argílica intermedia (caolinita, caolinita + esmectita, montmorillonita, illita y sericita) dado a que en La Manchuria se describió este tipo de alteración. En la Figura 36b se ilustran las zonas alteradas con estos minerales, en donde los minerales illita, caolinita + esmectita y sericita son mapeados en la Veta Speme y en los Domos del Sur, mientras que en la zona del Cerro Turulo, si bien predomina la silicificación, la Clasificación SAM genera un mapeo con los minerales montmorillonita y sericita.

Una acotación importante a destacar, es el hecho de que solo se pudo realizar la clasificación con los minerales que tienen rasgos espectrales diagnósticos en los intervalos del SWIR, es decir las arcillas. Es por esto que el mapeo creado por este método de clasificación es referido a las alteraciones argílicas y propilítica. Si bien las zonas ilustradas en las Figuras 34, 35 y 36 también presentan oxidación y silicificación, se probó la clasificación en los intervalos del VNIR para los óxidos, los resultados no fueron fieles con los datos de campo, dado que zonas alteradas con presencia de oxidación no fueron mapeadas correctamente por el método.

6. CONSIDERACIONES FINALES

Todo trabajo de campo puede ser asistido por medio de la percepción remota y otras tecnologías geomáticas, conjuntamente con los Sistemas de Información Geográfica (GIS), los cuales continúan en desarrollo y crecimiento tecnológico y técnico. La enorme cantidad de satélites multispectrales, hiperspectrales y de radar que hay en órbita y la facilidad con la que podemos acceder a sus datos bajo la forma de imágenes, simplifica la tarea del geólogo, dada la posibilidad de generar mapas preliminares en las etapas más tempranas de la prospección previas a los trabajos de campo. Tanto las imágenes Landsat como ASTER son fuentes de información poderosas para el mapeo de blancos de alteración, contribuyendo directamente a reducir tiempos y costos a la industria minera en las áreas de exploración.

La elección del sensor a utilizar está vinculada a la escala de trabajo con la que se desarrolle el proyecto, siendo confiable la utilización de las imágenes de estos dos satélites Landsat y TERRA a escalas 1:100.000 hasta 1:25.000. Cabe destacar que, para el diseño del sensor ASTER -sensor multispectral de 14 bandas-, se contó con el asesoramiento de geólogos conocedores de la importancia de la ubicación de las bandas de absorción de los minerales, de manera que los detectores de flujo radiante están correctamente ubicados para su detección.

Una observación que surge como resultado de este trabajo es la importancia de conocer las ventajas y/o limitaciones de los datos satelitales y los métodos a utilizar para la detección de alteraciones y minerales; algunas de estas técnicas de detección dependerán de las necesidades del proyecto o investigación.

Cuando se buscan resultados rápidos, existen técnicas muy útiles como los cocientes entre bandas, siendo el método más utilizado en cualquier trabajo con procesamiento de imágenes satelitales. En este trabajo en concreto, los cocientes entre bandas dieron muy buenos resultados, en particular los cocientes para la identificación de óxidos, tanto el cociente $ETM^+ 3/ETM^+ 1$ y $ETM^+ 5/ETM^+ 1$ para Landsat como el cociente $B2/B1$ para ASTER. Las oxidaciones descritas en los trabajos de campo del área de La Manchuria (Figura 16 y 22) coinciden con las detectadas por estos cocientes, mejorando su visualización cuando se combinan en una composición RGB.

Cuando se quiere identificar minerales del grupo de las arcillas, y localizar un posible blanco de alteración hidrotermal, en este caso argilización, los cocientes entre bandas siguen siendo útiles, pero la información que nos proporciona el sensor ASTER es superior al Landsat 7 debido a que presenta mayor cantidad de bandas en la región del Infrarrojo de onda corta. Aun así, el cociente $ETM^+ 5/ETM^+ 7$ de Landsat tiene un gran potencial, y si se combina este cociente en una composición RGB podemos fácilmente definir áreas con alteración argílica (Figura 15, 16 y 22, área de La Manchuria y Figura 17 zona de La Aragonesa-El Puntudo).

Por otro lado, ASTER permite discriminar minerales del grupo de las arcillas utilizando diferentes bandas para los cocientes y/o índices. De esta manera, pueden utilizarse varios cocientes e índices creados por distintos autores (Ninomiya, 2004; Yamaguchi and Naito, 2003; Rowan et al., 2003, entre otros), logrando la identificación de alteraciones: argílica avanzada, intermedia, propilítica, así como minerales diagnósticos de cada alteración. El cociente $B4/B6$ muestra buenos resultados en la detección de alteración argílica sin discriminar ningún tipo de mineral (Figura 23), mientras que si utilizamos otros cocientes que discriminan minerales en una composición RGB (Figura 24), se podrá tener mejores resultados visuales al momento de definir un mineral u otro.

Otro cociente e índice importante utilizado en el trabajo fue para el cuarzo y SiO₂, ya que la silicificación domina ampliamente en la región de estudio y se vincula con las mineralizaciones de oro y plata. En las imágenes Landsat no ha sido posible delimitar las áreas silicificadas, dada la respuesta uniforme de la sílice en el rango espectral cubierto por estas imágenes. Mientras que con ASTER, si bien la resolución espacial de la región del TIR es muy baja, los cocientes B13/B12 y índice $(B11*B11)/(B10*B12)$ resaltaron áreas silicificadas que son verificadas con los datos bibliográficos y de campo (Figura 25) y esta alteración es claramente visible en la combinación RGB de la Figura 26 del área La Aragonesa-El Puntudo.

Otra manera práctica que hemos utilizado para visualizar la alteración argílica fue la segmentación de densidades en Landsat 7. Si bien esta técnica conlleva un mayor procesamiento, los resultados logran limitar las zonas con mayor intensidad de la alteración, siendo aplicada la técnica sobre imágenes de Cociente entre Bandas $ETM^+ 5/ETM^+ 7$.

Con las técnicas de Componentes Principales también se obtuvieron muy buenos resultados, en especial con la Técnica de Crosta and Moore (1989) usando la adaptación propuesta por Loughlin (1991). Esta técnica fue aplicada en las imágenes de ambos sensores ETM^+ y ASTER. Aunque las técnicas de Componentes Principales se tornen un poco más laboriosas, tiene la ventaja de que puede realizarse sin previa corrección de las imágenes.

En el caso de Landsat 7, se generaron 6 componentes principales, de los cuales la CP5 brindó información sobre las alteraciones hidrotermales (Figura 18), pero sólo es útil para identificar las zonas alteradas, sin discriminar tipos de alteración. Asimismo en particular la CP3 permitió diferenciar claramente las rocas de composición ácida del resto. Para lograr mejores resultados se utilizaron las Componentes Principales Orientadas a Rasgos siguiendo la Técnica de Crosta y Moore (1989) adaptada por Loughlin (1991). Si bien el procedimiento a seguir para esta técnica es el mismo tanto para ASTER como Landsat, el resultado final, para las componentes de ASTER, es potencialmente superior al de Landsat. Sin embargo, cabe destacar que la composición color creada con la componente PC4 de "OH-" "H Component", la PC3 de "Fe" "F Component" y la "H+F Component" de Landsat (Figura 20) se obtuvo una de las mejores composición color del trabajo en cuanto a visualización de las zonas alteradas.

Las Componentes Principales Orientadas a Rasgos de ASTER fueron muy eficientes para resaltar aquellas zonas que contenían un mineral de interés. Fue muy estudiada la zona de la Estancia La Esperanza con esta técnica, y a pesar de los buenos resultados visuales que se obtuvieron (Figura 28), se indicaba la presencia de minerales de alteración argílica avanzada principalmente en el Cerro Tornillo, y esto disenta con los datos bibliográficos de campo; aquellos minerales característicos de alteración argílica intermedia y propilítica quedaban expresados por componentes en zonas que sí eran coherentes con lo descrito en campo (Figura 28). Las composiciones color de estas Componentes Principales Orientadas a Rasgos (Figura 29) permitieron una mejor visualización de las zonas donde se encontraba su presencia.

La componente principal del cuarzo (Figura 28) tuvo una correlación positiva con lo descrito en campo para la Estancia la Esperanza, siendo considerado un buen producto para detectar silicificación. Es por esto último, y también por los excelentes resultados visuales de la componentes principales "F Component" y "H Component" de Landsat, que se realizó una composición RGB con el componente principal de cuarzo de ASTER y los dos componentes, Fe "F Component" y OH- "H Component" de Landsat 7 (Figura 30).

Por último, una técnica de procesamiento que implica un mayor tratamiento, pre-procesamientos de las imágenes y análisis de resultados, es la Clasificación Digital de Imágenes. Para este caso se desarrolló el método "Spectral Angle Mapper" (SAM) en las imágenes ASTER.

Los mapeos generados por el método resultaron muy interesantes, dado que se trata de una técnica muy puntual si se compara con los cocientes, principalmente por el hecho de que utiliza un umbral de ángulo en radianes para comparar entre un espectro de referencia y el espectro de cada pixel. La única limitante fue que sólo se trabajó en los intervalos del SWIR, no pudiendo detectar la oxidación o silicificación; pero la observación a rescatar es que los resultados fueron bastantes coincidentes con el ACPOR, de tal manera que los minerales característicos de alteración argílica avanzada fueron mapeado por SAM en el Cerro Tornillo, llevando a la conclusión a la posible presencia de esta alteración en la zona. Cuando se presenta una situación similar a ésta, y no se la pueda solventar con datos bibliográficos o de campo previos, la mejor solución es realizar una nueva salida al campo, para obtener datos de la zona conflictiva.

En los Cuadros XI y XII se sintetizan los principales tipos de alteración presentes en las áreas analizadas y los resultados de los métodos de detección utilizados en cada caso para las imágenes Landsat ETM⁺ (Cuadro XI) y ASTER (Cuadro XII)

7. CONCLUSIONES

En este Trabajo Final de Licenciatura se realizó la práctica en las metodologías de detección de alteraciones minerales con las imágenes ETM⁺ y ASTER de los satélites Landsat 7 y TERRA en áreas ya exploradas del Macizo del Deseado (La Manchuria, La Aragonesa-El Puntudo, San Pedro-La Evelina y la zona de Estancia La Esperanza), para la detección de áreas de alteración que puedan estar indicando la presencia de mineralizaciones epitermales.

En las áreas estudiadas, las alteraciones hidrotermales son muy restringidas arealmente, por lo que en ocasiones, como es el caso particular del área de San Pedro-La Evelina, los alcances de las metodologías aplicadas en este trabajo no brindan datos suficientes para corroborar la información de campo. A su vez, en la mayoría de los casos, las alteraciones presentes se encuentran superpuestas –argilización acompañada de oxidación o silicificación-. Las distintas técnicas que hemos aplicado –cocientes entre bandas, índices, componentes principales o clasificación- están basadas en la identificación de alteraciones o minerales puros, es por ello que la detección de las alteraciones en estas zonas se ve dificultada.

En líneas generales las alteraciones detectadas más fácilmente y en coincidencia con los datos de campo fueron las alteraciones argílicas en general y, de ellas, las moderadas en particular, con amplio desarrollo en todas las zonas analizadas. La alteración argílica avanzada se encontraba con poco desarrollo superficial y relevada en una sola de las áreas estudiadas (Cerro Guanaco en la zona de Estancia La Esperanza). En el caso de la silicificación, si bien está presente en varios sectores como relleno y/o reemplazo, su detección es incierta y se requerirían nuevos datos y/o técnicas que permitan definirla mejor dada su importancia prospectiva.

Como consideración para el Trabajo Final de Licenciatura, el conocimiento adquirido con las herramientas y metodologías de detección de alteraciones y minerales con imágenes de satélite, así como el entrenamiento con los softwares para su procesamiento, fueron de gran utilidad para ser aplicadas a futuro en trabajos profesionales con objetivos de hallazgo de metales preciosos, considerando que la detección de anomalías espectrales podrían indicar, en forma indirecta, la presencia de mineralizaciones epitermales.

Alteraciones Métodos	Silicificación	Oxidación	Argilización
Composiciones RGB	RGB: 741 zonas silicificadas adquieren coloración verdosa y cuando está superpuesta con argilización, blanquecinos. Rocas ignimbríticas también se visualizan en estas tonalidades, por lo que esta composición no es del todo diagnóstica. Figura 2.	RGB: 741 la oxidación se visualiza en colores amarillentos a blanquecinos, similares a algunas ignimbríticas. No es diagnóstica su utilización. Figura 2.	RGB: 741 la argilización adquiere tonos amarillentos, verdosos a blanquecinos, superpuesto con la silicificación. Afloramientos ignimbríticos y tobáceos se visualizan en estos tonos similares. No es diagnóstico su interpretación. Figura 2.
Cocientes entre Bandas	No cuenta con bandas para su detección.	3/1 y 5/1 brindan buenos resultados para su identificación. El cociente 5/1 presenta mejores resultados visuales salvo algunas excepciones en donde el cociente 3/1 identifica mejor la oxidación (C° Turulo). Figura 15a y b.	5/7 con este cociente se logra identificar zonas con alteración argílica, con buenos resultados visuales. Figura 15c.
Composición color de cocientes	No cuenta con bandas para su detección.	RGB 3/1; 5/1; 5/7 zonas oxidadas se distinguen en tonos amarillos, y tonos blancos cuando esté presente la argilización. Figura 16b. RGB 5/7; 3/1; 4/3 las zonas alteradas presentan tonos amarillos conjuntamente con óxidos. Figura 16a.	
Componentes Principales	CP3 destaca la respuesta de rocas de composición ácidas (>65% SiO ₂). Figura 18c.	CP5 representa tanto la oxidación como la argilización. Figura 18e.	
Componentes Principales Orientados a Rasgos	No cuenta con bandas para su detección.	Fe "F Component" esta componente alcanza resultados superiores al obtenido por los cocientes. Figura 19a.	OH "H Componente" esta componente mejora la visualización con respecto al cociente. Figura 19b.
Composiciones Color con ACPOR	No cuenta con bandas para su detección.	RGB: F; H; F+H esta composición logra resultados visuales diagnósticos para identificar zonas con oxidación y alteración argílica. Figura 20.	

Cuadro XI: Síntesis de las alteraciones presentes en las áreas analizadas y los resultados de los métodos de detección con Landsat ETM⁺.

Alteraciones Métodos	Silicificación	Oxidación	Argílica Intensa	Argílica Moderada	Propilítica
Composiciones RGB	RGB: 641 zonas silicificadas adquieren una coloración magenta, similar a la argilización. Figura 26 inf.	RGB: 641 se presentan coloraciones amarillentas en zonas oxidadas. Figura 26 inf.	RGB: 641 puede visualizarse tonos rosados a magenta. Figura 26 inf.	RGB: 641 puede visualizarse tonos rosados a magenta. Figura 26 inf.	RGB: 641 no es muy extensa la alteración propilítica. Posiblemente en tonos verdes oscuros. Figura 26 inf
Cocientes entre Bandas e índices	13/12 cociente más representativo para la detección de cuarzo, con la limitante de la resolución del TIR. (B11*B11)/(B10*B12) buenos resultados, pero su visualización es mala por un efecto visual que se genera (Stripping). Figura 25a y b.	2/1 y 3/1 mejor método para identificar óxidos, logrando mejores resultados visuales el cociente 2/1. Figura 22a y b.	4/6 y 5/6: el primer cociente es muy útil para identificar las zonas argilizadas, sin ninguna discriminación entre minerales. El cociente 5/6 es útil para minerales como pirofilita o alunita. (B4*B8)/(B5*B6) y B7/(B5+B6); índices para identificación de caolinita, que brindan buenos resultados visuales, identificando zonas argilizadas en general. Figura 23a y b.	(B5+B7)/B6; (B5+B7)/B6, buenos índices para la identificación de illita o montmorillonita.	5/8 no se visualiza tan definidamente, mejora su interpretación en composiciones RGB (B6+B9)/(B7+B8) brindó mejores resultados que el cociente 5/8. Figura 23d.
Composiciones Color de Cocientes	RGB 13/12; 2/1; 4/6 composición muy útil para identificar los tres tipos de alteraciones. Zonas oxidadas y argilizadas se representan en tonos cian. Argilizadas y silicificadas en tonos magenta, y oxidadas y silicificadas amarillas. Si están presentes las tres alteraciones se visualiza en tonos blanquecinos. Figura 26 sup.				
		RGB 3/1; 5/6; (B6+B9)/(B7+B8) pueden discriminarse con la combinación de los distintos canales los minerales o grupo de minerales de cada alteración. Colores cian indican alteración argílica y propilítica. Figura 24b.			

			RGB: 4/6; 5/8; (B6+B9)/(B7+B8) colores magenta y blanquecinos indican zonas argilizadas y propilitizadas. Alteración propilítica visualizada en colores cian. Figura 24a.		
Componentes Principales Orientadas a Rasgos	CP3 Cuarzo uno de los mejores resultados visuales para la identificación de este mineral. Figura 28g.	No se aplicó	CP 3 Dickita; CP 4 Alunita; CP 4 Caolinita; resultados visuales claros, no muy contrastante el de la alunita, pero tienen correlación negativa con los datos bibliográficos, con excepción de la caolinita que se aproxima más a estos datos. Figura 28c, a d.	CP 3 Caolinita + Esmectita; CP 4 Illita; buenos resultados visuales, con correlación positiva a los datos de campo. Figura 28d y b.	CP 4 Calcita no son muy contrastantes los resultados con los afloramientos, posiblemente por no haber abundancia de este mineral. Figura 28f.
Composiciones Color con ACPOR e índices		No se aplicó	RGB: CP N°4 illita; CP N°3 dickita; Cociente 5/6 tonos amarillentos, implican la participación de los minerales illita y dickita, zonas que se visualicen en color cian, indican presencia de dickita y pirofilita o alunita, alteración argílica avanzada. Figura 29.		
Clasificación <i>Spectral Angle Mapper</i>	No se aplicó	No se aplicó	Mapeo por Clasificación SAM brindó muy buenos resultados, lográndose visualizaciones muy puntuales de los minerales en las áreas donde se aplicó el método. Figura 34, 35 y 36.		

Cuadro XII: Síntesis de las alteraciones presentes en las áreas analizadas y los resultados de los métodos de detección con ASTER.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, M., 2000, The Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA TERRA Platform. *Int. J. Remote Sens.* 21, 847–859.
- Alric, V., Féraud, G., Bertrand, H., Haller, M., Labudía, C. y Zubia, M., 1995. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Patagonian Jurassic volcanism: new constraints on Gondwana break up. *Terra Nova* 7: Abstract Suppl. 1: 353.
- Archangelsky, S., 1958. Estudio geológico y paleontológico del Bajo de La Leona (Santa Cruz). *Acta Geológica Lilloana*, 2: 5-136, Tucumán.
- Archangelsky, S., 1967. Estudio de la Formación Baqueró, Cretácico inferior de Santa Cruz, Argentina. *Revista del Museo de La Plata (n.s.) Paleontología* 5: 63-171.
- Arrondo, O. G., 1972: Estudio geológico y paleontológico en la estancia La Juanita y alrededores, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *Revista del Museo de La Plata*, VIII, Paleontología, 43.
- Ashley, R., 1974. Goldfield Mining District: Nevada Bureau of Mines and Geology Report 19, pages 49-66.
- Beiranvand Pour, A., and Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. V 42, pp 1309-1323.
- Beiranvand Pour, A., and Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*. V. 44, pp 1-9.
- Casamiquela, R., 1961. Sobre la presencia de un mamífero en el primer elenco (icnológico) de vertebrados del Jurásico de la Patagonia. *Noticia. Physis* 22 (63): 225-233.
- Castro Godoy, S. y Di Tommaso, I., 2004. Procesamiento de Datos Para el Mapeo Temático y Cartografía de Base en el Área de Sierra de Aguilar, Provincia de Jujuy, Argentina. Iº Simposio ASTER-GEOSAT - Datos Satelitales de Última Generación. Buenos Aires
- Center for the Study of Earth from Space (CSES), 1992, *SIPS User's Guide, The Spectral Image Processing System*, v. 1.1, University of Colorado, Boulder, 74 p.
- Chavez, Jr. P. S. and Kwarteng, A.Y., 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 3, pp. 339-348.
- Chuvieco, E., 2008. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ed. Ariel S.A. Barcelona, España. Pp 608.
- Crósta, A. P., and Rabledo, A., 1993. Assessing Landsat/TM for hydrothermal alteration mapping in central- western Brazil. 1053-1061.
- Crosta, A. P., Souza Filho, C. R., Asevedo, F., Brodie, C., 2003, Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis.

Crosta, A. P., and Moore, J. McM., 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 Proceedings. Calgary, Alberta (ERIM), pp: 1173-1187.

CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*)

De Barrio, R. E., 1993. El volcanismo ácido jurásico en el noroeste de Santa Cruz, Argentina. XII^o Congreso Geológico Argentino, Actas IV: 189-198.

De Giusto, J. M., 1956. Informe geológico preliminar zona Ea. Roca Blanca-Ea. Baqueró. Dpto. Magallanes, Prov. de Santa Cruz. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires (inédito).

De Giusto, J. M., Di Persia, C. A. y Pezzi, E., 1980. Nesocratón del Deseado. En: Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Vol II:1389-1430.

Di Persia, C.A., 1956. Informe previo al levantamiento geológico en escala 1:100.000 de la zona norte de la provincia Patagonia, al sur del río Deseado (3era. campaña). Yacimientos Petrolíferos Fiscales. 56 p. Buenos Aires (Informe inédito).

Di Persia, C., 1958. Informe previo al Levantamiento Geológico en escala 1:100.000 de la zona Norte del Territorio de Santa Cruz, al sur del río Deseado. Quinta Campaña. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires. Informe inédito.

Di Persia, C. A., 1962. Acerca del descubrimiento del Precámbrico en la Patagonia Extraandina (provincia de Santa Cruz). I^o Jornadas Geológicas Argentinas, Actas Vol. II: 65-68.

Di Persia, C. A., 1965. Presencia de Sedimentos Triásicos en el ambiente del Deseado. II^o Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 2: 147-154.

Drury, S. A., 1993. Image Interpretation in Geology (2^o edición). Chapman & Hall Eds. London.

Ducart, D.F., Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., and Coniglio, J., 2006, Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, shortwave infrared spectroscopy, and ASTER images: Economic Geology, v. 101, p. 981–996.

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. Asociación Geológica Argentina, Revista 56 (4): 548-558.

Echeveste, H., Fernández, R., Llambías, E., Tessone, M., Schalamuk, I., Bellini, G., Piccirillo, E. y De Min, A., 1999. Ignimbritas tardías de alto grado en la Formación Chon Aike. Macizo del Deseado, Santa Cruz. Argentina. XIV^o Congreso Geológico Argentino. Actas II, pp: 182-185.

Eiswerth, B., y Rowan, C. I., 1993. Analysis of Landsat Thematic Mapper images of study áreas located in western Bolivia, northern Chile and southern Peru. Investigación de Metales Preciosos en los Andes Centrales. Proyecto BID. pp: 19-44.

ERSDAC, 2007. S. ASTER User's Guide. Part-II (Ver. 5.1). pp 68.

Féraud, G., Alric, V., Fornari, M., Bertrand, H., y Haller, M., 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jurassic volcanic province of Patagonia: migrating magmatism related to Gondwana break-up and subduction. *Earth and Planetary Science Letters* 172: 83-96.

Feruglio, E., 1946. Sistemas orográficos de la Argentina. *Geografía de la República Argentina*. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, GAEA 4: 1-536.

Feruglio, E., 1949-50. Descripción Geológica de la Patagonia. Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires. Tomo I Cap. II.

Goetz, A. & C. Rowan, L. 1981. Geologic Remote Sensing. *Science* (New York, N.Y.). 211. 781-91. 10.1126/science.211.4484.781.

Guido, D., Tessone, M. y de Barrio, R. E., 2002. Domo riolítica La Aragonesa: vinculación con manifestaciones metalíferas, sector central del Macizo del Deseado, Santa Cruz. XV Congreso Geológico Argentino. Actas II: 365-369.

Gupta, R. P., 1991. *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag.

Harrington, H.J., 1962. Paleogeographic development of South America. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 46(10): 1773-1814, Tulsa.

Harris, J. R., Rencz, A. N., Ballantyne, B. y Sheridan, C., 1998. Mapping altered rocks using Landsat TM and lithochemical data: Sulphurets-Brucejack Lake District, British Columbia, Canada. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 64 (4): 309-322.

Hunt, G. R., 1977, Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3), 501-513.

INREMI, 2003. Mapeo regional y muestreo de reconocimiento del área La Aragonesa. Provincia de Santa Cruz, Argentina. Pp. 62 y 2 Anexos. Informe para San Jorge Minera (Inédito).

INREMI, 2004a. Área de cateo San Pedro, Provincia de Santa Cruz. Mapeo de semidetalle. Pp. 58 y 2 Anexos. Informe para FOMICRUZ S. E. (inédito).

ITT, 2001. ENVI Tutorial: Selected Hyperspectral Mapping Methods. Pp 29.

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. Calgary, Alberta (ERIM), pp: 17-28.

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebreicht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., y Goetz, A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS)- interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44:145-163

Leanza, A.F., 1958. Geología Regional. En: La Argentina, Suma de Geografía, Tomo I, Capítulo III:217-349, Editorial Peuser, Buenos Aires.

Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región Extraandina de Chubut y Norte de Santa Cruz. En: Leanza, A.F. (Ed.), Geología Regional Argentina, 601-653. Acad. Nac. Ciencias, Córdoba.

Loughlin, W. P., 1991, Principal component analysis for alteration mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, N° 9, pp. 1163-1169.

Marchionni, D. 2007. Caracterización volcano-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 Mykietiuik, K., 2005. Mapeo de alteraciones hidrotermales con Imágenes LANDSAT en el área de Estancia La Esperanza. Macizo del Deseado, Santa Cruz. Argentina. XVIº Congreso Geológico Argentino, Actas Tomo II, Pp: 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. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 3269-3276.

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. VI Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Buenos Aires. Actas, Pp: 247-252.

Marquetti, C., Becchio, R., Seggiaro, R. y Nakashima, K., 2005. Aplicación de Datos ASTER en la Hoja Geológica Andalgalá, Catamarca, Argentina. Contribuciones técnicas Proyecto GEOSAT-AR. SEGEMAR Anales N° 41 pp 55-62.

Marín, G., 1982. Descripción geológica de la Hoja 55c Gobernador Gregores, provincia de Santa Cruz. Informe preliminar. Servicio Geológico Nacional, 17 p. (Inédito).

Mykietiuik, K., Fernández, R. y Lastra, F., 2002. Alteraciones hidrotermales en el área de la Estancia la Esperanza, Macizo del Deseado, Santa Cruz. XV Congreso Geológico Argentino. Actas en CD-ROM. Artículo N° 245. 6p.

Mykietiuik, K. y Lanfranchini, M., 2004. Vetas de ceolita hidrotermal en el Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Actas Tomo II:787-798.

Mykietiuik, K., Fernández, R. y Acevedo, F., 2005. Alteraciones Hidrotermales Superpuestas: producto de fluidos de pH neutro y ácido en el cerro Guanaco, Macizo del Deseado, Santa Cruz. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60 (1): 23-31.

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 (UNLP), 245 p. (inédito).

Moreira P., Gonzalez, P., Fernandez, R., Echeveste, H., Schalamuk, I., Echeverri, R., 2005. El basamento metamórfico de bajo grado de las estancias La Modesta y La Josefina, Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60 (1) 49-63.

Moreira P., Fernández, R., Hervé, F., Fanning C.M. y Schalamuk, I.B.A. 2013. Detrital zircons U-Pb SHRIMP ages and provenance of La Modesta Formation, Patagonia Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 47: 32-46.

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.

Ninomiya, Y., 2002. Rock type mapping with indices defined for Multispectral Thermal Infrared ASTER data: case Studies. *Proceedings of SPIE*. Vol 4886.

Ninomiya, Y., 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 5234 · February 2004. Vol. 5234 (SPIE, Bellingham, WA, 2004), Pages: 180-190.

Pankhurst, R. J., Rapela, C. W. y Márquez, M. J., 1993. Geocronología y petrogénesis de los granitoides jurásicos del nordeste del Macizo del Deseado. *Actas 12º Congr. Geol. Arg.*, 4: 134-141. Mendoza.

Pankhurst, R. J., Riley, T. R., Fanning, C. M. y Kelley, S. P., 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41 (5): 605-62.

Panza, J. L., 1982. Descripción de las Hojas 53e "Gobernador Moyano" y 54e "Cerro Vanguardia". Servicio Geológico Nacional, 197 p. (Inédito).

Pezzuchi, H., 1978. Estudio geológico de la zona de Ea. Dos Hermanos, Ea. 25 de Marzo y adyacencias, Dpto. Deseado, Prov. De Santa Cruz. Tesis Doctoral, Univ. Nac. La Plata (inédito).

Podwysoki, M. H., Power, M. S. y Jones, O. D., 1985. Preliminary evaluation of Landsat 4 Thematic Mapper data for mineral exploration. *Advances in Space Research*. Vol. 5: 47-55.

Pour A. B., and Hashim M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews* 44, 1–9.

Rajendran, S., Al-Khirbash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Alabri, A.H., Kusky, T.M., Ghulam, A., 2012, ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy, *Ore Geology Reviews*, Vol. 44, p.p. 121–135.

Rowan, L. C.; Hook, S. J. y Abrams, M. J. 2003. Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer ASTER. A new satellite – imaging system. *Economic Geology* 98:1019-1027.

Rowan L.C. and 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*, v. 84, p. 350–366, doi: 10.1016/S0034-4257(02)00127-X.

Rowan, L.C, Schmidt Robert G., Mars John C., 2006, Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data, *Remote Sensing of Environment* 104 p. 74–87.

Sacomani, L., 1984. Ciclos basálticos cenozoicos del sector centro-occidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Informe preliminar. Servicio Geológico Nacional (Inédito).

SEGEMAR, 2005. Contribuciones técnicas Proyecto GEOSAT-AR. SEGEMAR Anales N° 41, Buenos Aires 2005. Pp 178.

Spatz, D. M. y Taranik, J. V., 1994. Exploration for cooper-molybdenum-gold porphyry deposits using multispectral and hyperspectral aerospace remote sensing techniques. SELPER 10: 41-52.

Stipanivic, P. y Reig, A. O., 1955. Breve noticia sobre el hallazgo de anuros en el denominado "Complejo Porfírico de la Patagonia Extraandina", con consideraciones acerca de la composición geológica del mismo. *Asoc. Geol. Arg., Rev.*, X (4): 215-233. Bs As.

Stipanivic, 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., Del Blanco, M y Marchionni, D., 1996a. Mineralización epitermal de Veta Speme, Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. IIIº Reunión de Mineralogía y Metalogénesis. *Actas INREMI, Publicación Nº5*, Pp: 231-235.

Tessone, M., Rolando, P. y López Groothuis, E., 1996b. Mineralización epitermal en ámbito de la Estancia La Pilarica, Santa Cruz. IIIº Reunión de Mineralogía y Metalogénia. *Actas*, pp: 237-242. using the ASTER SWIR bands, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 24, No. 22, 4311–4323.

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. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica, *Actas Vol III*: 94-99.

Tessone, M. y Etcheverry, R., 1998. Alteraciones hidrotermales asociadas a algunos prospectos epitermales del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Argentina. IV Reunión de Mineralogía y Metalogénia, Bahía Blanca. *Actas*, Pp: 267-274.

Tessone, M., 1999, Mineralizaciones epitermales en el área de La Manchuria, Santa Cruz, En: *Recursos Minerales de la República Argentina* (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR. *Anales* 35: 1225-1230.

Varela, R., Pezzuchi, H. D., Genini, A. D. y Zubia, M. A., 1991. Dataciones en el Jurásico inferior de rocas magmáticas del nordeste del Macizo del Deseado, Santa Cruz. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 46 (3-4): 257-262.

Viera, R. y Pezzuchi, H., 1976. Presencia de sedimentitas pérmicas en contacto con rocas del "Complejo Metamórfico" de la Patagonia Extraandina, Estancia Dos Hermanos, provincia de Santa Cruz. *Asociación Geológica Argentina. Nota Breve. Revista* 31 (4): 281-283.

Yamaguchi, Y. and Naito, C., 2003. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 24, Iss. 22, 2003, Pages 4311-4323.

Zambrano, J. y Urien, C., 1970. Geological outline of the basins in Southern Argentina and their continuation off The Atlantic shore. *Journal of Geophysical Research*, 75 (8): 1363-1396.