

ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LA HOYADA PUNA AUSTRAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

Emilce BUSTOS¹, José Marcelo ARNOSIO¹ y Gianluca NORINI²

¹GEONORTE -INENCO, UNSa, CONICET, Salta. E-mail: emilcebustos@gmail.com

²Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia.

RESUMEN

Las formas volcánicas resultan del balance de procesos constructivos y destructivos que afectan a los edificios volcánicos, por lo tanto el estudio de los rasgos volcánicos contribuye al entendimiento de la evolución del volcanismo de una zona. El Complejo Volcánico La Hoyada (Mioceno superior-Plioceno) se encuentra en el flanco oriental de la cordillera de San Buenaventura, en la provincia de Catamarca, Argentina. Esta contribución presenta una aplicación de modelos de elevación digital para el análisis morfológico del Complejo Volcánico La Hoyada, con el objetivo de identificar y evaluar las formas volcánicas de la región, para entender la evolución de este complejo volcánico antiguo con respecto a las manifestaciones volcánicas de la zona. El análisis morfológico se realizó usando los modelos de elevación digital ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) y SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), además de la evaluación de imágenes SPOT. Se realizaron distintos productos derivados de los modelos de elevación digital para llevar a cabo la identificación de morfologías areales. A través del análisis de los datos se identificaron 6 dominios morfológicos, cada uno representa un volcán individual de este Complejo. La actividad tectónica de la Puna Austral y el volcanismo moderno de la zona son los factores responsables de la destrucción de estos edificios volcánicos. Los rasgos volcánicos están mejor preservados hacia el norte del complejo, por lo tanto el grado de conservación podría indicar una migración de la evolución del volcanismo de sur a norte. Esta metodología constituye una herramienta fundamental para comprender la evolución volcánica de complejos volcánicos erodados de larga duración.

Palabras clave: *Andes Centrales, rasgos volcánicos, morfología volcánica, dominios morfológicos*

ABSTRACT

Using digital elevation models for morphological analysis of La Hoyada Volcanic Complex

Volcanoes' shapes result from constructional and destructional events; consequently, the study of volcanic features gives insight into the volcanic evolution. La Hoyada Volcanic Complex (Upper Miocene- Pliocene) is located in the eastern flank of San Buenaventura ridge, in Catamarca, Argentina. This study shows an application of digital elevation models for the volcanic area La Hoyada. The aim of this study is to examine the volcanic landforms because volcanic feature understanding of La Hoyada Volcanic Complex is an important tool for unravelling the evolution of this ancient and eroded volcanic complex. Morphological analysis of La Hoyada was performed using ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) and SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) Digital Elevation Models. The morphological evaluation was complemented by using high resolution images SPOT. Several products were derived from both Digital Elevation Models to identify areal morphologies. Through the evaluation of Digital Elevation Models derived data, as much as 6 morphological domains can be recognized each one representing a single volcano. Tectonic activity and modern volcanism in this area are responsible for the destruction of the volcanic edifices of La Hoyada. The partially conserved volcanic features are more distinguishable towards the north; hence, the grade of preservation could indicate that the evolution of this volcanic center was from south to north. This methodology provides a powerful tool for understanding the volcanic evolution of eroded long-lived volcanic complexes.

Keywords: *Central Andes, volcanic features, volcanic morphology, morphological domains*

INTRODUCCIÓN

Los rasgos volcánicos, en contraste con otros tipos de formas en la tierra, resultan de la interacción de fuerzas constructivas y destructivas, por lo tanto las formas

volcánicas deben ser estudiadas teniendo en cuenta estos procesos de crecimiento y erosión (Thouret 1999).

La evolución de grandes aparatos volcánicos incluye diferentes etapas de construcción, inactividad y destrucción, cam-

bios de estilo eruptivo y de composición del magma; y migración de centros eruptivos, que generan morfologías específicas. Por lo tanto, el estudio de la morfología volcánica constituye una herramienta muy importante, ya que los aparatos vol-

cánicos contienen información acerca del balance de factores como la edad, estado de crecimiento, composición, tasa eruptiva, posición del conducto y migración, grado de erosión, relación lava-tefra y deformación; y sobre factores subyacentes tales como el flujo magmático y el marco tectónico (Grosse *et al.* 2009).

Los modelos de elevación digital son utilizados en la rama de la geomorfología volcánica para caracterizar edificios volcánicos. Las aplicaciones derivadas de estos métodos (mapas de pendiente y aspecto, mapas de crestas, mapas de relieve sombreado, secciones transversales, etc.) son muy útiles para analizar los rasgos volcánicos

El análisis morfológico de áreas volcánicas presenta muy buenos resultados en zonas modernas, donde los procesos exógenos no han tenido tiempo para disectar y modificar la forma original del terreno (*e.g.* Favalli *et al.* 1999, Norini *et al.* 2004, Rodríguez *et al.* 2004, Fornaciai *et al.* 2010). Por otro lado, el análisis morfológico de edificios volcánicos a partir de los modelos de elevación digital, se utiliza para clasificarlos desde un enfoque cuantitativo (*e.g.* Bishop 2009, Grosse *et al.* 2012). En los terrenos volcánicos antiguos donde las formas volcánicas originales están enmascaradas por la erosión y tectónica pos-volcánica, los modelos de elevación digital sirven de herramienta para reconstruir la geomorfología paleovolcánica (*e.g.* Székely y Karátson 2004, Torrecillas *et al.* 2013, Rodríguez-González *et al.* 2010). Sin embargo, esta técnica como herramienta para la identificación de edificios volcánicos que componen un complejo volcánico de grandes dimensiones no ha sido aplicada.

En los Andes Centrales, en el ámbito de la Puna Austral, se han desarrollado durante el Mioceno inferior a superior diversos complejos volcánicos. Los estudios realizados en estos complejos están enfocados en las características geoquímicas y geocronológicas, con escasa o nula información sobre la morfología volcánica y su evolución (*e.g.* Aceñolaza *et al.* 1976, González 1983, Kraemer *et al.* 1999).

En esta contribución se presenta un aná-

lisis morfológico del Complejo Volcánico La Hoyada (Seggiaro *et al.* 2000), localizado en la porción sur de la Puna Austral, precisamente en el flanco oriental de la Cordillera de San Buenaventura, provincia de Catamarca, Argentina (Fig. 1).

El Complejo Volcánico La Hoyada es un centro volcánico andesítico de larga duración, Mioceno superior-Plioceno. En esta zona se realizaron estudios desde el punto de vista estratigráfico, estructural y geocronológico (Montero López 2009, Montero López *et al.* 2010a, 2010b), pero sin tener en cuenta a la morfología volcánica. En este trabajo se propone la reconstrucción de las superficies volcánicas del Complejo Volcánico La Hoyada para identificar los edificios volcánicos que conforman a esta zona degradada. Las técnicas presentadas en esta contribución apuntan a extraer la distribución de datos de altitud y datos espaciales de las formas volcánicas primarias. La reconstrucción de la historia evolutiva del Complejo Volcánico La Hoyada puede ser de gran utilidad debido a que el mismo se encuentra erosionado y fue afectado por la actividad volcánica posterior del Complejo Volcánico Cerro Blanco (73 Ka a ~5 Ka, Viramonte *et al.* 2008, Montero López 2009, Montero López *et al.* 2010c).

MARCO GEOLÓGICO

La Zona Volcánica Central (Deruelle 1982), ubicada entre los 14° y 28° de latitud sur, presenta una alta densidad de volcanes (*e.g.* de Silva y Francis 1991). En esta región se registró un aumento del volcanismo significativo durante el Cenozoico. En la porción sur de la Zona Volcánica Central, entre los 25° y 27° de latitud sur, se localiza la Puna Austral (Alonso *et al.* 1984). Esta zona está caracterizada por la presencia de volcanes e ignimbritas con edades comprendidas entre el Eoceno-Oligoceno hasta el Cuaternario. Esta región registra un pico de productividad en el volcanismo a los 8 Ma (Trumbull *et al.* 2006). Este volcanismo estuvo representado por edificios de composición intermedia a ácida para el Mioceno tardío y Plioceno temprano (*e.g.* Montero 2009).

Luego se desarrolló una actividad volcánica bimodal, con centros monogenéticos máficos (*e.g.* Kay *et al.* 1994, Risse *et al.* 2008) y calderas de composición ácida (Seggiaro *et al.* 2000, Arnosio *et al.* 2005) e ignimbritas riolíticas (*e.g.* Montero 2009, Montero *et al.* 2011).

Durante el Mioceno inferior a superior se desarrollaron diversos complejos volcánicos como el cerro Beltrán, cerro Tebenquicho, volcán Archibarca, volcán Antofalla, Tebén Grande, La Hoyada, construidos por flujos de lavas, complejos de domos y depósitos piroclásticos (*e.g.* Coira *et al.* 1993, Seggiaro *et al.* 2000, Montero *et al.* 2010a).

El Complejo Volcánico La Hoyada (Seggiaro *et al.* 2000), previamente denominado Formación La Hoyada (Turner 1963) se ubica en la provincia de Catamarca, dentro de la provincia geológica Puna, en su borde austral (Fig. 1). Está localizado en el flanco oriental de la cordillera de San Buenaventura, que marca la transición entre la Puna Austral y el basamento de las Sierras Pampeanas, sistema de Famatina y la Cordillera Frontal (*e.g.* Mon *et al.* 1988). Esta sierra presenta rumbo E-O y está compuesta por domos y complejos volcánicos de composición intermedia (Seggiaro *et al.* 2000) de edad comprendida entre el Mioceno superior y el Cuaternario.

El basamento del área está constituido por rocas pre-ordovícicas, ordovícicas y cenozoicas. Las rocas más antiguas se ubican al este del complejo y corresponden tanto a metamorfitas de grado metamórfico medio a alto (esquistos, gneises y migmatitas) como a rocas afectadas por bajo grado metamórfico (pizarras, filitas, esquistos) englobadas bajo la Formación Famabalasto (Turner 1973). Hacia el oeste, el basamento está representado por el Complejo Volcano-Sedimentario Cortaderas Chicas (Seggiaro *et al.* 2000) de edad ordovícica compuesto por unidades clásicas, volcánicas y volcanoclásticas, que se encuentran intruídas por rocas básicas y ultrabásicas (Complejo básico-ultrabásico Tramontana, Seggiaro *et al.* 2000). La relación entre estas dos unidades es tectónica (*e.g.* Mon y Hongn 1988); donde la secuencia ordovícica es cabalgada por

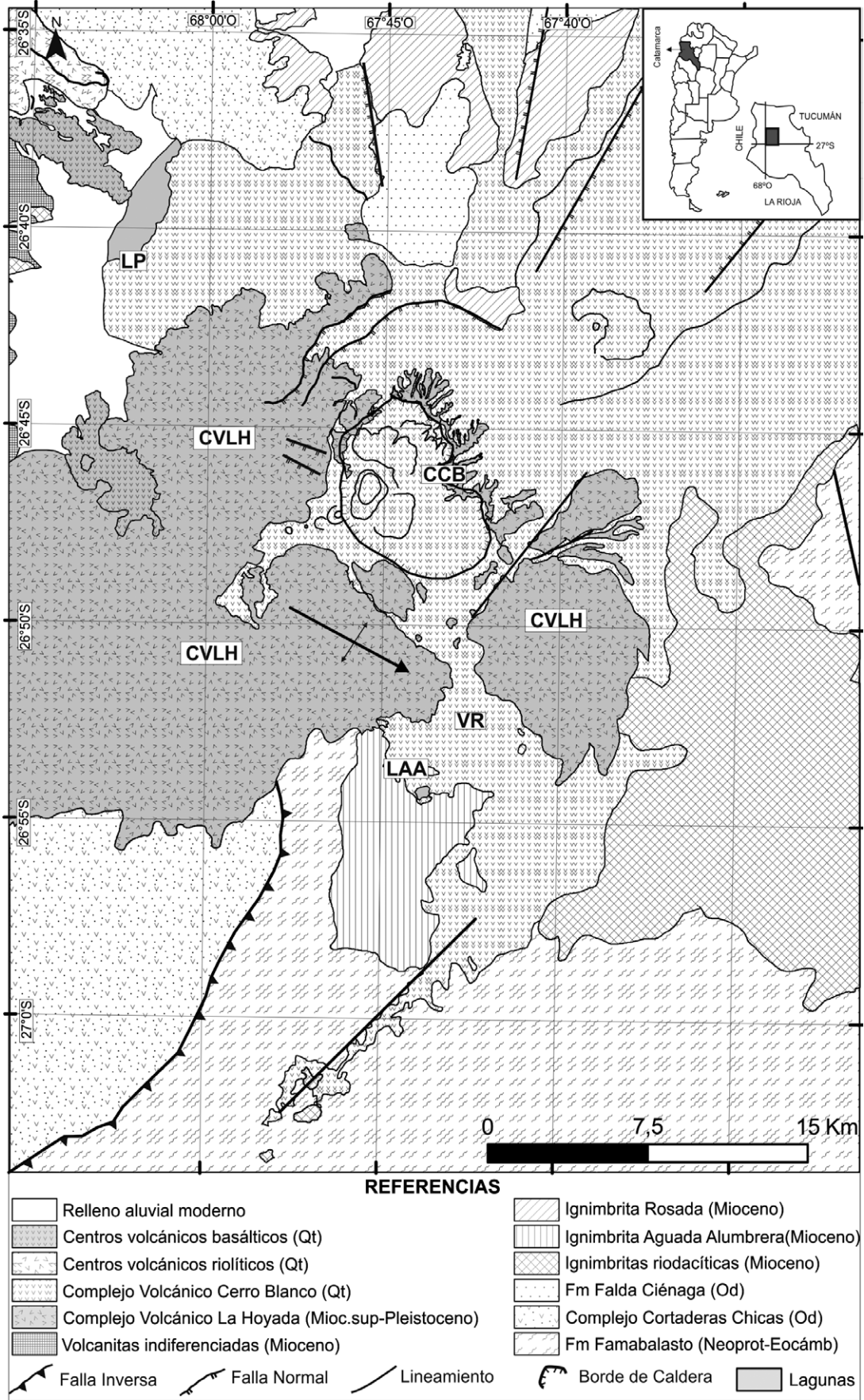


Figura 1: Localización del área en estudio y mapa geológico. CVLH: Complejo Volcánico La Hoyada; CCB: Caldera Cerro Blanco; LP: Laguna Purulla; LAA: Laguna Aguada Alumbra; VR: Valle Robledo.

las unidades más antiguas. La Formación Falda Ciénaga (Aceñolaza *et al.* 1976) aflora en el norte del área en estudio y corresponde a secuencias turbidíticas con fósiles del Ordovícico.

Las unidades cenozoicas que han sido reconocidas están mapeadas como ignimbritas riódacíticas, Ignimbrita Aguada Alumbreira (Montero López 2009) e Ignimbrita Rosada (Seggiaro *et al.* 2000). En el grupo de las ignimbritas riódacíticas se encuentran incluidas unidades formales como la Ignimbrita Las Papas (Rubio *et al.* 2001, *emend* Montero López 2009) e Ignimbrita Las Juntas (Montero López *et al.* 2011). Todas estas unidades corresponden a corrientes de densidad piroclásticas con composiciones dacíticas a riolíticas. Además hay otras unidades miocenas que no han sido identificadas con nombres formales y se encuentran mapeadas como volcanitas indiferenciadas. En el Pleistoceno se destaca la presencia de domos riolíticos y volcanismo basáltico que constituyen los extremos del volcanismo bimodal registrado en la zona (e.g. Kay *et al.* 1994, Seggiaro *et al.* 2000). El exponente más conspicuo de este volcanismo está representado por el Complejo Volcánico Cerro Blanco (Seggiaro *et al.* 2000), el cual fue interpretado como un sistema de calderas anidadas con abundantes depósitos piroclásticos y actividad dómica asociada (Seggiaro *et al.* 2000, Arnosio *et al.* 2005, Montero López *et al.* 2010c). Los productos son de composición riolítica/riódacítica de edad pleistocena media - holocena (Viramonte *et al.* 2008, Montero López 2009, Montero López *et al.* 2010c). Báez *et al.* (Báez *et al.* 2015) presentaron un nuevo esquema estratigráfico para el Complejo Volcánico Cerro Blanco, resumiendo de este modo la evolución en 3 épocas eruptivas principales que constituyen un periodo eruptivo.

Las contribuciones más completas sobre la geología del Complejo Volcánico La Hoyada realizadas hasta la actualidad corresponden a Montero López (2009), Montero López *et al.* (2010a) y Montero López *et al.* (2010b), quienes identificaron dos eventos volcánicos diferentes. El primero comprende, de base a techo, una

sucesión de unidades intercaladas de brechas volcánicas, depósitos piroclásticos, coladas y domos lávicos de composición andesítica-dacítica calcoalcalina (57-65 % SiO₂). La edad está comprendida entre los 7,04 ± 0,03 Ma y los 5,73 ± 0,02 Ma. Toda la secuencia está afectada por una deformación que generó el desarrollo de un plegamiento a gran escala, cuyo eje es subhorizontal con una dirección ESE-ONO. Por otra parte, la cinemática de fallas menores muestra la predominancia de un acortamiento E-O y/o subvertical y una extensión N-S a NNE-SSO. Coherente con esta cinemática de deformación, se generan fracturas extensionales subverticales de dirección E-O a ESE-ONO, a partir de la cual se emplazaron magmas de composición ligeramente alcalina (traquiandesítica), que constituyen los diques que cortan las rocas del primer ciclo volcánico y cuya edad es de 4,5 Ma. Sobre las unidades litoestratigráficas del primer evento se depositaron sedimentos fluviales, aunque están subordinados a los volcánicos. Este evento fue usado como nivel guía para delimitar los dos eventos volcánicos dentro de la historia del Complejo. Finalmente, el segundo evento comprende un registro similar al primero, formado por depósitos volcanoclásticos (ignimbritas y brechas) y lávicos intercalados, también de composición calcoalcalina, ligeramente más ácida que las rocas del primer ciclo eruptivo (68,5 % SiO₂). La edad oscila entre 4,5 Ma hasta 2,42 ± 0,02 Ma, esta última, la edad de las coladas que tapizan toda la secuencia del Complejo La Hoyada. La secuencia del segundo evento posee evidencias de menor deformación, ya que las unidades que lo forman están dispuestas de manera subhorizontal. El Complejo Volcánico La Hoyada constituye el basamento sobre el cual se emplazó el Complejo Volcánico Cerro Blanco (Seggiaro *et al.* 2000, *emend* Arnosio *et al.* 2005), manifestación del volcanismo más joven de la Puna Austral. A partir de relevamientos de campo, estudios geoquímicos y el análisis morfológico presentado en este trabajo, unidades mapeadas anteriormente como "lavas basálticas" y "lavas andesíticas y dacíticas" del Pleistoceno se redefinen e incluyen dentro

del Complejo Volcánico La Hoyada.

El borde sur de la Puna Austral registra dos fases de deformación desde el Neógeno (Allmendinger 1986, Allmendinger *et al.* 1989, Marrett *et al.* 1994, Marrett y Strecker 2000). La fase de deformación más antigua se desarrolló durante el Mioceno medio y Plioceno y estuvo caracterizada por un acortamiento horizontal NO-SE que generó corrimientos. Esta fase tectónica generó la morfología de *basin and range*, cuencas limitadas por sierras contraccionales, característica de la Puna (Allmendinger *et al.* 1997). El evento de deformación más joven generó una extensión subhorizontal N-S y un acortamiento E-O a ENE-OSO desde los 2 Ma (e.g. Allmendinger *et al.* 1989, Marrett *et al.* 1994), caracterizado por fallas de rumbo y normales. Estudios recientes realizados sobre la Ignimbrita Aguada Alumbreira y el Complejo Volcánico La Hoyada por Montero *et al.* (2010b), ubican el comienzo de la extensión a los 5Ma pudiéndose extender a los 7Ma. En las diferentes áreas donde se registró la extensión neógena, se postula que se mantiene activa hasta el presente.

METODOLOGÍA

Modelos de elevación digital

Los modelos de elevación digital constituyen un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno; por lo tanto el valor de altitud *z* de cada pixel se relaciona con los valores correspondientes de *x* e *y* expresados en un sistema de proyección geográfica.

Los modelos de elevación digital son muy utilizados para realizar análisis de la topografía y de las formas terrestres, además de modelar procesos de superficie (e.g. Millaresis y Argialas 2000, Bishop *et al.* 2001, Tucker *et al.* 2001).

Con el objetivo de realizar el análisis morfológico del Complejo Volcánico La Hoyada se utilizaron datos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*). Ambos modelos de elevación di-

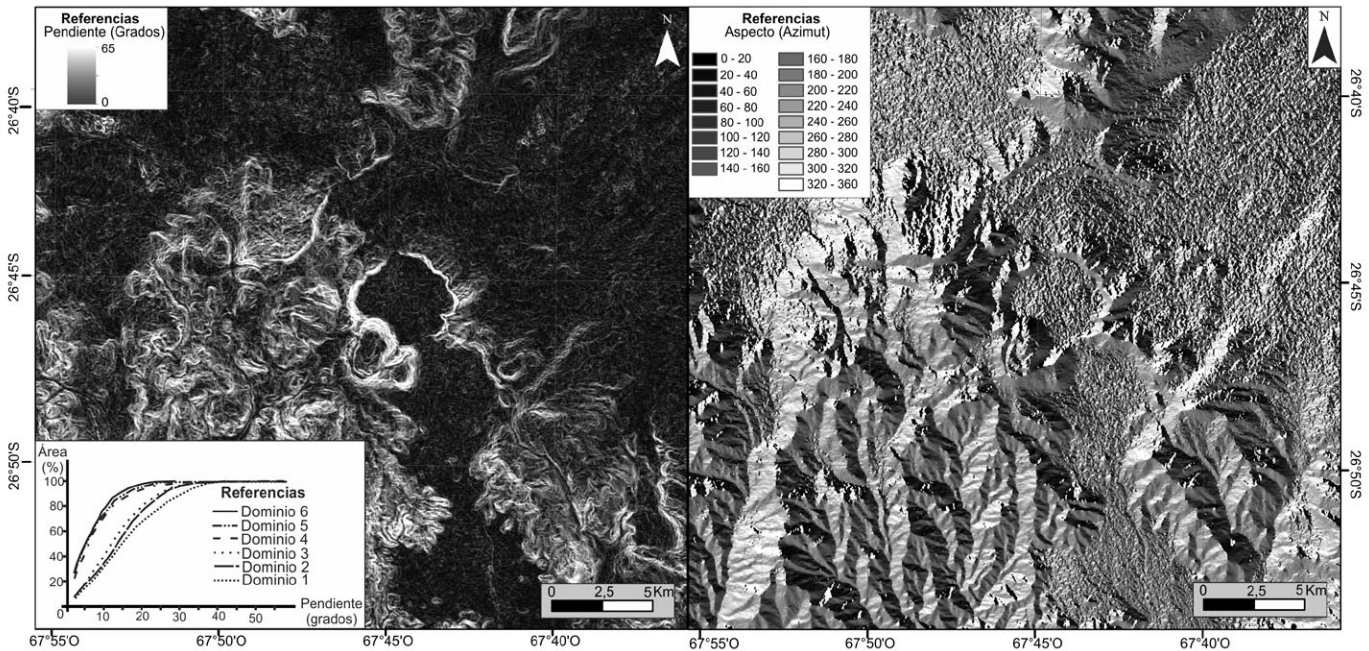


Figura 2: Mapa de pendiente (izquierda) y de aspecto (derecha). En el ángulo inferior izquierdo se presenta un gráfico con una curva de frecuencia acumulada de los valores de pendiente.

gital son gratuitos, de libre distribución y tienen cobertura global. Para la identificación de formas volcánicas de pequeñas dimensiones el estudio se complementó con imágenes SPOT extraídas del *Google Earth*.

Los modelos de elevación digital SRTM se realizaron por medio de una misión cumplida durante 11 días del mes de febrero de 2000. Los datos se tomaron a partir de un sistema de radar modificado que voló sobre el transbordador espacial *Endeavour*. Los modelos de elevación se generaron a partir de la técnica de interferometría de radar. Esta misión colectó datos topográficos de un 80 % de la superficie terrestre (entre 60° latitud norte y 56° de latitud sur) con un error en la vertical menor a 16 m (Rabus *et al.* 2003). La resolución espacial para los datos en la Argentina es de 90 m.

El subsistema visible del sensor ASTER contiene dos telescopios: uno con vista al nadir y otro con mirada hacia atrás. Combinando ambas vistas de estos telescopios se generan pares estereoscópicos en blanco y negro que producen modelos de elevación digital. ASTER GDEM es un mapa digital topográfico del 99 % de la superficie terrestre, con 30 m de resolu-

ción espacial. La primera versión de ASTER GDEM se lanzó en junio de 2009 y la segunda versión de 2011 incluye más pares estereográficos mejorando la cobertura y los defectos en las imágenes.

Procesamiento y análisis de modelos de elevación digital

El procesamiento y análisis de modelos de elevación digital es una herramienta importante para el reconocimiento morfológico de la superficie terrestre. En este trabajo se propone el desarrollo de distintas transformaciones aplicadas a los modelos de elevación digital para confeccionar mapas temáticos que destacan rasgos areales y lineales del terreno (Norini *et al.* 2004), además de la individualización de parámetros morfométricos. Los datos lineales permiten identificar rasgos estructurales y volcano-estructurales. Por otro lado, los datos areales permiten reconocer zonas morfológicamente homogéneas las cuales pueden vincularse directamente a edificios volcánicos diferentes, dominios estructurales y estadios evolutivos.

Imágenes de Relieve Sombreado: Se efectuaron a partir de los modelos de elevación digital con el objetivo de resaltar las estructuras geológicas por medio de la simula-

ción de la iluminación en la superficie del terreno desde una altura y dirección predeterminedada (Liu y Mason 2009). Se realizaron imágenes con relieve sombreado con una fuente de luz ubicada a 45° de altitud, cada 45° de azimut para los modelos de elevación digital utilizados.

Mapa de pendiente y aspecto: Se generó un mapa de pendiente y uno de aspecto para la zona en estudio utilizando los algoritmos embebidos en el *software* ArcGis 10 (Fig. 2). El cálculo del aspecto y de la pendiente se realiza teniendo en cuenta los valores de 8 pixeles vecinos. La pendiente está medida en grados con la convención de 0° para un plano horizontal. El aspecto se mide con la convención de 0° hacia el norte y un incremento en los grados en el sentido de las agujas del reloj. Estos mapas se clasificaron a partir del análisis de frecuencia de aspecto y valores de frecuencia acumulada de los valores de pendiente.

Mapa de crestas: En un paisaje volcánico erosionado como el que presenta el Complejo Volcánico La Hoyada, las crestas representan a las superficies menos erosionadas o más conservadas de un edificio volcánico. La identificación de estos rasgos permite reconocer las zonas más preservadas de los edificios volcánicos

(Székely y Karátson 2004). La individualización de las crestas en la zona del Complejo Volcánico La Hoyada se realizó a partir del *software* ArcGis 10. Las crestas de esta zona se identificaron mediante la confección de la red de drenaje a la inversa, calculando los rasgos más elevados de la zona en estudio.

Mapa de lineamientos: Los lineamientos se definen como elementos lineales, visible en la superficie de la tierra, que representan los fenómenos geológicos y/o geomorfológicos (Clark y Wilson 1994). Las imágenes de relieve sombreado derivadas del procesamiento de los modelos de elevación digital, las cuales resaltan los rasgos lineales, se unieron en un Sistema de Información Geográfica para realizar la identificación de los lineamientos presentes en la zona de estudio. En esta contribución se realizó la identificación automática de lineamientos, mediante el uso de programas informáticos y algoritmos. Es un método rápido y no está sujeto a la subjetividad humana. En este trabajo se utilizó el módulo LINE de *PCI Geomatics* en la versión gratuita demo (Hung *et al.* 2005). Este programa recoge los elementos lineales de una imagen y los registra en una capa vectorial. Los resultados fueron examinados y los lineamientos falsos identificados por el programa informático se eliminaron.

Identificación de rasgos volcánicos y perfiles topográficos: A partir de la examinación visual de las imágenes derivadas de los modelos de elevación digital y las imágenes de alta resolución SPOT (*Satellite Pour l' Observation de la Terre*) obtenidas del *Google Earth*, se identificaron los rasgos volcánicos preservados o parcialmente preservados de esta zona por observación directa. Las formas individualizadas se digitalizaron manualmente. A partir de los modelos de elevación digital, se generaron diversos perfiles topográficos que muestran las morfologías típicas en sección transversal de estas formas volcánicas.

RESULTADOS

El análisis morfológico del Complejo Volcánico La Hoyada, basado en modelos de

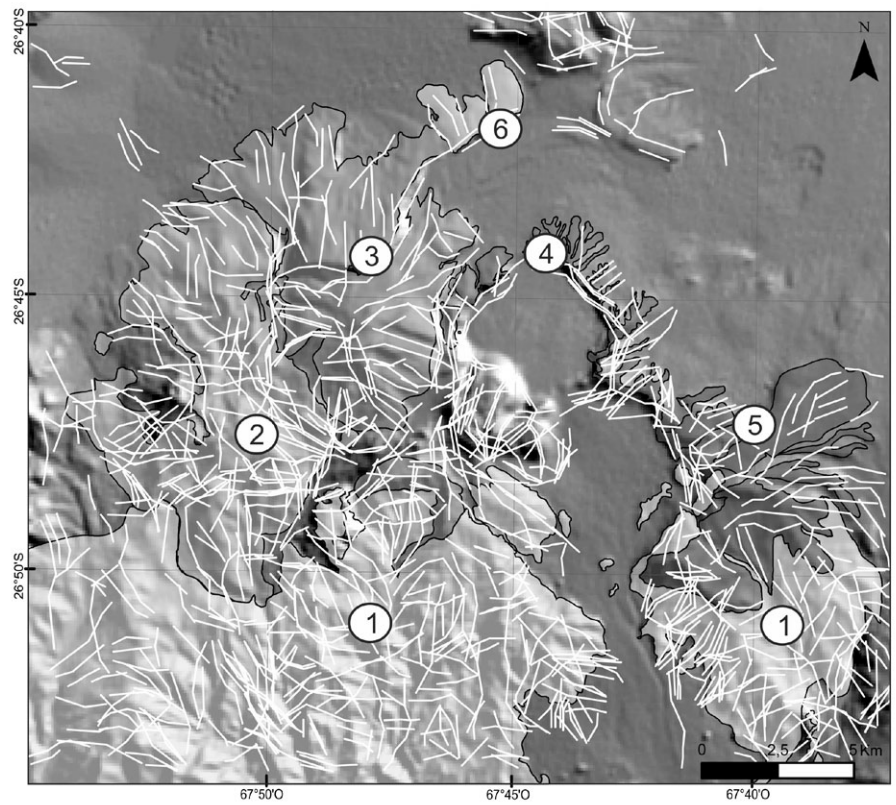


Figura 3: Dominios morfológicos (1-6) y lineamientos identificados para el Complejo Volcánico La Hoyada.

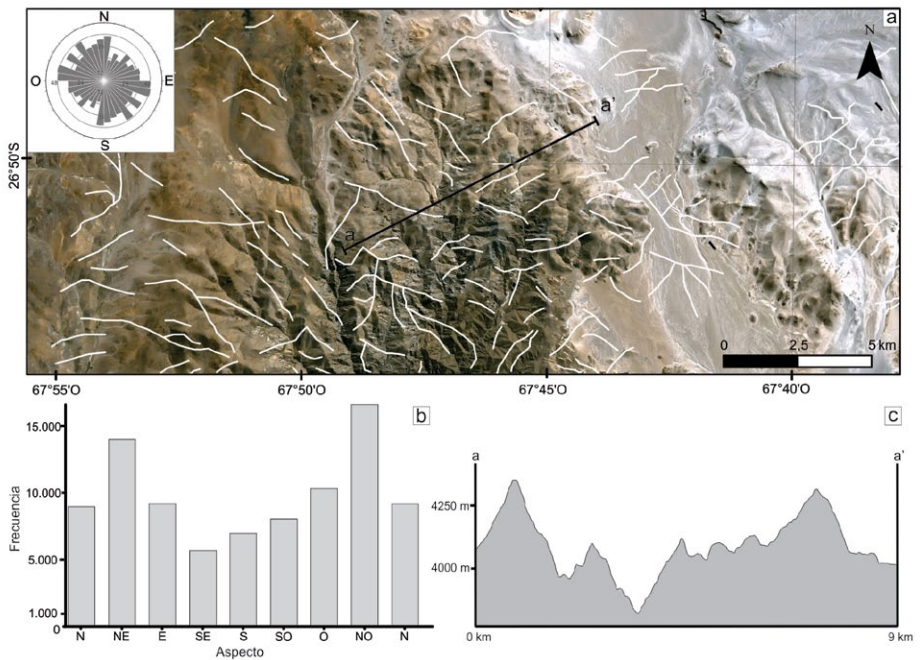


Figura 4: Dominio morfológico 1. a) Imagen Spot. Las líneas blancas representan las crestas del dominio 1. Se muestra la ubicación de la traza del perfil topográfico (a- a'). En el borde superior izquierdo, diagrama de rosa de los lineamientos; b) Frecuencia de valores de aspecto; c) Perfil topográfico SO-NE (a- a').

elevación digital e imágenes de alta resolución espacial SPOT, constituyó una herramienta efectiva para el reconocimien-

to de formas volcánicas en esta zona volcánica degradada. Los productos derivados de los modelos de elevación digi-

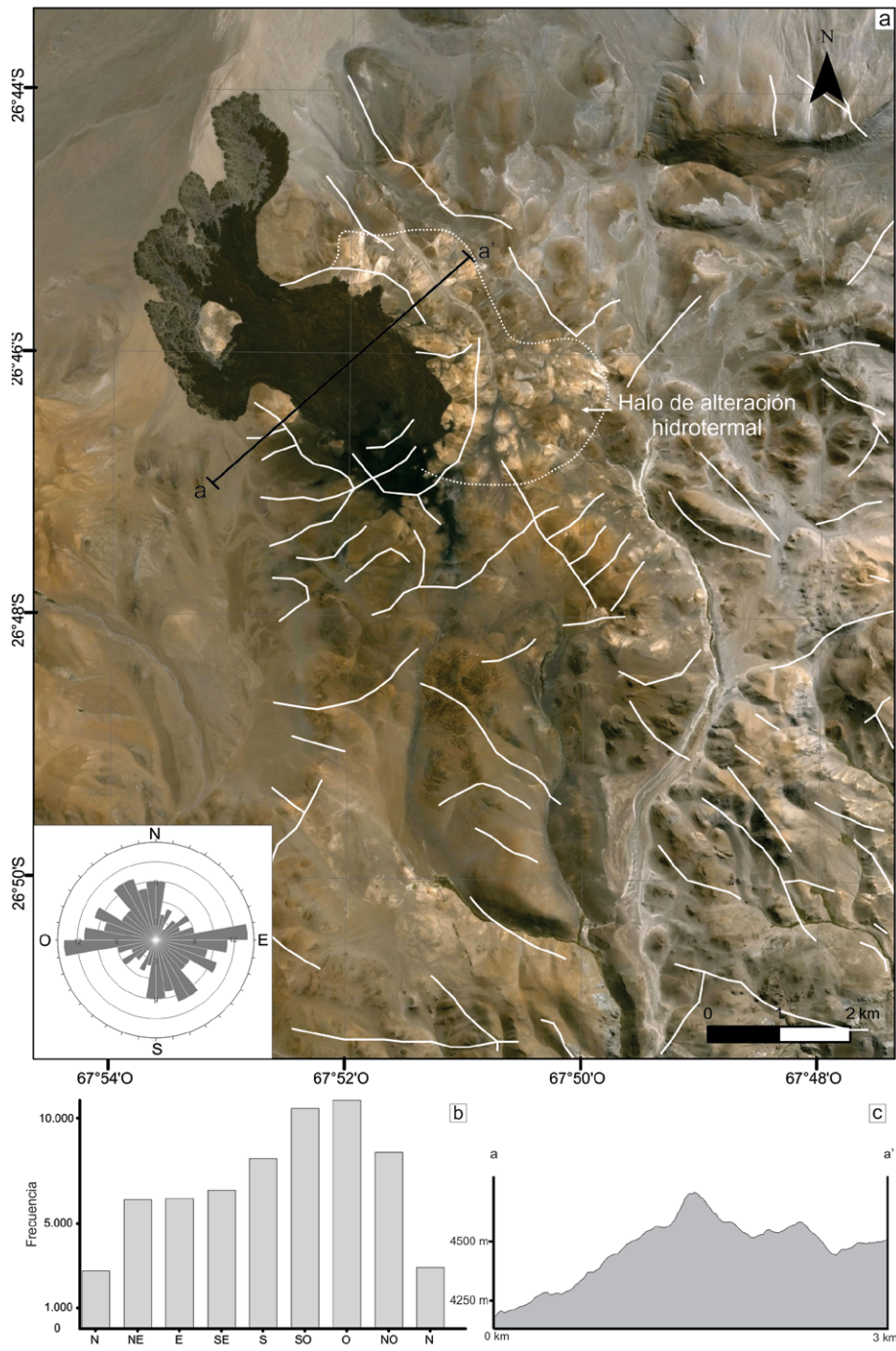


Figura 5: Dominio morfológico 2. a) Imagen Spot. Las líneas blancas representan las crestas del dominio 2. Se muestra la ubicación de la traza del perfil topográfico (a-a'). En el borde inferior izquierdo, diagrama de rosa de los lineamientos; b) Frecuencia de valores de aspecto; c) Perfil topográfico SO-NE (a-a').

tal como los mapas de pendiente, aspecto, imágenes de relieve sombreado ponen en evidencia las relaciones espaciales relevantes entre los elementos morfológicos que componen el área.

A partir del conjunto de datos obtenidos del análisis de los mapas de pendiente y aspecto, imágenes de relieve sombreado,

extracción de lineamientos, identificación de formas volcánicas, perfiles topográficos y patrones texturales se delimitaron seis dominios morfológicos dentro del Complejo Volcánico La Hoyada (Fig. 3). Cada dominio morfológico se caracteriza por una frecuencia de aspecto y valores de frecuencia acumulada de los va-

lores de pendiente (Fig. 2). Se logró la identificación de distintos tipos de flujos lávicos, formas dómicas, flancos de edificios volcánicos. Por otro lado, se individualizaron escarpas de gran magnitud que disectaron a los centros volcánicos identificados.

La primera gran distinción consistió en la separación morfológica de una zona al sur del Complejo Volcánico La Hoyada, donde no se distinguen rasgos volcánicos (dominio 1, Fig. 3) de otra con rasgos morfológicos volcánicos parcialmente conservados ubicada hacia el norte del área en estudio (dominios 2-6, Fig. 3).

A continuación se describirán en detalle los dominios morfológicos definidos junto con sus parámetros morfométricos que los caracterizan.

Dominio morfológico 1

El dominio morfológico 1 se ubica en la zona sur del área en estudio y ocupa una superficie aproximada de 260 km² (Fig. 3). Esta zona tiene valores altos de pendientes, ya que el 50 % del área presenta valores de gradiente superiores a los 15° (Fig. 2). Esta región se distingue de los otros dominios morfológicos definidos por la ausencia de detección de formas volcánicas conservadas mediante la técnica empleada en este trabajo. La inexistencia de rasgos volcánicos queda evidenciada en el mapa de crestas (Fig. 4a), donde se observa que éstas no forman patrones definidos. El diagrama de rosas muestra que la frecuencia en el azimut de los lineamientos para esta zona no registra ninguna tendencia (Fig. 4a). El gráfico de frecuencia de aspecto exhibe dos modas, la principal noroeste y la secundaria noreste (Fig. 4b). En el perfil topográfico SO-NE que cruza el dominio morfológico 1, se observan grandes incisiones correspondientes con valles fluviales (Fig. 4c).

Dominio morfológico 2

El dominio morfológico 2 se ubica en el oeste del área en estudio abarcando una superficie aproximada de 53 km² (Fig. 3). En esta zona se observa un halo de alteración hidrotermal y un volcán mono-

genético máfico (Fig. 5). Esta región se caracteriza por valores elevados de pendiente, donde el 50 % del área registra valores mayores a 12° (Fig. 2). En el mapa de identificación de crestas se observa un patrón radial débil en la zona del dominio morfológico 2 (Fig. 5a). La frecuencia principal de los lineamientos presentes en esta zona es E-O y secundariamente se observan lineamientos NO-SE y N-S (Fig. 5a). En el gráfico de frecuencia de aspecto se observa que las distintas clases tienen aproximadamente las mismas frecuencias; sin embargo se destacan valores más elevados en las clases oeste y suroeste (Fig. 5b). En la sección transversal con rumbo SO-NE se observa la forma volcánica cónica preservada (Fig. 5c).

Dominio morfológico 3

Este dominio se encuentra ubicado al oeste de la caldera Cerro Blanco (Fig. 3) y se extiende en un área aproximada de 75 km^2 . Presenta valores de pendiente relativamente elevados, 50 % del área ocupada por este dominio morfológico posee pendientes mayores a 12° (Fig. 2).

La Figura 6a muestra los resultados de la digitalización de las crestas de la zona y los rasgos volcánicos morfológicos que se individualizaron por medio de la inspección visual de imágenes satelitales de alta resolución. Se observa que este dominio es heterogéneo y está disectado por una escarpa curva de rumbo NE-SO. El diagrama de rosas de frecuencia de orientación de los lineamientos muestra que los azimuts preponderantes para esta región son NNO-SSE y ESE-ONO (Fig. 6a). La distribución de los valores de frecuencia de aspecto en este dominio muestra modas en las clases NE y NO (Fig. 6b). En la superficie inclinada ubicada en el noroeste se diferencian distintas formas volcánicas como coladas dómicas con perfil convexo característico y crestas de presión (Fig. 6c), flujos lávicos de morfologías fluidas con relieve suave y que finalizan abiertas como abanico, y lavas con desarrollo de albardones y crestas de presión. Por otro lado, en el centro de este dominio morfológico se observa una zona homogénea (núcleo) y hacia el norte se observan estructuras dó-

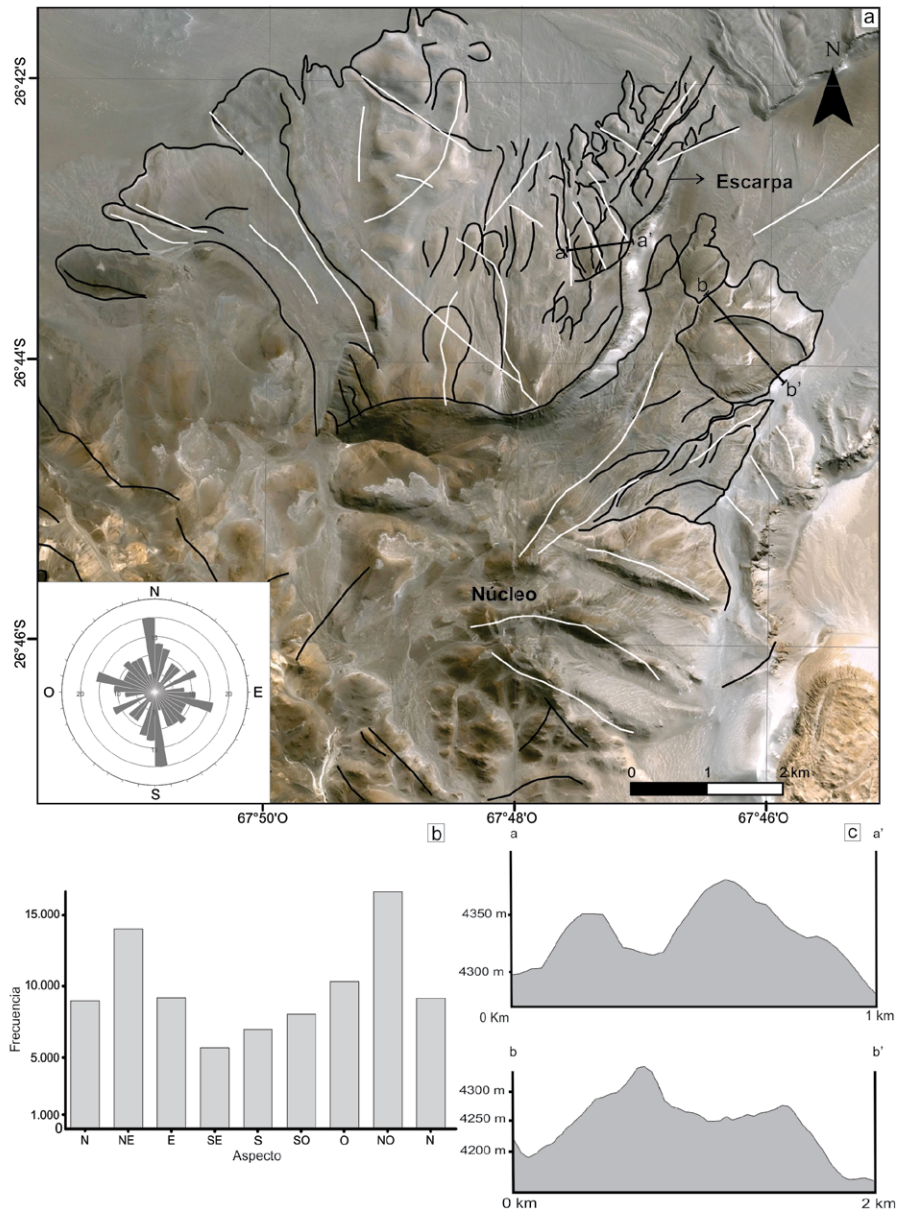


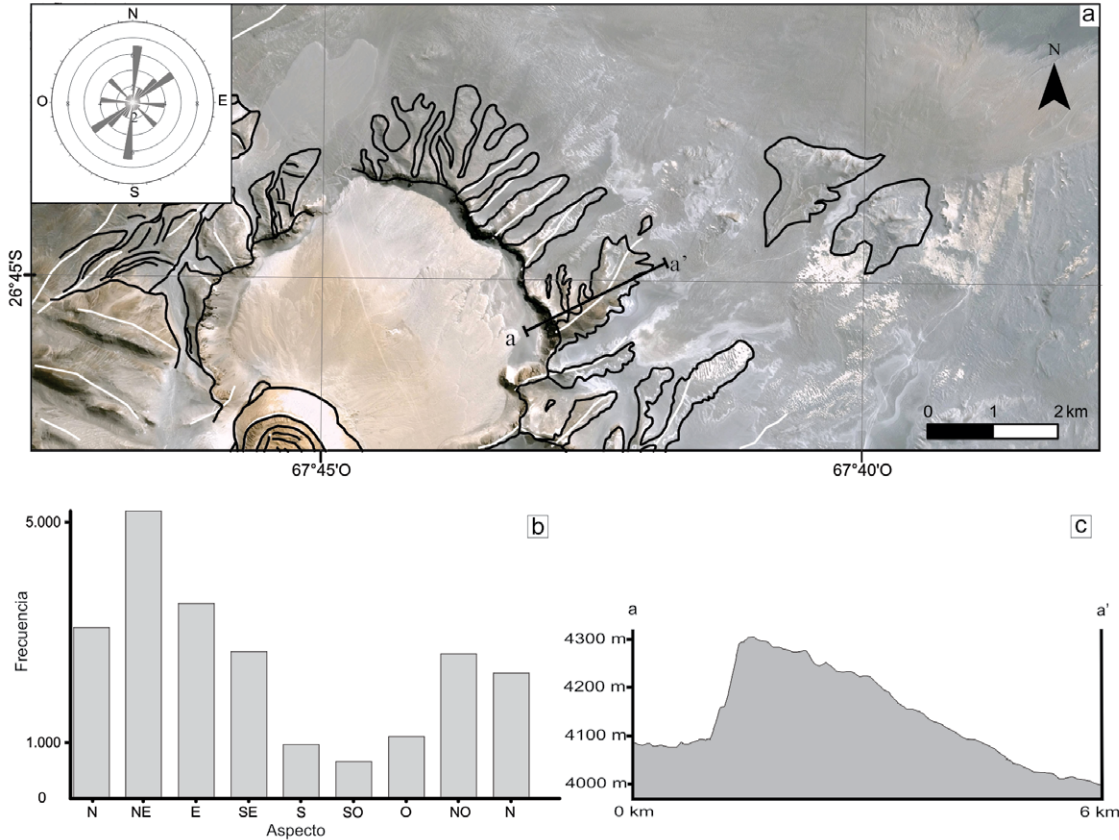
Figura 6: Dominio morfológico 3. a) Imagen Spot. Las líneas blancas representan las crestas del dominio 3 y las negras las formas volcánicas digitalizadas manualmente. Se muestra la ubicación de las trazas de los perfiles topográficos (a-a' y b-b'). En el borde inferior izquierdo, diagrama de rosa de los lineamientos; b) Frecuencia de valores de aspecto; c) Perfiles topográficos E-O (a-a') y NE-SO (b-b').

micas con un sector de colapso (Fig. 6c), además de flujos lávicos.

Dominio morfológico 4

El dominio morfológico 4 se encuentra rodeando a la caldera Cerro Blanco y abarca un área aproximada de 19 km^2 (Fig. 3). Esta zona es morfológicamente irregular y está segmentada por la instalación de la caldera Cerro Blanco. El 50 % del área ocupada por este dominio tiene pendientes inferiores a 10° (Fig. 2).

A partir de la delimitación de formas volcánicas en las imágenes SPOT se discriminaron morfologías lávicas con disposición radial (Fig. 7a). En el mapa generado a partir de la individualización de las crestas del área se observa un patrón radial de las mismas alrededor de la caldera Cerro Blanco (Fig. 7a). Los lineamientos muestran tendencias principales NS y NE-SO (Fig. 7a). Por otro lado, los valores de frecuencia más elevados de aspecto se registran en la clase NE (Fig. 7b). En la sec-



ción longitudinal de una de las lavas que componen este dominio, se observa que el perfil tiene una pendiente suave que es interrumpido por una pendiente abrupta de la escarpa de la escarpa como resultado de la formación de la caldera Cerro Blanco (Fig. 7c).

Dominio morfológico 5

El dominio morfológico 5 está ubicado inmediatamente al sureste de la caldera Cerro blanco comprendiendo un área de 29 km² (Fig. 3). La morfología de esta zona, al igual que en el dominio morfológico 4, está fragmentada debido a la construcción de la caldera Cerro Blanco.

Este dominio presenta valores bajos de pendientes, el 50 % del área tiene pendientes inferiores a los 5° (Fig. 2). En el mapa de crestas se observa la disposición radial de las mismas. Este patrón es consistente con la digitalización manual de los extremos de las coladas que se visualizan en las imágenes de alta resolución SPOT (Fig. 8a). Las orientaciones predominantes de los lineamientos en esta zona son NE-SO, ENE-OSO y NO-SE (Fig. 8a). Las

clases de aspecto con frecuencia más elevadas abarcan las clases desde el NO hasta el NE (Fig. 8b). En el perfil topográfico se observa un corte longitudinal de una lava que compone este dominio morfológico disectada por el cambio abrupto en la topografía por el emplazamiento de la caldera Cerro Blanco (Fig. 8c).

Dominio morfológico 6

El dominio morfológico 6 está ubicado en la zona norte del área en estudio y abarca un área aproximada de 5,4 km² (Fig. 3). Presenta valores relativamente bajos de pendiente; 50 % del área presenta valores por debajo de los 5° (Fig. 2).

En la imagen de alta resolución SPOT se identifica claramente la presencia de albardones y crestas de presión en los flujos lávicos (Fig. 9a). En la caracterización del patrón de crestas se observa un esquema paralelo de las mismas posicionado perpendicularmente a la escarpa que segmenta este dominio (Fig. 9a). El gráfico de frecuencia de lineamientos muestra una tendencia principal NNO-SSE (Fig. 9a). Los valores de frecuencia de aspecto

presenta dos modas principales: N-NE y O-NO (Fig. 9b). El perfil longitudinal de un flujo lávico es suave aunque está interrumpido por un cambio brusco de pendiente generado por la irrupción del relieve generado por la escarpa (Fig. 9c).

DISCUSIÓN

Dentro del ámbito de la Zona Volcánica Central, el Complejo Volcánico La Hoyada constituye un centro volcánico de larga duración carente de estudios morfológicos de detalle. En esta contribución, mediante un detallado estudio morfológico, en correlación con las observaciones de campo y los estudios geoquímicos se determinó que el Complejo Volcánico La Hoyada está comprendido por al menos seis dominios morfológicos que corresponden a centros volcánicos diferentes. Cada dominio morfológico, que corresponde a un edificio volcánico, se caracterizó a partir de mapas de pendiente y aspecto, patrones texturales, imágenes de relieve sombreado, extracción de lineamientos, identificación de formas volcá-

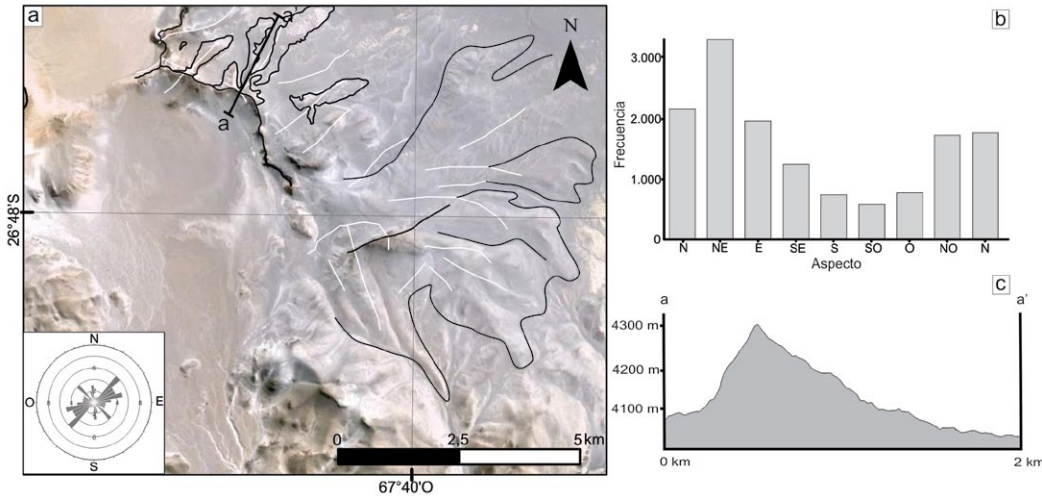


Figura 8: Dominio morfológico 5. a) Imagen Spot. Las líneas blancas representan las crestas del dominio 5 y las negras las formas volcánicas digitalizadas manualmente. Se muestra la ubicación de la trazas del perfil topográfico (a-a'). En el borde inferior izquierdo, diagrama de rosa de los lineamientos; b) Frecuencia de valores de aspecto; c) Perfil topográfico SSO-NNE (a-a').

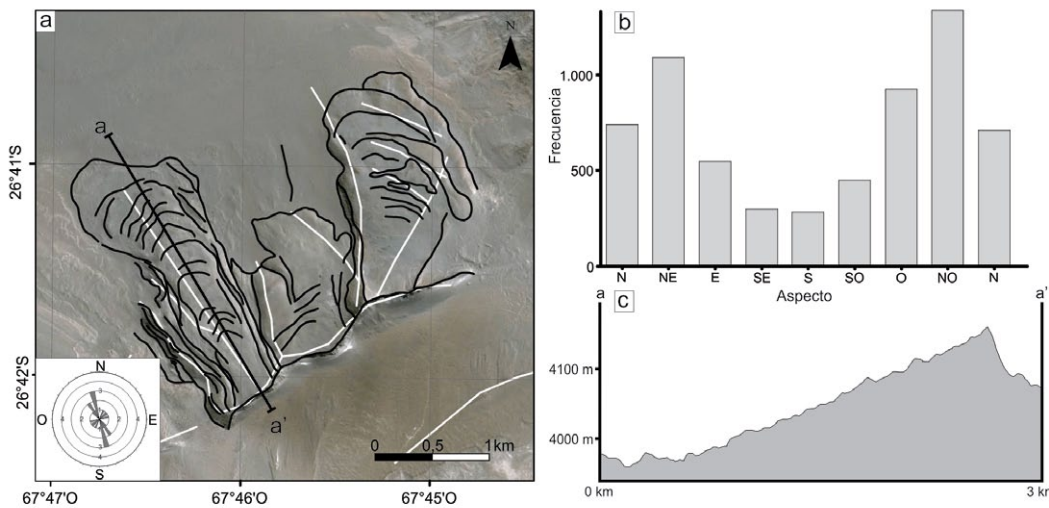


Figura 9: Dominio morfológico 6. a) Imagen Spot. Las líneas blancas representan las crestas del dominio 6 y las negras las formas volcánicas digitalizadas manualmente. Se muestra la ubicación de la trazas del perfil topográfico (a-a'). En el borde inferior izquierdo, diagrama de rosa de los lineamientos; b) Frecuencia de valores de aspecto; c) Perfil topográfico NE-SO (a-a').

nicas y perfiles topográficos.

La primera etapa del análisis morfológico consistió en la separación de dos zonas morfológicamente distintas (Fig. 3). La primera región discriminada, ubicada al sur de la zona en estudio (dominio 1), se caracteriza por la ausencia de rasgos volcánicos conservados distinguibles a partir de parámetros morfológicos. La segunda zona se ubica en el norte y se diferencia de la anterior porque presenta formas volcánicas parcialmente preservadas: coladas dómicas, coladas fluidas, coladas con albardones y domos. La zona del dominio morfológico 1 (Fig. 4) está profundamente incisa por escarpados valles fluviales como queda evidenciado en el perfil topográfico confeccionado para esta zona. Los valores de pendientes acumuladas calculadas son elevados co-

mo consecuencia de las altas inclinaciones de las laderas de las incisiones fluviales. La individualización de las crestas para esa área, no indica ningún patrón regular que sugiera la presencia de relictos de estructuras volcánicas. Por otro lado, en el diagrama de rosas de los lineamientos no queda marcada ninguna tendencia de azimut preponderante. Las dos modas representadas en el aspecto de la zona también se corresponden con los rasgos generados por la erosión fluvial de la zona. Un patrón radial de crestas débil caracteriza al dominio morfológico 2 (Fig. 5), consistente con una disposición radial típica de los edificios volcánicos. El perfil topográfico muestra una forma cónica parcialmente conservada en este dominio. Presenta valores de pendiente elevados que responden a la preservación de

la forma volcánica cónica original. Todas las clases de aspecto son aproximadamente regulares, lo cual también es consistente con una estructura cónica. Los lineamientos predominantes tienen una orientación E-O aunque otros importantes se registran NO-SE y N-S. En el dominio 2 se observa un halo de alteración hidrotermal y un volcán más joven monogenético sobre impuesto (Fig. 5) en esta zona, lo que indica un área con circulación de fluidos. El dominio morfológico 3 (Fig. 6) es muy heterogéneo, corresponde a un edificio volcánico disectado por la instalación una escarpa curva de rumbo NE-SO de cinemática normal. Como resultado de esta irrupción, el flanco NO de este edificio volcánico se encuentra conservado y el núcleo de la estructura volcánica re-

sulta expuesto en superficie. En la ladera volcánica se preservan diferentes morfologías de flujos lávicos como coladas con morfologías fluidas, lavas con albardones y crestas de presión además de coladas dómicas. En cambio, la zona del núcleo de esta estructura volcánica, ubicada hacia el este de la escarpa mencionada, se observa masiva. Asimismo, en esta zona quedan preservadas formas dómicas con sectores de colapso, además de lavas modernas relacionadas con la extensión que generó la escarpa. Las modas de aspecto para este dominio morfológico se registran en las clases del norte, lo cual se corresponde con la zona conservada de este aparato volcánico. Además, los valores de pendiente relativamente elevados de esta zona se corresponden también a la ladera conservada de este aparato volcánico. La tendencia de los lineamientos es NNO-SSE y ESE-ONO.

El dominio morfológico 4 (Fig. 7) es morfológicamente irregular, ya que se encuentra segmentado por el emplazamiento de la caldera Cerro Blanco. Por la estructuración de esta caldera se encuentran conservadas las zonas distales de esta estructura volcánica, registrándose solamente valores de pendiente bajos. En este dominio quedan preservadas las zonas distales de flujos lávicos dispuestos radialmente, coincidentes con la disposición de la caldera Cerro Blanco. Estos indicios apuntan a inferir que el edificio volcánico estaba ubicado virtualmente en la misma posición donde actualmente está la depresión de la caldera mencionada anteriormente. Los valores de frecuencia más elevados de aspecto se registran en la clase NE, ya que en esta zona se preservó mejor la disposición radial de las lavas. Los lineamientos muestran tendencia hacia NS, NE-SO, E-O, NO-SE.

Hacia el sur del dominio morfológico 4 se ubica el dominio 5. La morfología de esta zona, al igual que en el dominio morfológico anteriormente detallado, está segmentada debido a la construcción de la caldera Cerro Blanco (Fig. 8). La individualización de crestas identifica un patrón radial de las formas volcánicas con azimut discordante con las tendencias del

dominio 4. A diferencia del dominio de la caldera, se observa que las direcciones de los flujos lávicos conservados cambian de dirección, por lo que se puede afirmar que se trata de otro centro volcánico. Solo se conservan las zonas distales de los flujos lávicos que lo caracterizan; por esta razón las pendientes acumuladas son bajas en esta zona. Las clases de aspecto con frecuencia más elevadas son desde NO al NE, esto concuerda con la conservación de la mitad radial norte del aparato volcánico. Las tendencias de los lineamientos son NE-SO, ENE-OSO, NO-SE y N-S. El dominio morfológico 6 (Fig. 9) constituye un aparato volcánico fragmentado por una gran escarpa generada por la tectónica extensional de la zona. El área conservada de este edificio volcánico se constituye de lavas que preservan en su morfología albardones y crestas de presión características, que indican rasgos de dirección de flujo hacia el noroeste. Este dominio morfológico registra dos modas principales de aspecto, una norte-noroeste y otra oeste resultado de la posición de las lavas en este dominio. Por otro lado, los valores de pendiente en esta zona son bajos como consecuencia de que solo se preserva la zona distal de este centro volcánica. Los lineamientos muestran una tendencia NNO-SSE y NO-SE.

El grado de preservación de las distintas morfologías volcánicas que componen a los dominios morfológicos del Complejo Volcánico La Hoyada, constituye indicios de una evolución de este sistema volcánico de sur a norte.

El Complejo Volcánico La Hoyada presenta datos geocronológicos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ realizados por Montero López (2009) y Montero López *et al.* (2010a, b) entre ca. 7 Ma - ca. 2,5 Ma. El área correspondiente al dominio morfológico 1, presenta las edades más antiguas (ca. 7 Ma - 5 Ma). La zona norte del área en estudio (dominios 2-6) podría corresponder a una superposición de al menos 5 estratovolcanes anidados e interdigitados. Éstos podrían haber funcionado simultáneamente y ser, todos o parte de ellos, más jóvenes que 5 Ma.

El volcanismo moderno de esta zona de la Puna Austral, representado por el de-

sarrollo del Complejo Volcánico Cerro Blanco y la tectónica extensional de la región perturbaron la geomorfología y preservación de los geoformas volcánicas a los distintos edificios que componen al Complejo Volcánico La Hoyada.

CONCLUSIONES

En esta contribución se presenta la importancia del análisis morfológico de detalle para el reconocimiento e individualización de estructuras volcánicas parcialmente conservadas y la reconstrucción de complejos volcánicos disturbados en correlación con trabajos de campo y datos geoquímicos.

El uso de modelos de elevación y sus análisis permite la definición de la ocurrencia y distribución espacial de los rasgos volcánicos.

El análisis morfológico desarrollado para el Complejo Volcánico La Hoyada permite inferir al menos 6 edificios volcánicos individuales involucrados en la construcción de este extenso complejo volcánico. En el dominio morfológico 1 no fue posible la identificación de rasgos volcánicos, por lo que sería la zona más antigua de este complejo. Hacia el norte, mediante la metodología aplicada, se identificaron formas volcánicas como domos y flujos lávicos con distintas morfologías. El aumento en el grado de preservación de los rasgos volcánicos permite inferir una migración de la actividad volcánica del Complejo Volcánico La Hoyada de sur a norte. La metodología propuesta en esta contribución, complementado con estratigrafía de detalle, geoquímica y geocronología constituye una herramienta poderosa para el estudio de complejos volcánicos de larga duración.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los geólogos Walter Báez, Agustina Chiodi, Francisco López, Gabriela Fuentes y Nestor Suzaño, además de a los estudiantes Ruben Filipovich, Blanca Alfaro y Ana Lucía Santillán, por el apoyo durante los trabajos de campo y las enriquecedoras discusiones. Estas ta-

reas fueron financiadas gracias al Proyecto N°1987/1 "Estratigrafía volcánica, evolución magmática e historia eruptiva del Complejo Volcánico La Hoyada, Puna Austral, provincia de Catamarca" otorgado por el CIUNSA. El Proyecto AO SAOCOM N°40 concedido por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales proveyó los fondos necesarios para comprar la licencia del software ArcGis 10. Emilce Bustos agradece al CONICET la otorgación de becas para realizar los estudios de doctorado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, F.G., Toselli, A.J. y González, O. 1976. Geología de la región comprendida entre el salar del Hombre Muerto y Antofagasta de la Sierra, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31: 127-136.
- Allmendinger, R. 1986. Tectonic development, southeastern border of the Puna plateau, northwestern Argentine Andes. *Geological Society of America Bulletin* 97: 1070-1082.
- Allmendinger, R., Strecker, M., Eremchuk, E. y Francis, P. 1989. Neotectonic deformation of the southern Puna Plateau, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 2: 111-130.
- Allmendinger, R.W., Jordan, T.E., Kay, S.M. eI-sacks, B.L. 1997. The evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Annual Review Earth Planetary Sciences* 25: 139-174.
- Alonso, R., Viramonte, J.G. y Gutiérrez, R. 1984. Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 43-63, Bariloche.
- Arnosio, M., Becchio, R., Viramonte, J.G., Gropelli, G., Norini G. y Corazzato, C. 2005. Geología del Complejo Volcánico Cerro Blanco (26° 45' LS- 67° 45' LO), Puna Austral. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 851-858, La Plata.
- Báez W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortiz-Yañes, A., Viramonte, J.G., Bustos, E., Giordano, Guido, López, J.F., 2015, Estratigrafía y evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 32, núm. 1, p. 29-49
- Bishop, M.P., Bonk, R., Kamp, U. y Shroder, J.F. 2001. Topographic analysis and modeling for alpine glacier mapping. *Polar Geography* 25: 182-201.
- Bishop, M.A. 2009. A generic classification for the morphological and spatial complexity of volcanic (and other) landforms. *Geomorphology* 111: 104-109.
- Clark, C.D. y Wilson, C. 1994. Spatial analysis of lineaments. *Computers & Geosciences* 20: 1237-1258.
- Coira, B., Kay S. y Viramonte, J.G. 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna- a model for changing subduction geometry. *International Geology Review* 8: 677-720.
- de Silva, S.L. y P.W. Francis. 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag, 213 p., New York.
- Deruelle, B. 1982. Petrology of the plio-quaternary volcanism of the South-Central and Meridional Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 14: 77-124.
- Favalli, M., Innocenti, F., Pareschi, M.T., Pasquare, G., Mazzarini, F., Branca, S., Cavarra, L. y Tibaldi, A. 1999. The DEM of Mt. Etna: geomorphological and structural implications. *Geodin* 12: 279-290.
- Fornaciai, A., Bisson, M., Landi, P., Mazzarini, F. y Pareschi, M.T. 2010. A LiDAR survey of Stromboli volcano (Italy): Digital elevation model-based geomorphology and intensity analysis. *International Journal of Remote Sensing* 31: 3177-3194.
- González, O. 1983. Geología, alteración hidrotermal y edad del cerro Tebenquicho, Departamento Antofagasta de la Sierra, Catamarca. Informe interno, 10 p. Servicio Nacional Geológico Minero. Secretaría de Minería.
- Grosse, P., van Wyk de Vries B., Petrinovic I.A., Euillades P.A. y Alvarado G.E. 2009. Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology* 37: 651-654.
- Grosse, P., van Wyk de Vries B., Euillades P.A., Kervyn M. y Petrinovic I. 2012. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology* 136: 114-131.
- Hung, L.Q., Batelaan, O. y De Smedt, F. 2005. Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology*. En Ehlers M, Michel U (eds), *Proceedings of SPIE*, vol 5983
- Kay, S., Coira, B. y Viramonte, J.G. 1994. Young mafic back arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research* 99: 323-339.
- Kraemer, B., Adelman, D., Alten, M., Schnurr, W., Erpenstein, K., Kiefer, E., van den Bogaard, P. y Görler, K. 1999. Incorporation of the Paleogene foreland into the Neogene Puna Plateau, the Salar de Antofalla area, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 157-182.
- Liu, J.G. y Mason P.J. 2009. *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. John Wiley & Sons Ltd. Imperial College London, UK.
- Marrett, R., Allmendinger, R., Alonso, R. y Drake, R. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7: 179-207.
- Marrett, R. y Strecker, M.R. 2000. Response of intracontinental deformation in the Central Andes to late Cenozoic reorganization of South American Plate motions. *Tectonics* 19: 452-467.
- Millaresis, G.C. y Argialas, D.P. 2000. Extraction and delineation of alluvial fans from digital elevation models and Landsat Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1093-1101.
- Mon, R., Mena, R., Marrett, R. y Hongn, F. 1988. Rasgos de Neotectónica en la Puna Austral (República Argentina). 5° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 69-83. Santiago de Chile.
- Mon, R. y Hongn, F. 1988. El corrimiento del borde occidental del Cratógeno Central en la Puna. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 43: 338-342.
- Montero Lopez, M.C. 2009. Estructura y magmatismo neógeno-cuaternario en la Sierra de San Buenaventura (Catamarca): su vinculación con la terminación austral de la Puna. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 271 p., Salta.
- Montero López, M.C., Hongn F., Seggiaro R., Brod J.A. y Marrett R. 2010a. Estratigrafía y geoquímica del volcanismo de composición intermedia (Mioceno Superior-Plioceno) en el extremo oriental de la cordillera de San

- Buenaventura (Puna Austral). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67: 112-129.
- Montero López, M.C., Hongn, F.D., Strecker, M.R., Marrett, R., Seggiaro, R. y Sudo, M. 2010b. Late Miocene-early Pliocene onset of N-S extension along the southern margin of the central Andean Puna Plateau. Evidence from magmatic, geochronological and structural observations. *Tectonophysics* 494: 48-63.
- Montero López, M.C., Hongn, F., Brod, J.A., Seggiaro, R., Marrett R. y Sudo, M. 2010c. Magmatismo ácido del Mioceno Superior-Cuaternario en el área de Cerro Blanco-La Hoyada, Puna Sur. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67: 329-348.
- Montero, C., Guzmán, S. y Hongn, F. 2011. Ignimbritas de la quebrada del río Las Papas (Cordillera de San Buenaventura, Catamarca): una primera aproximación petrológica y geoquímica: *Acta Geológica Lilloana*, 23: 78-93.
- Norini, G., Groppelli, G., Capra, L. y De Beni, E. 2004. Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): New insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano. *Geomorphology* 62: 47-62.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. y Bamler, R. 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57: 241-262.
- Risse, A., Trumbull, R.B., Coira, B., Kay, S. y van den Bogaard, P. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of mafic volcanism in the back-arc region of the southern Puna plateau, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 26: 1-15.
- Rodriguez, O., Obando, M., Castillo, L. y Cepeda, H. 2004. Pyroclastic flow modeling to reconstruct a volcanic edifice in Paipa (Boyaca - Colombia). *Earth Science Research Journal* 8: 56-62.
- Rodriguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J.L., Pérez-Torrado, F.J., Gimeno, D. y Aulinas, M. 2010. Geomorphological reconstruction and morphometric modelling applied to past volcanism. *International Journal of Earth Sciences* 99: 645-660.
- Rubiolo, D., Seggiaro, R. y Hongn, F. 2001. Mapa de la Hoja Geológica 2769-IV Fiambalá, provincias de Catamarca y La Rioja. *Boletín* 361, Programa Nacional de Cartas Geológicas. 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Seggiaro, R., Hongn, F., Folguera, A. y Clavero, J. 2000. Hoja Geológica 2769 - II. Paso de San Francisco. *Boletín* 294, Programa Nacional de Cartas Geológicas. 1:250.000. SEGEMAR. Buenos Aires.
- Székel, B. y Karatson, D. 2004. DEM-based morphometry as a tool for reconstructing primary volcanic landforms: examples from the Börzsöny Mountains, Hungary. *Geomorphology* 63: 25-37.
- Thouret, J.C. 1999. Volcanic geomorphology—an overview. *Earth-Science Reviews* 47: 95-131.
- Torrecillas, C., Berrocoso, M., Felpeto, A., Torrecillas, M.D. y Garcia, A. 2013. Reconstructing palaeo-volcanic geometries using a Geodynamic Regression Model (GRM): Application to Deception Island volcano (South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology* 182: 79-88.
- Trumbull, R., Riller, U., Oncken, O., Scheuber, E., Munier, K. y Hongn, F. 2006. The time-space distribution of Cenozoic volcanism in the South-Central Andes: a new data compilation and some tectonic implication. En: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H., Ramos, V., Strecker, M. y Wigger, P. (Eds.), *The Andes - Active Subduction Orogeny*: 29-43, Springer.
- Tucker, G.E., Catani, F., Rinaldo, A. y Bras, R.L. 2001. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology* 36: 187-202.
- Turner, J.C. 1963. Informe geológico correspondiente a la “Mina La Hoyada”, Dpto. Tinogasta, Provincia de Catamarca. Servicio Nacional Minero Geológico (inédito), 24p., Buenos Aires.
- Turner, J.C.M. 1973. Descripción geológica de la Hoja 11d, Laguna Blanca. Servicio Nacional Minero Geológico, *Boletín* 142, 72p., Buenos Aires.
- Viramonte, J.G., Arnosio, M., Becchio, R., De Silva, S.L. y Roberge J. 2008. Cerro Blanco Volcanic Complex, Argentina: A Late Pleistocene to Holocene rhyolitic arc-related caldera complex in the Central Andes. IAVCEI General Assembly 2008, Reykjavik, Islandia.

Recibido: 3 de febrero, 2014

Aceptado: 30 de enero, 2015