

CARTOGRAFIA PRELIMINAR DE LOS MINERALES EVAPORITICOS DE LOS SALARES DE SUD LIPEZ (BOLIVIA) UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES

Cáceres, F,¹, Ali-Ammar, H¹, & Pirard, E¹.

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

1.- INTRODUCCIÓN

Este trabajo es un aporte más a la larga bibliografía que engloba la utilización de las técnicas de teledetección en el estudio de minerales evaporíticos. Los captores ópticos (multi – hiperspectrales) y radar tuvieron mucho éxito en este tipo de ambiente; ya sea para la determinación de la composición mineralógica o en el monitoreo de los mismos. Por la carencia de cobertura vegetal y la variedad de cuencas evaporitas que existen en la zona de Sud Lípez, la región es propicia para observar las capacidades de los sensores remotos.

2.- TRABAJOS ANTERIORES

Chapman, et al. (1989) fueron los primeros en utilizar las imágenes del satélite Landsat Thematic Mapper (TM) para el estudio de este tipo de ambientes. Los mencionados autores emplean la técnica de decorrelation stretching con el fin de cartografiar la superficie del Salar de Atacama (Chile). White & Drake (1993) utilizan las imágenes Landsat TM con el propósito de obtener la abundancia y distribución de yeso en la zona de Chott Fedjaj (Tunes)

Sabins & Millar* (1994) emplean imágenes Landsat TM y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) para la determinación del contenido de boro en el salar de Uyuni, con este propósito los autores utiliza el ratio TM 4/TM 7.

Bryant (1996) utiliza la técnica de desmezcla espectral sobre imágenes Landsat TM de la región Chott el Djerid (Tunes) con el objetivo de determinar la distribución espacial de yeso, halita y carnalita. Bryant (2003) emplea imágenes AVHRR en el monitoreo de playas en el Norte y Sud del continente africano, en este tipo de ambiente las modificaciones hidrológicas pueden ser detectadas mediante el análisis de imágenes satelitales, estas variaciones permiten determinar de manera indirecta los cambios de precipitación y evaporación del sistema.

Camargo, et al. (2003) emplea la información de reflectancia adquirida in situ sobre el salar de Uyuni con el fin de calibrar las imágenes satelitales, los autores recomiendan la utilización de este tipo de ambientes por su elevada homogeneidad espectral y los débiles efectos atmosféricos que existen en la zona.

Otros autores emplean captores aerotransportados para el estudio de este tipo de ambiente, especialmente en la región del Death Valley (California). Con este propósito Crowley & Clark (1992) y Crowley (1993) utilizan imágenes que provienen del captor AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) y Crowley, Mars & Hook (2000) emplean imágenes MASTER (MODIS/ASTER Airborne Simulator).

3.- LOS SALARES DE LOS LIPEZ

La región de Sud Lípez situada en el extremo Sudoeste de Bolivia, esta cubierto esencialmente por rocas volcánicas esencialmente ácidas (dacitas – riolitas) que pertenecen al complejo volcánico Neógeno - Cuaternario de los Andes Centrales. Dichas formaciones volcánicas ocupan gran parte de la Cordillera Occidental y su parte Sud se prolonga hacia el territorio argentino.

Si comparamos con la cuenca endorreica del Altiplano, la región de los Lípez se caracteriza por decenas (más de 30) cuencas intravolcánicas cerradas, independientes y mas elevadas (entre 4100 – 4600 msnm.) del resto del Altiplano.

El clima árido, las bajas precipitaciones (100 mm/año) y a topografía (figura 1) son los responsables de la existencia de los salares que existen en dicha región. La mayor parte de los cuales son la combinación de uno o mas tipos morfológicos (Risacher & Fritz, 1991): lagos de sal, costras de sal, playas y napas subaflorantes.

Los salares tienen una composición dominante de Na-Cl o Na-Cl-SO₄, en los cuales la secuencia evaporítica de precipitación esta condicionada a tres factores (Risacher, 1992):

* Trabajo enunciado posteriormente en los artículos de Sabins (1997 y 1999).

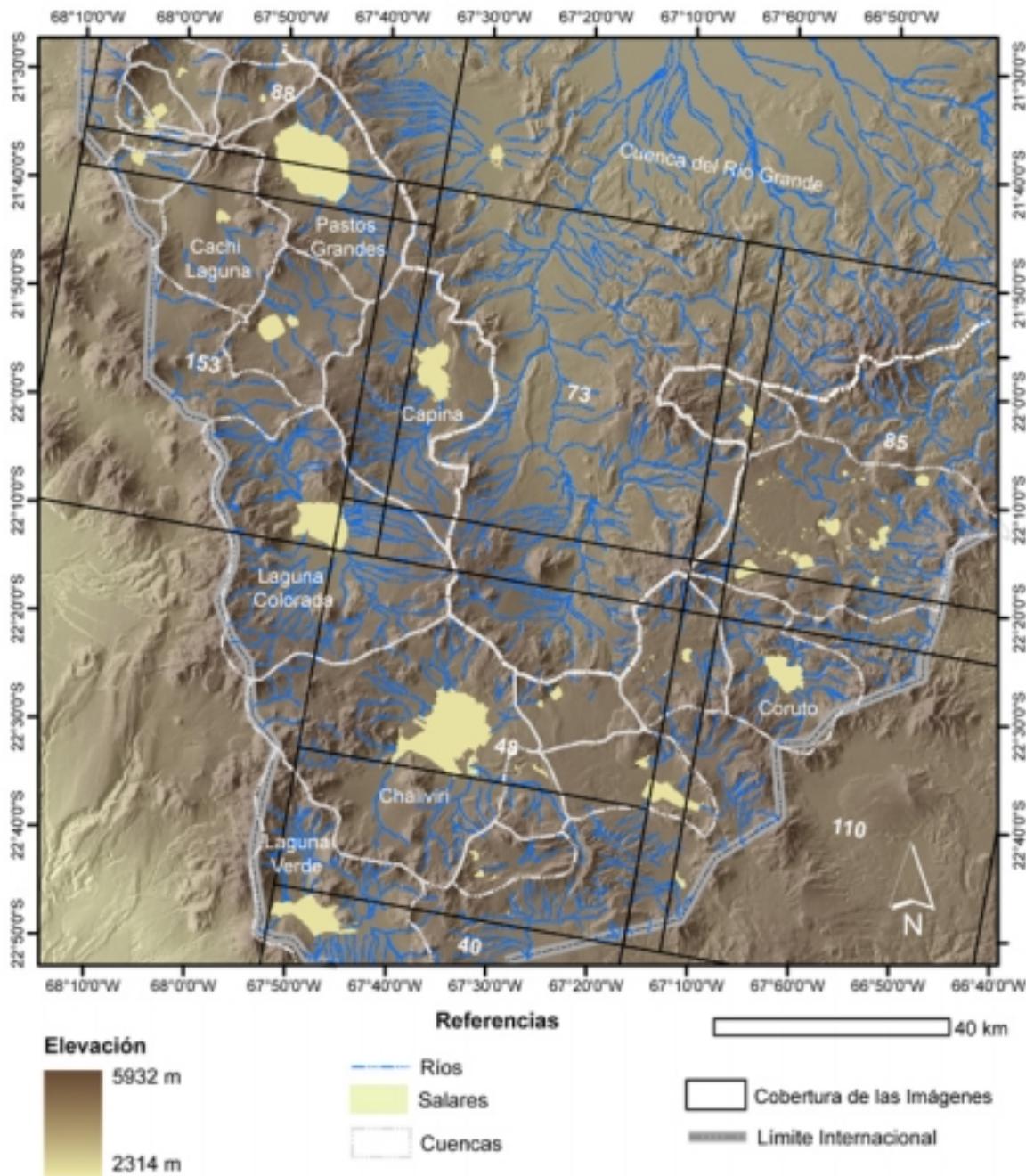


Figura 1 Ubicación de la zona de estudio - cobertura de las imágenes ASTER

- El origen de las aguas alimentadoras de la cuenca que vienen ambos del drenaje de rocas volcánicas y la removilización de depósitos evaporíticos antiguos.
- La presencia de sulfuros de exhalación (azufre nativo) de la actividad volcánica presente en la zona.
- Las características hidrológicas de los acuíferos (posición de las napas acuíferas dentro la cuenca).

4.- DATOS

El trabajo esta particularmente basado en las imágenes del captor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) que es uno de los cinco sensores embarcados sobre el satélite EOS-AM1 y denominado después TERRA plataforma, puesto en órbita en 1998. Su órbita a 700 km de altura, helio - sincrónica, cercana a los Polos y el tiempo que pasa a nivel del Ecuador permiten minimizar los efectos perjudiciales causados por las nubes. El satélite tiene una frecuencia de repetición de 16 días. El captor ASTER esta compuesto de tres subsistemas: El primer subsistema VNIR (Visible and Near Infrared) cubre la región visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. El subsistema es un escáner tipo "pushbroom" formado de dos telescopios uno a nadir que tiene tres bandas y otro localizado en la parte posterior con una simple banda; este canal es utilizado para las observaciones estereoscópicas. Los detectores CCD son lineales construidos en Si, cada captor posee 5000 detectores, los detalles de la resoluciónpectral y espacial del subsistema son mostrados en la tabla 1.

El segundo subsistema SWIR (Shortwave Infrared), con sus 6 bandas cubre el infrarrojo cercano y medio, los detectores son también de tipo "pushbroom" y opera con un simple telescopio que apunta a nadir y los datos son adquiridos por un espejo. Los detectores CCD son lineales y construidos en PtSi, cada banda spectral posee 2048 detectores. La tabla 1 muestra la resoluciónpectral y espacial del subsistema.

El tercer subsistema TIR (Thermal Infrared) con sus 5 bandas mensura la parte termal del infrarrojo; es un escáner mecánico compuesto de un simple telescopio a posición fija observando a nadir y de un escáner con un espejo localizado en la parte posterior. Cada banda utiliza 10 detectores construidos en HgCdTe; para preservar la dinámica de la imagen ella es codificada en 16 bits. La información espacial ypectral se puede observar en la tabla 1.

Los datos que adquiere el satélite tienen una amplia cobertura espectral y una resolución relativamente elevada, lo que permite discriminar una serie de materiales sobre la superficie (Yamaguchi et al., 1998).

En este trabajo se utilizaron siete imágenes cuyas características pueden ser observadas en la tabla 2, la cobertura de las imágenes puede observarse en la figura 1. Dado la magnitud de información y con en el fin de no mezclar propiedades físicas, solamente se tomo en cuenta las imágenes de los subsistemas VNIR y SWIR, no se considero el subsistema TIR. En esta zona del espectro y según la ley de Boltzmann, las mensuras toman en cuenta dos propiedades físicas de la materia (absorción-reflexión y temperatura), por lo contrario los otros dos subsistemas solamente mensuran uno (absorción-reflexión).

Sub-sistema	Banda No	Rango Espectral (μm)	Resolución Espacial (m)	Tamaño de la imagen (km)
VNIR	1	0.52-0.60	15	60
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	60
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.430		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475	90	60
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Tabla 1 Información del captor ASTER.

Los datos que adquiere el satélite tienen una amplia cobertura espectral y una resolución relativamente elevada, lo que permite discriminar una serie de materiales sobre la superficie (Yamaguchi et al., 1998).

Imagen	Nivel de tratamiento	Fecha de adquisición	Hora de adquisición
40	1B	03/12/2000	14:55:21
48	1B	24/07/2001	14:55:12
73	1B	17/01/2001	15:03:08
110	1B	05/07/2001	15:01:47
153	1B	07/06/2002	14:49:44
88	1B	07/06/2002	14:49:35
85	1B	28/01/2002	14:50:58

Tabla 2 Información de las imágenes utilizadas.

5.- MÉTODOS

5.1.- Pretratamiento de las imágenes

Sobre las imágenes brutas existen varios errores técnicos puestos en evidencia después que el satélite se encontraba en órbita (errores de paralaje y crosstalk), con este objetivo se tuvo que crear todo un procedimiento para la calibración de las mismas. Primeramente se corrigió el error de crosstalk de la imagen; este problema es creado por un mal aislamiento de algunos componentes electrónicos que genera una reflexión múltiple de la luz hacia los otros captores, generando de esta manera fantasmas en las imágenes (Iwasaki, et al., 2002). Este

problema es observado en las bandas 4 y 9 del subsistema SWIR, el método de corrección empleado en este trabajo fue desarrollado por los mismos autores.

El error de paralaje es evidenciado en todas las bandas del subsistema SWIR y es generado por la separación que existe entre captores, el error es de 0.5 píxeles por cada 900 m de elevación (Fujisada, 1998). Este problema fue corregido mediante la ortorectificación de todas las imágenes; con este propósito se utilizó un modelo digital del terreno construido en base a la información adquirida por las bandas 3b y 3n del mismo satélite.

5.2.- Corrección atmosférica

Con el fin de eliminar el efecto atmosférico que se encuentra en la imagen se utilizó el método descrito por Rowan & Mars (2003) que toma en cuenta el error que existe entre los datos adquiridos sobre el terreno y la imagen; mediante este procedimiento la imagen de radianza fue transformada en imagen de reflectancia.

Con el fin de evitar la generación de artefactos, la corrección fue efectuada de forma separada para cada uno de los salares, aislando el salar del resto de la imagen. De esta manera la zona estudiada presentaría una gran uniformidad espectral y mineralógica, por lo que suponemos que la creación de artefactos será ínfima. Este método puede ser utilizado en regiones donde no existe información meteorológica, como es el caso de Sud Lípez. Los modelos más complejos que en principio proporcionan mejores resultados, desgraciadamente requieren mayor información.

5.3.- Desmezcla espectral

La desmezcla espectral es el método por el cual un espectro mensurado de un píxel es descompuesto en una colección de espectros constituyentes llamados "endmembers" y el conjunto de sus fracciones correspondientes denominada "abundancia"; este último parámetro indica la proporción de cada endmember presente en un píxel (Keshava & Mustard 2002). El método se puede subdividir en tres etapas, las cuales son enteramente independientes la una de la otra:

5.3.1.- Determinación de los valores extremos

Un endmember puede traducirse literalmente como un valor extremo y técnicamente se traduce como un píxel puro, es decir un píxel que contenga solamente un material. Generalmente dicho píxel corresponde a un objeto macroscópico y/o microscópico presente en la escena, como por ejemplo el agua, suelo, vegetación, etc. El término también engloba la utilización de información espectral proveniente de librerías espectrales obtenidas en condiciones de laboratorio. Es lógico de suponer que esta noción existe si la mayor parte de los píxeles de la imagen son constituidos de mezclas como es el caso de una imagen satelital.

En la literatura existen muchos métodos para extraer los píxeles más puros de una imagen, en este trabajo se utiliza un método basado en la información espectral. Boardman et al. (1995) sugiere la técnica PPI (Pixel Purity Index), la cual se basa en las propiedades geométricas de un conjunto convexo y considera a cada píxel como un vector en un espacio a n-dimensiones (n-D). Para optimizar el procedimiento, el algoritmo no es aplicado a la imagen original sino a la imagen resultante de una reducción dimensional de datos basada en el método MNF (Minimun Noise Fraction) desarrollada por Green, et al. (1988). El algoritmo comienza con la generación de un vector aleatorio a n-D (denominado skewer), sobre el cual todos los píxeles de la imagen son proyectados, los píxeles que aparecen en las dos partes extremas del skewers son marcados y luego contados, este procedimiento es generalizado a un gran numero de skewers generados de igual manera. Al final de este proceso se obtiene una imagen con los píxeles más contados, es decir los píxeles que fueron contados más de 1000 veces son retenidos como posibles endmembers. Los candidatos a ser considerados como verdaderos endmembers son seleccionados en base a una comparación con una librería espectral y explorando su posición en el espacio n-D.

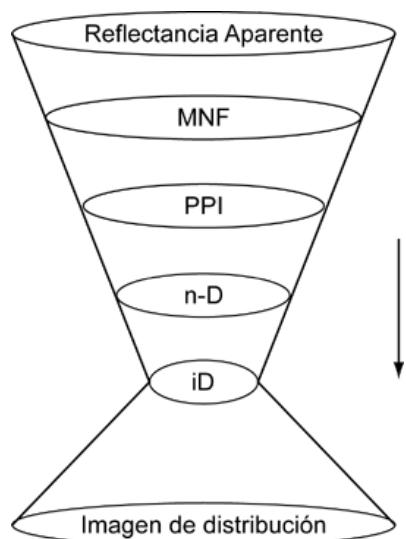


Figura 2 Procedimiento seguido para la extracción de los endmembers.

Esta selección supervisada requiere un gran conocimiento de las técnicas de teledetección y espectroscopía mineral. El mayor defecto de este método es la pobre interactividad y los resultados no pueden ser empleados para analizar un gran número de imágenes. Muchos autores consideran que la naturaleza aleatoria de los skewers es otra gran limitación del algoritmo (Plaza, et al., 2002). Todo el procedimiento seguido para la obtención de los valores extremos se puede observar en la figura 2.

5.3.2.- Modelo de desmezcla

El tipo y la naturaleza de las mezclas son cruciales para la comprensión de la señal; en la naturaleza las mezclas espectrales pueden ser consideradas como lineales y no lineales, siendo la segunda la más común entre las dos. Sin embargo los algoritmos que puedan analizar este tipo de mezclas se encuentran en un estado embrionario. Antes de considerar como lineales las mezclas que existen dentro una imagen se debe de suponer que (van der Meer, 2001):

- No existe interacción entre los materiales y cada fotón es adsorbido o reflejado por un solo material.
- La escala de la mezcla es muy grande en oposición al tamaño de los materiales.
- No existe múltiple dispersión.

Si tomamos en cuenta lo anteriormente enunciado, una combinación lineal de píxeles puros intentara descomponer la mezcla de espectros de reflectancia presentes en cada píxel R_i en fracciones f_i de sus endmembers Re_{ij} , que puede ser escrito como:

$$R_i = \sum_{j=1}^n f_j Re_{ij} + \varepsilon_i$$

este proceso puede existir bajo las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n f_j = 1 \text{ y } 0 \leq f_i \leq 1$$

donde R_i es la reflectancia de la mezcla espectral de cada píxel en la banda i , f_i es la fracción de cada píxel puro j calculado banda por banda, Re_{ij} es la reflectancia del endmember j en el canal i , i es el numero de bandas, j es cada uno de los n endmembers de la imagen, ε_i es el error residual o la diferencia entre la mensura y el modelo DN (Digital Number) en la banda i . La única solución para resolver esta ecuación es minimizar el error residual mediante la técnica de mínimos cuadrados. Este error debería ser en teoría igual al ruido del instrumento, en el caso de que solamente un endmember este presente en la imagen (van der Meer, de Jong & Bakker, 2001).

5.3.3.- Error de la desmezcla

El error residual para cada píxel de la imagen y sobre todas las bandas puede ser dado por el error cuadrático medio o RMS (Root Mean Square), representado sobre la forma de una imagen, el cual es calculado de la diferencia entre el modelo (R_{jk}) y la mensura (R_{jk}') y puede ser escrito como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (R_{jk} - R_{jk}')^2}{m}} / n$$

donde: n es el número de bandas espectrales y m es el numero de píxeles dentro la imagen (van der Meer, de Jong & Bakker, 2001).

Clase	Mineral	Formula Química	Picos de absorción (μm)
Sulfatos	Halita	NaCl	1.93
	Anhidrita	CaSO ₄	1.48, 1.8, 1.9, 1.3
	Basanita	CaSO ₄ .1/2H ₂ O	1.46, 1.94, 2.42
	Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O	0.99, 1.19, 1.48, 1.74, 1.96
	Tenardita	Na ₂ SO ₄	1.43, 1.91
	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	0.99, 1.22, 1.44, 1.94, 2.47
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃	1.8, 2.1, 2.33
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	2.34
	Natrón	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	0.99, 1.23, 1.48, 1.97
	Trona	Na ₃ H(CO ₃) ₂ .2H ₂ O	1.51, 1.94, 2.03
Boratos	Ulexita	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	0.99, 1.46, 1.96, 2.23
	Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	0.97, 1.47, 1.92

Tabla 3 Características de absorción de los principales minerales evaporíticos en la región VNIR-SWIR.

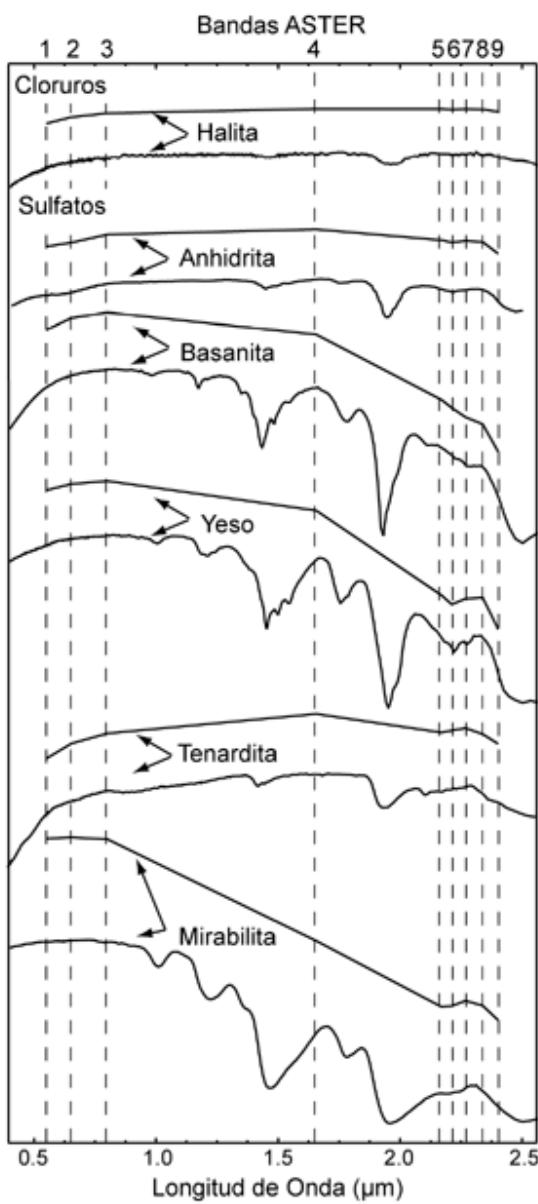


Figura 3a Espectros de la librería espectral del USGS comparados con los espectros remuestreados en función del captor ASTER.

aniones sulfato, carbonato y borato; de lo anteriormente enunciado se puede deducir que las variaciones químicas evidentemente modifican las características espectrales de los principales minerales evaporíticos susceptibles a ser encontrados en la región es ilustrado en la tabla 3.

En la tabla se puede observar que la mayoría de estos minerales presenta espectros de absorción entre 1 a 2.5 μm , esta absorción se presenta bajo dos procesos distintos: la transición electrónica que toma en cuenta la valencia del elemento (electrón en el último nivel orbital) y la vibración molecular (energía interatómica) que implica las ligazones moleculares (Crowley, 1991). La mayor parte de las características espectrales

6.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dado la cantidad de salares que existen en la zona, en este trabajo solamente presentamos los resultados obtenidos en el análisis de los salares de Pastos Grandes y Capina. El salar de Capina (40 km^2 de superficie) es de tipo playa con una tendencia geoquímica $\text{Na}-\text{Cl}-(\text{SO}_4?)$ (Risacher, 1992) y actualmente es explotado por su contenido de ulexita por la empresa Tierra S. A. Este borato sódico cálcico ocupa 1 km^2 ($\times 60\text{cm}$ de espesor) del centro del salar y se extiende ligeramente hacia el Sudeste (figura 5), Orris, et al. (1992b) determinan también ulexita aflorante en la parte periférica del salar. La ulexita se encuentra en forma de una capa superficial uniforme, ella también es descrita dentro los niveles superiores del manto de carbonato cálcico en profundidad. Los sedimentos "encajonantes" están constituidos de yeso y arcillas, los cuales también contienen nódulos de ulexita, en forma de lentes (Ballivián & Risacher, 1981 y Orris, et al., 1992b). Por su superficie de 130 km^2 , el salar de Pastos Grandes es uno de los más importantes de Sud Lípez. Su químismo es de tipo $\text{Na}-\text{Ca}- (\text{SO}_4) -\text{Cl}$ (Risacher, 1992) y morfológicamente es considerado como de tipo playa en el cual Ballivián y Risacher (1981) reconocen tres zonas de sedimentos (figura 6):

- Una zona constituida por costras, concreciones y pisolitas de composición carbonato cálcico y localizada al Noroeste del salar.
- Una zona compuesta por arcillas con un contenido en carbonato cálcico, ubicada al este del salar.
- La zona central o de arcillas recientes, que en su parte central contiene yeso, halita y ulexita.

6.1.- Análisis Espectral

Las características espetrales de los minerales evaporíticos fueron estudiadas por varios autores: Hunt et al. (1971), Crowley (1991), Drake (1995), Crowley (1996) que investigaron el rango espectral comprendido entre 0.4 a 2.5 μm y Crowley & Hook (1996) que estudiaron las características espetrales por encima de 2.5 μm . Dichos autores determinaron que en la región VNIR-SWIR, las características espetrales de los minerales evaporíticos son atribuidas a las vibraciones internas de boratos, carbonatos y aniones hidroxilos como también a moléculas de agua. Por lo contrario en la parte termal del espectro (emisividad), estas características están ligadas a los

observadas en los minerales evaporíticos tienen un origen vibratorio y son atribuidos generalmente a la forma de vibración interna de ciertos minerales, como es el caso de los boratos, carbonatos y de los aniones hidroxilos (Crowley, 1991).

Algunos de los minerales evaporíticos presentes en la tabla 3 son hidratados, por lo que probablemente las propiedades de absorción están causadas por las moléculas de agua, las cuales son un componente esencial de la estructura de estos minerales. Hunt et al. (1971) determina que la longitud de las bandas de absorción de dichos minerales está íntimamente ligada al O-H presente dentro las moléculas de agua y que es parte de estos minerales. En las formas anhidras de estos minerales la absorción es debido a la presencia de inclusiones fluidas y/o la presencia de agua adsorbida dentro la estructura cristalina (Drake, 1995).

Para el análisis de los espectros presentes en la imagen se utilizo la librería espectral del USGS, esta librería construida en laboratorio en un rango espectral de 0.4 a 2.5 μm , tiene un intervalo de muestreo de $\pm 10 \text{ nm}$, en los cuales se puede observar en detalle los diferentes picos de absorción (tabla 3) de los minerales evaporíticos. La librería fue remuestreada siguiendo un modelo gausiano de respuesta espectral y de esta manera se obtuvo las características espetrales de los minerales evaporíticos en función a la información que adquiere el captor ASTER. También se debe mencionar que no todos los minerales evaporíticos están presentes en la librería espectral; en dicha librería solamente se encuentran los principales minerales evaporíticos, los más raros y los que determinan en muchos casos el tipo de cuenca no están presentes.

En la figura 3a y b se puede observar los espectros de los diferentes minerales evaporíticos susceptibles a estar presentes en la región, como también la posición de las diferentes bandas del captor ASTER.

La halita no presenta picos de absorción entre 0.4 a 2.5 μm , el espectro remuestreado es casi plano, este inconveniente hace difícil a determinar la halita a partir de este tipo de información, sin embargo se puede suponer que dicho mineral esta presente en todo el salar en una mezcla íntima con los otros minerales evaporíticos.

Los espectros de la anhidrita, basanita y yeso son iguales, la única diferencia es la profundidad del pico de absorción (más pronunciado para el yeso); esta sutil diferencia será utilizada en el análisis espectral.

La mirabilita y tenardita presentan diferentes signatures espetrales, sin embargo el pico de absorción de ambos minerales se encuentra en la misma región espectral. La diferencia entre ambos minerales es térmica, es decir que la tenardita cristaliza cuando la mirabilita comienza a deshidratarse; dentro nuestro análisis ambos minerales son tomados en cuenta.

Los carbonatos como la calcita y la dolomita presentan picos de absorción en las bandas 7 y 8, las cuales se deben

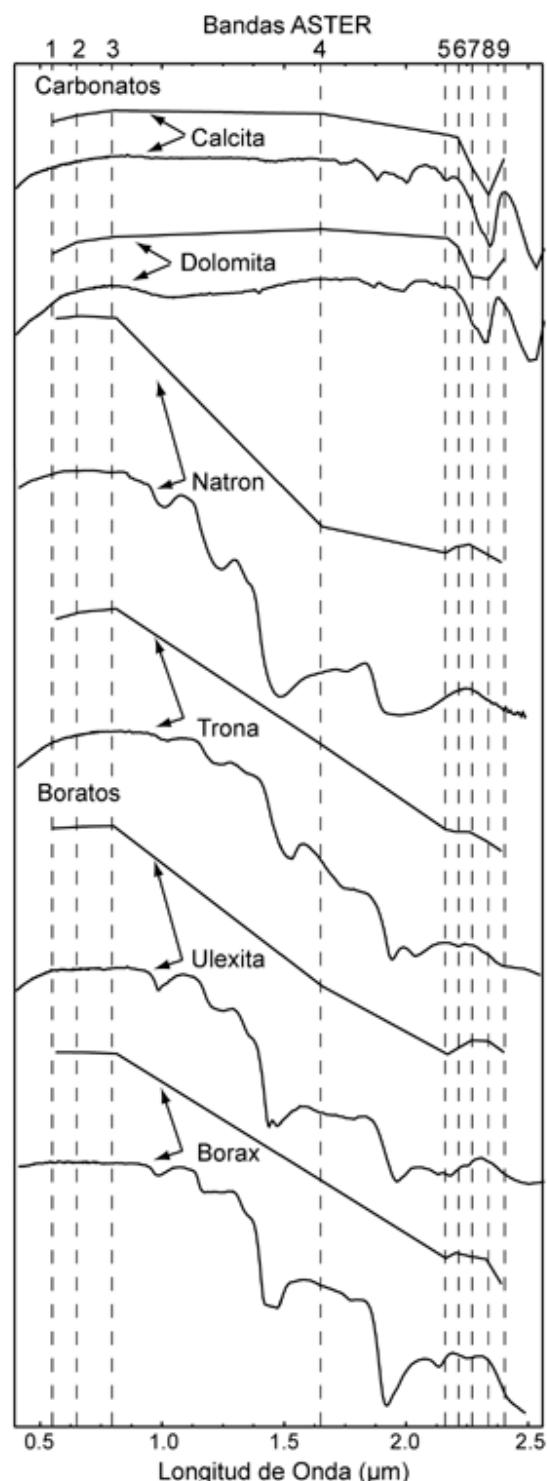
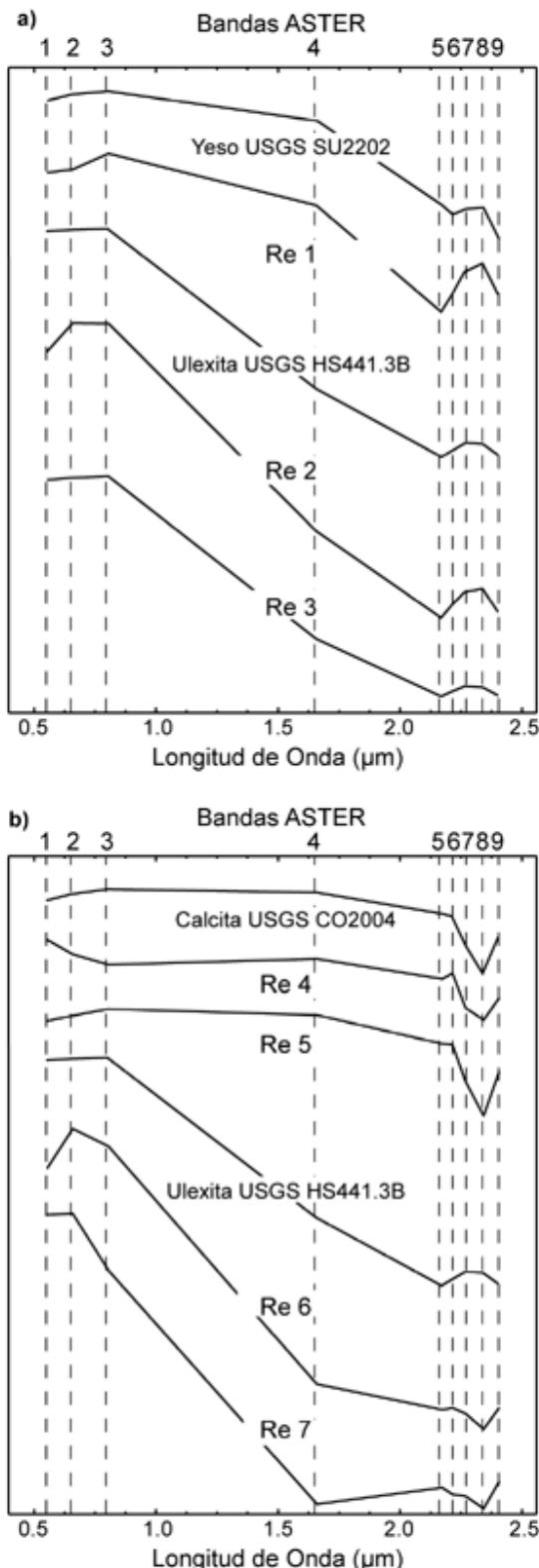


Figura 3b Espectros de la librería espectral del USGS comparados con los espectros remuestreados en función del captor ASTER.



esencialmente a la forma de vibración de los aniones carbonatos; estos minerales evaporíticos fueron descritos principalmente en la cuenca Pastos Grandes (Ballivián & Risacher, 1981).

Los otros carbonatos como el natrón y la trona, tienen espectros completamente diferentes, el natrón se diferencia de la trona por presentar dos picos de absorción (figura 3b). Por ultimo los boratos como la ulexita y el bórax tienen sus picos de absorción en la banda 5, la única diferencia es la sutil diferencia del pico (más grande cobertura espectral para la ulexita); sin embargo para que estos minerales se formen, tiene que existir un aporte de boro en la cuenca (generalmente una fuente hidrotermal).

Si comparamos lo anteriormente mencionado con la información de la tabla 3, podemos observar que los otros picos de absorción característicos de estos minerales se encuentran en la zona de absorción del agua y que limita su detección con el captor ASTER.

6.2.- Valores extremos

Antes de comenzar con la descripción de los resultados, debemos mencionar también que al momento de realizar el análisis se tomaron en cuenta las descripciones de los salares de Capina y Pastos Grandes realizadas por Ballivián y Risacher (1981) y Orris, et al. (1992a y b); esta información a priori permitió reducir el numero de minerales en el análisis y de esta manera evitar los problemas ligados a una confusión espectral.

Siguiendo todo el proceso descrito en el párrafo 6.3.1 solamente fueron retenidos tres endmembers para el Salar de Capina y cinco para el salar de Pastos Grandes, en los cuales se puede observar algunas características espetrales similares a los minerales evaporíticos contenidos en la librería espectral de la USGS. Las figura 4a y 4b ilustran los diferentes endmembers encontrados en el análisis de las imágenes de Capina y Pastos Grandes, los nombres asignados a cada endmember es el resultado de la comparación con la librería espectral obtenida en laboratorio y/o su ubicación espacial. La variación entre la forma de los espectros puede tener su origen en muchos factores físicos y químicos, como el contenido de agua, tamaño de las partículas, cambios en la composición química del mineral evaporítico, rugosidad del salar, etc. Por otra parte, a la hora de realizar el análisis se debe tomar en cuenta que el sensor

Figura 4 Espectros de los endmembers resultantes del análisis comparado con los espectros de laboratorio (USGS remuestreados; a) Capina y b) Pastos Grandes.

capta la información a 700 km de altitud y los parámetros enunciados anteriormente son difíciles a mensurar, por lo que preferimos utilizar todos los espectros de referencia en el análisis de la imagen. Una verificación espectral de terreno confirmara o negara la existencia de dichas poblaciones.

6.3.- Desmezcla espectral

En la figura 5b se puede observar el resultado de la desmezcla espectral del salar de Capina, a manera de comparación incluimos también (figura 5a) el mapa de repartición de las formaciones superficiales elaborado por Ballivián & Risacher (1981). Mediante este método se pudo delimitar bien las poblaciones presentes en la zona. Es interesante observar la distribución de la ulexita y podemos suponer que el descape de los sedimentos encajonantes por la explotación minera ayuda a agrandar los afloramientos de ulexita. El error del método, se suscribe a la parte norte del salar donde se encuentra el lago permanente y la parte central. Esta ultima zona esta ligada también a una zona con elevado contenido en agua (figura 7).

La figura 6b ilustra el resultado del análisis espectral del salar de Pastos Grandes, por comparación ilustramos también (figura 6a) el mapa de distribución de las formaciones superficiales extraídas del trabajo de Servant-Vildary, et al. (2002). Como se puede observar en la figura, la mayor parte de las poblaciones son bien delimitadas. La figura 8 muestra los errores obtenidos en la desmezcla de la imagen, al igual que en el caso de Capina, la mayor parte de los errores son ubicados en zonas con alto contenido en agua. Nuestros resultados son similares a los obtenidos por Crowley, Mars & Hook (2000) a excepción de la halita, la cual pudo ser identificada con captores hiperespectrales.

7.- Conclusiones

El captor ASTER con la información espectral que mensura es capaz de diferenciar los minerales presentes en el salar de Pastos Grandes y Capina. La utilización de las imágenes térmicas obtenidas por el mismo captor puede ayudar a delimitar mejor minerales como la halita. La tecnología hiperespectral aerotransportada mostró sus frutos en el análisis de este tipo de ambiente y el advenimiento de esta tecnología embarcada en los satélites, como ya es el caso de Hyperion, facilitara este trabajo y en un futuro muy cercano las cartas “geoquímicas” obtenidas a partir de los satélites serán muy comunes.

8.- Referencias

- Ballivián, O. & Risacher, F., 1981,** Los salares del Altiplano Boliviano. Métodos de estudio y estimación económica. UMSA – ORSTOM, 241p.
- Boardman, J. W., Kruse, F.A. & Green, R. O., 1995,** Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In *Summaries of 5th JPL Airborne Earth Science Workshop, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. Publication, 95-1: 23–26.*

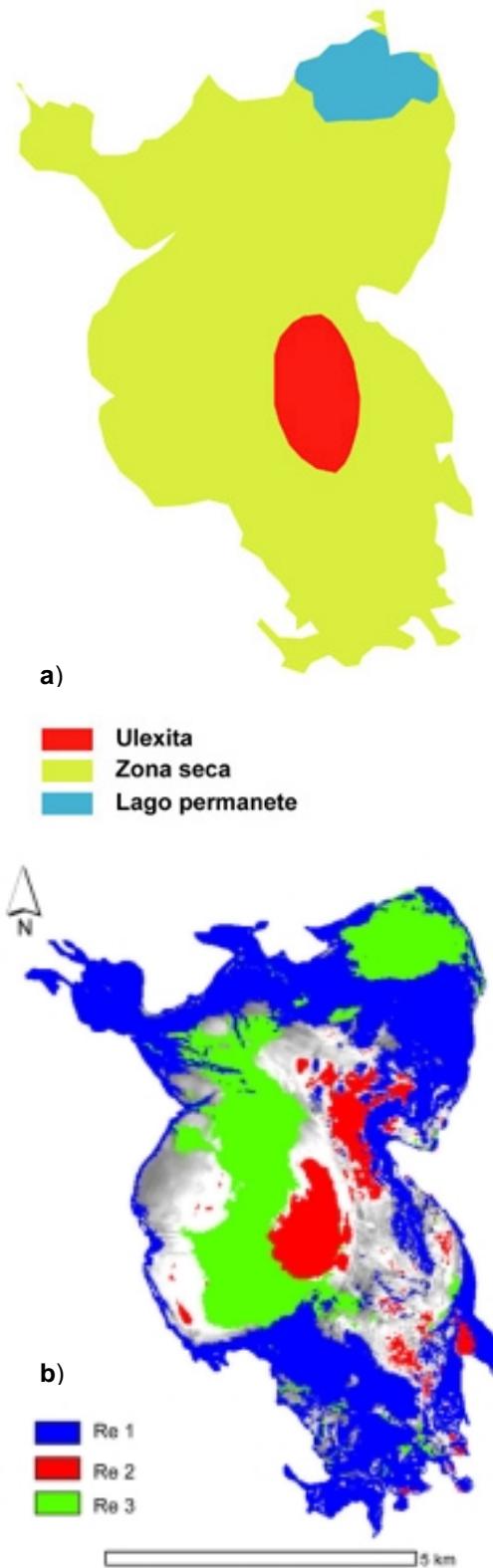


Figura 5 Salar de Capina, a) mapa de la distribución de los sedimentos recientes de Ballivian & Risacher (1981) y b) resultado de la desmezcla espectral.

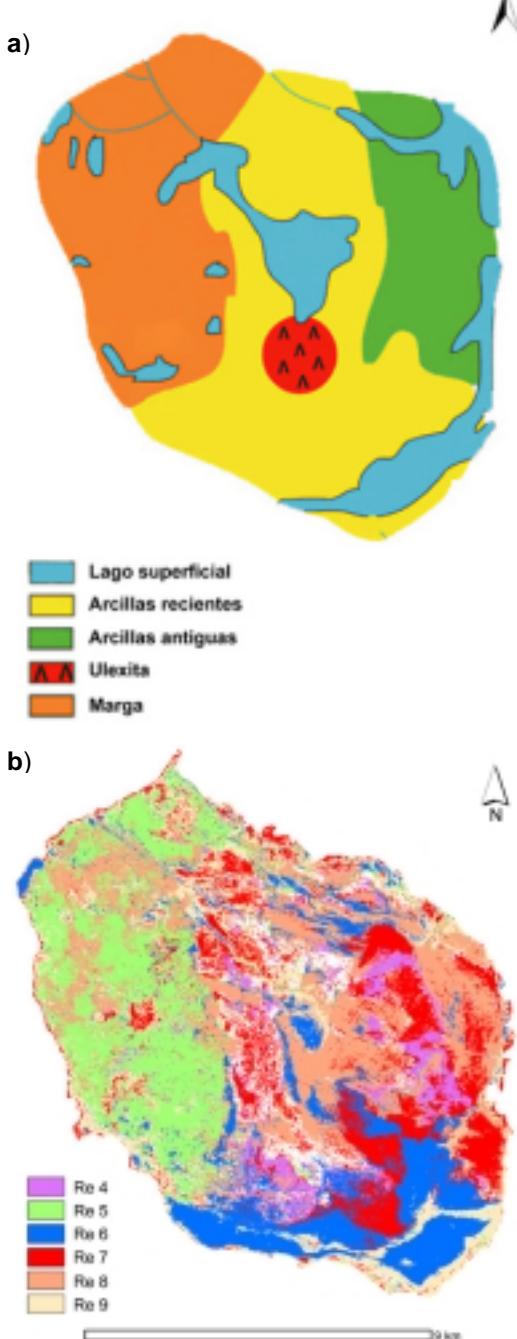


Figura 6 Salar de Pastos Grandes, a) mapa de distribución de los sedimentos recientes de Servant-Vildary, et al. (2002) y b) resultado de la desmezcla espectral.

Bryant, R. G., 1996, Validated linear mixture modelling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (2): 315–330.

Bryant, R. G., 2003, Monitoring playa systems using remote sensing: methods and applications. *AridLands*. 51 (accessible via: <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln51>).

Camargo, R. A., Ponzoni, F. J., Zullo, Jr. J., Queiroz, G. & Arnaud, Y., 2003, Characterization of the Salar de Uyuni for in-orbit satellite calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (6): 1461–1468.

Chapman, J. E., Rothery, D. A., Francis, P. W. & Pontual, A., 1989, Remote Sensing of evaporite mineral zonation in salt flats (salars). *International Journal of Remote Sensing*, 10 (1): 245–255.

Crowley, J. K., 1991, Visible and near-infrared (0.4 – 2.5 um) reflectance spectra of playa evaporite minerals. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B10): 16231 – 16240.

Crowley, J. K., 1993, Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: a first report from Death Valley, California. *Remote Sensing of Environment*, 44: 337–356.

Crowley, J.K., 1996, Mg- and K-Bearing borates and associated evaporites at Eagle Borax Spring, Death Valley, California: a spectroscopic exploration. *Economic Geology*, 91: 622–635.

Crowley, J. K. & Clark, R. N., 1992, AVIRIS study of Death Valley evaporite deposits using least-squares band-fitting methods. In: *Summaries of the 3th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. *JPL Publication 92-14*, 1: 29–31.

Crowley, J. K. & Hook, S. J., 1996, Mapping playa evaporite minerals and associated sediments in Death Valley, California, with multispectral thermal infrared images. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B1): 643–660.

Crowley, J. K., Mars, J. C. & Hook, S. J., 2000, Mapping evaporite minerals in the Death Valley salt pan using MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) data. *Fourteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, Las Vegas, Nevada, USA: 344–345.

Drake, N. A., 1995, Reflectance spectra of evaporite minerals (400 – 2500 nm): applications for remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 16 (14): 2555–2571.

Fujisada, H., 1998, ASTER Level-1 data processing algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4): 1101–1112.

Green, A. A., Berman, M., Switzer, M. & Craig, M. D., 1988, A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26 (31): 65–74.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W. & Lenhoff, C.J., 1971, Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, IV, Sulfides and Sulfates. *Modern Geology*, 3: 1– 14.

Iwasaki, A., Fujisada, H., Asao, H., Shindou, O. & Akagi, S., 2002, Enhancement of spectral separation performance for ASTER/SWIR. *Infrared Spaceborne Remote Sensing*. IX, Proceedings SPIE Vol: 4486, Paper-No. 4486-06: 42–50.

- Keshava, N. & Mustard J. F., 2002**, Spectral unmixing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19 : 44–57.
- Orris, G. J., Asher-Bolinder, S., Soria-Escalante, E. & Enriquez-Romero, R., 1992a**, Laguna Pastos Grandes, in USGS – GEOBOL, *Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, USGS Bulletin*, 1975: p199.
- Orris, G. J., Soria-Escalante, E., Asher-Bolinder, S. & Enriquez-Romero, R., 1992b**, Laguna Capina, in USGS – GEOBOL, *Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, USGS Bulletin*, 1975: 200–201.
- Plaza, A., Martinez, P., Perez, R. M. & Plaza, J., 2002**, Spatial/spectral endmember extraction by multidimensional morphological operations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (9): 2025–2041.
- Risacher, F., 1992**, Géochimie des lacs sales et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien, *Sciences Géologiques Bulletin*, 45 (3-4): 219p.
- Risacher, F. & Fritz, B., 1991**, Geochemistry of Bolivian Salars, Lipez, Southern Altiplano: Origin of solutes and brine evolution, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 687–705.
- Rowan, L. C. & Mars, J. C., 2003**, Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sensing of Environment*, 84: 350–366.
- Sabins, F. F., 1997**, Remote sensing, principles and interpretation. *W. H. Freeman & Company, New York, 3rd. Ed.*: 494p.
- Sabins, F. F., 1999**, Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14: 157–183.
- Sabins F. F. & Miller , R. M., 1994**, Resource assessment – Salar de Uyuni and vicinity. *Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Vol. I: 192–I103.*
- Servant-Vildary, S. Risacher, F. & Roux, M., 2002**, Diatom based transfer function for estimating the chemical composition of fossil water. Calibration based on salt lakes of the Lipez area in the South-Western Bolivian Altiplano, *Carnets de Géologie, Maintenon, Mémoire, 2002/01* (accessible via <http://paleopolis.rediris.es/>)
- USGS**, (<http://speclab.cr.usgs.gov>)
- Van der Meer, F., 2001**, Basic physics of spectrometry. In *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. F. Van der Meer & S. de Jong, ed. Kluwer Academic Publishers, 3–16.
- Van der Meer, F. de Jong, S. & Bakker, W., 2001**, Imaging spectrometry: basic analytic techniques. In *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. F. Van der Meer & S. de Jong, ed. Kluwer Academic Publishers, 16–61.
- White, K. & Drake, N., 1993**, Mapping the distribution and abundance of gypsum in South-Central Tunisia from Landsat Thematic Mapper data. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 37 (3): 309–325.
- Yamaguchi, Y. Kawakami, T. Kahle, A. B. Pniel, M. & Tsu, H., 1998**, ASTER mission planning and operations concept. *SpaceOps, International Symposium on Technical Interchange for Space Mission Operations and Ground Data Systems*: 8p.

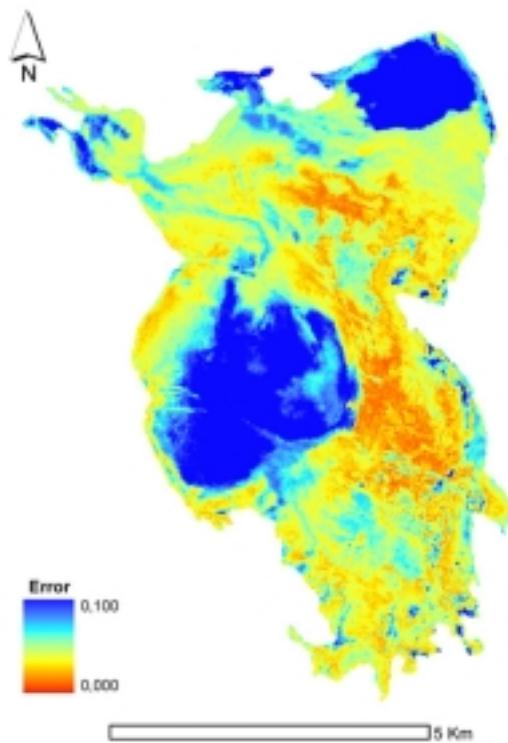


Figura 7 Distribución del error de desmezcla en el salar de Capina.

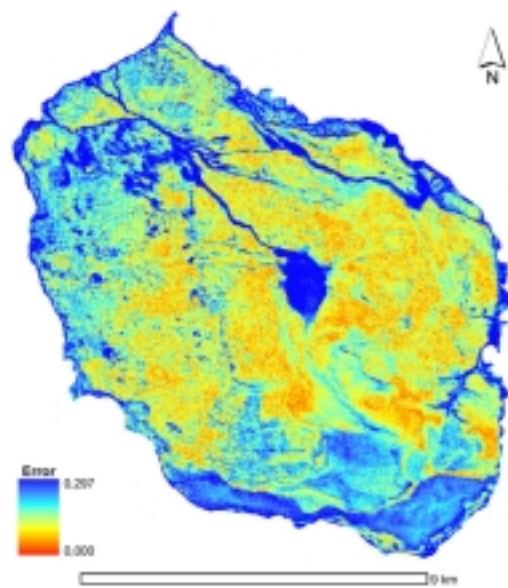


Figura 8 Distribución del error de desmezcla en el salar de Pastos Grandes.