



## Metodología de análisis mediante el uso de información satelital de la estructura y morfología del sector norte del batolito de Achala y su encajonante metamórfico, Sierras Pampeanas de Córdoba

Ernesto Guillermo ABRIL<sup>1</sup>, Ana CARO MONTERO<sup>3</sup>, Alina Beatriz GUERESCHI<sup>2,3</sup> y Roberto Donato MARTINO<sup>2,3</sup>

**Abstract:** *METHODOLOGY OF ANALYSIS THROUGH THE USE OF SATELLITE INFORMATION ON THE STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF THE NORTHERN SECTOR OF THE ACHALA BATHOLITH AND ITS METAMORPHIC HOST ROCKS, SIERRAS PAMPEANAS OF CÓRDOBA.* The satellite technology development, with specific software associated and the great diffusion of satellite images along with digital terrain models have allowed a great advance in the territorial land planning for agronomic and urban uses, the development of natural hazards specific maps. Within the field of geology has become an extremely useful work tool, which, knowing how to make use of it, allows the study of geological and tectonic units at regional and even global scale, which due to their dimensions have not been observed from a broader perspective. The digital processing tools, through algorithms, allow to discriminate lithological units, fault slopes, structural lineaments, drainage network, and a long list of possibilities that allow the study of large geological units, as well as their relations with adjacent ones. Using this methodology on the northern sector of the Achala batholite and its metamorphic field rocks, in the Sierra Grande of Córdoba (Sierras Pampeanas Orientales), valuable data on faulting, morphology and block tilting, due to the tectonic activity of the Retamito lineament and other parallel minor ones, have been provided. The use of digital terrain models has been useful to evaluate the traces of these lineaments throughout the studied area, verifying its northwest trend and its extension by more than 80 km, segmenting the batholith by its middle part, as well as to obtain the estimate of the topographical throw of more than 400 m between the two large blocks and their clockwise tilting.

**Resumen:** El desarrollo de la tecnología satelital, con software específico y la gran difusión de imágenes satelitales junto con modelos digitales del terreno, han permitido un gran avance en la planificación territorial del suelo para usos agronómicos y urbanos, el desarrollo de mapas específicos de riesgos naturales. Dentro del campo de la geología, ha llegado a ser una herramienta de trabajo extremadamente útil, que sabiendo hacer uso de ella, permite el estudio de unidades geológicas y tectónicas a escala regional e incluso global, las cuales, debido a sus dimensiones, no han podido observarse desde una perspectiva más amplia. Las herramientas de procesamiento digital, a través de algoritmos, permiten discriminar unidades litológicas, escarpes de fallas y lineamientos estructurales, calcular la red de drenaje, y muchas otras posibilidades que permiten el estudio de grandes unidades geológicas, así como sus relaciones con las adyacentes. Aplicando este método de trabajo sobre el sector norte del batolito de Achala y su encajonante metamórfico, en la Sierra Grande de Córdoba (Sierras Pampeanas Orientales), se han podido aportar valiosos datos sobre la fracturación, la morfología y la estructuración en bloques, debido a la actividad tectónica del lineamiento Retamito y otros

---

<sup>1</sup>) CREAN/IMBIV (CONICET-UNC), Facultad de Ciencias Agropecuarias y FCEFyN (Laboratorio Geotecnia), Universidad Nacional de Córdoba, e-mail: [ernesto.guillermo.abril@gmail.com](mailto:ernesto.guillermo.abril@gmail.com)

<sup>2</sup>) Departamento de Geología Básica, FCEFyN-UNC y CIGEA (FCEFyN-CNEA). Ciudad Universitaria, Córdoba, e-mail: [roberto.martino@unc.edu.ar](mailto:roberto.martino@unc.edu.ar), e-mail: [alina.guereschi@unc.edu.ar](mailto:alina.guereschi@unc.edu.ar)

<sup>3</sup>) CICTERRA (CONICET-UNC), Córdoba, e-mail: [acaromontero@gmail.com](mailto:acaromontero@gmail.com)

<sup>4</sup>) Ernesto Guillermo ABRIL, Dirección postal: FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Vélez Sarsfield 1611 X 5016, Córdoba, Argentina, e-mail: [ernesto.guillermo.abril@gmail.com](mailto:ernesto.guillermo.abril@gmail.com)

lineamientos menores paralelos. El uso de modelos digitales del terreno ha sido clave para evaluar la traza de dichos lineamientos a través del área estudiada, constatando su rumbo noroeste y su extensión por más de 80 km, segmentando el batolito por su parte media, así como para obtener la estimación del salto topográfico de más de 400 m entre los dos grandes bloques y su basculamiento en sentido horario.

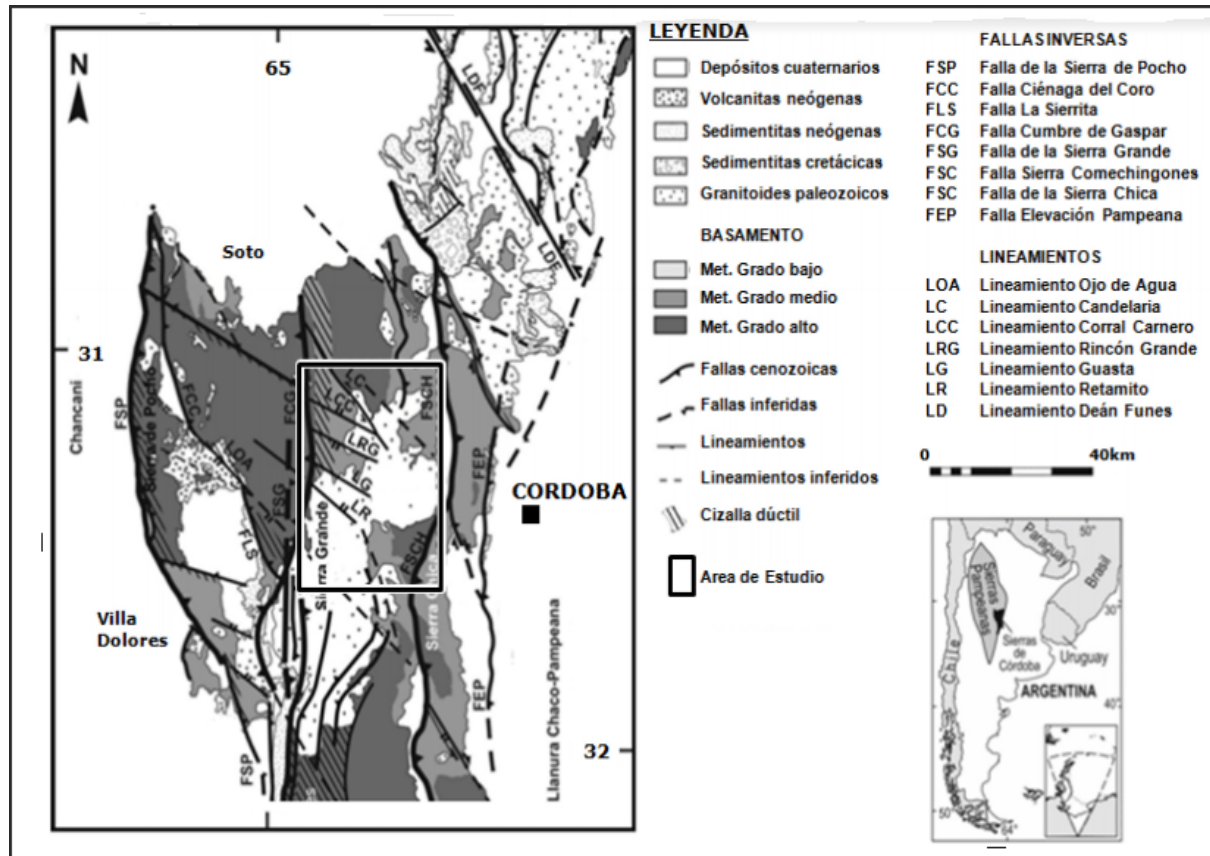
**Key words:** Remote sensing. Analysis satellite. Sierras de Córdoba. Batholith Achala. Geomorphology.

**Palabras clave:** Sensores remotos. Análisis satelitales. Sierras de Córdoba. Batolito de Achala. Geomorfología.

### Introducción

Cuando se emplea información satelital, es importante ensayar y analizar la validez y eficacia de los recursos y procedimientos disponibles. El propósito de tal evaluación es poder corroborar argumentos de campo e incorporar evidencias. En el presente caso, la experiencia es conducente a dilucidar la naturaleza y el significado de la participación de una discontinuidad estructural en la definición geomorfológica del área norte de las sierras de Córdoba.

Las Sierras de Córdoba forman parte del antepaís andino y constituyen el grupo más oriental de las Sierras Pampeanas. Están compuestas por un basamento metamórfico neo-proterozoico-paleozoico, que durante el Paleozoico inferior-medio fue imbricado por zonas de cizalla dúctil e intruido por granitoides como el batolito de Achala, en el área central de las sierras (figura 1). Este basamento se dispone en cordones montañosos de orientación meridiana, como la Sierra Grande y la Sierra Chica. Están limitados por fallas inversas vergentes al



**Figura 1.** Mapa geológico de las Sierras de Córdoba (modificado de Martino *et al.*, 2016a). / **Figure 1.** Sierras de Córdoba geological map (modified from Martino *et al.*, 2016a).

oeste, provocadas por una tectónica compresiva durante la orogenia Andina. Las sierras están afectadas además por lineamientos subverticales oblicuos a las fallas principales, con orientación noroeste, entre ellos el Lineamiento Retamito objeto de este estudio (figura 1).

Un conjunto de conocimientos adquiridos en campo y observaciones de contexto (Martino, 1988; Martino *et al.*, 2012 b, 2014, 2016 a,b), así como del entorno geológico del Lineamiento Retamito, han hecho posible inferir su protagonismo en la configuración actual del relieve regional en la Sierra Grande de Córdoba. Es preciso detenerse en el análisis de su incidencia en la geomorfología del sector norte del batolito de Achala, para lo cual se evalúa la información satelital.

El aporte que pueden ofrecer el análisis regional y de imágenes remotas satelitales, junto con el análisis asistido por computadora, contribuye de manera significativa al estudio y entendimiento de la problemática de las fallas y lineamientos que ya fueron observados por los primeros geólogos en las Sierras de Córdoba (Stelzner, 1875; González Bonorino, 1950; Cuerda, 1973) y actualmente siguen en estudio (Martino, 1988; Martino *et al.*, 2012 b, 2014, 2016 a,b).

Las Sierras de Córdoba están afectadas por una serie de estructuras lineales regionales que cortan de manera oblicua a todos los cuerpos de sierra, a veces limitándolos. Se denominan genéricamente como “lineamientos” debido a sus trazas rectas de magnitud regional. Al momento, se conoce la cinemática y las rocas cataclásticas-miloníticas producto de la actividad de algunos de estos lineamientos; otros están en estudio (Martino, 1988). El Lineamiento Retamito (Martino, 1988; Martino *et al.*, 2012 b, 2014, 2016 a,b) es una falla transtensional dextral de rumbo noroeste que se extiende por más de 80 km y atraviesa la Sierra Grande (figura 1). Esta estructura ha segmentado, casi en su parte media, al batolito de Achala y a su encajonante metamórfico inmediato, conformando dos grandes bloques, definidos como Dominio Achala Norte y Dominio Achala Sur. La caracterización y definición de estos dominios y la cartografía regional del

Lineamiento Retamito, mediante los recursos informáticos mencionados, son el objetivo principal de este trabajo.

## Antecedentes

El uso de imágenes remotas satelitales y modelos digitales del terreno comenzó entre los años 1960 y 70 con aplicaciones militares, estudios naturales y planificación urbana principalmente. En los años 80, se consolidaron estas metodologías con la llegada de amplias bases de datos y el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG); durante la siguiente década, la mejora e industrialización de la tecnología SIG junto con la aparición de microordenadores y el desarrollo de material gráfico a precios asequibles contribuyó a que estas metodologías pudieran ser aplicables a todos los ámbitos relacionados con la localización. A partir del año 2000, la difusión de datos a través de internet de manera gratuita, SIG, imágenes satelitales, desarrollos específicos de software para el tratamiento de éstos, han permitido tanto el estudio de problemáticas de carácter local (ej. Pérez López *et al.*, 2000; Troncoso *et al.*, 2012) y regional (ej. Nabel *et al.*, 2008), como la planificación territorial (ej. Paruelo *et al.*, 2005), generación de mapas precisos de riesgos geológicos (ej. Roa, 2007), etc.

## La escala de los fenómenos

De acuerdo con la concepción de coherencia de escala, la visualización de estructuras geológicas como fracturas y fallas *in situ* es inmediatamente seguida de una observación panorámica que busca relacionarlas con aspectos regionales, de manera tal que sea posible aproximar un abordaje general que contenga y explique fenómenos comprobados en el campo. En este sentido, el tema de la escala es expuesto con claridad por Ruiz Rivera y Galicia (2016), siendo un principio elemental explicar fenómenos menores según otros que se comportan como rectores de diseños locales.

El concepto de escala es utilizado en diversas disciplinas en relación con las cualidades y la extensión geográfica del objeto de estudio y para abordar metodológicamente la investigación científica. Se aplica particularmente al diseño del muestreo y también en la secuencia de inferencia, pero tiene un papel protagónico en el proceso del análisis espacial (García, 2006). Recurriendo a diferentes escalas de consideración, pueden advertirse relaciones temporales de los elementos de la fracturación desde su diseño, vislumbrándose secuencias de ocurrencia e incluso la evolución de determinados patrones de deformación/ruptura.

Estas estrategias se emplean en campo, analizando el estado de cosas según distintas distancias y perspectivas, pero también en gabinete. La posibilidad de observar en aproximación/alejamiento es proporcionada por las imágenes aéreas y satelitales, y se complementa con el análisis direccional según diferentes ángulos de elevación de la visual, que empleamos desde hace décadas (Kimsa y Abril, 1981, 1982; Abril, 1989; Abril y Baleani, 1989).

Ya entonces en el ámbito del análisis digital de imágenes (ADI), sus herramientas se complementan con las que le son propias al procesamiento digital (PDI) y el análisis multispectral de imágenes (AMI), este último ya en el área específica de los sistemas de información geográfica (SIG), ya que implican la composición de capas georeferenciadas.

## Materiales y métodos

### Análisis satelital

Los diferentes fenómenos naturales detectables, sus partes y sus geoformas asociadas tienen una expresión superficial directa (visibles) y/o indirecta (inferibles). Cada fenómeno (y las partes que lo definen) tiene sus dimensiones. En parte, las posibilidades de su detección en campaña derivan de geoformas y litologías típicas. El análisis de rasgos mayores y de su contexto, que muchas veces define o confirma su identidad, se efectúa a la distancia, sea desde

un punto estratégico de observación en campo como a partir de aerofotografías y/o imágenes satelitales.

En aerofotografías e imágenes satelitales, el estudio de las estructuras secundarias en el ámbito frágil (el caso que nos ocupa es el basamento cristalino aflorante), la fracturación se resume en rasgos lineales designados como geolineamientos estructurales o simplemente geolineamientos. Para estos estudios, se recurre a las estrategias de análisis visual convencional aplicadas tradicionalmente a partir de escenas en formato papel. En el ámbito del análisis digital, la información proporcionada por imágenes satelitales, modelos digitales del terreno y sistemas de información geográfica, se puede manipular para conseguir resultados similares pero con ventajas significativas. Básicamente, se concentraba en el análisis de escenas multi-temporales a diferente escala y considerando *buffers* de distinta jerarquía, la observación perpendicular o lateral según ángulos vertical y horizontal variados, a distintas distancias y seleccionando las monobandas (en particular las del infrarrojo cercano) y variados compuestos color multibanda (color natural simulado, falsocolores compuestos, etc.).

Dentro de las estrategias aludidas, y en la fase primaria de detección de estos rasgos, se busca el mejoramiento de las imágenes, con la idea de destacar línea en general. Esto se logra mejorando la nitidez de todo rasgo de carácter lineal, con el efecto de síntesis (unión de partes) que en este sentido ofrece la visualización sinóptica. El análisis del grado de coherencia que presentan las evidencias logradas durante el pasaje de escalas es un segundo argumento de peso. La armonía del conjunto con los detalles y particularidades del lineamiento, y sus contrastes con el contexto, confirman o no la identidad estructural de los rasgos. Una visualización a mayor distancia permite relacionar una serie de línea menores como pertenecientes a una línea mayor (regional) que obedece a fenómenos de magnitud superior. Esto es coherente con la teoría de la segmentación, que defiende la pertenencia de partes a rasgos mayores, aun

manifestándose de modo discontinuo.

En el ámbito del procesamiento digital de imágenes, los mejoramientos dirigidos a la detección pueden confiarse a los filtrados direccionales simples sobre bandas específicas de imágenes multiespectrales, en los rasgos simples, y a filtrados especiales sobre modelos digitales de terreno (MDT), en los rasgos compuestos. Ambos son aplicables específicamente en ambientes de montaña, donde la rugosidad de la superficie contribuye al enmascaramiento de las partes.

### Selección de imágenes y cartografía

En el caso que se aborda, dados los conocimientos acumulados específicamente sobre el Lineamiento Retamito, se ensayó una serie de procedimientos llevados adelante a partir de distintos recursos gráficos (imágenes), para corroborar los argumentos de campo. Se busca, además, incorporar nuevas evidencias para dilucidar la naturaleza y características de este rasgo que define la geomorfología de la parte noroeste de las sierras de Córdoba y analizar las ventajas de una adecuada selección de recursos y estrategias de análisis asistidos por computadora.

El estudio se ha desarrollado contando con software de procesamiento de imágenes y aplicaciones SIG (Eastman, 2016), recurriéndose a imágenes satelitales LANDSAT, C-BERS, SENTINEL y SPOT de uso libre, obtenidas de los catálogos de INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016), CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, 2016) y *Google Earth Pro* (Google, 2016).

Se emplearon escenas de diferentes fechas, en función de su disponibilidad, analizando previamente sus aportes de acuerdo con aspectos fenológicos, atendiendo particularmente a la presencia de indicadores concurrentes (topografía, vegetación, humedad del suelo) y la época del año, como diferentes ángulos de iluminación solar.

Los análisis topográficos fueron efectuados con el empleo de registros Shuttle RADAR

Topography Mission, SRTM (Jet Propulsion Laboratory, 2014) y Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER (Jet Propulsion Laboratory, 2015).

Se ha recurrido a cartografía temática publicada (Faja de Deformación Guamanes: Martino, 1988, 1993, 2003; facies del batolito de Achala: Lira y Sfragulla, 2014; mineralización de Uranio asociada: Blasón *et al.*, 2014; estructura de las sierras de Córdoba: Martino y Guerreschi 2014, Martino *et al.*, 2012 a, 2014, 2016a) e inédita (Martino, com. pers.), formateada y georreferenciada, para su tratamiento en el ámbito de los sistemas de información geográfica.

### Interpretación de imágenes

La visualización del Lineamiento Retamito es clara en las imágenes de prácticamente todos los sensores multiespectrales. Cotejada con indicadores de carácter territorial, se ha podido advertir una correspondencia directa con características topográficas (cotas, pendientes y elementos de la red de drenaje, en principio). Por esta razón, los estudios presentes se han centrado en este caso en los relevamientos satelitales topográficos SRTM y ASTER, considerándose que el procesamiento de estos datos nos permite abordar el tema de la objetividad de las interpretaciones.

La síntesis de la que derivan los mapas es un recurso de simplificación que permite diferenciar partes y jerarquizar contenidos. Como tal, es un recurso visual. Debido a la subjetividad que de ordinario se le asigna a la interpretación derivada del análisis visual, se recurre a procesos matemáticos que permiten generar una cartografía ajustada a los términos aceptables en ciencia. Así, el análisis asistido por computadora es un paso más hacia el logro de productos cartográficos menos subjetivos y, por lo tanto, condicionantes de una mirada más cercana a la observación científica.

La limpieza de detalles es un proceso que tiene particular peso en el análisis, debido a que no debería eliminar evidencia. De allí el auxilio que brindan las estrategias SIG, que hacen po-

sible un barrido de detalles por tema y tomar en cuenta algunos muy significativos en determinada temática (indicadores provenientes de la topografía, la vegetación, la humedad del suelo, los ángulos de iluminación solar, etc.). De este modo, lo que es un dato menor descartable en una capa de información puede ser tenido en cuenta protagónicamente en otra, evitándose perderlo como argumento soporte de la interpretación.

De allí que del proceso de síntesis gráfica derivan los mapas, bases de datos gráficos de suma utilidad para advertir, analizar y entender las relaciones espaciales de las cosas. El siguiente paso es el análisis multitemático (capas de mapas) que posibilitan las estrategias SIG, que permiten recolectar testimonios o pruebas y estudiar su coherencia argumental según las variables geográfica y temporal.

El análisis espacial a partir del procesamiento matemático de las expresiones numéricas (luego tonales) de los elementos que representan los argumentos referidos garantiza un confinamiento interesante de las alternativas y disminuye de modo no antojadizo las ambigüedades que de por sí presenta una interpretación.

Las limitaciones del intérprete se encuentran determinadas por sus propias capacidades físicas y psico-físicas (perceptuales), la calidad de los productos que analiza y la disponibilidad de opciones. En este último tópico se incluye el tipo de sensores a los que recurre, la resolución de las imágenes que analiza (geométrica, espectral y temporal) y las estrategias de análisis a las que apele (estacionalidad y/o fechas de análisis, particularidades del clima, fenológicas, etc.).

Los conocimientos específicos, la experiencia y las habilidades del intérprete, los recursos tecnológicos e informáticos, así como la documentación complementaria completan una gama de alternativas cuyo diseño y secuencia de aplicación serán fundamentales en la confiabilidad de los resultados. En el presente caso, nos detenemos en el mejoramiento del producto a analizar (imágenes) y en la obtención de escenas que estimulen y optimicen la agudeza del intér-

prete en los procesos de detección, identificación y circunscripción de rasgos.

## Procesamiento digital

Para la detección de rasgos estructurales lineales, o lineamientos, se recurre a técnicas de realce que precisamente las destacan. Esto se logra a partir de procesamientos digitales englobados en los que se denominan filtrados espaciales. Con ellos se apunta a destacar elementos que pudieran estar asociados a lineamientos, disimulando el contexto y, a la vez, mejorando su nitidez, como así también haciendo visibles detalles y particularidades de contexto asociadas a los rasgos, en distintas jerarquías.

Con las máscaras designadas como de *pasa alta* los rasgos de carácter lineal resultan destacados. Estos filtros (como el Laplaciano o el de Prewitt) se emplean para la detección de bordes, esto es, para lograr definir límites de zonas intermedias que resultan luego graficadas como homogéneas. Los procesamientos para detección

de bordes se basan en buscar incrementar contrastes en zonas con diferencias en las intensidades y reducirlos donde las variaciones son relativamente menores.

Entre los filtros hay diferencias según sean o no lineales y según qué frecuencias dejan pasar. Utilizan máscaras (matrices operadoras), y a partir de algoritmos, se aplican recorriendo la imagen, centrando las operaciones en cada píxel y operando en su entorno según los coeficientes de la máscara. En una zona de la imagen donde hay poco contraste o una muy pequeña variación de los niveles espectrales, la salida (resultante) pasa a ser cero o próxima a cero. Para nuestras operaciones hemos seleccionado los filtros *pasa alta*, dado que dejan pasar frecuencias que se encuentran por encima de un umbral determinado. Estos disminuyen considerablemente la amplitud tonal de la imagen original (distancia entre mínimos y máximos), reduciendo el contraste global.

El operador Sobel fue empleado aquí sobre las diferencias de cota de ASTER para la

detección de bordes. Este operador diferencial discreto calcula una aproximación al gradiente de la función de intensidad de la imagen. El cálculo de la derivada direccional de la función expresa cómo son los cambios en esa dirección. Los cambios se asocian a altas frecuencias y resultan destacados los bordes de las partes u objetos presentes en la imagen. Los bordes marcan fronteras a partir de la localización de los puntos de la imagen donde se producen discontinuidades en los niveles de gris.

Resultante =  $\sqrt{\text{sqr}(X) + \text{sqr}(Y)}$  para:

X = imagen resultante por aplicación del kernel  $K_x$ .

Y = imagen resultante por aplicación del kernel  $K_y$ .

$$h_1 = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad h_2 = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

Con las matrices de Sobel (o máscaras de Sobel) se calculan el gradiente según las direcciones horizontal ( $h_1$ ) y vertical ( $h_2$ ).

Las síntesis cromáticas son resultados que permiten la delineación de contornos y la definición de unidades que pasarán luego a ser analizadas en cuanto a su significado o identidad, apelando al conocimiento de la geología local o regional. Estos productos en color o en tonalidades de gris cuentan a su favor con que son logrados desde el análisis numérico, por lo cual garantizan una objetividad matemática muy necesaria al momento de sostener argumentos de homogeneidad y continuidad.

El diseño de paletas de color presenta opciones interesantes en este sentido. Las paletas son las que traducirán a la vista las particularidades numéricas. Sus variables de manejo son los tonos, colores, combinación de colores, cantidad de tonos y colores, ancho de intervalos y tipo de distribución (continua, discontinua, regular, irregular, contrastada, etc., entre otras).

El manejo de estas variables conduce a la disponibilidad de paletas cualitativas, cuantitativas, de color, en niveles de gris, etc. Cada software ofrece sus estándares, pero el operador puede generarlas según sus necesidades específicas.

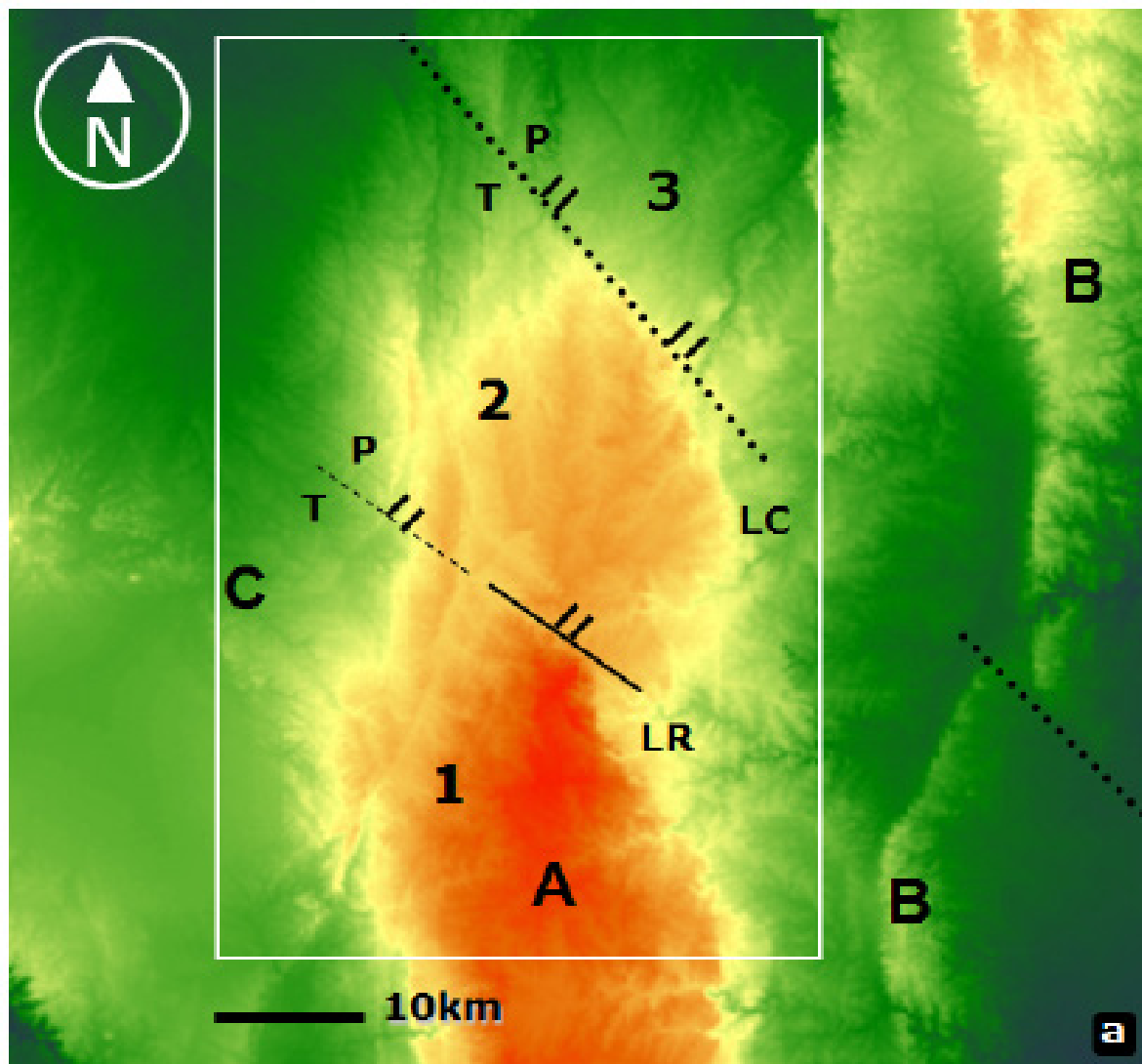
Los productos resultantes conforman indicadores geomorfológicos, complejos en cuanto a que están atados a distintas variables relacionadas con la topografía. Estos permiten la visualización de similitudes y asociaciones que facilitan la detección de singularidades. Posibilitan al intérprete advertir relaciones objetivas entre la geomorfología y otras características territoriales como las pendientes y el drenaje.

Este verdadero clasificador de cotas hace posible discriminar unidades a partir de partes o elementos topográficamente correspondientes expresados en firmas multicromáticas (efecto bandera). Franjas y umbrales de cotas homónimas resultan expresados con claridad y se visualizan sus relaciones de entorno y diseños espaciales mellizos.

El procedimiento recuerda la conocida estrategia de *slicing* que se aplica en discriminación espectral y multispectral conduciendo a la caracterización cromática de ámbitos topográficos en bandera. Se aplica la paleta de colores cuantitativa en 256 niveles cromáticos y permite la definición de continuidad y ruptura de unidades topográficas. Es un verdadero discriminador geomorfológico que aplicamos en una estrategia de visualización de patrones geomorfológicos, el progreso, la persistencia o extinción espacial de tendencias topográficas y diseños semejantes en los mismos intervalos de cota.

## Resultados

El Lineamiento Retamito es una estructura perteneciente a un juego de lineamientos estructurales con un rumbo de tendencia general NO a ONO y equidistancia variable. Varios de ellos fueron cartografiados (figura 1) y figuran ya como estructuras confirmadas (Martino, 1988, 1993, 2003; Martino *et al.*, 2012 a,b, 2014,



**Figura 2. A)** Modelo digital de terreno (MDT) sobre base ASTER con escala cromática progresiva de cotas. Referencias: A, B y C unidades topográficas; 1, 2 y 3: Bloques montañosos; T techo; P piso. Se indican los bloques bajos con los peines. / **Figure 2. A)** Digital terrain model over ASTER image with progressive chromatic elevation contour scale. References: A, B and C topographic units; 1, 2 and 3 mountain blocks; T roof; P wall. The low blocks are indicated by combs.

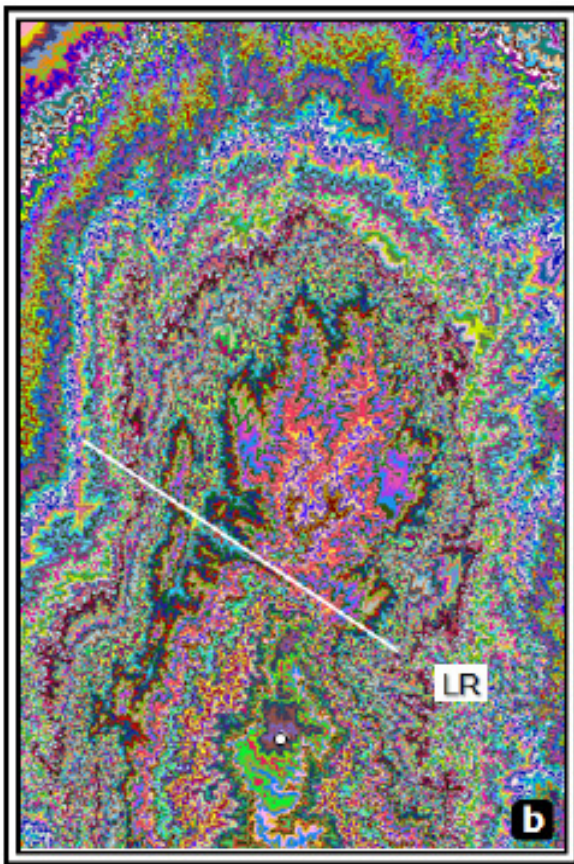
2016 a,b; Caro Montero *et al.*, 2015). Su papel en la geomorfología regional es significativo, ya que define un resalto topográfico en la Sierra Grande de más de 400 m, entre un bloque positivo (Dominio Achala Sur) y otro negativo (Dominio Achala Norte). El impacto de esta estructura en la geomorfología local se manifiesta en el diseño de la red de drenaje y en la definición y disposición de las cuencas hidrográficas.

Debido a la actividad tectónica vinculada al Lineamiento Retamito, se ha producido un basculamiento de bloques hacia el norte en el Dominio Norte y hacia el Este en el Dominio

Sur. El lineamiento es además un metalotecto de primer orden en las Sierras de Córdoba, ligado a yacimientos de uranio dentro del batolito de Achala (Mina Schlagintweit; Blasón, 1999; Blasón *et al.*, 2014).

El Lineamiento Retamito y su paralelo ubicado al Norte (Lineamiento Candelaria, LC en figura 1), definen sub-bloques que descienden abruptamente a partir de las rupturas. La unicidad del cuerpo principal se advierte en la imagen síntesis (figura 2), que permite incluso advertir un desplazamiento relativo de los bloques.





**Figura 2. B)** Área marcada en la figura 2a donde se aplica una paleta color cuantitativa para mostrar rangos de cotas sintéticamente. El recurso permite destacar la unicidad geomorfológica del conjunto a partir de una compresión de los datos topográficos. Se advierte un diseño simétrico a partir del eje central de la sierra orientado NE-SO y el cambio drástico del diseño a partir del Lineamiento Retamito (LR), mostrando un relieve escarpado hacia el SO y suave hacia el NE. / **Figure 2. B)** Rectangle area marked in figure 2a where a quantitative palette color was applicate to show the contour ranks synthetically. This resource allows to emphasize the geomorphological uniqueness of the set from a compression of the topographic data. A symmetrical design is seen from the central axis of the NE-SW oriented mountain range and the drastic change of the design from the Retamito Lineament (LR), showing a steep relief towards the SW and smooth towards the NE.

En la figura 2 a, se muestran tres unidades topográficas (A, B y C). A se corresponde con el batolito de Achala, B con la Sierra Chica y C con la Cumbre de Gaspar. En el batolito de Achala se observa que el Lineamiento Retamito trunca el bloque definiendo un bloque alto (techo de la falla) de un bloque bajo (piso de la falla). El rechazo calculado entre ambos es de 400 metros. Hacia el norte, se ha destacado otro quiebre topográfico importante que está determinado por el Lineamiento Candelaria. En

esta unidad, se presentan las mismas relaciones techo/piso que en el caso del lineamiento Retamito. El resultado es un descenso hacia el NE de tres bloques (1, 2 y 3, en la figura 2 a). El Bloque 1 se designa en este trabajo Dominio Achala Sur (DAS) mientras que al bloque 2 se lo llama Dominio Achala Norte (DAN). Como veremos más adelante, esta unidad presenta particularidades en la red de drenaje que permiten reforzar su individualización como tal.

En la figura 2b se ha destacado el Lineamiento Retamito y se visualizan las unidades geomorfológicas según rangos de cotas discriminados tonalmente. Cada banda de color expresa una diferencia de cotas representativa de una franja de terreno. Cuanto más estrecha se presenta, más pronunciada es la pendiente. Se advierte entonces un diseño simétrico a partir del eje central de la unidad, orientado NE-SO y un cambio drástico a partir del Lineamiento Retamito. Hacia el suroeste (DAS), se presenta una geomorfología más escarpada que al noreste (DAN). El impacto de la estructura en la geomorfología local se manifiesta en un diseño claro de la red de drenaje y en la definición y disposición de las cuencas. Cabe agregar que a partir de la presencia del Lineamiento Retamito se produce un basculamiento de bloques hacia el norte en el DAN y hacia el este en el Dominio Sur, discutiéndose a continuación.

En la figura 3 a, se advierte el cambio de rumbo de la red de drenaje a partir del Lineamiento Retamito, mostrando la inclinación del DAN hacia el norte y del DAS hacia el este y oeste (divisoria de aguas) respectivamente. En la figura 3b, se muestra un detalle de la distribución espacial de las geoformas en función de su rango de cota. La continuidad del patrón en simétrico desde el eje NE-SO. Esto se respeta incluso a ambos lados de la discontinuidad y a pesar de la diferencia de cotas de alrededor de 400 metros, mostrando la pertenencia del conjunto a una misma unidad geomorfológica y a la misma unidad litológica: los granitoides del batolito de Achala.

En la figura 4, se muestra la topografía regional y el resalto de alrededor de 400 m que

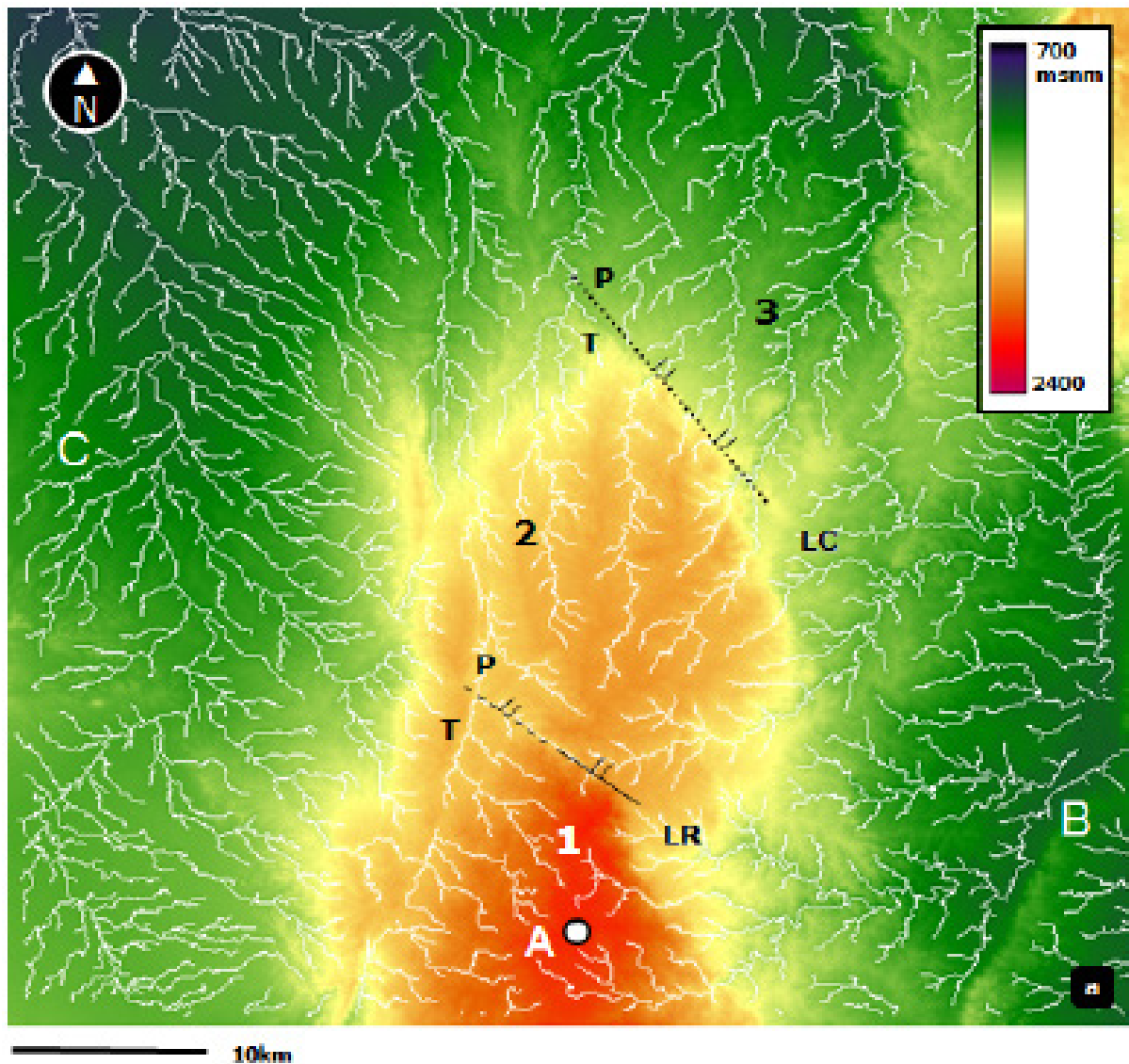


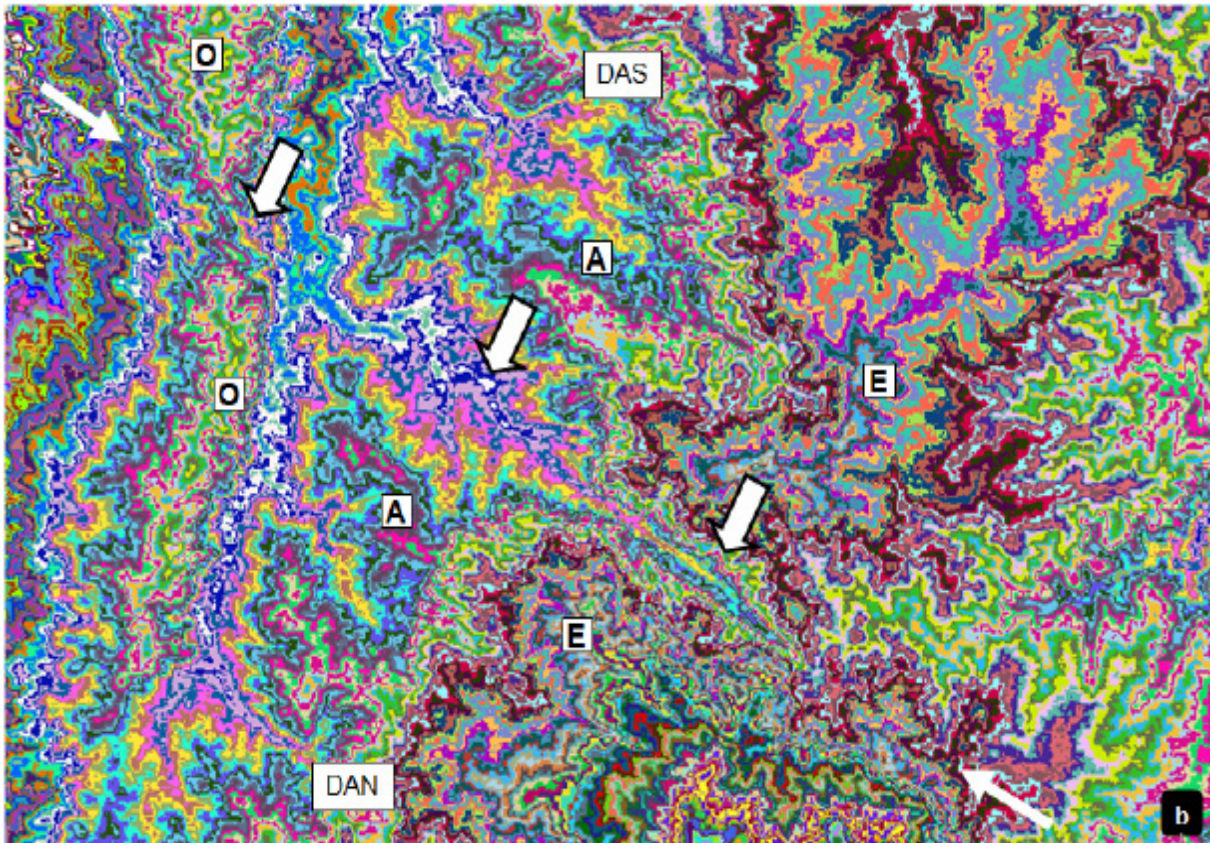
Figura 3. A) Red de drenaje del área estudiada. / Figure 3. A) Drainage network of the studied region.

justifica la consideración de los denominados Dominio Achala Norte y Dominio Achala Sur, a partir del Lineamiento Retamito. Se ha destacado la cota de los 1800 msnm, que define la unidad montañosa de los granitoides de Achala en su conjunto y las cotas máximas del DAS (2300 msnm) y del DAN (1900 msnm).

En la figura 5, se advierte la unicidad del DAN a partir de cuatro cuencas que lo abarcan, todas elongadas según dirección NNE y con sentido de escurrimiento hacia el norte. El esquema cambia a partir del Lineamiento Retamito hacia el sur, presentándose las cuencas elongadas hacia el este y el oeste y escurriendo hacia el noreste y el noroeste, respectivamen-

te. La disposición es acorde a una divisoria de aguas que pasa a ser claramente el eje central de la sierra de Los Gigantes.

La figura 6 a muestra rasgos determinados por la concentración de pendientes, resultando definidos los bloques 1, 2 y 3. La imagen fue lograda a partir de un filtrado Sobel sobre los datos MDT ASTER. El procesamiento produce la sensación de iluminación desde flancos según direcciones perpendiculares a las franjas donde se concentran las mayores pendientes. A diferencia de los filtrados direccionales clásicos, el recurso destaca todos los resaltos a la vez. Es interesante advertir que hay otros muchos rasgos cuya asociación a la topografía es clara



**Figura 3. B)** Detalle en la zona del Lineamiento Retamito (LR), (paleta color cuantitativa) que muestra sintéticamente la geomorfología por rangos de cotas, diferenciando una unidad central A de franjas laterales homogéneas, al Este y al Oeste. Se marca la traza del Lineamiento Retamito y se destaca la pertenencia geomorfológica del conjunto según un diseño simétrico desde el eje central de la sierra. Referencias: A, B y C unidades topográficas; 1, 2 y 3 Bloques montañosos; T techo; P piso. Se indican los bloques bajos con los peines; DAS dominio Achala Sur; DAN dominio Achala Norte; O: franja de borde occidental; E: franja de borde oriental. / **Figure 3. B)** Detail in the area of the Retamito Linearment (quantitative color palette) that shows the geomorphology by ranges of contour ranks, differentiating a central unit A of homogeneous lateral strips, to the East and the West. The trace of the Retamito Linearment is marked and the geomorphological belonging of the set is highlighted according to a symmetrical design from the central axis of the mountain range. References: A, B and C topographic units; 1, 2 and 3 mountain blocks; T roof; P wall. The low blocks are indicated by combs; DAS Achala South Domain; DAN Achala North Domain. O: occidental margin; E: oriental margin.

y que aporta el dato específico del gradiente de pendiente. La figura 6 b es una aproximación según el sector marcado en 6 a presentada en una paleta de colores diferente que posibilita despejar la escena de detalles y visualizar rasgos principales. Entre ellos se destacan los que permiten individualizar los bloques 1 y 2 (a partir del Lineamiento Retamito) y la unidad montañosa central de sus confinantes C y B.

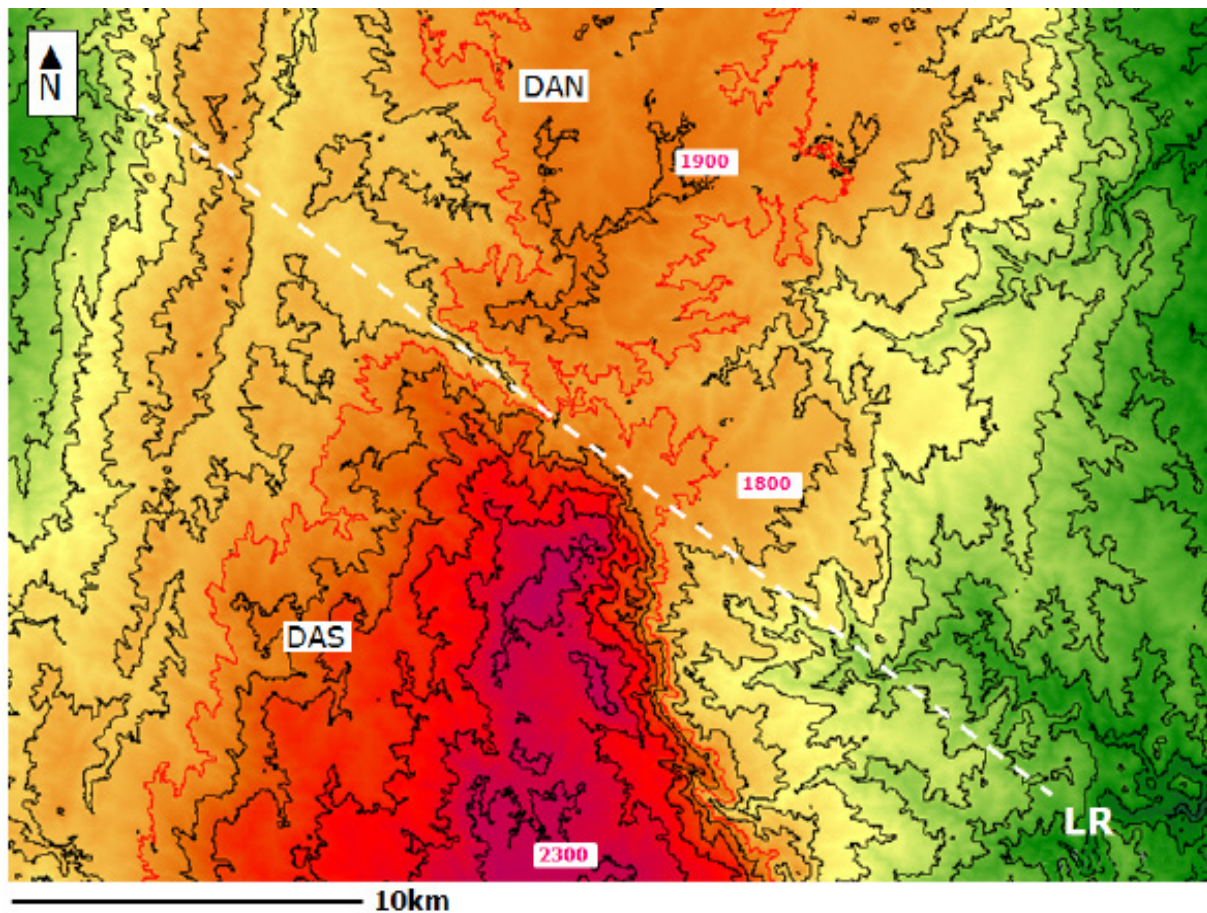
## Discusión y conclusiones

Se han podido vincular coherentemente argumentos sólidos provenientes de los análisis de antecedentes geológicos, cotejos de campo y aportes propios, mediante apreciaciones globa-

les efectuadas a partir de recursos y estrategias propios del procesamiento, manejo e interpretación de información de satélite.

Los resultados obtenidos confirman los estudios previos realizados y contribuyen a su sostenimiento. Además, generan nuevas preguntas e hipótesis que señalan próximas direcciones de estudio.

Los avances obtenidos abren interesantes perspectivas para emplear nuevas modalidades de procesamiento digital de información radar para obtener imágenes que permitan análisis objetivos de variables e indicadores espaciales de índole geomorfológicos. En sucesivas etapas y escalas cada vez más abarcativas, se pretende en el futuro inmediato abarcar íntegramente las



**Figura 4.** Topografía del entorno del Lineamiento Retamito en equidistancia 100 m. Se han destacado la cota de los 1800 msnm, que define el cuerpo montañoso en su conjunto, y las cotas extremas que muestran la diferencia de nivel de aproximadamente 400 m entre ambos bloques. Referencias: LR Lineamiento Retamito; DAN Dominio Achala Norte; DAS Dominio Achala Sur. / **Figure 4.** Topographic contour lines of the Retamito Lineament area with a 100 m equidistance. The height of the 1800 msl was marked, which defines the mountainous body as a whole, and the extreme contour-topographic lines showing the level difference of approximately 400 m between both blocks. References: LR Retamito Lineament; DAN Achala North Domain; DAS Achala South Domain.

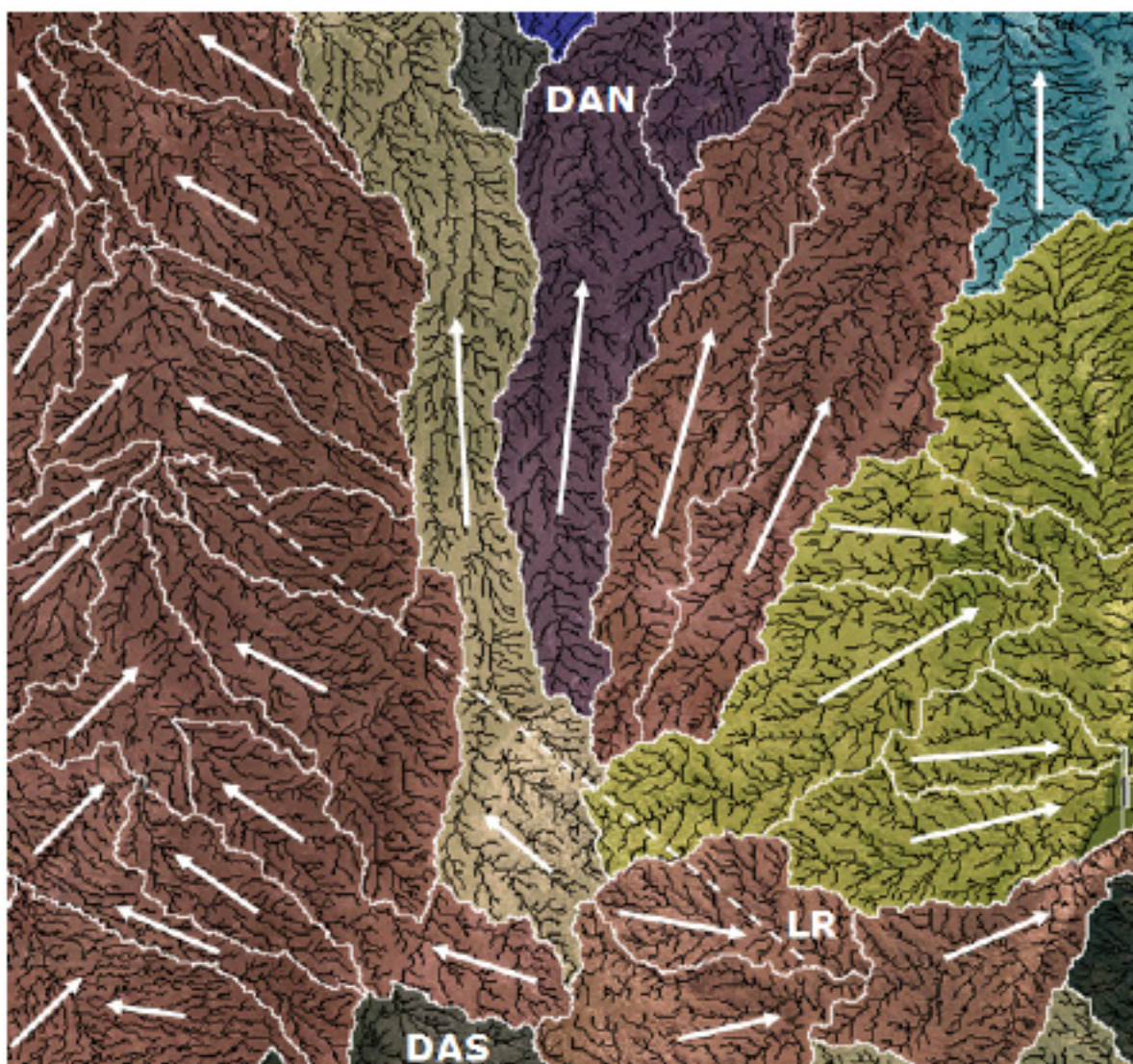
sierras de Córdoba en progresivas etapas de análisis.

Los tres cordones montañosos que conforman las Sierras de Córdoba están asociados a grandes fallas que los levantan, y al mismo tiempo están afectadas por estructuras frágiles oblicuas que segmentan el basamento cristalino en bloques. En la Sierra Grande, conformada en su mayor parte por el batolito de Achala (figura 1), encontramos varias de estas estructuras lineales oblicuas, de rumbo NO–SE y ONO–ESE, conocidas como lineamientos, las cuales segmentan al batolito, caracterizando la geomorfología y la hidrogeología de la zona.

Estos lineamientos, caracterizados por ser más o menos rectilíneos y atravesar indistintamente rocas de diferente litología, suelen

presentar un escarpe de varios metros. Sin embargo, para poder estudiar su implicación en la estructura y tectónica de las Sierras de Córdoba es necesaria la aplicación de metodologías de análisis satelital a escala regional, debido ante todo al área afectada por éstos. Es por ello que este trabajo ha permitido arrojar más luz sobre los lineamientos, que hasta hace poco tiempo no habían sido tenidos en cuenta en el estudio de la tectónica en el antepaís andino a estas latitudes.

El Lineamiento Retamito segmenta al batolito de Achala en dos bloques principales, llamados Dominio Achala Sur (de mayor altura) y Dominio Achala Norte (figura 2). El salto entre ambos ha sido estimado en 400 m aproximadamente (figura 4). Las cuencas de drenaje calculadas a partir de la



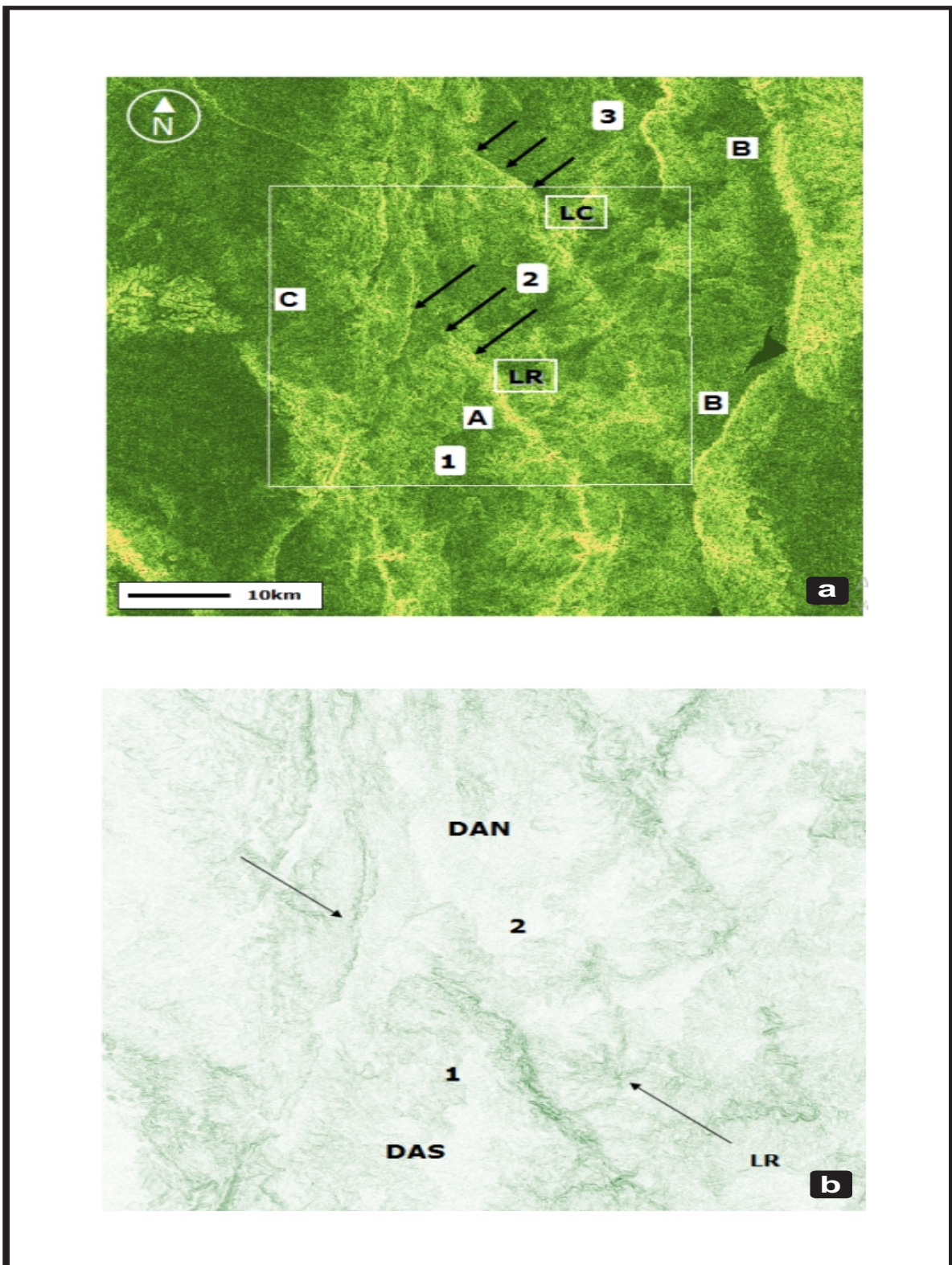
**Figura 5.** Drenaje superficial y cuencas de la comarca del Lineamiento Retamito. Se destacan la orientación de las cuencas y la dirección del escurrimiento en cada una de ellas. Referencias: LR Lineamiento Retamito; DAN dominio Achala Norte; DAS dominio Achala Sur. / **Figure 5.** Hydrological map showing the main drainage basins and the calculated hydrological network in the Retamito Lineament area. The orientation of the basins and the direction of the drainage in each one of them are marked. References: LR Retamito Lineament; DAN Achala North Domain; DAS Achala South Domain.

red hidrológica son de morfología elongada y gran longitud en el DAN, mientras que en el DAS tanto su área como el índice de elongación es mucho menor. Así mismo, la dirección de flujo de la red de drenaje es hacia el norte en el DAN y hacia el este en el DAS, indicando la dirección del basculamiento de los bloques. La forma y longitud de las cuencas hidrológicas, junto con la dirección de flujo de la red de drenaje dependen en gran medida de la tectónica a la que se encuentran sometidas, y dado que el cambio entre los distintos tipos de cuencas

se produce en el Lineamiento Retamito, su relación es indudable.

### Agradecimientos

Se agradece a las instituciones CONICET, FONCyT, SECyT-UNC y Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba por el apoyo a nuestras investigaciones a lo largo de todos estos años.



**Figura 6. A)** Concentración de pendientes a partir del filtrado Sobel sobre los datos MDT ASTER destacando rasgos asociados a la topografía y al gradiente de pendientes. / **Figure 6. A)** Slope concentration made it with sobel filtration in MDT ASTER data, marking the features associated with the topography and the slope gradient. / **Figura 6. B)** Detalle del sector marcado en la figura 6a en paleta de colores específica para eliminar detalles y visualizar rasgos principales. Se destacan los bloques 1 y 2, el Lineamiento Retamito y la unidad montañosa central. Referencias: LR Lineamiento Retamito; A, B y C unidades topográficas; 1, 2 y 3 bloques montañosos; DAN dominio Achala Norte; DAS dominio Achala Sur. / **Figure 6. B)** Rectangle area marked in figure 6a in specific color palette to eliminate details and showing the principal features. Blocks 1 and 2, the Retamito Lineament and central mountain range are marked also. References: LR Retamito Lineament; A, B and C topographic units; 1, 2 and 3 mountain blocks; DAN Achala North Domain; DAS Achala South Domain.

## Referencias

- Abril, E.G. 1989. Paleo eolian morphology and natural obstruction of surficial water dripping at the Argentine pampean plain through orbital standard scenes observation. Workshop on Remote Sensing Techniques with Applications to Agriculture, Water and Weather Resources. *Conference Handouts*. Trieste, Italia.
- Abril, E.G. y Baleani, O.A. 1989. Ensayo de procesamientos digitales de imágenes satelitales con la finalidad de realzar la red de drenaje en áreas espectralmente monótonas. *4<sup>o</sup> Simposio Latinoamericano de Sensores Remotos*. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Blasón, R. 1999. Yacimiento Schlagintweit, distrito minero uranífero Batolito de Achala, Córdoba. En: E.O. Zappettini (ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales*, SEGEMAR, Anales 35, Buenos Aires, pp. 613–20.
- Blasón, R., Bello, C., Álvarez, J. y Zarco, J. 2014. Recursos uraníferos. En: R.D. Martino y A.B. Guerreschi (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba*, Relatorio del 19<sup>o</sup> Congreso Geológico Argentino, Córdoba, pp. 1189–1205.
- Caro Montero, A., Martino, R. D. y Guerreschi, A. B. 2015. Estudio sismotectónico integrado de la falla Ciénaga del Coro, lineamiento Ojo de Agua y falla La Sierrita, Sierras de Córdoba. *16<sup>o</sup> Reunión de Tectónica*, (General Roca, Río Negro). Resúmenes: 186-187.
- CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina) 2016. <http://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/catalogo-de-imagenes.html>
- Cuerda, A. 1973. Sierras Pampeanas, una nueva interpretación de su estructura. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 38: 293-303.
- Eastman, R. 2016. IDRISI 17.00. Selva. Clark University. <http://www.clarklabs.org>
- García, D. 2006. *La escala y su importancia en el análisis espacial*. Ecosistemas, 15(3): 7-18.
- González Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 5(3): 81-110.
- Google (Google Earth Pro) 2016. <https://earth.google.com/web>
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil) 2016. <http://www.inpe.br>
- Jet Propulsion Laboratory 2014. <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Jet Propulsion Laboratory 2015. [https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial\\_map=satellite&spatial\\_type=rectangle](https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle)
- Kimmsa, J.F. y Abril, E.G. 1981. Método de análisis de geolocalizaciones en imágenes satelitales. *3<sup>o</sup> Simposio Nacional de Análisis de Información*. LANDSAT. (San Miguel) Ed. CNIE.
- Kimmsa, J.F. y Abril, E.G. 1982. Geolocalizaciones as a tool for zone differentiation in regional geological studies. The application of LANDSAT image analysis in Sierras de Córdoba, Argentina. *Poster Session 16<sup>o</sup> The International Symposium on Remote Sensing of Environment*. (Buenos Aires).
- Lira, R. y Sfragulla, J. 2014. *El magmatismo devónico-carbonífero: el batolito de Achala y plutones menores al norte del cerro Champaquí*. En: R.D. Martino y A.B. Guerreschi (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba*, Relatorio del 19<sup>o</sup> Congreso Geológico Argentino, Córdoba, pp. 293-347.
- Martino, R.D. 1988. Geología y Petrología del Basamento Metamórfico de la Región situada al Norte de Cuchilla Nevada. Sierra Grande de Córdoba. *Tesis Doctoral, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*, 174, 29 figuras y 10 mapas (inéedita).
- Martino, R. 1993. La Faja de Deformación ‘Guamanes’: Petrografía, Estructura Interna y Significado Tectónico, Sierra Grande de Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 48(1): 21-32.
- Martino, R. D. 2003. Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: una reseña general. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58: 549–71.
- Martino, R. D. y Guerreschi, A. B. 2014. *La estructura neoproterozoica–paleozoica inferior del complejo metamórfico de las Sierras de Córdoba*. En: R.D. Martino y A.B. Guerreschi (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba*, Relatorio del 19<sup>o</sup> Congreso Geológico Argentino, Córdoba, pp. 95–128.
- Martino, R. D., Guerreschi, A. B. y Carignano, C. C. 2012a. Influencia de la tectónica Preandina sobre la tectónica Andina: El caso de la falla de la Sierra Chica, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69: 207–221.
- Martino, R. D., Toledo, A. E. y Guerreschi, A. B. 2012b. Lineamientos transtensionales en el margen noroccidental del batolito de Achala y su relación con la exhumación de rocas de alto grado y la extensión cretácica en las Sierras de Córdoba. *15<sup>o</sup> Reunión de Tectónica (San Juan)*, Libro de Resúmenes, 90.
- Martino, R. D., Guerreschi, A. B. y Caro Montero, A. 2014. *La estructura cenozoica (paleógena–neógena) de las Sierras de Córdoba*. En: R.D. Martino y A.B. Guerreschi (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba*, Relatorio del 19<sup>o</sup> Congreso Geológico Argentino, Córdoba, pp. 649–71.
- Martino, R. D., Guerreschi, A. B. y Caro Montero, A. 2016a. Reactivation, inversion and basement

- faulting and thrusting in the Sierras Pampeanas of Córdoba (Argentina) during Andean flat-slab deformation. *Geological Magazine*, 153(5/6): 962-991, doi: 10.1017/S0016756816000339. Set.
- Martino, R. D., E. G. Abril, A. B. Guerreschi y A. Caro Montero. 2016b. *Control del Lineamiento Retamito en la estructura interna y morfología general del batolito de Achala, Sierras de Córdoba, Argentina*. 17° Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográficas. Editores: Sione, W.; Viva Mayer, F.M.; Antes, M.E. y Serafini, M.C – 1a ed. – Luján: EdUnLu, 2017. Libro digital, PDF. Primera Edición. ISBN: 978-987-3941-14-6.
- Nabel, P. E. y Becerra Serial, R. M. 2008. Uso de técnicas geomáticas para el mapeo y caracterización de unidades geomórficas de la Ciudad de Buenos Aires (Argentina) mediante interpretación visual de parámetros morfométricos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(2): 173-185.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P. y Verón, S. R. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87): 14-23.
- Pérez López, R., Muñoz Martín, A., Elorza Tenreiro, F. J., Paredes Bartolomé, C., y Muñoz, V. 2000. Dimensión fractal de la distribución espacial de fracturas en el área granítica de El Berrocal (Sistema Central): relación con el tensor de esfuerzos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13(3-4): 487-503.
- Roa, J. 2007. Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2): 183-219.
- Ruiz Rivera, N. y Galicia, L. 2016. La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Boletín del Instituto de Geografía*, 89: 37-153
- Stelzner, A. 1875. Comunicaciones sobre la geología y mineralogía de la República Argentina. *Actas Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 1: 1-12.
- Troncoso, M., Pinto, L., y Vargas, G. 2012. Geomorfología de un posible escarpe cuaternario en la Zona de Falla Pocuro al sureste de la ciudad de Los Andes, Región de Valparaíso. *13° Congreso Geológico Chileno*, 13: 308-310.

**Recibido:** 07 de Noviembre del 2016

**Aceptado:** 14 de Marzo del 2017