

# Morfometría de edificios volcánicos del Cenozoico Superior entre los 25° y 26° S, Chile

Victor Villa\*, José Antonio Naranjo

Servicio Nacional de Geología y Minería, Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago.

\*Mail: [victor.villa@sernageomin.cl](mailto:victor.villa@sernageomin.cl)

**Resumen.** La excelente preservación de los volcanes mioholocenos en los Andes Centrales de Chile, entre los 25° y 26° S, favorece el estudio de la evolución del arco volcánico cenozoico superior en esta parte de los Andes. En términos morfométricos, destaca la abundancia de volcanes compuestos de hasta 31 km<sup>3</sup> en el Mioceno Medio, el predominio de volcanes menores (<150 m de alto) en los alrededores de la Caldera elusiva Aguilar, y la concentración del volcanismo en cordones volcánicos desde el Plioceno Superior. Estas diferencias de tamaño pueden estar asociadas a la perennidad de estructuras geológicas utilizadas para el transporte y almacenamiento de los magmas en la zona.

**Palabras Clave:** Morfometría de volcanes, Andes Centrales, Volcanismo Cenozoico Superior

## 1. Introducción

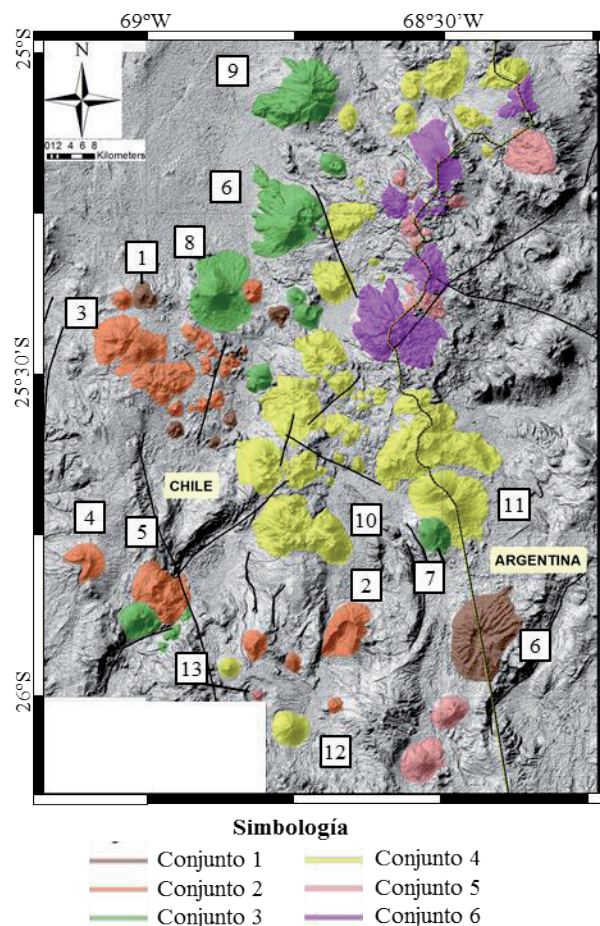
La extrema aridez imperante desde el Mioceno en los Andes Centrales de Chile, entre los 25° y 26° S, ha permitido la preservación de estructuras volcánicas de hasta 25 Ma. De esta manera, el área de estudio constituye un excelente lugar para estudiar la evolución del volcanismo cenozoico superior en esta parte de los Andes.

En el área, Naranjo *et al.* (2013a, b) proponen 15 unidades de volcanes, sobre la base de antecedentes geocronológicos y morfológicos obtenidos durante el levantamiento de las cartas geológicas Áreas Salar de Agua Amarga y Portezuelo del León Muerto y Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño. Estas unidades corresponden a conjuntos de volcanes (Mioceno Inferior a Plioceno Inferior), y volcanes individuales (Plioceno Superior al Holoceno), las que incluyen principalmente volcanes compuestos y complejos volcánicos. Previamente, Naranjo y Cornejo (1992) presentaron 6 unidades de volcanes a escala 1:250.000. En el presente trabajo, sobre la base de mediciones estandarizadas, se caracteriza morfométricamente los volcanes de las unidades previamente definidas y se discuten las posibles causas de las diferencias de tamaño identificadas.

## 2. Características morfométricas de unidades de volcanes de la zona

A partir de imágenes satelitales y modelos de elevación digital (DEM) ASTER GDEM, se determinaron parámetros morfométricos de 129 edificios volcánicos (44

complejos volcánicos, 53 conos compuestos y 30 conos simples, Fig. 1) entre los 25° y 26° S. El borde de cada edificio se determinó al evaluar los lugares con cambios de pendiente coincidentes con la cartografía geológica disponible. Con este borde, se determinó una base topográfica para cada edificio. En cada volcán, los valores de altura del edificio (H), volumen (V), diámetro promedio (diámetro de una esfera con igual área que la base del edificio, Wb) y razón de aspecto (H/Wb), fueron determinados con el programa *Global Mapper v. 11.0*. Una metodología similar es presentada por Grosse *et al.* (2009, 2012).



**Figura 1.** Principales volcanes estudiados. 1) Vn. Gemelos, 2) Vn. Puntiaquedo de la Isla, 3) Vn. Chaco, 4) Vn. Bolsón, 5) Vn. Encanche, 6) Vn. León Muerto, 7) Vn. Parinas, 8) Vn. del Azufre, 9) Vn. de la Pena, 10) Complejo Volcánico de la Isla, 11) Complejo Volcánico Sierra de Aguas Blancas, 12) Vn. Salar Grande. 13) Vn. Chato Aislado.

Debido a la escala de trabajo, en el presente estudio se ha decidido utilizar los conjuntos de volcanes definidos por Naranjo y Cornejo (1992), con edades radiométricas y observaciones realizadas por Naranjo *et al.* (2013a, b).

### **Conjunto 1: Volcanes del Mioceno Inferior (24 a 17 Ma)**

Se consideraron 7 volcanes pertenecientes a esta unidad (5 volcanes compuestos, 1 cono simple y 1 complejo volcánico), distribuidos entre los 24 y 17 Ma (Naranjo *et al.*, 2013a, b). La altura absoluta de estos centros volcánicos varía entre 159 y 621 m, con un promedio de 383 m. El volumen de los centros volcánicos de este lapso se encuentra en el rango 0,18 a 1,23 km<sup>3</sup>, con excepción del cerro León Muerto, cuyo volumen actual alcanza los 19 km<sup>3</sup>. Salvo en el caso del volcán Dos Hermanos, ubicado en la parte occidental de la zona de estudio, la razón de aspecto de estos edificios varía entre 0,05 y 0,12.

### **Conjunto 2: Volcanes del Mioceno Inferior – Medio (17 a 15 Ma)**

De esta unidad, se consideraron 25 volcanes (2 complejos volcánicos, 16 volcanes compuestos, y 7 conos simples). Forman clústeres de volcanes en la parte centro occidental del área (Fig. 1), donde la altura absoluta de los centros eruptivos raramente supera los 200 metros, con un volumen siempre inferior a los 0,3 km<sup>3</sup>. Además, se reconocen grandes estratovolcanes moderadamente erosionados, principalmente en la parte sur del área de estudio. La altura absoluta de estos edificios varía entre 58 y 861 m sobre su base, con un promedio de 307 m. Solo 2 centros volcánicos de este conjunto se observan con una altura absoluta superior a 750 m (Vn. Puntigudo de la isla, 750 m; Vn. Chaco, 849 m), ambos volcanes compuestos, colapsados en una o más oportunidades (Naranjo y Cornejo, 1989; Villa, 2013). El resto de los edificios volcánicos no supera una altura de 550 m sobre su base, con el 50% de los centros eruptivos bajo los 200 m de altura.

El volumen de los volcanes varía principalmente entre 0,1 y 3,77 km<sup>3</sup>, aunque 4 edificios presentan un volumen mayor a 7 km<sup>3</sup>, destacando por su tamaño los volcanes Chaco (15 km<sup>3</sup>) y Encanche (10 km<sup>3</sup>), ambos ubicados en la parte occidental del área. Los otros dos volcanes con un volumen superior a 7 km<sup>3</sup> presentan colapsos importantes hacia el oeste (Vn. Bolsón, 7 km<sup>3</sup>) y hacia el sur (Vn. Puntigudo de la Isla, 9 km<sup>3</sup>). La razón de aspecto varía entre 0,04 y 0,14, con un promedio de 0,08. La baja razón de aspecto en algunos casos puede deberse a efectos de la erosión, como en el caso del clúster de volcanes ubicados en el Cordón de Cerros Bayos, al sur del cerro del Azufre. Estos volcanes presentan alturas en general inferiores a 150 m, abarcando en total un área de 26 km<sup>2</sup>.

### **Conjunto 3: Volcanes del Mioceno Medio – Superior (15 a 10 Ma)**

En total se consideraron 15 volcanes pertenecientes a este conjunto (3 complejos volcánicos, 8 volcanes compuestos y 4 conos simples). Los volcanes de esta unidad se reconocen principalmente en la parte noroccidental de la zona de estudio, donde conforman el frente occidental del arco volcánico cenozoico (Fig. 1). En la parte sur, el Volcán Parinas (5.368 m s.n.m.) es el volcán más oriental de este conjunto y constituye una de las mayores alturas absolutas de la zona (890 m sobre su base). Los volcanes más altos entre los 25° y 26° S corresponden al volcán Quebrado (5.179 m s.n.m.), volcán Azufre (5.490 m s.n.m.) y de la Pena (5.241 m s.n.m.), con 1.274, 1.266 y 1.165 m sobre su base, respectivamente. El Volcán de la Pena presenta varios colapsos que generan, entre otras, la extensa avalancha hacia el oeste observada en la parte norte del área estudiada (Villa, 2013).

Los volcanes de esta unidad tienen una distribución de alturas absolutas dispersa entre 83 y 1.274 m, con una altura promedio de 558,65 m que corresponde por más de 150 m al mayor promedio de alturas absolutas en la zona. Su razón de aspecto es en promedio de 0,12, levemente superior al promedio de las otras unidades, y alcanza 0,18 como máximo. Los edificios de este conjunto se encuentran poco erosionados, principalmente afectados por colapsos de origen volcánico y con quebradas poco incisivas que afectan los flancos de algunos volcanes. El volumen de los edificios varía principalmente entre 0,1 y 7 km<sup>3</sup>, con la excepción de los tres volcanes más altos (de la Pena, Azufre y Quebrado) cuyos volúmenes superan los 18 km<sup>3</sup> (hasta 31 km<sup>3</sup> en el caso del volcán de la Pena).

### **Conjunto 4: Volcanes del Mioceno Superior – Plioceno Inferior (10 a 3,5 Ma)**

Es la unidad de volcanes con mayor extensión superficial en la zona (1.021 km<sup>2</sup>). Se concentra principalmente en la parte central del área y se extiende bajo la cadena volcánica actual hasta la parte nororiental. En total, se consideraron 52 centros volcánicos en este conjunto de volcanes (12 conos simples, 17 volcanes compuestos y 23 complejos volcánicos). Los volcanes de esta unidad poseen alturas entre 36 y 1.203 m sobre su base, aunque la mayoría (75%) no supera los 424 m, motivo del bajo promedio de altura absoluta observado (330 m). Tres de los volcanes de este conjunto poseen alturas característicamente superiores al resto, sobre los 954 m (Volcán Salar Grande, 1.149 m, y complejos volcánicos Sierra de Aguas Blancas y de la Isla, con 1.203 y 989 m, respectivamente). La mayoría de los edificios (94%) exhibe una razón de aspecto entre 0,04 y 0,16 con un promedio de 0,09. El volumen de los edificios y macizos de esta unidad en general no supera los 3 km<sup>3</sup> (78% de los

edificios se encuentran bajo esa medida), valor desde el cual se distribuyen aleatoriamente hasta alcanzar  $28 \text{ km}^3$ .

### Conjunto 5: Volcanes del Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior (3,5 a 1 Ma)

Se consideró la totalidad de los edificios volcánicos en este intervalo (15), de los cuales solo dos se encuentran en la parte sur del área (volcán Chato Aislado y Complejo Volcánico Gemelos o Dos Puntas). En esta unidad se reconocen 6 complejos volcánicos, 5 volcanes compuestos, 3 conos simples y un domo, además de productos provenientes de fuentes ubicadas bajo la cadena volcánica actual (Conjunto 6). La altura de estos volcanes varía entre 60 y 1.034 m sobre su base, con un promedio de 331 m, concentrados mayoritariamente (87%) bajo los 424 m. Su razón de aspecto se encuentra en el rango 0,04-0,17, con un promedio de 0,11, y su volumen es por lo general mayor a 0,1 e inferior a  $8 \text{ km}^3$ .

### Conjunto 6: Volcanes del Pleistoceno – Holoceno (<1 Ma)

Estos volcanes constituyen el arco volcánico actual, por lo que es el que mejor conserva sus estructuras originales. Incluye 3 conos simples, 3 volcanes compuestos y 9 complejos volcánicos. Se encuentra exclusivamente formando una franja en la zona noreste del mapa, sobre los Volcanes del Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior. La altura de los cuerpos volcánicos que forman esta unidad varía entre 60 y 687 m sobre su base, con un promedio de 267 m. Se observa que existen dos gap de altura absoluta, entre 172 y 367 m y entre 483 y 686 m. Seis cuerpos volcánicos poseen más de  $1 \text{ km}^3$  de volumen, la mayoría ubicados bajo el rango de  $0,1 \text{ km}^3$ . Las razones de aspecto de estos volcanes se encuentran entre 0,04 y 0,15, con un promedio de 0,09, concentrados principalmente entre 0,06 y 0,1.

## 3. Discusión

La principal diferencia morfométrica observada entre los 6 conjuntos de volcanes tiene relación con la altura absoluta, volumen y distribución de los edificios. En particular, destaca la mayor altura y volumen alcanzado por los volcanes del Conjunto 3, en especial aquellos que forman el frente volcánico (volcanes de la Pena, Chaco, del Azufre, Quebrado, Fig. 1). Los volcanes del Conjunto Volcánico 4 se distribuyen en dos poblaciones de tamaño: una población mayoritaria con alturas absolutas inferiores a 420 m y volúmenes menores a  $2 \text{ km}^3$ , y una población de volcanes de más de 500 m que suele formar cordones de volcanes mayores, a diferencia de las etapas anteriores que se caracterizan por poseer volcanes compuestos relativamente aislados o formando parte de alineamientos.

Los edificios de menor altura (<150 m) se concentran principalmente en dos zonas bien definidas, ambas en torno a un cordón de complejos volcánicos parcialmente erosionados pertenecientes al Conjunto 4. El clúster occidental se compone de volcanes de los conjuntos 1 y 2, mientras que el clúster oriental se compone de volcanes del conjunto 4. Este último conjunto es el que abarca una mayor superficie ( $1.021 \text{ km}^2$ ), con una densidad de volcanes de 0,05 por  $\text{km}^2$ . El Conjunto 3, por su parte, es el que tiene la menor densidad de volcanes en la zona, con 0,03 volcanes por  $\text{km}^2$ . Sin embargo, es a su vez el conjunto de volcanes con la mayor relación de volumen/área, lo que indica que aunque posee menos volcanes, estos son en general de mayor tamaño que en el resto de los conjuntos.

La aparición de grandes complejos volcánicos a partir de los 10 Ma, concentrados en la parte oriental de la zona de estudio, probablemente tiene relación con un aumento paulatino en el ángulo de subducción a lo largo de los últimos 25 Ma (Kay *et al.*, 2008, y referencias en él). En ese sentido, Trumbull *et al.* (1999) encuentran que, entre los 25° y 26° S, las lavas entre 8 y 5 Ma presentan un mayor grado de contaminación cortical, y atribuyen este aumento en la contaminación de los magmas a una mezcla con fundidos corticales en algún sector de la corteza media. Cabe destacar que en la zona no se observan ignimbritas en el lapso 10 – 2 Ma, abundantes inmediatamente al norte (21° a 24° S) en la zona que de Silva (1989) define como *Altiplano-Puna Volcanic Complex* (APVC), y al sur de los 26° S.

La existencia de una lava dacítica de más de  $12 \text{ km}^3$  inmediatamente al norte del clúster de volcanes pequeños, datada en 7 Ma (Naranjo *et al.*, 2013a), indica la existencia de cámaras magmáticas lo suficientemente grandes como para generar  $12 \text{ km}^3$  en un solo evento. De esta manera, es posible que el Conjunto 4, al menos localmente, sea el exponente sur de un periodo de magmatismo importante en los Andes Centrales, capaz de generar grandes calderas entre los 21° y 24° S y que, debido a la existencia de una corteza superior debilitada por procesos magmáticos previos, no pudo desarrollarse como una (o más) cámaras magmáticas de gran tamaño sino más bien como pequeñas cámaras magmáticas coalescentes entre los 25° y 26° S en Chile.

### 3.1 Comparación de las morfologías en la zona de estudio con la Zona Volcánica Sur (SVZ)

El espesor de la corteza en la Zona Volcánica Central (CVZ en inglés) es de hasta 70 km (60 km en la zona de estudio, Allmendinger *et al.*, 1997, y referencias en él). En cambio, en la Zona Volcánica Sur (SVZ en inglés), el espesor alcanza no más de 30-40 km (Hildreth y Moorbath, 1988). Esta diferencia de espesor entre ambas zonas afecta directamente el grado de contaminación cortical por asimilación, evidenciado en los patrones de REE (Haschke



*et al.*, 2006), mayores en la CVZ. En general, los edificios volcánicos en la zona de estudio tienen tamaños característicamente menores que en la Zona Volcánica Sur (37° - 46° S), en que volcanes compuestos como el Villarrica (39°25' S, 71°56' W) y el Llaima (38°41' S, 71°43' W), y complejos volcánicos como el Puyehue – Cordón Caulle (40°31' S, 72°11' W) tienen un tamaño considerablemente mayor tanto en altura absoluta como en volumen, y sus razones de aspecto son similares a las obtenidas para complejos volcánicos y volcanes compuestos en la zona.

La complejidad estructural de la corteza superior, en la zona del CVZ, puede tener un rol preponderante en la evolución de los productos volcánicos de la zona, así como en el tipo de volcanismo presente. De esta manera, la profundidad y tamaño de las cámaras magmáticas podría ser relativamente mayor en la SVZ que en la CVZ, en donde el gran espesor de la corteza favorecería la acumulación de magmas a distintos niveles, de menor tamaño y con un mayor grado de contaminación cortical. Así mismo, la existencia de una corteza más tectonizada, permitiría una migración continua de las cámaras magmáticas en la CVZ, impidiendo la acumulación en cámaras mayores y más duraderas, a diferencia de lo que ocurre en la SVZ donde el menor espesor de la corteza favorecería la existencia de grandes estructuras profundas, con tiempos de tránsito de magma hacia la superficie menores y por lo tanto un menor grado de diferenciación y contaminación de los productos volcánicos.

Localmente, en la zona de estudio, esto se observa en el mayor tamaño promedio de los volcanes del Conjunto 3 (15-10 Ma), probablemente asociado a estructuras más profundas que en el Conjunto 4 (10-4 Ma), favoreciendo así el establecimiento de cámaras magmáticas más perennes. En ese sentido, un estudio isotópico de los productos de los distintos tipos de volcanes ayudaría a interpretar los tipos de cámara magmática y magmas, la relación entre los edificios de un mismo conjunto, y las diferencias entre las distintas unidades.

#### 4. Conclusiones

Existen diferencias en los valores morfométricos de las unidades de volcanes estudiadas en la zona. En particular, destaca el mayor tamaño relativo de los volcanes del Conjunto 3, y la existencia de dos poblaciones de volcanes en el Conjunto 4. Estas diferencias pueden estar relacionadas a la profundidad y duración de las estructuras presentes en el área, las que a su vez condicionarían el tamaño y perennidad de las cámaras magmáticas que alimentaron a los volcanes.

#### 5. Agradecimientos

Esta es una contribución al Plan Nacional de Geología del Departamento de Geología Regional del Sernageomin.

#### Referencias

- Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S. M., Isacks, B. 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Ann Rev Earth Planetary Science* 25: 139-174.
- de Silva, S. L. 1989. The Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. *Geology* 17: 1102-1106.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P. A., Kervyn, M., Petrinovic, I. A. 2012. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology* 136: 114-131.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I. A., Euillades, P. A., Alvarado, G. 2009. Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology* 37: 651-654.
- Haschke, M., Günther, A., Melnick, D., Echtler, H., Reutter, K.-J., Scheuber, E. 2006. Central and Southern Andean Tectonic Evolution Inferred from Arc Magmatism. In O. Oncken, G. Chong, G. Franz, P. Giese, H.-J. Götze, V. A. Ramos, et al., *The Andes: Active Subduction Orogeny*. pp. 337-353. Berlin: Springer-Verlag.
- Hildreth, W., Moorbath, S. 1988. Crustal Contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineral Petrology* 98: 455-489.
- Kay, S.M., Coira, B., Mpodozis, C. Field Trip guide: Neogene evolution of the central Andean Puna plateau and southern Central Volcanic Zone. in Kay, S.M., and Ramos, V.A., eds., *Field trip guides to the Backbone of the Americas in the southern and central Andes: Ridge collision, shallow subduction, and plateau uplift: Geological Society of America Field Guide* 13: 119-183, doi: 10.1130/2008.0013(05)
- Naranjo, J. A., Cornejo, P. 1989. Avalanchas múltiples del volcán Chaco en el norte de Chile: un mecanismo de degradación de volcanes compuestos miocenos. *Revista Geológica de Chile* 16, N°1: 61-72.
- Naranjo, J. A., Cornejo, P. 1992. Hoja Salar de la Isla, regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 72 .
- Naranjo, J.A.; Villa, V.; Venegas, C. 2013a. Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo del León Muerto, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Nos. 151-152, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Naranjo, J.A.; Villa, V.; Venegas, C. 2013b. Geología de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Nos. 153-154, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Trumbul, R.B., Wittenbrink, R., Hahne, K., Emmermann, R., Büsch, W., Gerstenberger, H., Siebel, W. 1999. Evidence for Late Miocene to Recent contamination of arc andesites by crustal melts in the Chilean Andes (25-26° S) and its geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences* 12:135-155.
- Villa, V. 2013. Morfología de estructuras volcánicas cenozoicas de los Andes Centrales entre los 25° y 26° S, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile: 89 p.