

DISCRIMINACIÓN DE ROCAS ULTRAMÁFICAS Y SU ENCAJONANTE METAMÓRFICO, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM+, SIERRA CHICA, CÓRDOBA

Patricia A. ANZIL y Roberto D. MARTINO

CICTERRA - CONICET y Cátedra de Geología Tectónica. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. E-mails: panzil@com.uncor.edu, rdmartino@com.uncor.edu

RESUMEN

En el marco de una investigación sobre la identificación y cartografía de rocas ultramáficas en la sierra Chica de Córdoba, se evalúan técnicas y estrategias de análisis y caracterización espectral de imágenes satelitales como recursos para detectar y delimitar estos cuerpos. Se utilizan además datos de campo y la ubicación de afloramientos ya reconocidos en campaña para cotejar los resultados que se obtienen del análisis de las imágenes. Se emplean imágenes satelitales Landsat-7 ETM+, recurriéndose a estrategias de procesamiento digital tales como la combinación de bandas, los cocientes de bandas y las clasificaciones espectrales, lográndose avanzar en el propósito planteado, a pesar de la cobertura vegetal y la escasa superficie de tales afloramientos. El área de estudio se ubica en las Sierras Pampeanas de Córdoba, entre la sierra Grande y sierra Chica, lugar donde afloran cuerpos ultramáficos, correspondientes a la faja ultramáfica oriental, intercalados en metamorfitas de grado medio a alto. De los procesos aplicados para el tratamiento digital, las clasificaciones con máxima probabilidad y paralelepípedos, son los que aportan los mejores resultados. Estos son consistentes con cuerpos ya reconocidos por otros medios.

Palabras clave: *Procesamiento de imágenes, clasificación, ultramáficos, Córdoba.*

ABSTRACT: *Ultramafic rocks discrimination from country rocks, using Landsat 7 ETM+ image data processing, in the Sierra Chica, Córdoba.*

Techniques and strategies were developed in image analysis and spectral characterization in a reasearch to identify and map the ultramafic rocks and to detect and outline these bodies at Sierra Chica of Córdoba. Field data and specific location of these bodies were used to check the results obtained from the digital treatment. Landsat- 7 ETM+ image data are employed in digital processing, including band combination, band rationing and spectral classification to reach the purpose of this work, in spite of vegetal cover and reduced exposed area of these rocks. Ultramafic rocks, part of the "Eastern Belt", intercalates with intermediate to high grade metamorphic rocks, located in the Sierras Pampeanas of Córdoba, between Sierra Grande and Sierra Chica. Maximum likelihood and box classifications are the best performance in digital image processing. This is consistent with other way to recognize these bodies.

Keywords: *Image processing, classification, ultramafic, Córdoba.*

INTRODUCCIÓN

En el basamento expuesto de las sierras de Córdoba, existen afloramientos de rocas máficas y ultramáficas dispuestas conformando una faja, cuya litología, asociaciones y emplazamiento, fuertemente condicionado por la tectónica, fueron los argumentos fundamentales a partir de los cuales Kraemer *et al.* (1995) destacaron su importancia en la evolución geológica regional.

Ante la necesidad de cartografiar estas unidades litológicas, cuya distribución espacial tiene un significado específico en tectónica, se hace necesario su reconocimiento a nivel regional. Tratándose de cuerpos rocosos de reducida extensión y ubicados en áreas metamórficas complejas, como las que conforman el basamento de las Sierras de Córdoba, esta tarea se hace particularmente difícil de llevar adelante en campaña.

La utilidad significativa que prestan las

imágenes satelitales, en cuanto posibilitan una cobertura regional y la extracción de datos multiespectrales, el recurso se presenta como promisorio para tratar de contribuir a resolver el problema planteado.

Los trabajos de campo efectuados hasta el presente y la localización cierta de afloramientos rocosos del tipo mencionado, sirven como referencias de base a partir de las cuales se calibran los umbrales espectrales correspondientes a las litologías investigadas, permitiendo evaluar la facti-

bilidad de emplear el recurso como herramienta de prospección a nivel regional. En base a lo mencionado más arriba el objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la eficiencia y el nivel de certidumbre esperables de la aplicación de las técnicas y procedimientos de diferenciación multibanda de afloramientos rocosos ultramáficos, a partir de información satelital multiespectral para utilizarlos en la cartografía, en el descubrimiento de nuevos cuerpos y eventualmente en la prospección regional. También se intenta clarificar qué niveles de interferencia produce la vegetación que cubre significativamente la región en general y particularmente a estos afloramientos de rocas ultramáficas. Por último se intenta explorar el rendimiento de algunos algoritmos de clasificación, que se encuentran como antecedentes de este tipo de caracterización espectral de las rocas ultramáficas, pero que han sido aplicados a ambientes sin vegetación. De los procesos aplicados para el tratamiento digital, las clasificaciones supervisadas con máxima probabilidad y paralelepípedos, son los que aportan los mejores resultados.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Medios empleados

A los fines enunciados, se emplea información satelital Landsat, recurriéndose al sensor L7 ETM+ [Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), 2007]. La fecha de adquisición de la imagen seleccionada (*path - row* = 229-082) corresponde a la época invernal (13 de junio de 2002), considerándose adecuada a los fines perseguidos dada la disminución estacional del vigor de la vegetación y la transparencia de las caducifolias. La imagen tiene correcciones sistemáticas (radiométricas y geométricas) realizadas por CONAE. Se realizan correcciones atmosféricas, exclusivamente para el procedimiento de cocientes entre bandas. Los programas usados para el procesamiento fueron ILWIS Academic 3.3

(ITC 2001) e Idrisi 15.0 Andes. Fueron ejecutados sobre una plataforma PC, recurriéndose a procedimientos y recursos estratégicos propios del análisis digital de imágenes, con el soporte de la información de campo y los antecedentes bibliográficos disponibles.

Desarrollo del trabajo

No han sido detectados antecedentes de discriminación de rocas ultramáficas mediante la aplicación de estos recursos en la región y es escasa la bibliografía disponible donde se citan estudios aplicados a este tipo de litologías. Consecuentemente, se ensayan aquí diferentes estrategias dirigidas a los propósitos mencionados y se utiliza de base la literatura existente sobre discriminación de estas litologías mediante los cocientes de bandas en imágenes Landsat (Abrams *et al.* 1988, Sultan *et al.* 1986, Kusky y Ramadan 2002, Gad 2002, Frei y Jutz 1989, Sabins 1999, Bishta 2004, Gad y Kusky 2006).

Los primeros pasos se efectuaron realizando la localización de los afloramientos reconocidos en el campo sobre imágenes con procesamiento básico. De tal modo, el proceso de interpretación se inició con observaciones monobanda y en falso color compuesto no convencional, tendiente a advertir el peso de la información de cada banda en la caracterización de partida de las litologías investigadas.

Sobre la base de los antecedentes generales al respecto, se comenzó a trabajar en ecuaciones multiespectrales planteadas oportunamente para diferenciar rocas ultramáficas serpentinizadas (Sultan *et al.* 1986, Sabins 1999, Gad y Kusky 2006, Bishta 2004). Los resultados expuestos por tales autores permitieron iniciar un análisis de base y orientar los procesamientos futuros, a pesar de versar aquellos sobre problemáticas y condiciones locales bien diferentes a las presentes. También se aplica el índice de vegetación de la diferencia normalizada (IVDN), para evaluar la influencia que ejerce la vegetación.

Seguidamente, el procedimiento considerado más conveniente fue efectuar clasificaciones multiespectrales, sobre la base

de las características digitales investigadas mediante exploración espectral de detalle. Para ello se recortó una subescena de la imagen 229-082 original (Cuadro 1), procesando a los fines de este trabajo el sector comprendido entre los 31°20' - 31°40' lat. sur y 64°30' - 64°37' de long. oeste (Fig. 3).

Análisis y procesamiento digital

La zona de estudio es un área montañosa correspondiente a la comarca intermedia entre la sierra Chica (zona cumbral y de la escarpa de falla) y la sierra Grande (zona del labio bajo de la sierra Chica y margen oriental de la sierra Grande). A la interferencia de la topografía, se suma en este caso la cubierta vegetal, constituida por arbustales, pequeños bosques de árboles de pequeño porte y pastizales, coberturas expresadas en áreas donde cada tipo biótico se manifiesta en distintas proporciones.

La realidad de superficie indica que los afloramientos rocosos son de dimensiones variadas e irregulares, lo cual se traduce en un significativo grado de dificultad para su detección, considerando además que se encuentran parcialmente cubiertos por la vegetación y que se verifican importantes variaciones de reflectividad introducidas por la topografía.

Cocientes de bandas: Los cocientes de bandas han sido aplicados con éxito en diferenciaciones litológicas en zonas desérticas. Si bien en el presente caso existe la interferencia de la vegetación, se han investigado los resultados de aplicar algoritmos ya utilizados en la diferenciación de rocas afines (Sultan *et al.* 1986, Sabins 1999, Bishta 2004, Gad y Kusky 2006). Para estos procedimientos se realizan correcciones atmosféricas, utilizando el módulo ATMOSC de IDRISI 15.0 Andes, que convierte el valor del nivel digital del píxel a un valor de reflectancia aproximada (Eastman 2006), requerido para la aplicación de estos tipos de algoritmos. Sobre la base de estos antecedentes, se generó el compuesto color (5/7)R + (5/1)V + [(5/4)*(3/4)]A, propuesto por Sultan *et al.* (1986). El cociente entre

el infrarrojo medio y el infrarrojo lejano (5/7), realza las zonas donde existen minerales con altos contenidos en OH⁻ (como serpentinas y arcillas) por su alta absorción en la banda del infrarrojo lejano y baja en el infrarrojo medio, la imagen de cocientes señalarían con píxeles claros a las rocas ricas en serpentina. La relación entre el infrarrojo medio y el azul (5/1), favorece la identificación de rocas con minerales opacos (como magnetita o ilmenita) dando una signatura con tonos oscuros y grises para estas fases. La multiplicación entre los cocientes correspondientes a las bandas infrarrojo medio y rojo sobre el infrarrojo cercano (5/4)*(3/4), se aplica para caracterizar minerales de aluminosilicatos con hierro (Sultan *et al.* 1987). Complementariamente, se emplean los colores compuestos resultantes de las composición de cocientes: (3/5)R + (3/1)V + (5/7)A (Sabins 1999), (5/7)R + (5/1)V + (4/1)A (Bishta 2004), (5/3)R + (5/1)V + (7/5)A y (7/5)R + (5/4)V + (3/1)A (Gad y Kusky 2006). Otro cociente de bandas particular, es el IVDN, aplicado con el propósito de identificar variaciones en la cubierta vegetal que pudieran resaltar cambios referidos a la litología sobre la que se asienta. El IVDN, índice de vegetación de la diferencia normalizada, es un índice que relaciona las bandas (4-3)/(4+3), fundado en la baja reflectividad para la vegetación que presenta la banda 3 y la alta reflectividad en la banda 4. Varía entre 1 y -1; indicando los valores negativos ausencia de actividad fotosintética.

Clasificaciones no supervisadas y supervisadas: La combinación 7+3+1 (RVA) permite acceder a una buena diferenciación de base y sobre la cual trabajar. Se utilizan las tres bandas menos correlacionadas entre sí, la banda 7(R), cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben, más que reflejar la energía; en la banda 3(V) la vegetación refleja fuertemente; y la banda 1(A), abarca el segmento en el cual los minerales con óxidos de hierro absorben energía.

El procesamiento digital consistió en

buscar los valores indicativos de los materiales de superficie, procediéndose a una serie de clasificaciones no supervisadas, con variación de número de clases entre 12 y 6. Sobre la base de sus resultados, se efectuaron clasificaciones supervisadas empleando todas las bandas, en la búsqueda de una cantidad de clases orientativa para aplicar a la siguiente fase de clasificación. El criterio de observación se centró en la definición homogénea de tonos, texturas y distribución de unidades de superficie, según su coherencia con la verdad de campo. Para la clasificación supervisada, se emplearon los datos de sucesivos muestreos espectrales de las litologías de interés, definiendo los umbrales correspondientes. Corregida la dispersión de las clases y detectada la identidad de éstas, se concluyó en la definición de las siguientes unidades espectrales, siendo 1: complejo metamórfico, 2: granito, 3: lago, 4: río, 5: área urbana, 6: área urbana periférica, 7: campo tipo 1, 8: campo tipo 2, 9: vegetación sobre complejo metamórfico y 10: pinar.

En las clasificaciones supervisadas, fueron utilizados cuatro algoritmos de clasificación contenidos en el programa ILWIS 3.3 empleado (ITC 2001): de máxima probabilidad (Fig. 2a), paralelepípedos (Fig. 2b), mínima distancia Mahalanobis (Fig. 2c; Richards 1993, Thomas *et al.* 1987) y mínima distancia (Fig. 2d). Para los fines buscados, se seleccionaron los dos primeros algoritmos. Se aplicaron filtros, a modo de herramientas para mejorar la clasificación (Haack *et al.* 1987, Cushnie y Atkinson 1985, Chuvieco 1996, ITC 2001), dirigidos a uniformar las clases y eliminar puntos aislados o mezclas poco significativas por su extensión. El resultado depende del tipo de filtro que se aplique.

Una segunda fase de clasificación, se orientó exclusivamente a circunscribir la clase correspondientes a los cuerpos ultramáficos. El reducido tamaño de estas y la complejidad de la clase complejo metamórfico (clase 9), obliga a efectuarla en esta etapa de trabajo, dirigida a discriminar particularidades del citado complejo. Se

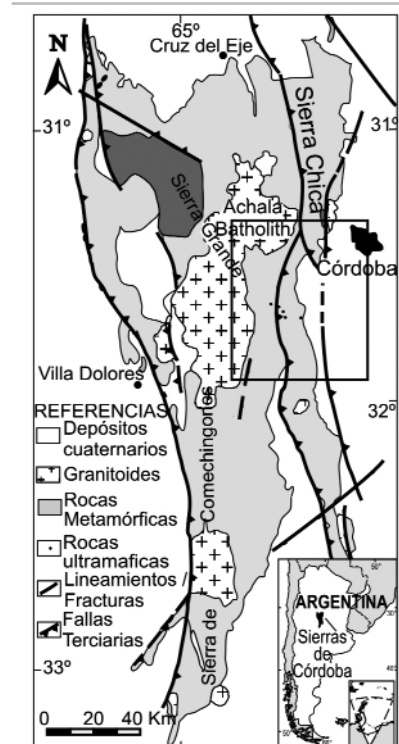


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, el recuadro corresponde al área de la imagen Landsat-7 ETM+ (*path-row* = 229-082) utilizada en este trabajo.

asignan siete clases identificadas en el recorte de la imagen, entre ellas: complejo metamórfico, ultramáfico, cantera, campo, pinar, vegetación, agua y urbano. Para no modificar los niveles digitales (ND) del píxel, no se efectuaron correcciones atmosféricas y al finalizar el procedimiento de la clasificación, la imagen fue georeferenciada con puntos de control apoyados en una imagen georeferenciada con proyección Geográfica (Latitud y Longitud) y Datum WGS 84.

GEOLOGÍA REGIONAL DEL AREA DE LA IMAGEN 229-082

La zona de estudio, contenida en la imagen utilizada (229-082), abarca parte de la sierra Chica y sierra Grande de Córdoba en la zona central-oriental (Fig. 1). Geológicamente, está conformada por un basamento metamórfico de edad Precámbrico superior - Paleozoico inferior, que está expuesto como cordones montañosos orientados N-S que fueran

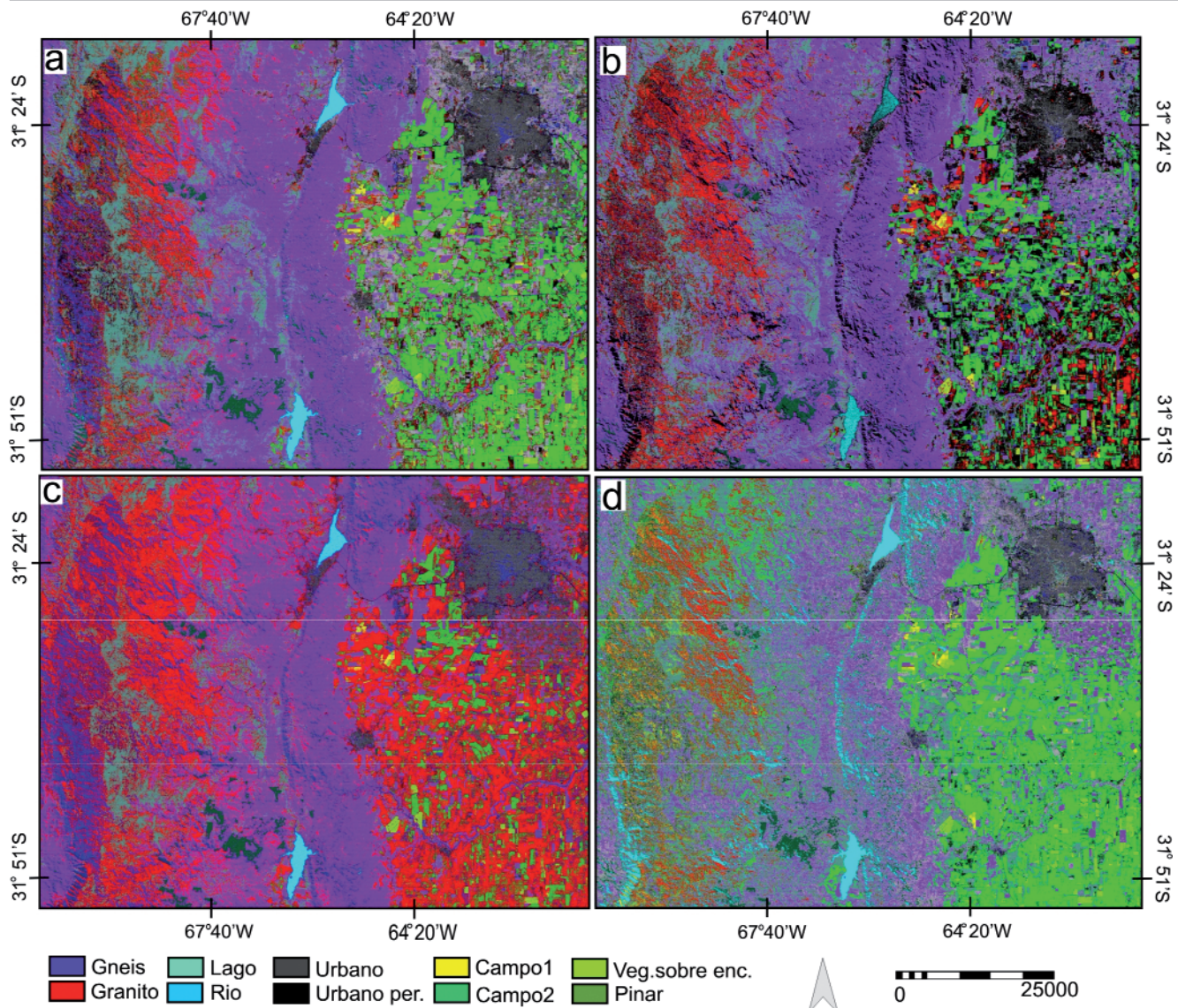


Figura 2: Recorte de la imagen Landsat-7 ETM+ correspondiente al cuadro (*path-row* = 229-082). Imagen clasificada con clasificador: a) máxima probabilidad; b) paralelepípedos; c) mínima distancia de Mahalanobis y d) mínima distancia.

CUADRO 1: Propiedades técnicas de las imágenes Landsat- 7 ETM+.

Banda	Faja del EEM	Región EEM	Resolución Espacial(m)
1	0,45-0,52	Azul	28,5
2	0,52-0,60	Verde	28,5
3	0,63-0,69	Rojo	28,5
4	0,76-0,90	NIR	28,5
5	1,55-1,75	SWIR	28,5
7	2,08-2,35	SWIR	28,5
8	0,50-0,90	PAN	15,0
6	10,4-12,5	TIR	60,0

EEM= espectro electromagnético, NIR= infrarrojo cercano, SWIR= infrarrojo medio o de onda corta, PAN= pancromática, TIR= infrarrojo termal.

levantados por fallamiento inverso de bajo ángulo durante la orogenia andina (Gordillo y Lencinas 1979, Martino *et al.* 1995). En ese basamento, se expone una de las fajas de rocas máficas y ultramáficas pertenecientes al Proterozoico tardío, llamada faja ultramáfica oriental (Kraemer *et al.* 1995, Escayola *et al.* 1996). La litología, el complejo emplazamiento tectónico y la asociación de esta faja con rocas miloníticas, ha permitido interpretarla como asociaciones de tipo ofiolítico. (Martino *et al.* 1995, Escayola *et al.* 1996). Kraemer *et al.* (1995) fueron los primeros que establecieron la importancia tectónica

que tiene esta faja en la evolución de las sierras Pampeanas Orientales, faja que separaría el terreno Córdoba del cratón del Río de La Plata (Ramos 1988, 2008). Una visión diferente es planteada por Rapela *et al.* (2007). Los cuerpos ultramáficos están compuestos principalmente por lherzolitas y harzburgitas, que constituyen una faja de tipo lherzolítico y representarían rocas originadas en un ambiente de retroarco, probablemente ensialico. Esta faja de rocas ultramáficas se extiende desde la localidad de Río Tercero hasta Ischilín, coincidiendo con la faja de deformación de la sierra Chica

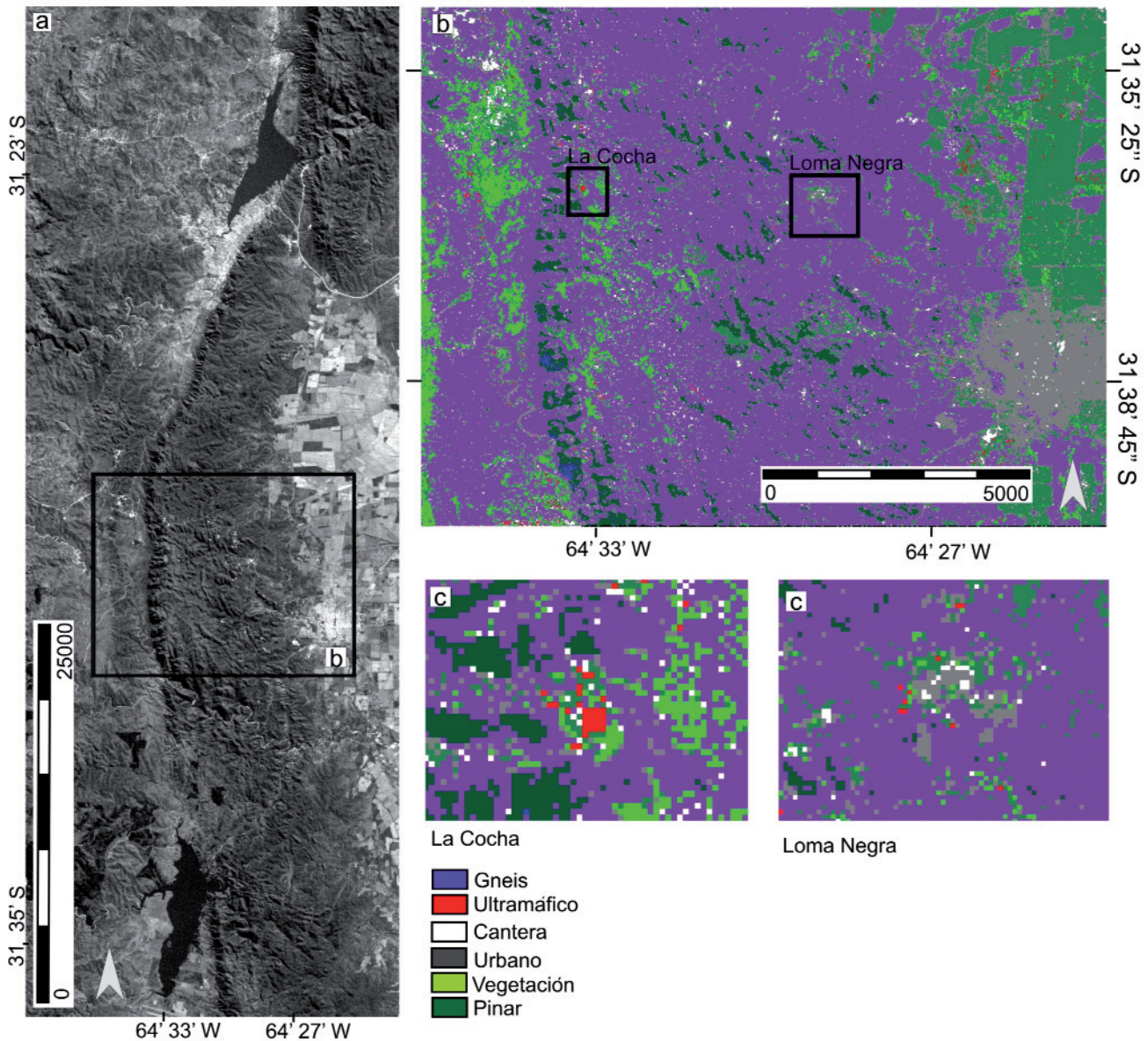


Figura 3: a) Recorte específico del área de afloramiento de los cuerpos ultramáficos; b) ampliación de la imagen clasificada con el algoritmo de máxima probabilidad; en los recuadros se ubican los cuerpos de Loma Negra (a la derecha) y La Cocha (a la izquierda); c) ampliación del área correspondiente a Loma Negra y La Cocha.

(Kraemer *et al.* 1995, Martino *et al.* 1995) en la que afloran importantes manifestaciones como son los complejos de Loma Negra, Bosque Alegre, La Cocha, Santa Cruz, Mina Ada y Cerro Sapo. Gran cantidad de manifestaciones menores fueron estudiadas por Mutti (1992 a, b y bibliografía citada allí), Pugliese (1995), Martino y Zapata (2002) y Anzil y Martino (2005). Los principales afloramientos de la faja se encuentran al NO de la ciudad de Alta Gracia, principalmente dentro del ámbito de la sierra Chica. En general, estos cuer-

pos se encuentran asociados a mármoles, anfíbolitas, gneises y migmatitas de medio a alto grado, en una faja general de orientación NNO.

En el sector de la sierra Grande de la imagen 229-082, aflora el batolito de Achala, de naturaleza granítica y carácter intrusivo postcinemático, de edad Paleozoica inferior (Dorais *et al.* 1997, Rapela *et al.* 2008). Es el mayor complejo magmático de las Sierras Pampeanas, ocupando un área de 105 km de largo por 43 km de ancho. Rocas del Precámbrico – Paleozoico infe-

rior, en facies dominantes de anfíbolitas y granulitas, constituyen su entorno encajonante (Lira y Kirschbaum 1990, Rapela *et al.* 1998). Demange *et al.* (1996), sobre la base de análisis químicos y petroológicos, diferenciaron dentro del batolito cinco series magmáticas: Achala, El Cóndor, Cumbrecita, Champaquí y Characato (cf. Zarco 2006).

Cabe recordar aquí que a los fines de este trabajo se recortó una subescena de la imagen 229-082 original (Cuadro 1) descrita en este acápite (véase Fig. 3) que

CUADRO 2: Matriz de confusión para la clasificación realizada con el algoritmo de máxima probabilidad.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	268	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0,4
B	0	301	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0,99
C	0	0	2030	32	0	137	1	0	8	16	0	0,91
D	42	21	23	979	0	0	34	2	18	14	0	0,86
E	0	0	0	0	2924	0	0	0	0	0	0	1,00
F	0	0	10	0	0	658	0	0	0	0	0	0,99
G	0	0	0	0	0	0	35	3	3	0	0	0,85
H	1	0	0	33	0	0	248	992	476	0	0	0,57
I	2	0	2	24	0	0	16	79	202	2	0	0,62
J	0	0	120	179	0	0	0	0	2	378	0	0,56
M	0,86	0,93	0,93	0,77	1,00	0,83	0,1	0,92	0,28	0,92		

A= campo1, B= campo2, C= complejo metamórfico, D= granito, E= lago, F= pinar, G= río, H= urbano, I= urbano periférico, J= vegetación sobre encajonante, K= no clasificado, L= exactitud del productor, M= exactitud del usuario.

guarda las mismas características geológicas de la imagen completa.

RESULTADOS

Los cocientes de bandas propuestos por Sultan *et al.* (1986), Bishta (2004), Gad y Kusky (2006) y el IVDN, no permiten observar diferencias en las respuestas del complejo metamórfico y los cuerpos ultramáficos, por lo cual no resultó efectivo a los fines apuntados. Las relaciones entre bandas que propone Sabins (1999), sin embargo distinguen en color verde a los cuerpos ultramáficos de La Cocha y Loma Negra, dada la respuesta alta en la banda roja (3) y una elevada absorción en el azul (1). El complejo metamórfico se diferencia por su color azul en general, por una alta respuesta en el infrarrojo medio (5) y baja en el infrarrojo lejano (7). En las clasificaciones supervisadas, el clasificador de máxima probabilidad (Fig. 2a), no evade el efecto de la topografía, que introduce la clasificación errónea de los píxeles ubicados de la zona de sombra de la escarpa de falla de la sierra Chica. En la clasificación de paralelepípedos (Fig. 2b), se observó buena diferenciación y límite de las clases principales granito y complejo metamórfico. Se necesitó no obstante de una mejora con aplicación de filtrado lineal. No se obtuvieron resultados satisfactorios mediante la aplicación del algoritmo de mínima distancia Mahalanobis (Fig. 2c) y el de mínima distancia (Fig. 2d).

Sobre la base del análisis visual, de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las cuatro clasificaciones, se seleccionaron el de máxima probabilidad y el de paralelepípedos, por la mayor definición obtenida. Mediante la clasificación por paralelepípedos se obtuvieron un promedio de exactitud de campo de 60,50% (indica cuántos píxeles de la verdad de campo fueron bien clasificados) y un promedio de exactitud de clases de 72,74% (indica cuántos píxeles de las clases fueron bien clasificados). La medida global de fiabilidad (suma de todos los píxeles clasificados correctamente sobre el número total de píxeles) fue de un 62,87%. Para el caso de la aplicación del clasificador de máxima probabilidad, la matriz puede verse en el Cuadro 2 y los porcentajes logrados fueron: promedio de exactitud de campo 82,87%, promedio de exactitud de clases de 75,54%, con una medida global de fiabilidad de un 84,83%. El resultado final, correspondiente al recorte de la imagen (Fig. 3), permite observar que algunos de los elementos clasificados como ultramáficos no se corresponden con la realidad de campo. Sin embargo, en el producto de la clasificación sí se encuentran los cuerpos ultramáficos localizados en el campo, entre ellos La Cocha y Loma Negra, siendo éstos los más importantes. Su nivel de definición es adecuado y han sido asignados correctamente a esta clase. El tamaño de los afloramientos hace que no sea posible

aplicar el filtro para contribuir al acabado de bordes sin eliminar la clase.

DISCUSIÓN

Pudieron ensayarse los algoritmos de clasificación de Sultan *et al.* (1986), Bishta (2004) y Gad y Kusky (2006), resultados que no parecen recomendables, probablemente debido a la influencia de la cobertura vegetal, ya que los algoritmos fueron desarrollados para zonas desérticas, donde ésta no se presenta como interferencia. En cuanto a la ecuación propuesta por Sabins (1999), permite establecer la diferencia buscada, aún así no alcanzaría esta ecuación para ubicar cuerpos ultramáficos que no hayan sido previamente identificados en el campo. El IVDN, no parece variar en función de la vegetación que se desarrolla sobre las diferentes litologías que se pretenden identificar en este trabajo.

Entre los diferentes algoritmos, el clasificador de máxima probabilidad daría respuestas favorables, a los fines de este trabajo. Permite distinguir las litologías predominantes, como el granito y las rocas metamórficas (gneises y milonitas) que conforman el encajonante dominante. Diferencia las clases de manera homogénea y sin ruido excesivo, en contraposición a lo que resulta con el clasificador de mínima distancia. Se observa que tampoco excluye demasiados píxeles en la clasificación, como ocurre en el caso de los paralelepípedos. La medida global de fiabilidad de la matriz de confusión de máxima probabilidad (84,83%), refleja una mejor clasificación respecto de esta última.

En el estudio de detalle, ante una mayor homogeneidad litológica y la presencia de los principales afloramientos de los cuerpos ultramáficos, éstos alcanzan a ser caracterizados, a pesar de su reducida extensión (0,5 Km de largo por 0,2 Km de ancho, en el caso del cuerpo La Cocha). Sin embargo se observa dispersión, lo cual indica que, si bien hay inclusión de la clase prospectada, los umbrales no permiten confinarla a lo que estrictamente corresponde según la verdad de campo.

No se ha podido precisar si el enmascaramiento de la firma espectral está dado por la relación de resolución (relación entre la resolución del sistema y el tamaño máximo de las unidades a prospectar), o a factores relacionados con la cobertura vegetal. Estos últimos inciden seguramente en la dificultad comentada, pero no se podría precisar en qué medida.

Indudablemente ligada en primer lugar a la relación de resolución, los filtros aplicados para optimizar la cartografía digital de los cuerpos los desdibujan para hacerlos desaparecer.

CONCLUSIONES

Los procesamientos digitales registrados como antecedentes específicos en la prospección de rocas ultramáficas, no aportan significativamente a la definición espectral de la clase prospectada.

Los métodos de clasificación supervisada convencionales del tipo de máxima probabilidad y el de paralelepípedos, muestran ser útiles en el proceso de discriminación espectral de rocas ultramáficas de reducida superficie de afloramiento, conociéndose la ubicación precisa de afloramientos guía.

La escasa magnitud de los afloramientos y la cobertura vegetal contribuyen a disminuir la efectividad de los clasificadores empleados observándose ruido. La imposibilidad de aplicar filtros de mejoramiento de bordes impide el cartografiado digital de las unidades caracterizadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del trabajo de tesis doctoral de P. Anzil para el Doctorado en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), y de la beca otorgada por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y la Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba el apoyo brindado para la ejecución en las

tareas de campo. Se agradecen los comentarios realizados en una primera versión de este manuscrito por la Dra. Silvia Godoy (Segemar, Buenos Aires), el Dr. Ernesto Abril (FCEF, UNC) y el Dr. Daniel Pérez (FCEN, UBA).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Abrams, M., Rothery, D. y Pontual, A. 1988. Mapping in the Oman Ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics* 151: 387-401.

Anzil, P. y Martino, R. 2005. Estructura del cuerpo ultramáfico de La Cocha, Sierra Chica de Córdoba, Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 53-58, La Plata.

Bishta, A. 2004. Lithologic discrimination of Gabal Qattar – Um Disi environs, north eastern Desert of Egypt using thematic mapper data of Landsat 7. 3rd International Symposium on Geophysics, 541-557, El Cairo.

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. S.A., 569 p., Madrid.

Cushnie, J. y Atkinson, P. 1985. The effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51: 1483-1493.

Demange, M., Alvarez, J., Lopez, L. y Zarco, J. 1996. The Achala Batholith (Córdoba, Argentina): a composite intrusion made of five independent magmatic suites. Magmatic evolution and deuteritic alteration. *Journal of South American Earth Sciences* 9: 11-25.

Dorais, M., Lira, R., Chen, Y. y Tingey, D. 1997. Origin of biotite-apatite-rich enclaves, Achala batholith, Argentina. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 130: 31-46.

Eastman, J. 2006. IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University, 327 p., Worcester.

Escayola, M., Ramé, G. y Kraemer, P.

1996. Caracterización y significado geotectónico de las fajas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba. 13° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 421-438.

Frei, M. y Jutz, S. 1989. Use of Thematic Mapper data for the detection of gold bearing formations in the eastern Desert of Egypt. En *Proceedings of the 7th thematic conference on remote sensing for ore exploration geology* 2: 1157-1172, Calgary.

Gordillo, C. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Leanza, A.P. (ed.) *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias 1: 577-650, Córdoba.

Gad, S. 2002. Exploration for mineralized granites in Central Eastern Desert, Egypt, M.Sc. Thesis, Faculty of Science, South Valley University, (inédita), 118 p., Aswan.

Gad, S. y Kusky, T. 2006. Lithological mapping in the Eastern Desert of Egypt, the Barramiya area, using Landsat thematic mapper (TM). *Journal of African Earth Sciences* 44: 196-202.

Haack, B., Bryant, N. y Adams, S. 1987. An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification. *Remote Sensing of Environment* 21: 201-213.

ITC 2001. ILWIS 3.3 user's guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 530 p., Enschede.

Kraemer, P., Escayola, M. y Martino, R. 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40'-32°40'), Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50(1-4): 47-59.

Kusky, T., y Ramadan, T. 2002. Structural controls in the Neoproterozoic Allaqi suture: an integrated field, Landsat TM, and radar C/X SIR SAR images. *Journal of African Earth Sciences* 35: 107-121.

Lira, R. y Kirschbaum, A. 1990.

- Geochemical evolution of granites from the Achala batholith of the Sierras Pampeanas. *Geological Society of America, Special Paper* 241: 67-76.
- Martino, R. y Zapata, I. 2002. Plegamiento en vaina tipo 'a' de los cuerpos ultramáficos y estructura general de la región de Sintonsacate, Sierra Chica, Córdoba. *Avances en Microtectónica. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial* 5: 139-142.
- Martino, R., Kraemer, P., Escayola, M., Giambastiani, M. y Arnosio, M. 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° LS. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50(1-4): 60-77.
- Mutti, D. 1992a. Las rocas ultrabásicas – básicas de la provincia de Córdoba: interpretaciones geoquímicas e importancias geotectónicas. 1° Reunión de Mineralogía y Metalogénesis y Jornada de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas. *INREMI*: 411-432, La Plata.
- Mutti, D. 1992b. El complejo gabro-peridotítico de Bosque Alegre, Provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47(2): 153-168.
- Pugliese, L. 1995. Geoquímica y petrogénesis del complejo máfico – ultramáfico estratificado del Cerro La Cocha de Bosque Alegre, en la Sierra Chica de Córdoba. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 340 p., Córdoba.
- Ramos, V.A. 1988. Late Proterozoic-Early Paleozoic of South America: a collisional history. *Episodes* 11: 168-174.
- Ramos, V.A. 2008. The basement of the Central Andes: the Arequipa and related terranes. *Annual Review on Earth and Planetary Sciences* 36: 289-324.
- Rapela, C., Pankhurst, R., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. y Fanning, C. 1998. The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. En Pankhurst, R., Rapela, C. (eds.) *The Proto-Andean Margin of Gondwana. Geological Society of London, Special Publications* 142: 181-217.
- Rapela, C., Baldo, E., Pankhurst, R. y Fanning, C. 2008. The devonian Achala batholith of the sierras Pampeanas: F-rich, aluminous A-types granites. 6° South American Symposium on Isotope Geology. *Proceedings in CD-ROM, paper* 53: 8 p.
- Rapela, C., Pankhurst, R., Casquet, C., Fanning, C., Baldo, E., González-Casado, J., Galindo, C. y Dahlquist, J. 2007. The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth-Science Reviews* 83: 49-82.
- Richards, J. 1993. Remote sensing digital image analysis. *An Introduction* (2nd Ed.), Springer-Verlag, 340 p., Berlín.
- Sabins, F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14: 157-183.
- Sultan, M., Arvidson, R. y Sturchio, N. 1986. Mapping of serpentinites in the Eastern Desert of Egypt using Landsat Thematic Mapper data. *Geology* 14: 995-999.
- Thomas, I., Ching, N., Benning, V. y D'Aguzzo, J. 1987. A review of multi-channel indices of class separability. *International Journal of Remote Sensing* 8: 331- 350.
- Zarco, J. 2006. Geología estructural y petrología estructural del complejo granítico peraluminoso de Achala en relación con la génesis y la localización de la mineralización de uranio (Sierras Pampeanas, Argentina). Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta, (inédito), 94 p., Salta.

Recibido: 27 de Noviembre, 2009

Aceptado: 25 de Marzo, 2010