

Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales

Benigno Godoy¹, Jorge Clavero², Constanza Rojas³, Estanislao Godoy⁴

¹ Programa de Doctorado en Ciencias, Mención Geología, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, 1280 Antofagasta, Chile.
bgn001@alumnos.ucn.cl

² Energía Andina S.A., Darío Urzúa 2165, Providencia, Santiago, Chile.
jclavero@energiandina.cl

³ Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, 1280 Antofagasta, Chile.
corojas@ucn.cl

⁴ Tehema Consultores. Virginia Subercaseaux 4100, Pírcue, Chile.
egodoyster@gmail.com

RESUMEN. Las avalanchas de detritos, asociadas a colapsos parciales de edificios volcánicos, son fenómenos comunes en la evolución de un volcán. Este tipo de flujos son por inestabilidades, que pueden deberse a factores tales como la existencia de zonas afectadas por alteración hidrotermal, cambios climáticos, terremotos, intrusión de magmas en zonas superficiales (criptodomas y/o diques) y/o movimiento de fallas bajo el edificio volcánico o cercanas a él. El producto final de estos flujos -denominado depósito de avalancha de detritos (DAD)- presenta morfologías típicas de cerrillos y drenajes cerrados. En los Andes Centrales se han reconocido, al menos, 14 centros volcánicos con depósitos de avalancha asociados, entre los que está el volcán Tata Sabaya (Bolivia). El colapso que ha dado origen a este depósito podría haberse generado por una combinación de actividad sísmica y magmática en el volcán. El depósito asociado al colapso parcial de este volcán se distribuye sobre la parte baja del flanco sur del volcán y sobre la parte noroccidental de la cuenca del salar de Coipasa. Cubre una superficie de más de 230 km² y tiene un volumen estimado de 6±1 km³. Sobre la base de las composiciones litológicas, se ha establecido que el depósito está constituido por 6 tipos distintos de cerrillos, los cuales son: lávicos, piroclásticos, sedimentarios mixtos, brecha piroclástica y andesítico-basálticos. Considerando el tipo predominante de cerrillos y su distribución espacial dentro del depósito, se ha definido 6 facies diferentes (Facies de Bloques Toreva, Facies de Cerrillos Volcánicos, Facies Central, Facies de Cerrillos Sedimentarios, Facies Mixta y Facies de Cerrillos de Brecha Piroclástica). Tomando en cuenta la distribución espacial de estas facies, se propone la estructura del paleovolcán previa a su colapso parcial.

Palabras clave: Avalanchas de detritos, Volcán Tata Sabaya, Cerrillos, Facies volcánicas, Zona Volcánica Central, Andes, Bolivia.

ABSTRACT. Volcanic facies of the debris avalanche deposit of Tata Sabaya Volcano, Central Andes. Debris avalanches associated with partial sector collapse of volcanic edifices are common phenomena in the evolution of a volcano. These flows are formed by edifice instability, which could be due to several factors such as the presence of hydrothermally altered areas, climatic changes, earthquakes, shallow magma intrusions (cryptodomes and/or dykes) and/or fault activity beneath or close to the volcano. The final product of this avalanche flow, known as debris avalanche deposit (DAD) shows typical hummocky and closed drainage morphologies. More than 14 volcanic centers of the Central Andes have volcanic DAD's, being Tata Sabaya (Bolivia) one of them. The collapse that has originated the deposit could have been generated by a combination of magmatic and seismic activity in the volcano. The deposit associated to the partial collapse of Tata Sabaya volcano is distributed on its lower southern flank and partially fills the north-western part of the Salar de Coipasa basin. The deposit covers a minimum area of 230 km² and has an estimated minimum volume of 6±1 km³. The deposit is formed by 6 different types of hummocks, according to their compositions: lavic, pyroclastic, sedimentary, mixed, pyroclastic breccia and basaltic-andesitic hummocks. Based on the predominant hummock type and the spatial distribution, the deposit has been divided into 6 different facies (Toreva Block Facies, Volcanic Hummocks Facies, Central Facies, Sedimentary Hummocks Facies, Mixed Facies and Pyroclastic Breccia Hummocks Facies). Taking into account the facies distribution and their characteristics, we infer the pre-collapse structure of the volcano.

Keywords: Debris avalanche, Tata Sabaya volcano, Hummocks, Volcanic facies, Central Volcanic Zone, Andes, Bolivia.

1. Introducción

Las avalanchas de detritos son flujos producidos por el colapso de un sector de un edificio volcánico (Ui, 1983). Entre los factores que pueden originar un colapso se encuentran: los procesos de alteración hidrotermal que debilitan sectores del edificio (*e.g.*, López y Williams, 1993; Reid, 2004), las características del sustrato o basamento que soporta el peso del edificio (*e.g.*, van Wyk de Vries *et al.*, 2001; Wooler *et al.*, 2004), la violencia de la erupción del volcán (*e.g.*, Voight *et al.*, 1981), la reactivación de fallas bajo el edificio volcánico (Tibaldi *et al.*, 2008; Wooller *et al.*, 2009) y los cambios climáticos (Capra, 2006). La inestabilidad y el colapso de edificios volcánicos han sido objeto de gran cantidad de estudios en el mundo, en particular con posterioridad a la erupción del Monte Santa Helena en 1980 (*e.g.*, Voight *et al.*, 1981; Ui, 1983; Siebert, 1984; Francis y Wells, 1988; Ponomareva *et al.*, 2006). El estudio de estos eventos es de gran utilidad para reconocer la estabilidad de edificios volcánicos propensos a colapsar y que se encuentren cercanos a áreas pobladas, de manera de mitigar los posibles efectos que un flujo de estas características pudiese generar (*e.g.*, Capra *et al.*, 2002; Thouret *et al.*, 2005; Catane *et al.*, 2008).

Los depósitos generados por las avalanchas de detritos corresponden a una mezcla, generalmente pobremente seleccionada, de detritos que varían de bloques intactos a otros totalmente brechizados. En esta mezcla predomina el material lítico proveniente del volcán, pudiendo estar presente algún material juvenil, en caso de estar asociado el colapso a un evento eruptivo, y/o material incorporado durante su avance (Siebert, 1984). La morfología típica de un depósito de avalancha de detritos corresponde a una topografía de cerrillos. Esta topografía es distintiva e irregular y está constituida de pequeños montículos que se encuentran separados entre sí por cuencas y depresiones someras. Cordones longitudinales y transversales también forman parte de la morfología de estos depósitos (Ui, 1983; Siebert, 1984). En la parte proximal de estos depósitos, se ha observado grandes bloques rotados (*e.g.*, Wadge *et al.*, 1995; Voight *et al.*, 2002; Ponomareva *et al.*, 2006) similares a los bloques Toreva caracterizados por Reiche (1937). Una particularidad de este tipo de depósitos es que, tanto en el interior de los cerrillos como en el de los bloques Toreva, es posible

reconocer la composición del material colapsado y, en ocasiones, las relaciones estratigráficas de los materiales que fueron incorporados en el momento del colapso del volcán (*e.g.*, Malone, 1995; Wadge *et al.*, 1995; Belousov *et al.*, 2001; Clavero *et al.*, 2004; Kervyn *et al.*, 2008).

Los depósitos de avalancha de detritos tienen espesores que varían desde algunos decímetros a centenas de metros, y cubren áreas de varias centenas, e incluso miles de kilómetros cuadrados (Ui, 1983; Francis y Wells, 1988; Capra *et al.*, 2002). Debido a esto, para su estudio es común la utilización de sensores remotos tales como fotografías aéreas, imágenes satelitales Landsat MSS, TM e imágenes satelitales ASTER (*e.g.*, Francis *et al.*, 1985; Francis y Wells, 1988; Godoy, 2008; Kervyn *et al.*, 2008).

Un depósito de avalancha de detritos puede ser considerado como una facies dentro de la evolución de un edificio volcánico (*e.g.*, Karacik, 2006). A la vez, debido a diferencias composicionales y texturales, este depósito se puede subdividir en distintas facies, las cuales indican cambios de ambiente y en los procesos de depositación existentes entre un sector y otro. Estas diferencias estarían relacionadas con cambios en las características litológicas y morfológicas de los cerrillos, las que a su vez están relacionadas con diferentes dominios dentro del depósito (*sensu* Clavero *et al.*, 2002). De esta manera, se pueden caracterizar unidades distintivas (facies) dentro de un depósito de avalancha de detritos, tal como el caso de las facies de bloques y matriz del Monte Santa Helena (Glicken, 1996), las unidades El Cenizal y Monturaqui del volcán Socompa (Wadge *et al.*, 1995) y las facies de cerrillos continuos y aislados del volcán Parinacota (Clavero *et al.*, 2006).

El objetivo del presente trabajo es estudiar la disposición espacial de las diferentes unidades litológicas existentes en el depósito de avalancha del volcán Tata Sabaya e inferir su distribución original en el edificio volcánico y alrededores, previo al colapso. También, se establecerá una relación entre esta distribución y la distribución de los materiales dentro de este depósito. Para esto, se ha hecho una caracterización, composicional y morfológica de los cerrillos presentes en el depósito de avalancha de detritos del volcán, así como también una descripción, sobre la base de su composición y ubicación dentro del depósito, de las distintas facies presentes en él.

2. Marco Geológico

La Zona Volcánica Central de la Cordillera de los Andes abarca una extensa área comprendida entre los 15°S (sur de Perú) y los 27,5° (norte de Chile y Argentina) (de Silva y Francis, 1991). Corresponde a un arco magmático, paralelo a la fosa Perú-Chile a una distancia entre 250 y 300 km (Wörner *et al.*, 1992; Stern, 2004). El arco presenta elevaciones que alcanzan alrededor de 6.000 m s.n.m., y está desarrollado sobre una corteza continental cuyo espesor varía entre 30 y 75 km (Beck *et al.*, 1996).

En los Andes Centrales, Francis y Wells (1988) reconocieron, a partir del análisis de sensores remotos (fotografías espaciales, imágenes satelitales Landsat, TM y MSS, y fotografías aéreas), 14 centros volcánicos mayores con presencia de depósitos de avalancha de detritos (Fig. 1). Se han desarrollado nuevos trabajos *in situ* en algunos de estos depósitos (e.g., van Wyk de Vries *et al.*, 2001; Clavero *et al.*, 2002; Clavero *et al.*, 2004), así como también se han identificado nuevos depósitos de este tipo en la zona (e.g., Thouret *et al.*, 2005; Godoy *et al.*, 2008). Se ha propuesto que estos depósitos de avalancha de detritos han sido generados por deslizamiento gravitacional (e.g., van Wyk de Vries *et al.*, 2001),

alteración hidrotermal (e.g., Godoy *et al.*, 2008), erupciones magmáticas (e.g., O'Callaghan y Francis, 1986; Thouret *et al.*, 2005; Godoy y Clavero, 2008) o procesos mixtos (Clavero *et al.*, 2004), influyendo en gran parte de estos colapsos el estrés tectónico local (e.g., Francis y Wells, 1988; Godoy *et al.*, 2008; Vezzoli *et al.*, 2008; Arancibia *et al.*, 2009).

El volcán Tata Sabaya es un estratovolcán compuesto, constituido por lavas calcoalcalinas, con alto contenido de potasio (High-K) (de Silva *et al.*, 1993). Tiene una altura, desde su base, de 1700 m, y su cima se encuentra a 5430 m s.n.m. Está localizado en el altiplano de Bolivia (19°18'S; 68°31'W), al norte del salar de Coipasa (Fig. 1), y pertenece a una cadena volcánica de 30 km de longitud, orientada en dirección este-oeste. Esta cadena comienza en el volcán Isluga, en Chile, y termina en el volcán Cerro Sacasani, en Bolivia (de Silva y Francis, 1991). El volcán Tata Sabaya tiene una edad del Mioceno Medio y se encuentra sobre un basamento constituido por ignimbritas cenozoicas, equivalentes a aquellas que constituyen la Formación Altos de Pica, en Chile (de Silva *et al.*, 1993). El edificio volcánico está conformado principalmente por lavas andesíticas a dacíticas y por domos dacíticos. Hacia el flanco norte del volcán se encuentra una serie de bloques

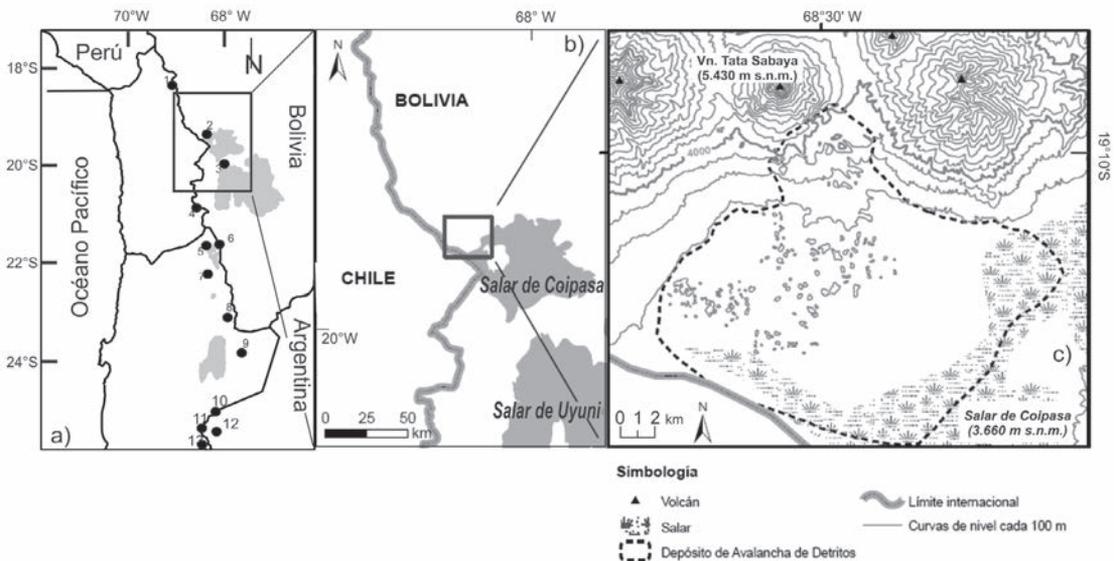


FIG. 1. Mapa de ubicación del volcán Tata Sabaya. a) Distribución de los volcanes con depósitos de avalancha de detritos identificados por Francis y Wells (1988). Los números corresponden a: 1. Parinacota; 2. Tata Sabaya; 3. Tittivilla; 4. Caiti; 5. Aucasquincha; 6. Ollagüe; 7. San Pedro; 8. Sairecabur?; 9. Laguna Verde; 10. Socompa; 11. Llullaillaco; 12. Rosado; y 13. Lastarria. b) Localización del volcán Tata Sabaya. c) Distribución del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya.

graníticos que corresponderían a parte del basamento alzado tectónicamente. Estos bloques tienen edad Proterozoica y se encuentran orientados en dirección NNW (de Silva *et al.*, 1993). Hacia el sur del volcán se han reconocido depósitos de flujo piroclástico y bloques con diaclasamiento prismático, cuyos diámetros alcanzan los 3 m (Clavero *et al.*, 2006).

Distribuida hacia el flanco sur del volcán Tata Sabaya, y sobre el borde noroccidental del salar de Coipasa, se observa un depósito de avalancha de detritos. Deruelle y Brousse (1984), llevando a cabo un estudio preliminar del volcán, indican que el depósito de avalancha de detritos correspondía a un depósito de flujo piroclástico. Tomando en cuenta esto, los autores propusieron un complicado mecanismo de erupción para este volcán. Estudios posteriores describen el depósito observado hacia el sur del volcán, como uno generado por un colapso del edificio volcánico (Francis *et al.*, 1985; Francis y Wells, 1988; de Silva y Francis, 1991). Así, se ha establecido que la evolución del volcán Tata Sabaya ha ocurrido en cuatro etapas (de Silva *et al.*, 1993). La Etapa I corresponde a la generación de un basamento constituido, principalmente, por depósitos consolidados de flujos piroclásticos, piroclásticos de caída y piroclásticos de bloques y cenizas. En este basamento también se encuentran fragmentos de bombas volcánicas. Esta primera etapa de construcción del volcán ha sido denominada Etapa de Escudo Piroclástico. La segunda etapa, denominada Etapa de pre-Colapso, corresponde a la generación de un edificio volcánico, el cual se habría construido sobre

el escudo piroclástico. Este edificio habría estado constituido por lavas andesíticas a dacíticas y por domos dacíticos con una altura ligeramente mayor que la del actual volcán (de Silva *et al.*, 1993). La tercera etapa corresponde a la de Etapa de Colapso de Cono, y durante esta se habría generado el depósito de avalancha de detritos distribuyéndose hacia el sur del volcán. La última etapa corresponde al desarrollo del actual edificio volcánico. Esta etapa se denomina Etapa de Sellado pos-Colapso, y comprende la erupción de lavas y domos sobre la caldera de colapso originada durante la etapa anterior (de Silva *et al.*, 1993).

3. Metodología

Para la caracterización del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya se ha llevado a cabo la descripción de 85 cerrillos presentes en el depósito. De esta manera, se ha descrito la petrografía de los bloques mayores que están presentes en estos cerrillos. También, se han descrito las características morfológicas de los cerrillos, las que comprenden las inclinaciones (α_1 , α_2 y α_3) y longitudes que ellos presentan (Fig. 2), considerando para ello la metodología utilizada por Clavero *et al.* (2002) en el depósito de avalancha de detritos del volcán Parinacota.

Además, para el desarrollo de este trabajo, 28 fotografías aéreas, escala 1:60.000 fueron utilizadas. Estas fotografías fueron ortorrectificadas y a partir de ellas se obtuvo un Modelo de Digital de Terreno (MDT), con una resolución de 16 m, con el fin de

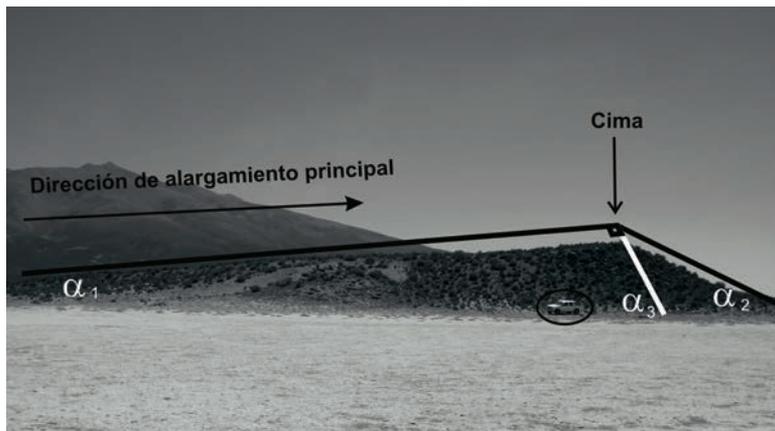


FIG. 2. Representación de los parámetros morfológicos, medidos en terreno, para cerrillos del depósito de avalancha. α_1 y α_2 representan las inclinaciones para las longitudes en la dirección de alargamiento principal, y α_3 para una perpendicular a esta.

estimar el volumen y la distribución areal del depósito. Además, con la ayuda de estas herramientas, ha sido posible determinar la distribución espacial de las facies presentes en este depósito. Una explicación detallada del proceso de ortorrectificación de las fotografías aéreas y de la generación del Modelo Digital de Terreno, así como el cálculo del volumen del depósito, se encuentra en Godoy (2008).

4. Características generales del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya

El depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya es considerado uno de los mejor conservados entre los reconocidos en los Andes Centrales (Francis y Wells, 1988). Este depósito tiene, en planta, forma de T invertida, con un eje de simetría de orientación aproximada norte-sur. Este abarca un área de ~230 km² (Fig. 1), con una longitud máxima de 23 km. Tiene un volumen estimado de 6 ± 1 km³, y presenta un coeficiente de avance relativo (H/L) de, aproximadamente, 0,08 (Godoy, 2008). Este coeficiente ha sido relacionado con el coeficiente de fricción (Ui, 1983; Siebert, 1984), y se encuentra dentro de los valores estimados para este tipo de depósito (Ui *et al.*, 2000).

La cicatriz del colapso que ha dado origen a la avalancha se encontraría sellada por lavas emitidas durante la Etapa de Sellado pos-Colapso. Esta se observa en los flancos oriental y occidental del volcán, mira hacia el sur y presenta una abertura de 120° (de Silva *et al.*, 1993). En la parte proximal del depósito existen estructuras similares a las descritas por Reiche (1937) como bloques Toreva, las cuales son similares a las presentes en otros depósitos de este tipo en los Andes Centrales (*e.g.*, Wadge *et al.*, 1995; Clavero *et al.*, 2002).

El depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya presenta costras carbonáticas en la cima de los cerrillos localizados en el flanco noroccidental del salar de Coipasa (Fig. 3). Costras similares han sido encontradas en otros sectores del salar de Coipasa y en los bordes del salar de Uyuni, siendo interpretadas como evidencias de un paleolago que habría ocupado la cuenca que abarcan ambos salares (Sylvestre *et al.*, 1996; Sylvestre *et al.*, 2000). De esta manera, se ha interpretado que la avalancha habría ingresado al salar cuando este aún era un lago (Godoy, 2008). Además, durante el desarrollo de este trabajo se ha obtenido la edad de un depósito

de flujo piroclástico posterior al colapso. Para esto se ha utilizado datación C¹⁴ en un fragmento de madera carbonizada encontrada en la base de este depósito (Clavero *et al.*, 2006). La edad obtenida mediante esta técnica para este fragmento de madera ha sido de 6 ka A.P. La edad entregada por la madera carbonizada y las oscilaciones de edades obtenidas para las fases lacustres presentes en la cuenca de Uyuni-Coipasa (Sylvestre *et al.*, 1996; Sylvestre *et al.*, 1999; Sylvestre *et al.*, 2000) sugieren que la avalancha habría ocurrido entre los 6 y 16 ka A.P.

La ausencia de material con alteración hidrotermal en el depósito y la aridez de la zona en que se encuentra el volcán, hacen poco probable que la alteración hidrotermal y la lluvia hayan sido factores causantes del colapso del volcán. Por otra parte, hay presencia de bloques con diaclasamiento prismático ('Prismatically Jointed Blocks') dentro del depósito, a la vez que existen fallas cercanas al edificio volcánico. Así, una combinación de actividad sísmica e inestabilidad por actividad magmática serían los factores más acordes que habrían gatillado el colapso del volcán.

4.1. Cerrillos

Los cerrillos son las características más sobresalientes de los depósitos de avalancha de detritos, y se constituyen por fragmentos del volcán que han colapsado y bloques incorporados a la avalancha durante su avance. Según lo expresado por Glicken (1996), existen tres tipos de cerrillos generados por una avalancha de detritos. Estos tipos se definen de acuerdo al contenido de bloques y matriz existente en ellos: los cerrillos A son aquellos constituidos por grandes bloques, no observándose material de tamaño fino (matriz) en ellos; cerrillos B, formados principalmente de matriz, existiendo algunos bloques dispersos en ellos, y cerrillos C, que se encuentran compuestos por bloques que yacen o son rodeados por material fino.

Los cerrillos del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya se encuentran constituidos por fragmentos de lavas andesíticas a dacíticas de anfíbol; depósitos piroclásticos, de oleada y del tipo bloques y cenizas; bombas volcánicas andesítico-basálticas; depósitos salinos, depósitos lacustres y brechas de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de composición dacítica de anfíbol (Clavero *et al.*, 2006). En algunos cerrillos estos materiales se

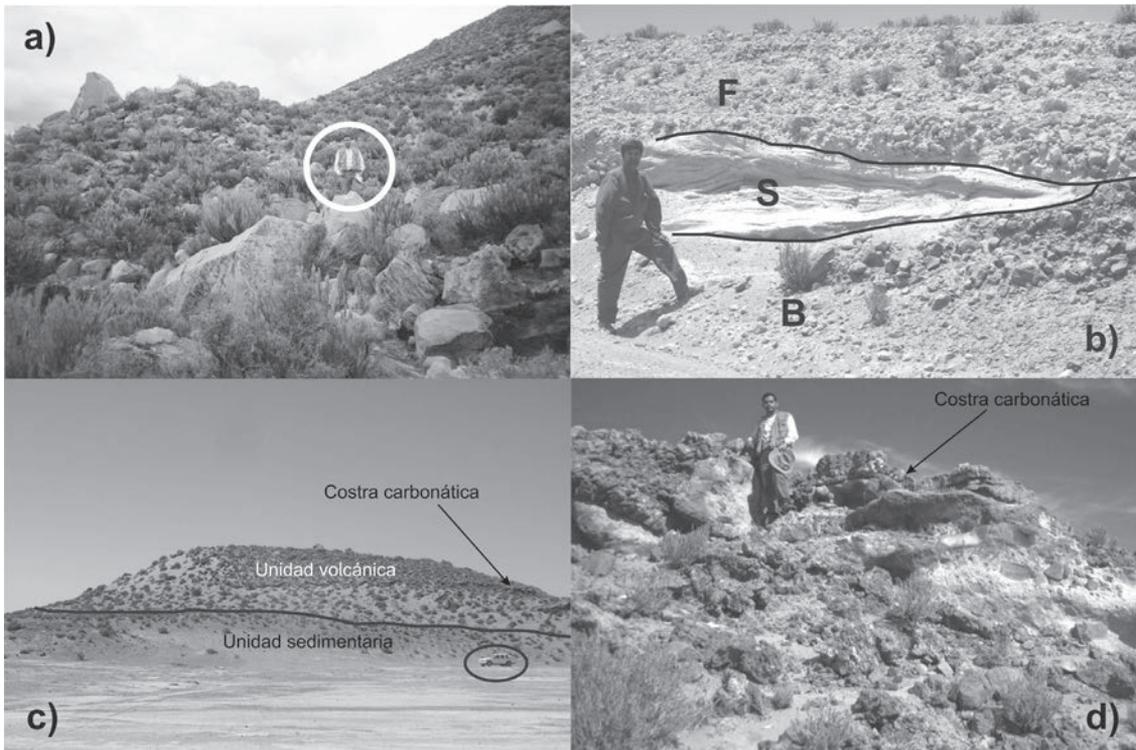


FIG. 3. Fotografías de diferentes cerrillos caracterizados para el depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya. **a.** Cerrillo lávico; **b.** Cerrillo piroclástico. En este se puede observar una secuencia piroclástica completa, la cual preserva la secuencia estratigráfica original. Esta secuencia está constituida por un depósito piroclástico del tipo bloques y cenizas (B) en la base y un depósito de flujo piroclástico (F) hacia la parte superior. Intercalado entre ambos se encuentra un depósito de oleada piroclástica (S); **c.** Cerrillo mixto. Se indican las diferentes unidades que constituyen este tipo de cerrillos, así como también la costra carbonática presente en la parte superior; **d.** Parte superior de un cerrillo de brecha piroclástica. En este se indica la costra carbonática que se observa en la parte superior de este tipo de cerrillos.

encuentran basculados, deformados y/o fracturados, encontrándose fallas normales, pliegues y estructuras de inyección (Clavero *et al.*, 2006; Godoy, 2008). En la cima de los cerrillos se observan bloques aislados que pueden llegar a medir un poco más de 10 m de diámetro. Algunos bloques presentan en sus caras marcas de impacto similares a las descritas para otros depósitos de los Andes Centrales (*e.g.*, Clavero *et al.*, 2002, 2005). Además, dentro del depósito, se han encontrado cerrillos amalgamados ('Compound hummocks', *sensu* Clavero *et al.*, 2002), que comprenden dos o más cerrillos, de la misma composición, depositados uno sobre o al lado del otro, sin que haya una separación clara entre ellos. Los cerrillos muestran una tendencia a disminuir de tamaño, a medida que se alejan del volcán, variando de 800 m a 40 cm de altura. Además, a medida que avanzan hacia las zonas distales, los cerrillos se van

separando unos de otros, encontrándose aislados hacia estas zonas. Sobre la base de la composición litológica dominante y las características morfológicas, se han identificado seis tipos de cerrillos en el depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya. Además, considerando el contenido de matriz y bloques, la clasificación de Glicken (1996) ha sido utilizada para los cerrillos presentes en este depósito.

4.1.1. Cerrillos Lávicos

Son cerrillos de grandes extensiones. Presentan longitudes que varían entre 400 y 800 m y alturas de 200 hasta 400 m. Tienen volúmenes de $15 \times 10^3 \text{ m}^3$ hasta $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ y α_1 , α_2 y α_3 abruptas que varían de 35 a 60°. Se localizan en la parte proximal del depósito y están constituidos por bloques de composición dacítica de anfíbol y andesítica. Los bloques presentes, que alcanzan longitudes de hasta 5 m de

diámetro (Fig. 3a), no encontrándose una matriz fina o de otra composición en este tipo de cerrillos. De esta manera, este tipo de cerrillos correspondería a cerrillos tipo A de acuerdo a la clasificación de Glicken (1996).

4.1.2. Cerrillos Piroclásticos

Son cerrillos alargados, con longitudes de 100 hasta 200 m y una altura media de 2,5 m. Presentan α_1 , α_2 y α_3 de entre 10 y 25°, y tienen un volumen promedio de 2×10^4 m³. Se distribuyen en zonas proximales, hacia el sur de los cerrillos lávicos. Los cerrillos piroclásticos se encuentran constituidos por grandes bloques de material piroclástico que no presentan una disrupción de su secuencia estratigráfica original. Estos bloques están formados por depósitos de flujo piroclásticos del tipo bloques y cenizas, y de depósitos de flujo piroclástico, ambos de composición dacítica, observándose, además, lentes correspondientes a depósitos de oleadas piroclásticas (Fig. 3b). De esta manera, estos cerrillos se proponen como bloques de material piroclástico y han sido clasificados como cerrillos tipo A (Glicken, 1996).

4.1.3. Cerrillos Sedimentarios

Este tipo de cerrillos se encuentran hacia los bordes del depósito, y algunos hacia la zona central del mismo. Son cerrillos que llegan a medir 3 m de altura, tienen longitudes inferiores a 100 m y α_1 , α_2 y α_3 que van de 1 a 20°. Están constituidos por una matriz correspondiente a materiales de depósitos aluviales, con clastos que varían de tamaño arena fina a arena gruesa. Estos materiales presentan una estratificación paralela a subparalela. Tanto dentro como sobre esta matriz se observan fragmentos de hasta 1 m, de lavas y brechas piroclásticas de composición dacítica de anfíbol. Por otra parte, esta matriz se encuentra intercalada con capas correspondientes a depósitos piroclásticos de caída y/o sedimentos salinos. Corresponden a cerrillos tipo B (Glicken, 1996), y en ellos se observan estructuras de deformación (*e.g.*, diques clásticos y pliegues) que han sido asociadas al movimiento de la avalancha (Godoy, 2008).

4.1.4. Cerrillos Mixtos

Son cerrillos que se encuentran hacia la zona central del depósito. Son de dimensiones variables, con alturas que van desde los 4 hasta los 60 m, longitudes de entre 10 y 500 m, y α_1 , α_2 y α_3 que varían entre 8 y 35°. Están constituidos por **a**) una

unidad sedimentaria, en la base, de características composicionales similares a la de los cerrillos sedimentarios, observándose, además, bombas volcánicas de composición andesítica-basálticas, y **b**) una unidad volcánica, en la parte superior, formada por fragmentos volcánicos (lavas y piroclastos) con diámetros de hasta 3 m de longitud y composición dacítica de anfíbol (Fig. 3c). Considerando esto, este tipo de cerrillos se describen como cerrillos tipo C, de acuerdo a la clasificación propuesta por Glicken (1996). Por otra parte, el material sedimentario presente en la base de estos cerrillos tiene, en algunos sectores, pliegues y otras estructuras de deformación (Clavero *et al.*, 2006; Godoy, 2008).

4.1.5. Cerrillos de Brechas Piroclásticas

Estos cerrillos se distribuyen hacia las zonas distales del depósito. Están constituidos por bloques de brechas piroclásticas, de composición dacítica de anfíbol. Estas brechas han sido generadas por depósitos de flujos piroclásticos del tipo bloques y cenizas (Fig. 3d). Morfológicamente son similares a semielipsoides truncados, con una superficie relativamente horizontal en la parte superior. Existen dos tipos de cerrillos de brechas piroclásticas: los primeros, y más comunes, son de gran tamaño, variando desde 10 m hasta un poco más de 40 m de altura, con longitudes que van desde 50 a 200 m, y con α_1 , α_2 y α_3 que varían entre 35 y 50°. Los segundos corresponden a cerrillos de α_1 , α_2 y α_3 entre 15 y 25°, con longitudes entre 120 y 160 m, y una altura promedio, aproximada, de 2,5 m. Este tipo de cerrillos corresponden a cerrillos tipo A (Glicken, 1996).

4.1.6. Cerrillos Andesítico-Basálticos

Son cerrillos de pequeñas dimensiones: alturas que varían de 0,8 a 4 m, longitudes que alcanzan los 80 m y α_1 , α_2 y α_3 que van desde los 20 a los 25°. Corresponden a una matriz constituida por fragmentos de bombas volcánicas de composición andesítico-basáltica. Los fragmentos presentes en esta matriz alcanzan hasta 60 cm de diámetro y se encuentran rodeando bloques de lavas y de brechas piroclásticas, ambos de composición de dacita de anfíbol, cuyos diámetros alcanzan los 120 cm. Debido a esto, este tipo de cerrillos ha sido clasificado como cerrillos tipo C (Glicken, 1996). Por otra parte, estos cerrillos se distribuyen en la zona central y distal del depósito, rodeando a los cerrillos mixtos.

4.2. Facies

Para la caracterización de facies del depósito de avalancha de detritos del volcán Ollagüe, Clavero *et al.* (2005) utilizaron una terminología diferente a la definida por Glicken (1996). Glicken (1996) divide el depósito del Monte Santa Helena en facies de bloques y de matriz, de acuerdo al contenido de material fino (<2 mm) y consistencia de los bloques presentes en los cerrillos. Por otra parte, Clavero *et al.* (2002) definen las facies descritas de acuerdo a las características petrográficas de los cerrillos que la constituyen. Para esto, los autores llevaron a cabo un análisis sedimentológico en mayor profundidad, considerando, además, la distribución de los cerrillos dentro del depósito. Siguiendo este modelo, de mayor detalle que aquel definido por Glicken (1996), el depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya se ha agrupado en seis facies (Fig. 4). Estas facies presentan características composicionales, representadas por el tipo de cerrillos que las constituyen, y una distribución espacial definida, describiéndose cada una de ellas a continuación. Una caracterización más detallada del depósito ha permitido la identificación de 11 facies distintas, las que han sido utilizadas para establecer la dinámica del movimiento del depósito (Godoy, 2008).

4.2.1. Facies de Bloques Toreva (FBT)

Esta facies se localiza hacia la porción proximal de la avalancha (Fig. 4). Se encuentra constituida

por Bloques Toreva (*sensu* Reiche, 1937), no observándose cerrillos en ella. Los Bloques Toreva de esta facies son grandes bloques de domos y/o lavas-domo dacíticos. Estos bloques tienen longitudes que van de 800 a casi 1200 m y alturas que alcanzan los 800 m. Esta facies cubre un área de ca. 5,5 km² y tiene un volumen aproximado de 0,2 km³, lo que corresponde a un 2% y un 3,5% del área y volumen total del depósito, respectivamente.

4.2.2. Facies de Cerrillos Volcánicos (FCV)

Se distribuye en la parte proximal de la avalancha, inmediatamente hacia el sur de la Facies de Bloques Toreva (Fig. 4). Está constituida por cerrillos piroclásticos y lávicos, siendo la única facies donde se observa este tipo de cerrillos. Hacia su sector distal se observan algunos cerrillos sedimentarios. Cubre un área aproximada de 22 km² (~10% del área total del depósito) y se ha estimado para ella un volumen de 3,4 km³. Esto último corresponde el 59% del total del volumen del depósito, por lo que esta facies es la de mayor volumen dentro del mismo.

4.2.3. Facies Central (FC)

Está constituida principalmente por cerrillos mixtos y ocasionales cerrillos andesítico-basálticos rodeándolos, observándose hacia sus márgenes algunos cerrillos sedimentarios. Se distribuye en la zona central del depósito, inmediatamente al sur de la Facies de Cerrillos Volcánicos (Fig. 4), ocupando un volumen de ca. 1,2 km³ (21% del total) y un área de

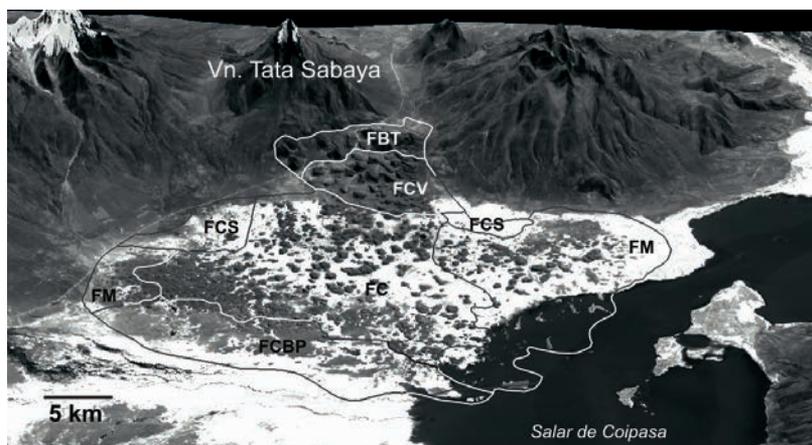


FIG. 4. Distribución de las diferentes facies en las que se ha dividido este depósito. **FBT**: Facies de Bloques Toreva; **FCV**: Facies Cerrillos Volcánicos; **FC**: Facies Central; **FCS**: Facies Cerrillos Sedimentarios; **FM**: Facies Mixta; **FCBP**: Facies Cerrillos de Brecha Piroclástica.

ca. 80 km². Así, es la facies con mayor distribución areal dentro del depósito, abarcando un 35% del total de la superficie de este.

4.2.4. Facies de Cerrillos Sedimentarios (FCS)

Se distribuye hacia el este y el oeste de la Facies Central, en la zona proximal del depósito (Fig. 4). Abarca un área de 14 km² y un volumen estimado de 2x10⁷ m³, lo que corresponde al 6% y al 0,2% del área y volumen total del depósito, respectivamente. Se encuentra constituida por cerrillos sedimentarios, los cuales disminuyen de tamaño a medida que se alejan del volcán.

4.2.5. Facies Mixta (FM)

Esta facies se distribuye hacia la zona lateral del depósito, al sur de la Facies de Cerrillos Sedimentarios (Fig. 4). Está constituida por cerrillos mixtos, sedimentarios y por brechas piroclásticas, sin que exista un tipo predominante de cerrillos entre ellos. Abarca un área total de ca. 74 km² (32% del área total de depósito) y tiene un volumen estimado de 9 x 10⁸ m³ (16% del total) Se pueden observar algunos cerrillos aislados y deformados hacia la parte distal de esta facies.

4.2.6. Facies de Cerrillos de Brecha Piroclástica (FCBP)

Corresponde a la facies más distal del depósito (Fig. 4). Está compuesta mayoritariamente por cerrillos de brecha piroclástica, de grandes dimensiones, con algunos cerrillos mixtos hacia su parte central y cerrillos sedimentarios aislados hacia su parte distal. Abarca un área de ca. 34,5 km² (15% del área total) y tiene un volumen aproximado de 10⁷ m³ (0,2% del volumen total).

5. Discusión. Relación entre las facies y la distribución de los materiales al momento del colapso

Los depósitos de avalancha de detritos volcánicos están constituidos, principalmente, por materiales presentes en el edificio volcánico en el momento de su colapso. La distribución de estos materiales, y la consiguiente distribución de los cerrillos y bloques dentro del mismo, está relacionada con la posición que ocupaban estos en el edificio volcánico en el momento de su colapso (*e.g.*, Voight *et al.*, 1981; Glicken, 1996; Clavero *et al.*, 2002; Voight *et al.*, 2002). Además, estos depósitos pueden presentar

fragmentos del sustrato del edificio volcánico y depósitos aluviales, glaciales, fluviales y lacustres que se disponían en los alrededores del edificio volcánico y que se incorporan a la avalancha durante su avance (van Wyk de Vries y Francis, 1997; Ui *et al.*, 2000; Clavero *et al.*, 2002, 2005, 2006; Bernard *et al.*, 2008).

Considerando esto, junto a la distribución y dimensiones de las diferentes facies y cerrillos presentes dentro del depósito asociado al colapso del volcán Tata Sabaya (Fig. 4), se ha llevado a cabo la reconstrucción del edificio volcánico y sus alrededores en el momento en que se generó la avalancha (Fig. 5).

El edificio volcánico precolapso habría presentado una altura similar a la del actual volcán, estando constituido por domos y flujos de lavas cohesivos de composiciones andesíticas a dacíticas (Fig. 5a). En el momento del colapso, parte de este material se desplazó casi intacto hacia la parte proximal de la avalancha (Fig. 5b), y dio origen a los cerrillos lávicos y a los bloques Toreva del depósito (Fig. 5c). Parte del material del edificio volcánico que continuó en movimiento fue fracturándose durante su avance para disponerse tanto en la parte superior de los cerrillos mixtos y en los cerrillos andesítico-basálticos, como dentro de la matriz de los cerrillos sedimentarios y sobre ella (Fig. 5c). De esta manera, el material correspondiente al antiguo edificio volcánico se distribuye por casi todo el depósito.

Por otra parte, los cerrillos piroclásticos corresponderían a depósitos piroclásticos, similares a los que actualmente se distribuyen hacia el flanco sur del edificio volcánico, y se habrían situados en esta misma posición (Fig. 5a). Este material piroclástico habría sido incorporado en la base de la avalancha durante su movimiento (Fig. 5b), quedando distribuido bajo los cerrillos volcánicos al finalizar este movimiento (Fig. 5c).

Como se ha mencionado anteriormente, la Facies Central constituye la mayor parte del depósito (Fig. 4). Las estructuras presentes en la base y la distribución de los materiales que conforman estos cerrillos, indicarían que estos han sido generados por incorporación de material durante el movimiento de arrastre por el avance de la avalancha (Fig. 5b). De esta manera, la avalancha, compuesta inicialmente solo de bloques derivados tanto del edificio volcánico (lavas y domos) como de depósitos piroclásticos, incorporó en su base material sedimentario. Este

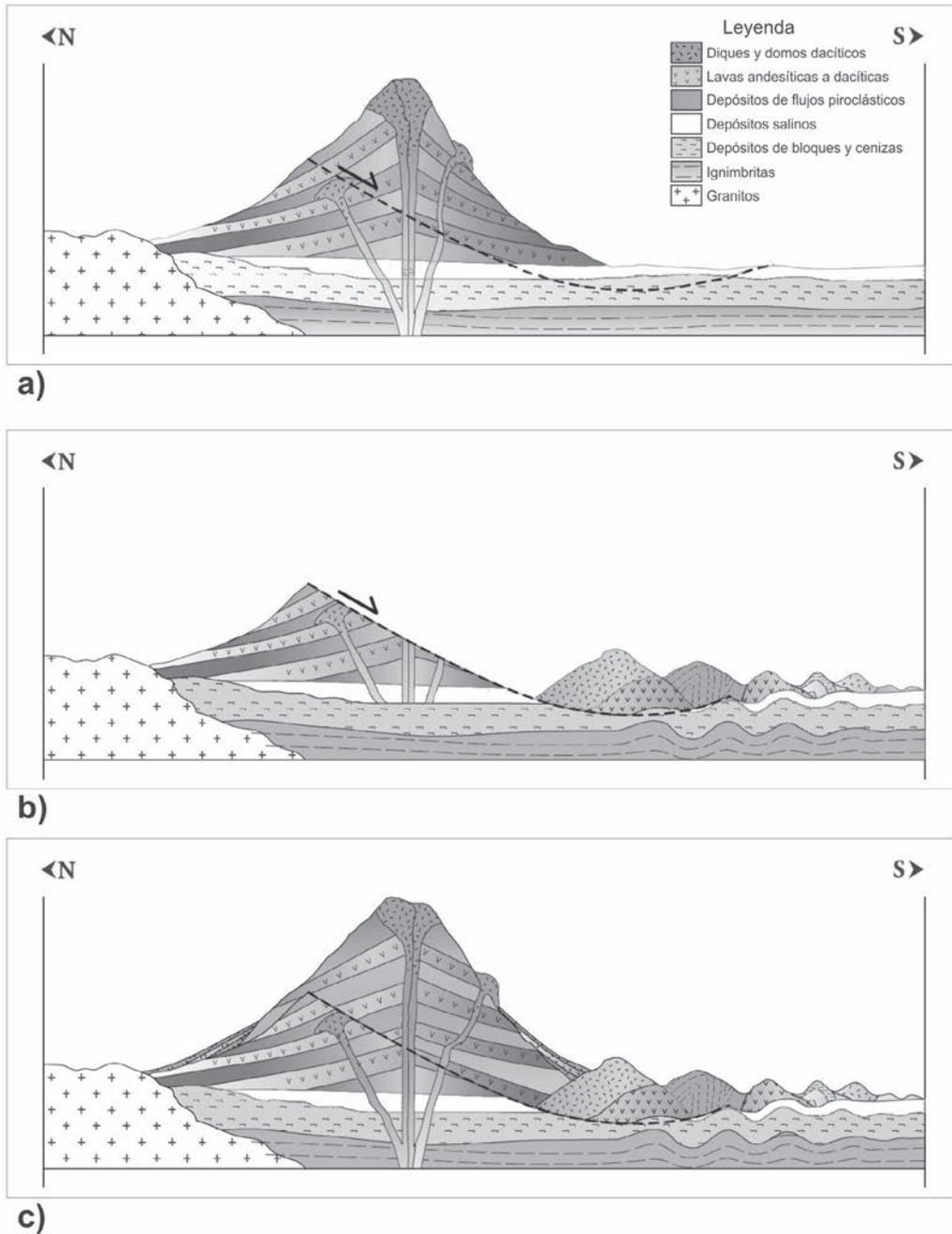


FIG. 5. Esquema de constitución y evolución del volcán Tata Sabaya desde su colapso parcial hasta el actual edificio. La línea segmentada representa el anfiteatro y posterior cicatriz de colapso generada. La flecha indica la dirección de movimiento de la avalancha. **a.** Volcán precolapso y la distribución de las diferentes unidades litológicas que lo habrían conformado. Este paleoedificio habría estado constituido por una alternancia de secuencia de depósitos piroclásticos y domos de composiciones dacíticas, y lavas de composiciones andesíticas a dacíticas. El basamento del volcán comprendería secuencias piroclásticas (Etapa de Escudo Piroclástico) y sedimentarias lacustres, observándose hacia el norte un basamento intrusivo de composición granítica (ver texto); **b.** Distribución de unidades litológicas, pertenecientes al volcán y al basamento del mismo, en el depósito generado por la avalancha de detritos; **c.** Estructura del actual edificio volcánico, el cual se constituiría de manera similar al edificio precolapso.

material sedimentario correspondería a secuencias aluviales, salinas y lacustres que se habrían localizado hacia los márgenes del volcán (Fig. 5a).

Debido a la ausencia de material del edificio precolapso en los cerrillos de brecha piroclástica y a la posición distal de estos dentro de la avalancha, se propone que los materiales que conforman estos cerrillos se encontraban hacia la parte más lejana del flanco sur del volcán (Fig. 5a). Estos materiales fueron incorporados en el frente de la avalancha durante su avance (Fig. 5b), depositándose hacia las zonas distales de la misma (Fig. 5c). Debido a su rigidez, y a la disminución de su tamaño hacia las zonas distales del depósito, se propone que estos materiales habrían constituido grandes bloques, que se disgregaron a medida que la avalancha avanzó.

Depósitos sedimentarios, principalmente de tipo salinos y lacustres, se habrían localizado hacia el sur del paleovolcán (Fig. 5a), constituyendo parte de la cuenca lacustre que dio origen al salar de Coipasa (Sylvestre *et al.*, 1996; Sylvestre *et al.*, 2000). Estos depósitos sedimentarios fueron parcialmente incorporados a la avalancha, depositándose hacia las zonas distales y marginales de la misma, dando origen a los cerrillos sedimentarios (Fig. 5b).

Por último, los cerrillos andesítico-basálticos corresponderían a material escoriáceo piroclástico proximal de poco volumen. Este se habría encontrado presente en el flanco sur del edificio volcánico, posiblemente asociado a algún centro de emisión lateral (paleocono de piroclastos de flanco) siendo disgregado principalmente en la parte central del depósito.

6. Conclusiones

El volcán Tata Sabaya colapsó parcialmente en el Pleistoceno Superior-Holoceno, y dio origen a un depósito de avalancha de detritos el cual muestra la típica morfología de cerrillos y bloques Toreva. Este depósito se distribuye hacia el sur del volcán e inunda parcialmente la cuenca del salar de Coipasa. Para este depósito, se ha establecido la ocurrencia de 6 tipos diferentes de cerrillos, de acuerdo a sus características morfológicas y composicionales. Además, tomando en cuenta las morfologías (cerrillos y bloques Toreva) presentes y su disposición espacial, se ha podido separar el depósito de avalancha de detritos en 6 distintas facies. El análisis de facies ha permitido reconstruir, al menos parcialmente, el flanco sur del paleoedificio volcánico. El remanente

de este paleoedificio se encontraría en la actualidad cubierto por lavas y domos generados por la actividad volcánica poscolapso. El paleoedificio habría estado constituido, principalmente, por lavas y domos con composiciones que varían de andesitas a dacitas de anfíbol. Por otra parte, hacia los flancos del volcán se disponían depósitos piroclásticos (consolidados y sin consolidar), aluviales, salinos y lacustres que fueron en parte incorporados por el flujo de avalancha durante su avance.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto Fondecyt No. 1040137 a cargo del Dr. J. Clavero R. Los autores agradecen a los Sres. G. Pocoaca y H. Uribe, geólogos pertenecientes al Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN), de Bolivia, por su asistencia logística durante la realización de las campañas de terreno. También agradecen a los Sres. J. Lemp (Chile) y M. Paredes (SERGEOTECMIN) por la colaboración prestada durante estas campañas. Finalmente, se agradece a Dr. M. Suárez, Dr. J.M.Espíndola, J.L. Macías por su contribución en la elaboración de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Arancibia, G.; Rojas, C.; Clavero, J.; Godoy, E. 2009. Análisis estructural del depósito de avalancha de detritos del volcán Llullaillaco (24°43'S), Andes Centrales. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 12: S2-001. Santiago.
- Beck, S.L.; Zandt, G.; Myers, S.C.; Wallace, T.C.; Silver, P.G.; Drake, L. 1996. Crustal-thickness variations in the central Andes. *Geology* 24 (5): 407-410.
- Belousov, A.; Belousova, M.; Schmincke, H.-U. 2001. Structure and emplacement mechanisms of the Roque Nublo debris avalanche, Gran Canaria (Canary Islands). *In* XXVI European Geophysical Society General Assembly: 1 p. Niza, Francia.
- Bernard, B.; van Wyk de Vries, B.; Barba, D.; Leyrit, H.; Robin, C.; Alcaraz., S.; Samaniego, P. 2008. The Chimborazo sector collapse and debris avalanche: Deposit characteristics as evidence of emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176: 36-43.
- Capra, L. 2006. Abrupt climatic changes as triggering mechanisms of massive volcanic collapses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 155: 329-333.
- Capra, L.; Macías, J.L.; Scott, K.M.; Abrams, M.; Garduño-Monroy, V.H. 2002. Debris avalanches and debris

- flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico-behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113: 81-110.
- Catane, S.G.; Cabria, H.B.; Zarco, M.A.H.; Saturay Jr., R.M.; Marisol-Robert, A.A. 2008. The 17 February 2006. Guinsaugon rock slide-debris avalanche, Southern Leyte, Philippines: deposit characteristics and failure mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67: 305-320.
- Clavero, J.E.; Sparks, R.S.J.; Huppert, H.E.; Dade, W.B. 2002. Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile. *Bulletin of Volcanology* 64: 40-54.
- Clavero, J.; Polanco, E.; Godoy, E.; Aguilar, G.; Sparks, R.S.J.; van Wyk de Vries, B.; Pérez de Arce, C.; Matthews, S. 2004. Sustrata influence in the transport and emplacement mechanism of the Ollagüe debris avalanche (northern Chile). *Acta Volcanologica* 16 (1-2): 59-76.
- Clavero, J.; Pocoaca, G.; Godoy, B.; Godoy, E.; Rojas, C. 2006. Influencia del sustrato en el transporte y emplazamiento de la avalancha del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 11, Actas 2: 439-442. Antofagasta.
- de Silva, S.L.; Francis, P.W. 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag: 218 p. Berlin.
- de Silva, S.L.; Davidson, J.P.; Croudace, I.W.; Escobar, A. 1993. Volcanological and petrological evolution of Volcán Tata Sabaya, SW Bolivia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55: 305-335.
- Deruelle, B.; Brousse, R. 1984. 'Nuee Ardente' deposits at Tata Sabaya volcano (Bolivian-Chilean Andes): pumice and lava blocks crystallization from single magma at different depths. *Revista Geológica de Chile* 22: 3-15.
- Francis, P.W.; Wells, G.L. 1988. Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. *Bulletin of Volcanology* 50: 258-278.
- Francis, P.W.; Gardeweg, M.; Ramírez, C.F.; Rothery, D. A. 1985. Catastrophic debris avalanche deposit of Socompa volcano, northern Chile. *Geology* 13: 600-603.
- Glicken, H. 1996. Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-677: 98 p.
- Godoy, B. 2008. Análisis estructural y de facies del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales, Bolivia. Memoria de Título (Inédito), Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas: 107 p.
- Godoy, B.; Aguilera, F.; Ahumada, S.; Mercado, J.L.; Medina, E. 2008. The Debris-Avalanche Deposit (DAD) of Aguilucho-Apacheta Volcanic Complex, Northern Chile. *In Alexander von Humboldt International Conference, No. 4-The Andes: Challenge for Geosciences*, Actas: 82 p. Santiago, Chile.
- Godoy, E.; Clavero, J. 2008. Sobre el control endógeno del colapso parcial del volcán Ollagüe, frente volcánico andino a los 21°S. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 17, Actas 3: 1353-1354. Jujuy, Argentina.
- Karacik, Z. 2006. Stratigraphy and volcanology of the Türkbükü volcanics: Products of a stratovolcano in the Bodrum Peninsula, SW Anatolia. *Geological Journal* 41: 145-162.
- Kervyn, M.; Klaudius, J.; Keller, J.; Mbede, E.; Jacobs, P.; Ernst, G.G.J. 2008. Remote sensing study of sector collapses and debris-avalanche deposits at Oldoinyo Lengai and Kerimasi volcanoes, Tanzania. *International Journal of Remote Sensing* 29: 6565-6595.
- López, D.L.; Williams, S.N. 1993. Catastrophic volcano collapse: Relation to hydrothermal alteration. *Science* 260: 1794-1796.
- Malone, D.H. 1995. Very large debris-avalanche deposit within the Eocene volcanic succession of the northeastern Absaroka Range, Wyoming. *Geology* 23 (7): 661-664.
- O'Callaghan, L.J.; Francis, P.W. 1986. Volcanological and petrological evolution of San Pedro volcano, Provincia El Loa, North Chile. *Journal of the Geological Society of London* 143: 275-286.
- Ponomareva, V.V.; Melekestsev, I.V.; Dirksen, O.V. 2006. Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene-Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 158: 117-138.
- Reiche, P. 1937. The Toreva Block - A distinctive landslide type. *Journal of Geology* 45: 538-548.
- Reid, M.E. 2004. Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization. *Geology* 32 (5): 373-376.
- Siebert, L. 1984. Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22: 163-197.
- Stern, C.R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31 (2): 161-206.
- Sylvestre, F.; Servant-Vildary, S.; Fournier, M.; Servant, M. 1996. Lake levels in the southern Bolivian Altiplano (19°-21°S) during the Late Glacial based on diatom studies. *International Journal of Salt Lake Research* 4: 281-300.

- Sylvestre, F.; Servant, M.; Servant-Vildary, S.; Causse, C.; Fournier, M.; Ybert, J.P. 1999. Lake-level chronology on the Southern Bolivian Altiplano (18°-23°) during Late-Glacial Time and the Early Holocene. *Quaternary Research* 52: 54-66.
- Sylvestre, F.; Servant-Vildary, S.; Servant, M.; Rouchy, J.-M.; Causse, C.; Fournier, M. 2000. Lake-level fluctuations from Uyuni-Coipasa basin, Bolivia between 21 and 8 ¹⁴C kyr B.P.: Diatom and shoreline evidences. *In Central Andes Paleoclimatology Workshop*: 3p. Tucson, Arizona.
- Thouret, J.-C.; Rivera, M.; Wörner, G.; Gerbe, M.-C.; Finizola, A.; Fornari, M.; González, K. 2005. Ubinas: The evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67: 557-589.
- Tibaldi, A.; Corazzato, C.; Kozhurin, A.; Lagmay, A.F.M.; Pasquarè, F.A.; Ponomareva, V.V.; Rust, D.; Tormey, D.; Vezzoli, L. 2008. Influence of substrate tectonic heritage on the evolution of composite volcanoes: Predicting sites of flank eruption, lateral collapse, and erosion. *Global and Planetary Change* 61: 151-174.
- Ui, T. 1983. Volcanic dry avalanche deposits - Identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 18: 135-150.
- Ui, T.; Takarada, S.; Yoshimoto, M. 2000. Debris Avalanches. *In Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; editor). Academic Press: 617-626. San Diego, California.
- van Wyk de Vries, B.; Francis, P.W. 1997. Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature* 387: 387-390.
- van Wyk de Vries, B.; Self, S.; Francis, P. W.; Keszthelyi, L. 2001. A gravitational spreading origin for the Socompa debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 105: 225-247.
- Vezzoli, L.; Tibaldi, A.; Renzulli, A.; Menna, M.; Flude, S. 2008. Faulting-assisted lateral collapses and influence on shallow magma feeding system at Ollagüe volcano (Central Volcanic Zone, Chile-Bolivia Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 171 (1-2): 137-159.
- Voight, B.; Glicken, H.; Janda, R.J.; Douglass, P. M. 1981. Catastrophic rockslide avalanche of May 18. In *The 1980 eruptions of Mount St. Helens* (Lipman, P.W.; Mullineaux, D.R.; editors). U.S. Geological Survey Professional Paper 1250: 347-377. Washington, D.C.
- Voight, B.; Komorowski, J.-C.; Norton, G.E.; Belousov, A.B.; Belousova, M.; Boudon, G.; Francis, P.W.; Franz, W.; Heinrich, P.; Sparks, R.S.J.; Young, S.R. 2002. The 26 December (Boxing Day) 1997 sector collapse and debris avalanche at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *In The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T.H.; Kokelaar, B.P.; editors). Geological Society of London *Memories* 21: 363-407.
- Wadge, G.; Francis, P.W.; Ramírez, C.F. 1995. The Socompa collapse and avalanche event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 66: 309-336.
- Wooller, L.; van Wyk de Vries, B.; Murray, J.B.; Rymer, H.; Meyer, S. 2004. Volcano spreading controlled by dipping substrata. *Geology* 32 (7): 573-576.
- Wooller, L.; van Wyk de Vries, B.; Cecchi, E.; Rymer, H. 2009. Analogue models of the effect of long-term basement fault movement on volcanic edifices. *Bulletin of Volcanology* 71: 1111-1131.
- Wörner, G.; Moorbath, S.; Harmon, R.S. 1992. Andean Cenozoic volcanic centers reflect basement isotopic domains. *Geology* 20: 1103-1106.