

Características microtexturales como indicadores del transporte y emplazamiento de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México)

Matteo Roverato* y Lucia Capra

Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México,
Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, 76230 Querétaro, México.

*roteo@hotmail.com

RESUMEN

Durante la historia eruptiva del Volcán de Colima han ocurrido numerosos colapsos parciales del edificio, acompañados por el emplazamiento de grandes depósitos de avalanchas de escombros (AdE). En este trabajo se consideran dos depósitos de avalancha, previamente descritos por Roverato et al. (2011, J. Volc. Geoth. Res., 207, 33-46), que afloran en el sector suroriental del actual edificio, la AdE San Marcos (AdE-SM; $V \sim 1.3 \text{ km}^3$) y la AdE Tonila (AdE-T; $V \sim 1 \text{ km}^3$). El fechamiento de material orgánico relacionado a estos depósitos ha arrojado edades de $>28 \text{ ka cal. AP}$ para el depósito San Marcos y $\sim 15 \text{ ka cal. AP}$ para el depósito Tonila. El colapso San Marcos fue promovido principalmente por deformaciones volcano-tectónicas que originaron una avalancha de escombros con características “secas” (contenido de agua $<10\%$). Por el contrario el colapso de Tonila que emplazó la AdE-T ocurrió durante condiciones paleoclimáticas “húmedas” en un periodo caracterizado por la presencia de mucha humedad en el ambiente y de agua en el edificio volcánico que jugaron un papel relevante en la inestabilidad del volcán y en los procesos de transporte de la avalancha. En el presente trabajo se aportan nuevos datos sobre los procesos involucrados en el transporte y en los mecanismos de emplazamiento de las avalanchas de escombros a partir de una detallada caracterización granulométrica y microtextural de los depósitos investigados. En general las AdE-SM y AdE-T mantuvieron un comportamiento dinámico masivo durante su desplazamiento, sin un proceso de depósito selectivo. La AdE-SM tuvo el comportamiento propio de un flujo granular inercial “seco” en el que predominan las interacciones grano-grano de elevada energía. En la AdE-T, el alto contenido de material fino, sumado a un contenido relevante de fluidos en la masa antes del colapso (debido a la saturación parcial del edificio y a la gran humedad presente en el ambiente) pudo haber sido relevante en el aumento de su movilidad. Para ambas AdE, a nivel microscópico, las marcas de impacto, las fracturas de diferente intensidad y los cristales parcialmente rotos sugieren una interacción entre las partículas de tipo colisional, puntual, rápida y de alta energía. En general las evidencias microscópicas encontradas sugieren una interacción de los granos de tipo normal (de impacto) mientras que la evidencia de esfuerzos de cizalla (rasguños y surcos), en comparación, es ampliamente menor.

Palabras clave: avalancha de escombros, microtexturas, microscopía electrónica de barrido, mecanismos de emplazamiento, Volcán de Colima, México.

ABSTRACT

During its history Colima volcano has experienced numerous partial edifice sector collapses with the emplacement of debris avalanche deposits (DAD) of contrasting volume, morphology and texture. A previous detailed stratigraphic study in the southeastern sector of the volcano described by Roverato *et al.* (2011, *J. Volc. Geoth. Res.*, 207, 33-46) allowed the recognition of two debris avalanche deposits named San Marcos DAD (SM-DAD $V \sim 1.3 \text{ km}^3$) and Tonila DAD (T-DAD $V \sim 1 \text{ km}^3$). Radiocarbon dates of organic material, directly associated with these deposits, gave ages of $>28 \text{ kyr cal. BP}$ for the SM-DAD and $\sim 15 \text{ kyr cal. BP}$ for the T-DAD. The San Marcos collapse was promoted by ongoing volcano-tectonic deformation. The failure event triggered a “dry” debris avalanche (water content $<10\%$). In contrast, the Tonila failure occurred in “wet” paleoclimate conditions during a period characterized by high humidity; the fact that the volcanic system was partially water-saturated was an important factor in the volcanic instability and transportation processes. This work sheds light on the transport and emplacement mechanisms of debris avalanches based on a detailed granulometric and microtextural analysis of the studied deposits. SM-DAD and T-DAD had a massive dynamic behavior during their emplacement, characterized by a lack of selective depositional process. The SM-DAD originated from a “dry” inertial granular flow in which high-energy grain-grain interaction prevailed. Abundant fines and fluids within the mass before the collapse could have enhanced its mobility. In fact, the water content in the flowing mass promoted positive pore-water pressure that reduced the frictional energy dissipation enhancing flow mobility. Both DADs show partially broken crystals/particles, percussion marks and fractures of different intensity that are the result of punctual, rapid and high-energy impacts. In general, the observed microscopic features suggest that the particle-particle interaction occurred in a collisional regime characterized by grains subjected to short, high velocity impacts, while evidence of frictional interaction is less common than that of the collisional type.

Key words: debris avalanche deposit, microtextures, scanning electron microscopy, emplacement mechanisms, Colima Volcano, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de crecimiento y desarrollo de volcanes activos está caracterizada por episodios de colapso provocados por distintos factores, ya sean endógenos o exógenos, que han ocurrido en numerosos volcanes del mundo (Siebert *et al.* 1987, McGuire, 1996; van Wyk de Vries *et al.*, 2001; Bernard *et al.*, 2008; Zernack *et al.*, 2010; Roverato *et al.*, 2011). A partir del colapso parcial o total de un edificio volcánico se originan flujos de avalanchas de escombros (AdE), que son flujos granulares que se desplazan bajo la fuerza de gravedad en las laderas de un volcán. Existe una extensa bibliografía (Komorowski *et al.*, 1991; Palmer *et al.*, 1991; Glicken, 1996; Clavero *et al.*, 2002; Siebert *et al.*, 2004; Bernard *et al.*, 2008; Bernard *et al.*, 2009; Zernack *et al.*, 2010; Roverato *et al.*, 2011) en donde se establecen con claridad las características texturales de estos depósitos, como la textura en rompecabezas así como la morfología de los depósitos, caracterizados por montículos de varias decenas o hasta centenas de metros de altura que, junto a la presencia de un cráter en herradura en el volcán, representan las claves típicas para interpretar la ocurrencia del colapso en un volcán. Sin embargo, el mecanismo de emplazamiento de estos flujos de avalanchas es todavía tema de debate, ya que hasta la fecha no existe un modelo único que describa el mecanismo de transporte y emplazamiento. El modelo generalmente aceptado considera un mecanismo de transporte en masa, en donde el movimiento se concentra en

una superficie basal de cizalla (Takarada *et al.*, 1999). Sin embargo, existe todavía controversia sobre los mecanismos que actúan adentro de la masa granular y cómo estos afectan la movilidad del mismo. Con el presente trabajo se pretende aportar evidencias de los distintos mecanismos que actúan en el interior de un flujo de avalancha de escombros y de cómo estos pueden contribuir a su movilidad. En particular se presentan aquí datos de dos avalanchas de escombros que se originaron en el Pleistoceno Tardío en el Volcán de Colima, San Marcos (AdE-SM) y Tonila (AdE-T), depósitos que ya fueron previamente descritos, en cuanto a su origen y distribución (Roverato *et al.*, 2011). Una detallada caracterización granulométrica y el estudio microtextural (al microscopio de barrido) de los depósitos de AdE-SM y AdE-T, son utilizados aquí como instrumento clave para ayudar a comprender la dinámica que actúa durante el transporte y los mecanismos de emplazamiento de estos flujos granulares de gran magnitud.

VOLCÁN DE COLIMA

El Volcán de Colima es parte del Complejo Volcánico de Colima (CVC), que es un gran complejo andesítico localizado en el sector occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). El CVTM es un arco volcánico continental calcálico que se extiende a través de México central y está asociado a la subducción de las placas Cocos

y Rivera por debajo de la placa de Norteamérica (Ponce *et al.*, 1992; Pardo y Suarez, 1993). (Figura 1). Este arco magmático continental presenta una longitud aproximada de 1000 km y amplitud irregular de entre 80 y 230 km con una dirección preferencial E-W en la porción central y oriental. Sin embargo su porción occidental muestra una dirección WNW-ESE (Gómez-Tuena *et al.*, 2007) y está relacionada con la apertura del Golfo de California y caracterizada por la triple intersección de los grabens Colima-Tepic-Chapala (Ferrari *et al.*, 1994). El CVC se localiza en el graben de Colima (orientación NE-SW), que junto al graben de Tepic (orientación NW-SE) separa el bloque Jalisco de la placa de Norteamérica al oeste y el bloque Michoacán al este (Ferrari *et al.*, 1994, Bandy *et al.*, 2005) (Figura 1). El CVC se compone de tres edificios volcánicos de composición andesítica, Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima (Luhr y Carmichael, 1980). Los tres centros eruptivos están alineados con una orientación N-S relacionada a un sistema de fallas que afectan el CVC y que pudo haber sido un factor importante en el proceso de migración del vulcanismo hacia el sur (Garduño *et al.*, 1998) y de su marcada inestabilidad que ha llevado a frecuentes colapsos volcánicos y emplazamiento de avalanchas de escombros (Norini *et al.*, 2010). En la historia eruptiva del CVC se han reconocido grandes y numerosos eventos de colapso lateral que dieron

origen a depósitos de avalancha de escombros (Robin *et al.*, 1987; Luhr y Prestegard, 1988; Stoores y Sheridan, 1992; Komorowski *et al.*, 1993 y 1997; Capra y Macias, 2002; Cortés *et al.*, 2010; Roverato *et al.*, 2011).

DEPÓSITOS DE AdE SAN MARCOS Y TONILA

La estratigrafía de los depósitos de AdE-SM y AdE-T fue descrita en detalle en el trabajo de Roverato *et al.* (2011). Estos depósitos se distribuyen en un área de aproximadamente 200 km² y están delimitados por el río Naranjo al SE y por la barranca Beltrán al NE; sus volúmenes son de ~1.3 km³ para la AdE-SM y ~1 km³ para la AdE-T (Figura 2). El fechamiento de material orgánico (carbón y material orgánico de acumulación) ha arrojado edades de >28 ka cal. AP para el depósito de AdE-SM y ~15 ka cal. AP para el depósito de AdE-T.

Depósito de AdE San Marcos

El colapso San Marcos fue promovido por la geometría del edificio (flancos empinados) y por deformaciones volcano-tectónicas, y fue acompañado por una erupción

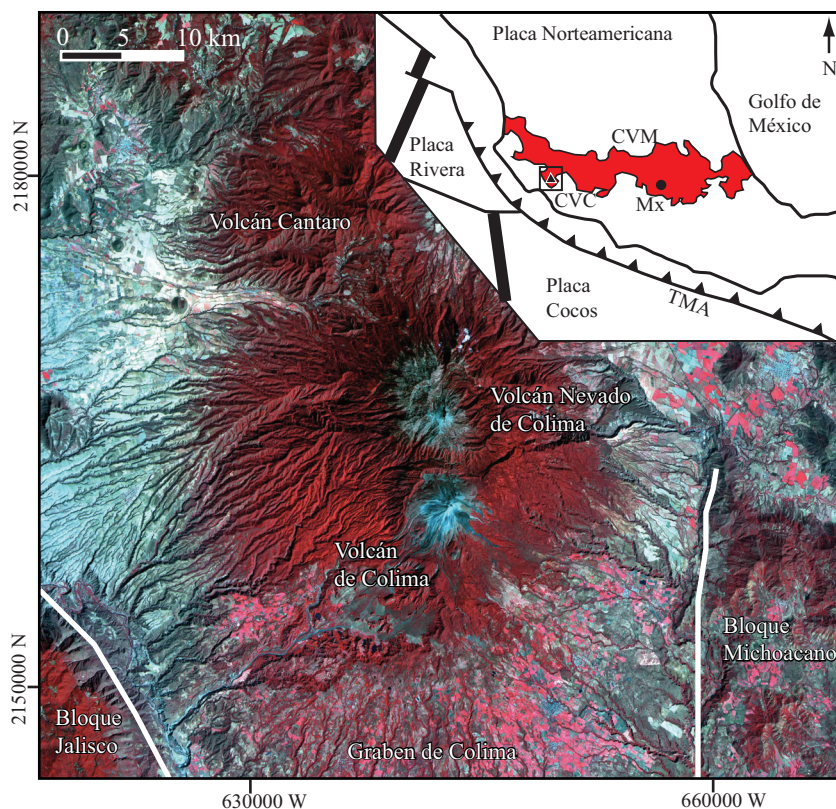


Figura 1. Mapa de localización del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM); CVC: Complejo Volcánico de Colima; Mx: Ciudad de México; TMA: Trinchera Mesoamericana. La imagen Aster muestra la localización de los bloques Jalisco y Michoacán y el Complejo Volcánico de Colima insertado en el Graben de Colima; las líneas blancas representan las fallas principales del graben.

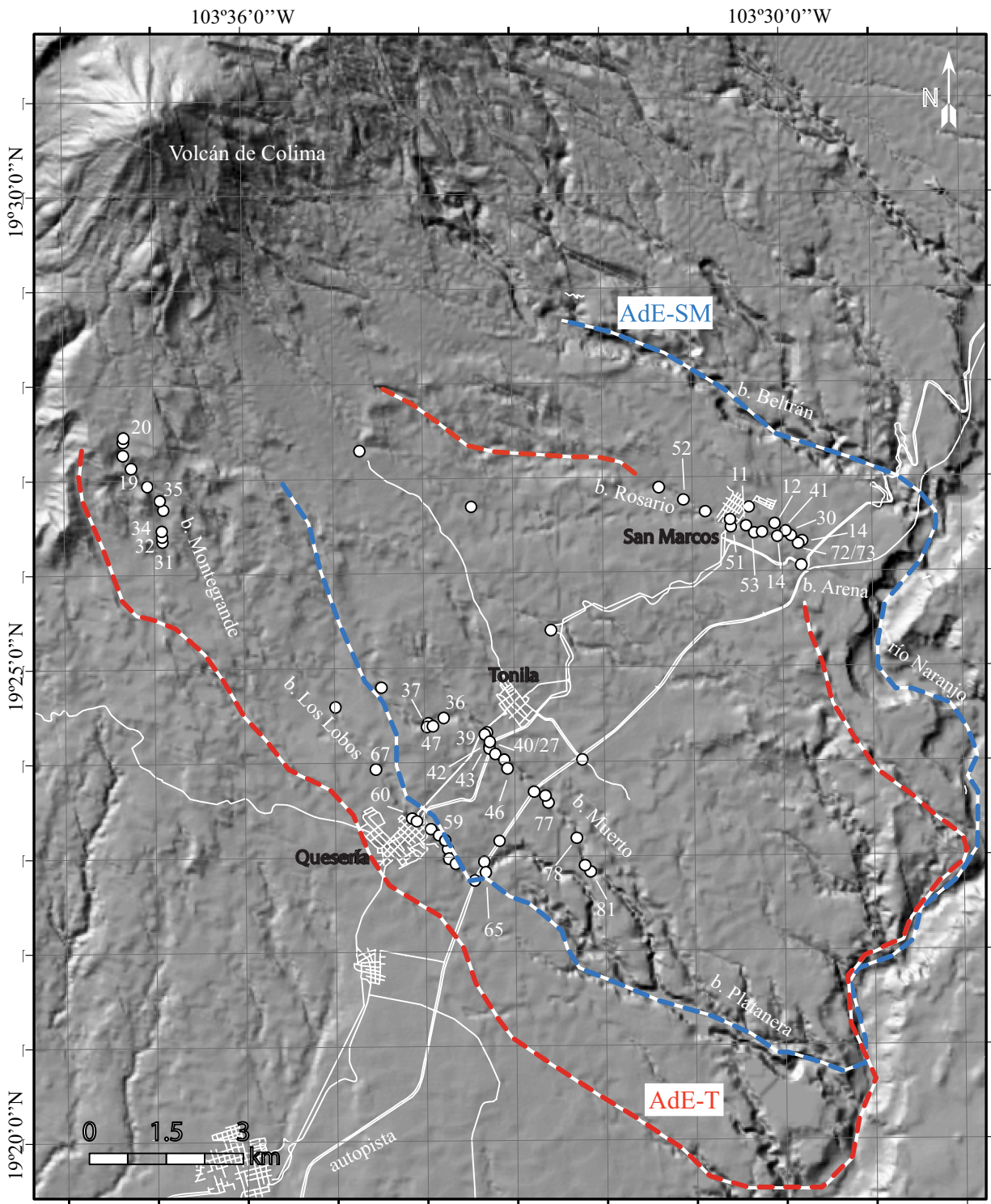


Figura 2. La imagen de elevación digital muestra la distribución de los depósitos de avalancha de escombros San Marcos (DAde-SM, línea discontinua azul) y Tonila (DAde-T, línea discontinua roja, así como los sitios investigados). Los puntos blancos indican los afloramientos con el número respectivo.

magmática responsable del emplazamiento de depósitos de flujo piroclástico (Roverato *et al.*, 2011). El depósito SM muestra características de avalancha de escombros “seca” (contenido de agua <10%) (Pierson y Costa, 1987), con abundantes clastos con estructuras en rompecabezas y

con repentinos cambios de facies a lo largo de su extensión debido a cambios en la litología de los grandes bloques removilizados desde el edificio volcánico, con evidentes cambios de coloración debido al diferente grado de alteración hidrotermal. El depósitos (Figura 3a) se presenta



Figura 3. Las fotos muestran la diferencia textural de los depósitos de avalancha de escombros (a) San Marcos (AdE-SM) y (b) Tonila (AdE-T). El primero se presenta en facies de matriz enriquecida en clastos >256 mm (fMrc), mientras que el depósito de AdE-T presenta una textura en facies de matriz (fM) con clastos <256 mm.

con una alta concentración de clastos de tamaño >256 mm (facies de matriz rica en clastos - fMrc).

Depósito de AdE Tonila

El evento responsable del emplazamiento de la AdE-T ocurrió durante la fase final del Último Máximo Glacial (Glacial Tardío, GTA - 18–15 ka cal. AD) (Caballero *et al.*, 2010), periodo caracterizado por una grande humedad y la posible presencia de un casquete glaciar en la cumbre del volcán con una importante circulación de agua en el edificio (Roverato *et al.*, 2011). El evento Tonila fue fuertemente influenciado por las condiciones paleoclimáticas que han jugado un papel relevante en la inestabilidad del edificio volcánico y en los mecanismos de transporte y emplazamiento del cuerpo de avalancha, mismos que se ven reflejados en las características texturales del depósito. La AdE-T presenta características similares al depósito San Marcos en zonas cercanas (<8 km de la cumbre), sin embargo, hacia las áreas marginales y distantes (>15 km) muestra un cambio evidente en su textura, que se caracteriza por tener una abundante fracción de matriz arenosa más homogénea y parcialmente cementada, rodeando a porciones más heterogéneas donde se pueden reconocer las texturas de avalancha de escombros antes descritas. Esta facies ha sido definida como híbrida (Capra y Macías, 2002; Roverato *et al.*, 2011), ya que muestra características transicionales entre una avalancha

de escombros a un flujo de escombros, lo que se relaciona con la presencia de abundantes fluidos en la masa antes de su removilización. La AdE-T (Figura 3b) se caracteriza por la abundancia de clastos de tamaño <256 mm y abundante matriz (facies de matriz - fM). Al igual que el evento San Marcos, el evento Tonila estuvo caracterizado por una erupción postcolapso como lo demuestra la presencia de depósitos piroclásticos directamente en contacto con la avalancha y con características texturales que indican una componente hidromagmática (Roverato *et al.*, 2011) que nuevamente demuestran una elevada circulación de fluidos en el volcán al momento del colapso.

METODOLOGÍA

Como parte del estudio sedimentológico de los depósitos de AdE-SM y AdE-T se analizaron 28 muestras colectadas a lo largo de las barrancas investigadas, 14 muestras pertenecen al depósito San Marcos y 14 al depósito Tonila. El análisis granulométrico comprende tres métodos para cada clase granulométrica estudiada: gruesa, media y fina.

1) La fracción gruesa comprende las partículas de tamaño entre -4ϕ y -9ϕ (16 y 512 mm) y el procedimiento analítico utilizado se basa en lo propuesto por Sarocchi *et al.* (2005), usando el método de Rosiwal (1898). Las partículas se midieron por medio de imágenes digitales de alta resolución en las cuales se creó una malla con abertura

arbitraria en función del diámetro promedio de las partículas. Las imágenes fueron analizadas con el programa "Image Pro Plus".

2) La fracción media comprende los tamaños desde -3ϕ a 4ϕ (8 mm a $63\ \mu\text{m}$). Este análisis se lleva a cabo con el tamizado en seco utilizando mallas con un intervalo de 1ϕ . Las muestras fueron agitadas con un equipo Ro-Tap RX-29 (W.S.Tyler) durante un tiempo de 7-11 minutos. En promedio se utilizó medio kilo de muestra, pesando cada fracción obtenida en una báscula electrónica de precisión.

3) La porción fina $>4\phi$ ($<63\ \mu\text{m}$) fue analizada con un fotosedimentógrafo Frisch – Analysette 20 que utiliza la técnica de difracción láser. Los resultados obtenidos representan la clase granulométrica comprendida entre 4ϕ y 9ϕ con un intervalo de 1ϕ . Los datos de los tres métodos fueron normalizados para obtener el rango completo (de -9ϕ a 9ϕ) del tamaño de las partículas de cada muestra analizada.

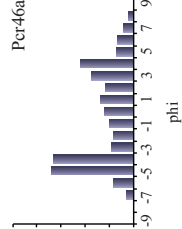
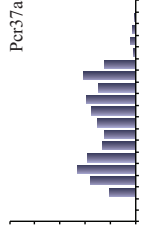
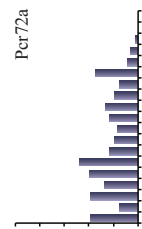
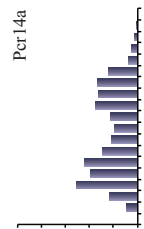
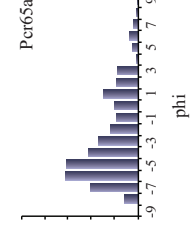
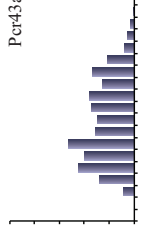
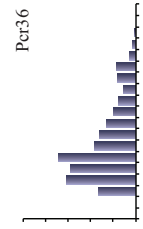
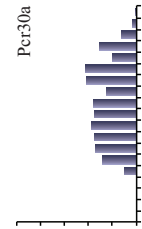
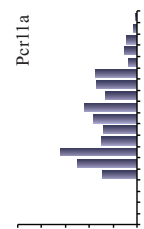
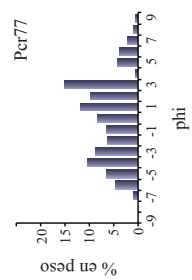
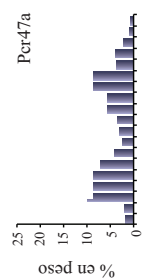
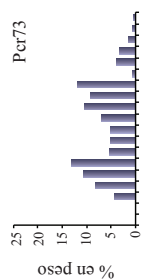
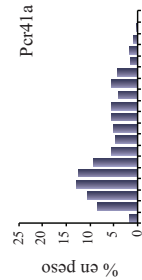
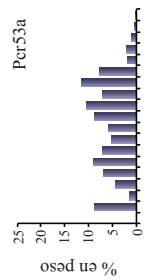
Para obtener los parámetros estadísticos de moda, selección, curtosis y asimetría se utilizó el programa KWare SFT (versión 2.19.0168*, 31/07/2007 – Ken Wohletz). Para el análisis microscópico de la textura de las partículas se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL-35C equipado con un detector de dispersión de energía Tractor Northern, con una corriente de 15 kV y un tiempo de adquisición de 20 s. Para este propósito se procesaron ocho muestras, cuatro del depósito de AdE-SM y cuatro del depósito AdE-T. Cada muestra, compuesta por partículas de 1–0.5mm fue montada sobre un cilindro de aluminio y recubierta por carbono.

CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA

Los histogramas presentados en las Figuras 4a y 4b muestran la distribución granulométrica de los depósitos investigados en este trabajo, la cual se describe de afloramientos proximales a distales (Figura 2). La mayoría de las distribuciones granulométricas muestran, en general, un comportamiento bimodal con modas principalmente entre -5ϕ y -3ϕ para las fracciones más gruesas, y 3ϕ – 4ϕ para las finas. Algunas distribuciones presentan un perfil con tendencia unimodal como en el caso de Pcr14c y 32 (Tabla 1) mientras que otras tienen distribuciones trimodales hasta multimodales como en el caso de Pcr53a, 11c, 12b, 31, 65d, 67 y 34. Muchos histogramas (p. ej. Pcr11a, 73 77, 35, 65d, 67) exhiben una pequeña moda en el rango de los limos entre 5ϕ y 7ϕ , aunque el porcentaje en peso de estas clases sigue siendo muy bajo comparado con las otras fracciones. Por lo general, en ambos depósitos no se nota una gran variación granulométrica con la distancia, aunque es visible un ligero incremento para la AdE-T. Por ejemplo, si consideramos los dos extremos de la AdE-T, Pcr20DA (afloramiento más cercano–6 km) y Pcr65d (afloramiento más distante–18 km), se nota una ligera disminución del tamaño de partícula con la distancia. Pcr65d muestra un aumento notable de los valores para cada fracción entre 0ϕ y 3ϕ con un aumento

considerable, también, en las fracciones limo-arcillosas (5ϕ – 9ϕ). Por lo general el depósito de AdE-T está muy mal seleccionado y con grandes variaciones laterales de facies. Por ejemplo, los histogramas de las muestras Pcr35 y Pcr32 (Figura 4b) presentan una semejanza relevante, pero son muy diferentes del correspondiente a la muestra Pcr34, a pesar de que las tres muestras afloran relativamente cerca. Las curvas acumulativas (Figura 5) en general no muestran grandes variaciones entre un depósito y el otro. Para ambos depósitos se observa una ligera disminución en la pendiente de las curvas de las fracciones de grava fina - arena ($-2\phi \rightarrow 4\phi$) para volver a tener un ligero aumento de la pendiente en el campo de los limos. Las cúspides que se observan en algunas curvas (Figura 5), debidas a cambios repentinos de la pendiente, representan la escasez de material de algunas fracciones granulométricas, generalmente 4ϕ y 5ϕ , que se puede observar en los histogramas de la Figura 4. Observando la Tabla 1 se aprecia que el depósito de AdE-SM presenta una mayor concentración de clastos en la fracción grava-arenosa que la avalancha Tonila, cuya distribución granulométrica migra hacia fracciones más finas. Los contenidos de grava, arena, limo y arcilla de cada muestra están representados en la Tabla 1. La avalancha San Marcos presenta un contenido de grava que varía de 27 a 72% en peso, aunque predominan las concentraciones entre 42 y 69% en peso con un valor medio de 50% en peso. El contenido de matriz (Tabla 1) es muy abundante para ambos depósitos (siendo mayor en la AdE-T). La matriz en la avalancha San Marcos varía entre un mínimo de 28% hasta un máximo de 72% en peso, con un valor medio de 49% en peso (tabla 1), y para la AdE-T, varía entre 24% y 90% en peso con un valor medio de 56% en peso (tabla 1). Para la AdE-SM el contenido de finos (limo + arcilla) tiene un porcentaje bastante elevado pasando de un mínimo de 2 a un máximo de 17% en peso con una concentración más abundante entre 4 y 9% en peso y un valor medio de 7% en peso mientras que el contenido de arcilla es mínimo con valores máximos alrededor de 0,4–0,5% en peso. La avalancha Tonila presenta un contenido de grava ligeramente menor que el depósito de AdE-SM, el cual está caracterizado por valores que varían entre 10% y 75% en peso, con predominancia de concentraciones entre 20% y 60% en peso y un valor medio de 43% en peso (Tabla 1). El contenido de finos es más abundante que en la avalancha San Marcos, con valores que varían entre 2% y 17% en peso y un valor medio de 8% en peso. Los contenidos de arcilla, aunque bajos, suben 0.3 puntos respecto a los del depósito San Marcos, presentando valores máximos de 0.7% en peso aproximadamente (Tabla 1). Como ya se mencionó, la matriz varía de 24% a 90% en peso con un valor medio de 56% en peso (Tabla 1). Graficando estos datos en un diagrama ternario de grava-arena-finos(limo+arcilla) (Figura 6) se confirma que las muestras del depósito San Marcos abarcan un área cargada hacia las gravas, mientras que las muestras de la avalancha Tonila se concentran hacia las arenas.

a) DAdE San Marcos



b) DAdE Tonila

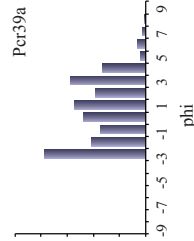
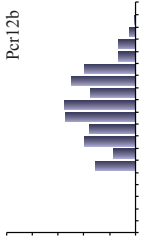
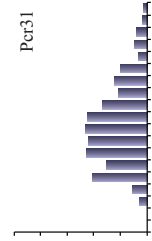
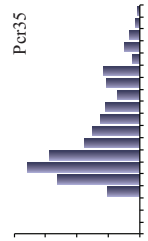
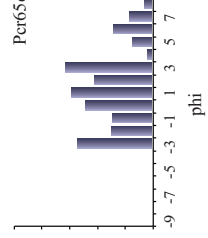
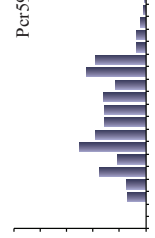
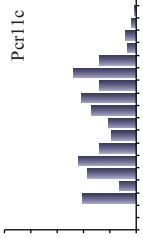
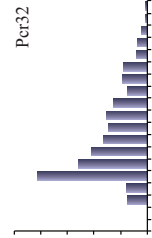
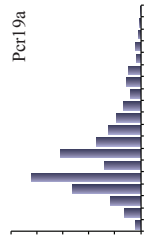
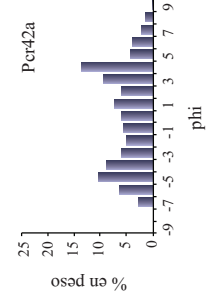
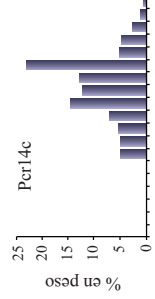
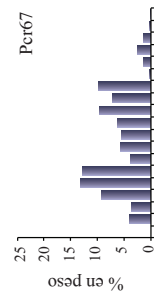
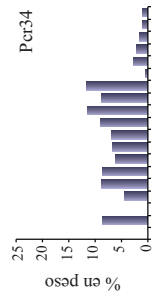
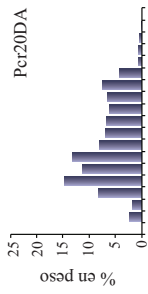


Figura 4. Histogramas de la distribución granulométrica de los depósitos de avalancha de escombros (DAdE): (a) San Marcos y (b) Tonila. Los afloramientos están organizados de más cercano a más distante de la cumbre. a: Per53a → Per65a; b: Per20DA → Per65d).

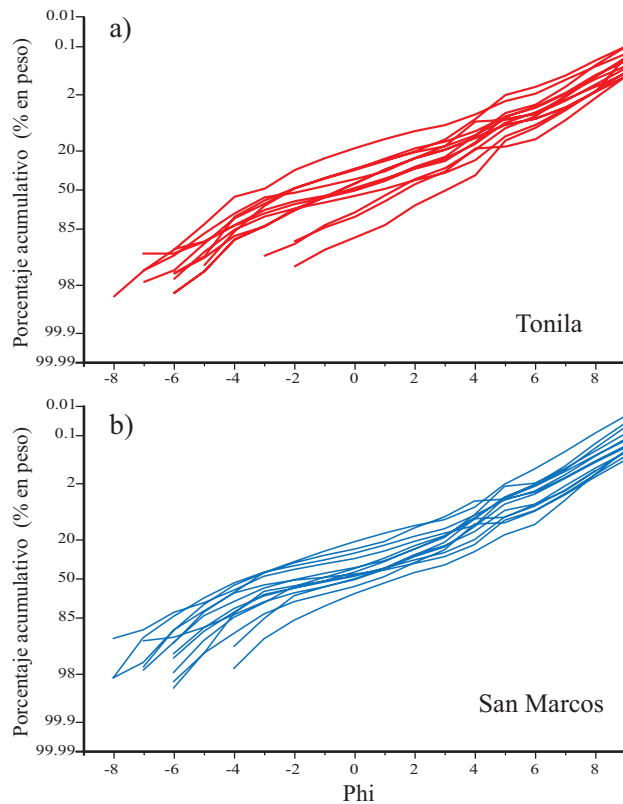


Figura 5. Curvas acumulativas de los depósitos de avalancha de escombros (a) Tonila y (b) San Marcos. Se hace notar que las cúspides que se observan en algunas curvas, debidas a cambios repentinos de la pendiente, reflejan la escasez de material de algunas fracciones granulométricas, generalmente 4ϕ y 5ϕ .

La Tabla 2 presenta los parámetros estadísticos (Mz , σ , sk , K) para ambos depósitos de AdE-SM y AdE-T, los afloramientos están organizados del más cercano al más distante. Para el depósito de AdE-SM los parámetros no muestran una gran variación con la distancia. La media (Mz) se mantiene con valores marcadamente negativos que reflejan el dominio de las gravas; la desviación estándar (σ) varía entre 3.4 y 4.37, valores que representan un grado de selección marcadamente pobre, que además, no indican ningún tipo de variación con la distancia. Los valores de la asimetría, *skewness* (sk), muestran una tendencia positiva hacia las fracciones más finas. La curtosis (K) tiene valores entre 0.63 y 1.13.

Para la AdE-T, el único parámetro que muestra una ligera variación es la media, la cual tiende a aumentar con la distancia, lo que se traduce en una disminución del tamaño de los clastos hacia áreas más marginales. La desviación estándar refleja una mala selección y varía entre 2.55 y 4.19, valores en promedio más bajos que los del depósito de AdE-SM. El parámetro *skewness* tiene una tendencia positiva hacia las fracciones más finas y la curtosis tiene valores muy parecidos a los del depósito San Marcos.

La Figura 7 muestra tres diagramas de tendencia de los parámetros estadísticos más significativos (Mz , sk , σ) que permiten comparar los dos depósitos de AdE.

ANÁLISIS TEXTURAL MICROSCÓPICO

El análisis microscópico (Figura 8) aplicado a ocho muestras de los dos depósitos toma en cuenta las características texturales superficiales de las partículas de tamaño entre 1 y 0.5 mm ($0-1\phi$). Se identificaron varios tipos de fracturas, tales como caras de fracturas, surcos rectos, fracturas concoides, escalones arqueados, marcas de percusión y rasguños de diferente intensidad. Las partículas analizadas son principalmente líticas y cristales de piroxeno y, en menor medida, de anfíbol. Los clastos en general se presentan con una morfología heterogénea; algunos son alargados, mientras otros son más esféricos (Figura 8a) con partes angulosas o redondeadas como en el caso del cristal de la Figura 8b con bordes perfectamente redondeados. Las fracturas en general se encuentran en ambos tipos de fragmentos, líticos y cristales, y es común que las fracturas

Tabla 1. Contenidos en porcentaje de grava, arena, limo y arcilla de las muestras estudiadas de los depósitos de avalancha de escombros San Marcos (AdE-SM) y Tonila (AdE-T). L: limo; Arc: arcilla.

Muestra	Grava (-8φ a -2φ)	Arena (-1φ a 4φ)	Limo (5φ a 8φ)	Arcilla (≥ 9φ)	Finos (L+Arc)	Matriz (-1φ a 9φ)
AdE-SM						
Pcr53a	42.84	51.67	5.25	0.25	5.50	57.17
Pcr11a	42.70	50.16	6.82	0.32	7.14	57.3
Pcr41a	65.42	30.00	4.45	0.14	4.59	34.59
Pcr14a	54.20	41.81	3.93	0.06	3.99	45.80
Pcr30a	27.41	55.24	17.15	0.30	17.45	72.69
Pcr72a	52.54	33.60	4.12	0.04	4.16	37.76
Pcr73	46.76	43.82	9.10	0.34	9.44	53.26
Pcr37a	47.73	49.9	2.28	0.09	2.37	52.27
Pcr47a	50.76	38.66	10.16	0.43	10.59	49.25
Pcr36	72.00	25.90	2.10	0.02	2.12	28.02
Pcr43a	50.80	44.90	4.15	0.15	4.30	49.20
Pcr46a	47.65	43.00	9.34	0.00	9.34	52.34
Pcr77	36.74	51.71	11.0	0.55	11.55	63.26
Pcr65a	68.91	26.68	4.19	0.22	4.41	31.09
Valor medio	50	42	7	0.2	7	49
AdE-T						
Pcr20DA	59.82	38.15	1.93	0.10	2.03	40.18
Pcr19a	75.35	21.92	2.57	0.16	2.73	24.65
Pcr35	59.59	33.95	6.0	0.45	6.45	40.40
Pcr34	43.46	48.03	7.5	1.00	8.50	56.53
Pcr32	60.10	34.22	5.42	0.27	5.69	39.91
Pcr31	44.34	47.79	7.21	0.72	7.93	55.72
Pcr67	53.66	38.85	6.28	0.21	6.49	45.34
Pcr11c	45.15	50.00	4.75	0.10	4.85	54.85
Pcr12b	22.51	68.35	8.88	0.25	9.13	77.48
Pcr14c	9.96	75.76	13.73	0.54	14.27	90.03
Pe59	44.01	50.34	5.27	0.38	5.65	55.99
Pcr39a	29.87	66.50	3.56	0.06	3.62	70.12
Pcr42a	39.59	48.20	12.1	0.20	12.30	60.50
Pcr65d	21.04	61.55	16.7	0.71	17.41	78.96
Valor medio	43	49	7	0.4	8	56

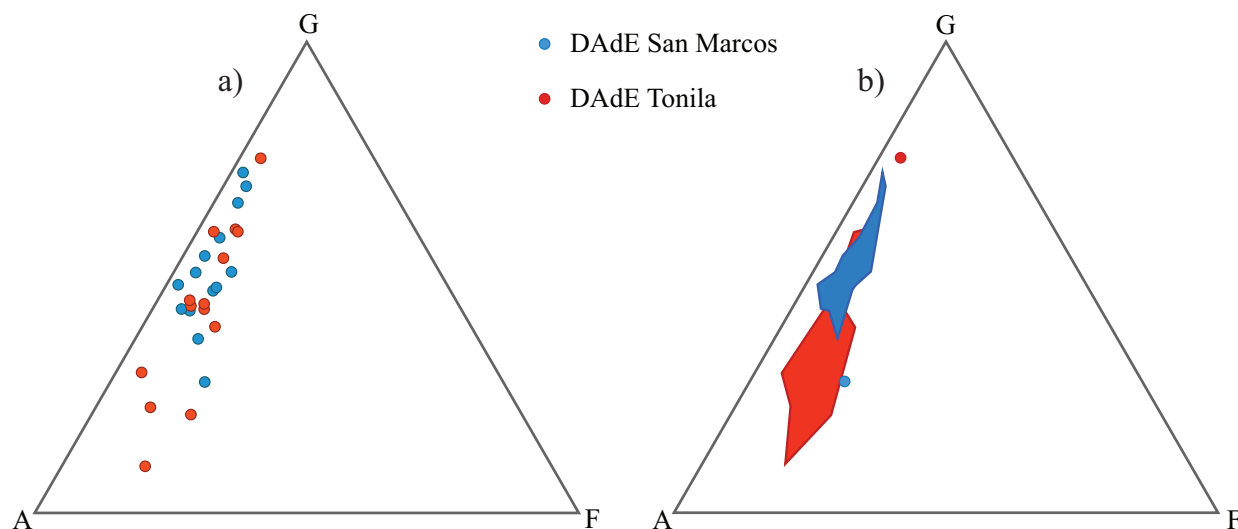


Figura 6. Diagramas triangulares Grava-Arena-Finos(Limo+Arcilla) de las muestras de los depósitos de avalancha de escombros (DAdE) San Marcos (a) y Tonila (b). El diagrama (a) representa los puntos gráficos de cada muestra recolectada, y el diagrama ternario (b) muestra las áreas de tendencia de los dos depósitos de avalancha de escombros.

en los líticos se observen tanto en la matriz del clasto, como en los cristales contenidos en el mismo (Figura 8c). Por el contrario, generalmente las fracturas en los cristales no se propagan hacia la matriz del clasto como se observa en la Figura 8d. La misma foto muestra los planos de foliación del cristal. Es muy común observar cristales truncados (Figura 8e) y/o rotos (Figura 8f), así como con texturas similares a las que Komorowski *et al.* (1991) y Caballero y Capra (2011) definieron como “geometría en escalera” (Figura 8g y 8h). En general los cristales conservan claramente cualquier tipo de rasgo y fractura. La Figura 8i muestra una fractura irregular con una pequeña estructura “pull-apart” que nos indica la cinemática de movimiento de las dos porciones del cristal, y en la Figura 8j se puede observar un pequeño desplazamiento dado por la fractura. Otro rasgo muy común son los escalones producidos por desgarres (Figuras 8 k-o). Otros rasgos característicos son los rasguños y surcos. En la Figura 8p se pueden notar rasguños paralelos en un cristal de piroxeno y en la Figura 8q se observan rasguños paralelos con profundidad mayor en la porción derecha de cada incisión. Surcos paralelos espaciados se observan en un cristal de anfíbol en la Figura 8r. Las marcas de impacto son abundantes, como las mostradas en la Figura 8s con una secuencia de impactos consecutivos. En cambio, en la Figura 8t se puede apreciar una marca de impacto más amplia que ha fracturado y molido el lugar del choque en el cristal. Es bastante común encontrar en depósitos intemperizados, pequeños agujones triangulares de pocas micras de tamaño, que se desarrollan dentro de las fracturas de los anfíboles. Este tipo de alteración definida como *etching* (Velbel, 1989) o sea una incisión o, más bien, una removilización química que afecta partes del anfíbol (usualmente hornblenda) y deja en los planos del cristal pequeñas excavaciones y en las extremidades los típicos agujones triangulares (Figura 8u).

Tabla 2. Parámetros estadísticos obtenidos en las muestras analizadas de los depósitos de avalancha de escombros (DAdE) San Marcos y Tonila. Los afloramientos están organizados desde el más cercano hasta el más distante desde el origen.

	Media (<i>Mz</i>)	Desviación estándar (σ)	Skewness (<i>sk</i>)	Curtosis (<i>K</i>)
<i>DAdE San Marcos</i>				
53a	-1.29	4.06	-0.17	0.79
11a	-0.75	3.40	0.13	0.78
41a	-3.48	4.15	0.36	1.13
14a	-2.29	3.90	0.16	0.69
30a	0.48	3.49	0.02	0.78
73	-1.51	3.88	0.01	0.76
72a	-3.25	4.5	0.24	0.77
37a	-1.75	3.64	-0.01	0.70
47a	-1.82	4.37	0.16	0.63
36	-3.53	3.28	0.38	1.01
43a	-1.74	3.48	0.14	0.79
46a	-1.16	3.91	0.16	0.64
77	-0.67	3.6	-0.11	0.83
65a	-3.50	3.51	0.37	0.80
<i>DAdE Tonila</i>				
20DA	-2.41	3.40	0.28	0.78
19a	-3.74	3.17	0.27	1.16
35	-1.97	3.55	0.45	0.93
34	-1.19	4.19	-0.11	0.82
32	-2.37	3.48	0.35	0.88
31	-1.26	3.55	0.16	1.00
67	-2.22	3.99	0.17	0.82
11c	-1.38	3.83	-0.12	0.71
12b	0.34	2.93	0.01	0.92
14c	1.68	2.55	-0.18	1.08
59	-1.11	3.65	0.03	0.77
39a	-0.17	2.62	-0.02	0.68
42a	-0.61	4.15	-0.09	0.68
65d	0.78	3.28	0.10	1.01

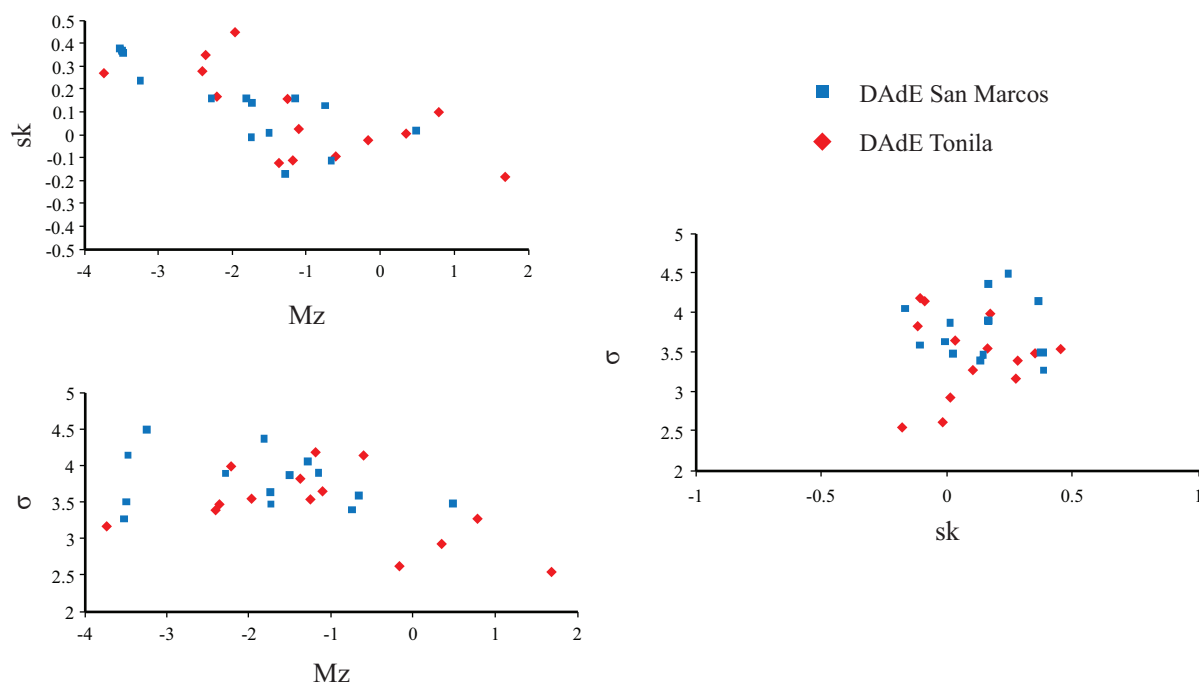


Figura 7. Diagramas de tendencia de los parámetros estadísticos más significativos, media (Mz), desviación estándar (σ) y skewness (sk), en los que se comparan los dos depósitos de avalancha de escombros (DAdE). Los puntos graficados no muestran ninguna concentración peculiar que pueda sugerir una tendencia específica de los depósitos.

DISCUSIÓN

De manera general, las características sedimentológicas de los depósitos de AdE San Marcos y Tonila, la proporción casi constante entre grava, arena y finos (limo y arcilla), así como los valores de la media y desviación estándar, apuntan a flujos que mantuvieron un comportamiento dinámico masivo durante su desplazamiento. El hecho de que la media y la desviación estándar presenten valores prácticamente constantes sin variaciones progresivas con la distancia, indica la inexistencia de un proceso de depósito selectivo o una fuerte abrasión entre las partículas que hubiera modificado su diámetro. Estas tendencias han sido reconocidas también en trabajos previos y confirman la visión general de un mecanismo de transporte masivo con disgregación progresiva del material (Glicken, 1991; Palmer *et al.*, 1991; Belousov *et al.*, 1999; Shea *et al.*, 2007; Bernard *et al.*, 2008; Caballero y Capra, 2011). Sin embargo, cada depósito aquí estudiado muestra peculiaridades que apuntan a condiciones que han favorecido su movilidad y han afectado el tipo de interacción entre los fragmentos. Por ejemplo, si consideramos a un cuerpo de avalancha como un flujo que se mueve como una entidad homogénea desde su inicio hasta su depósito, podemos considerar que no ocurrió turbulencia durante su transporte y que predominaron los esfuerzos de cizalla en su base (modelo “*plug flow*” de Takarada *et al.*, 1999).

El depósito de AdE San Marcos está completamente seco (Roverato *et al.*, 2011) y muestra comportamientos propios de un flujo granular inercial donde predominan las

interacciones grano-grano de elevada energía (colisiones y fricciones). La Figura 9 muestra un clasto encontrado en la parte distal (17 km) donde los fragmentos que lo componen fueron desplazados por esfuerzos de cizalla que actuaron durante el transporte y posiblemente al momento del emplazamiento del cuerpo de avalancha. Si consideramos que dicho clasto pudo haber sido ingerido en cualquier lugar de la avalancha en movimiento, y no necesariamente en su base, deberíamos de tomar en cuenta que los esfuerzos de cizalla se podrían haber concentrado también en diferentes porciones del flujo, modificando así el modelo “*plug flow*” (Takarada *et al.*, 1999) que considera que el esfuerzo de cizalla está concentrado sólo en la base del flujo. En otras palabras, en lugar de tener un flujo que se mueve como un cuerpo rígido (o semirígido) arriba de un nivel que absorbe el esfuerzo de cizalla, podemos imaginarlo como un flujo que presenta múltiples zonas, discontinuas, distribuidas en varios niveles del cuerpo en movimiento, que absorben los esfuerzos de cizalla que promueven el transporte.

La matriz del depósito, según las evidencias encontradas (parámetros estadísticos y granulométricos), no se formó por la fragmentación progresiva del material durante el transporte, como lo han sugerido varios autores (Ui *et al.*, 1986; Takarada *et al.*, 1999; Davies y McSaveney, 2002; Davies y McSaveney, 2009), sino más bien por la fragmentación de la masa al momento del colapso y por una disgregación progresiva de los fragmentos durante el transporte (Glicken, 1996; Capra y Macias, 2002; Caballero y Capra, 2011).

Por otro lado, Roverato (2012) y Roverato *et al.*

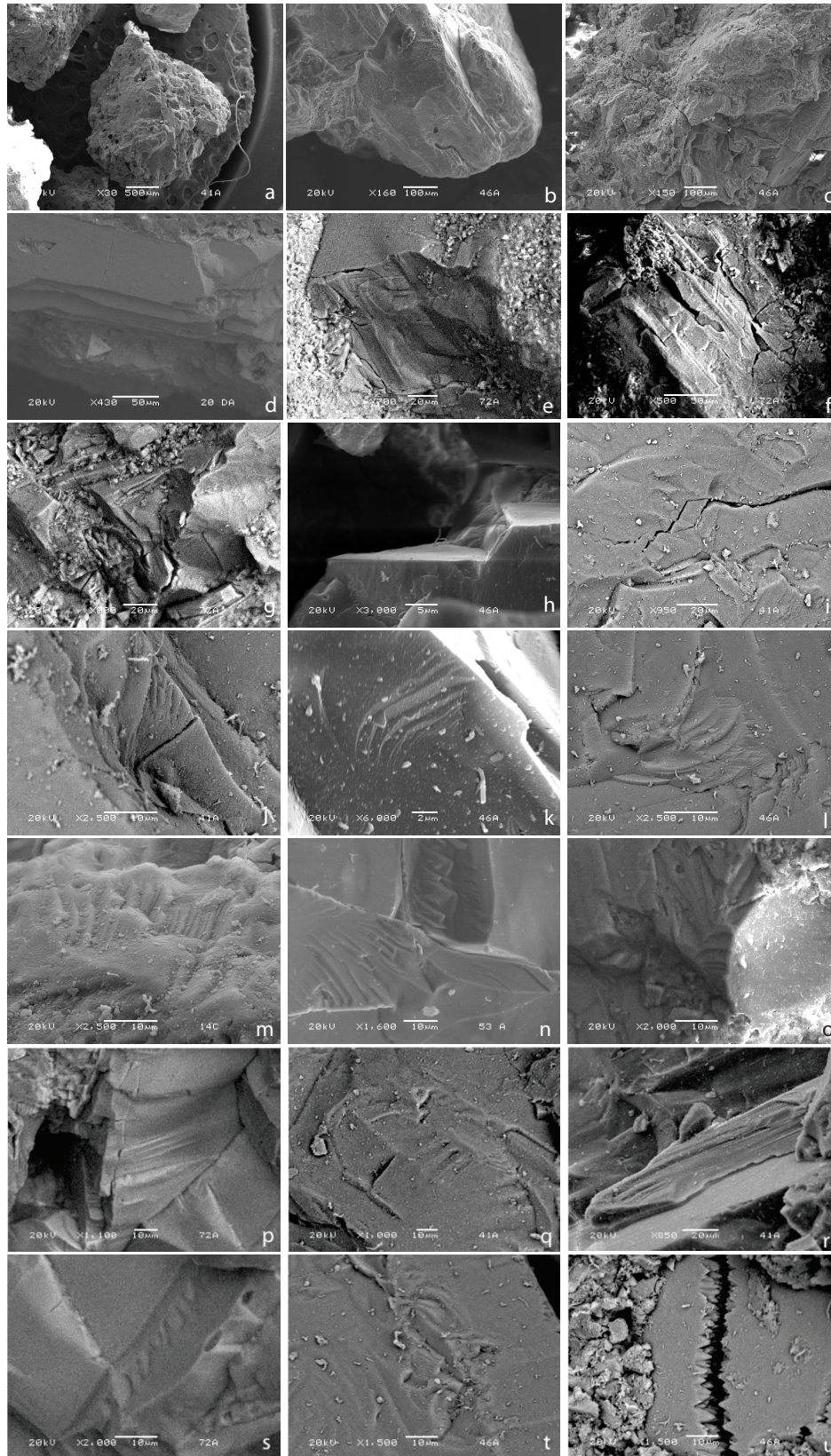


Figura 8. Imágenes al microscopio de barrido de las partículas de los depósitos de avalancha de escombros. Los clastos en general se presentan con una morfología heterogénea, siendo algunos alargados, y otros más esféricos (a) con partes angulosas o redondeadas (b). Las fracturas se encuentran en ambos fragmentos, líticos y cristales (c, d). Es muy común observar cristales truncados (e) y/o rotos (f) o como “geometría en escalera” (g, h). En algunas partículas se observan desplazamientos dados por las fracturas (i, j). Otros rasgos muy comunes son los escalones producidos por desgarres (k, l, m, n, o) y rasguños y surcos (p, q, r). Las marcas de impacto son abundantes (s, t). Intemperismo (*etching*) sucesivo al emplazamiento es común en cristales de hornablenda (u).

(sometido) describieron que las características sedimentológicas del depósito de AdE Pungarehu del volcán Taranaki de Nueva Zelanda (Neall, 1979; Price *et al.*, 1999; Neall, 2003; Zernack *et al.*, 2010; Turner *et al.*, 2011; Platz *et al.*, 2012) muestran como dependiendo de la litología de los clastos, es posible observar también un proceso de fragmentación durante el transporte, lo cual demuestra que puede existir una fuerte dualidad (disgregación y fragmentación) en los mecanismos de transporte de estos grandes cuerpos de avalancha.

El depósito de avalancha Tonila está caracterizado por un elevado contenido de matriz que pudo influenciar la movilidad del flujo. La presencia de material fino sumado a un contenido relevante de fluidos en la masa antes del colapso (debido al derretimiento de nieve/hielo y una gran humedad presente en el ambiente) (Roverato *et al.*, 2011) favoreció la formación de presiones positivas en los poros de la masa incrementando su movilidad, siendo ésta más similar a la de un flujo de escombros. La característica de humedad (facies híbridas) en partes marginales y distales confirma que durante su emplazamiento la porción más enriquecida en fluidos y fragmentos alterados hidrotermalmente, se mueve de manera similar a un flujo de escombros capaz de erosionar material limo-arenoso del substrato (Scott *et al.*, 1995). El arrastre de material areno-limoso del substrato aumenta adicionalmente el contenido de matriz en el flujo hacia su base favoreciendo su movilidad. Además, de acuerdo con Glicken (1996), la fricción interna de las partículas puede ser reducida por la presión de poro debido a que la presencia de agua reduce el número y/o la intensidad de colisiones de las partículas disminuyendo la dispersión de energía, la fricción interna y favoreciendo la movilidad.

El análisis en el microscopio electrónico de barrido de las partículas de los depósitos de AdE San Marcos y Tonila proporcionó evidencias de que ambos depósitos tienen la firma típica de un depósito de AdE. Por lo general las características texturales superficiales de las partículas indican que los esfuerzos involucrados durante el transporte fueron de tipo normal de impacto y de cizalla (en menor cantidad). Varias marcas de impacto, fracturas de diferente intensidad y cristales parcialmente rotos denotan una interacción entre las partículas de tipo colisional. La colisión entre dos granos puede ser puntual, rápida, de alta energía y alta velocidad (Caballero y Capra, 2011) resultando en roturas parciales de las partículas/cristales o en marcas de impacto profundas (Figura 8t) acompañadas a menudo por fracturación de las porciones contiguas al impacto. Por el contrario, si las colisiones son repetidas y de menor energía pueden dejar varias marcas de impacto de menor intensidad en el mismo sector de una partícula, como se muestra en la Figura 8s, sin necesariamente romper la partícula ni fracturarla. Este hecho se puede explicar considerando que algunas partículas no tuvieron suficiente espacio para moverse por lo que interactúan mutuamente vibrando. Las colisiones más violentas pudieron haber ocurrido si consideramos que las partículas son objetos libres en movimiento con una mayor energía cinética que se disipa a través de impactos violentos. El esfuerzo de cizalla se refleja principalmente en los rasguños y surcos de las partículas que, además, indican diferente intensidad de interacción entre las mismas, definida por el grado de profundidad de las marcas. En general, las evidencias microscópicas encontradas sugieren, sin duda, una interacción de los granos de tipo normal (de impacto). En efecto, las marcas que proporcionan evidencia de esfuerzos de cizalla son ampliamente menores con respecto a las marcas por esfuerzos normales por impacto, sugiriendo que la interacción de los granos durante el transporte fue puntual, desarrollándose en un ambiente de alta energía.

CONCLUSIONES

Las evidencias sedimentológicas presentadas en este trabajo sugieren que los mecanismos que actúan durante el transporte y emplazamiento de las avalanchas de escombros no actúan de manera uniforme dentro de las mismas. Por un lado, la fragmentación mayor ocurre en los primeros estadios del colapso, y durante el transporte predomina la disgregación del material. Por otra parte, los procesos de fragmentación y disgregación pueden también actuar contemporáneamente durante el transporte dependiendo de la naturaleza del material involucrado.

Los análisis microscópicos evidencian que durante el transporte de las dos avalanchas, el régimen predominante fue de tipo colisional de impacto evidenciado por la presencia de marcas indicadoras de esfuerzos normales, mientras que la evidencia de esfuerzos de cizalla (rasguños y surcos), en comparación, es ampliamente menor.



Figura 9. Clasto fracturado de lava andesítica del depósito de avalancha de escombros San Marcos. Se observa que los fragmentos que lo componen están desplazados según los esfuerzos de cizalla que actuaron durante el transporte del cuerpo de avalancha.

Para el evento Tonila, la presencia de agua en las rocas que formaban el edificio antes del evento de colapso representó un factor importante que influyó y controló su transporte. El contenido de fluidos en la masa en movimiento aumentó la movilidad y facilitó la transformación lateral de facies pasando a un flujo con características híbridas, de una clásica avalancha de escombros a un flujo de escombros con fuerte poder erosivo, que, asimilando material del substrato, aumentó la cantidad de finos que favoreció su movilidad.

Generalmente, los modelos que consideran un flujo semirígido que se mueve por encima de una capa basal que absorbe el esfuerzo de cizalla se han aplicado a varias avalanchas en todo el mundo. Sin embargo, creemos que es difícil aplicar este modelo para todas las avalanchas de escombros. La complejidad de estos cuerpos a nivel textural, la profunda variabilidad topográfica de los diferentes ambientes volcánicos, los diferentes mecanismos disparadores de un colapso y la influencia de factores exógenos pertenecientes a diferentes regiones climáticas nos obliga, finalmente, a considerar cada evento de avalancha como evento único que responde a sus propios mecanismos de transporte y emplazamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo benefició de las correcciones y sugerencias de José Luis Macías y las de un segundo árbitro anónimo que ayudaron a mejorar el manuscrito. El presente trabajo se realizó con el apoyo de los proyectos 46340, 99486 (CONACYT), 14 (SRE-CONACYT) e IN106710 (UNAM) otorgados a Lucia Capra, y de la bolsa de doctorado (CONACYT) otorgada a Matteo Roverato para el periodo 2009-2012. Se agradece además a Marina Vega González (técnico del microcopio de barrido, CGEO-UNAM) por las fotos de microscopía electrónica.

REFERENCIAS

- Bandy, W., Michaud, F., Bourgeois, J., Calmus, T., Dymant, J., Mortera-Gutiérrez, C.A., Ortega-Ramírez, J., Pontois, B., Royer, J.Y., Sichlerg, B., Sosson, M., Rebolledo-Vieyra, M., Bigot-Cormier, F., Diaz-Molina, O., Hurtado-Artunduaga, A.D., Pardo-Castro, G., Trouillard-Perrot, C., 2005, Subsidence and strike-slip tectonism of the upper continental slope off Manzanillo, Mexico: *Tectonophysics*, 398, 115-140.
- Belousov, A., Belousova, M., Voight, B., 1999, Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia: *Bulletin of Volcanology*, 61, 324-342.
- Bernard, B., Van Wyk Vries, B., Barba, D., Leyrit, H., Robin, C., Alcaraz, S., Samaniego, P., 2008, The Chinborazo sector collapse and debris avalanche: Deposit characteristics as evidence of emplacement mechanisms: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 36-43.
- Bernard, B., van Wyk de Vries, B., 2009, Distinguishing volcanic debris avalanche deposits from their reworked products: the Perrier sequence (French Massif Central): *Bulletin of Volcanology*, 71, 1041-1076, doi:10.1007/s00445-009-0285-7.
- Caballero, L., Capra, L., 2011, Textural analysis of particles from El Zaguán debris avalanche deposit, Nevado de Toluca volcano, Mexico: Evidence of flow behavior during emplacement: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200, 75-82.
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vazquez-Selem, L., Ortega, B., 2010, Evidencias de cambios climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 3.
- Capra, L., Macías, J.L., 2002, The cohesive Naranjo debris-flow deposit: A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 213-235.
- Clavero, J.E., Sparks, R.S.J., Huppert, H.E., 2002, Geological constraints on the emplacement mechanism of the Paríacota avalanche, northern Chile: *Bulletin of Volcanology*, 64, 40-54.
- Cortés, A., Macías, J. L., Capra, L., Garduño-Monroy, V. H., 2010, Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México. The 3600 yr BP La Lumbre-Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189 (1-4), 52-66.
- Davies, T.R., McSaveney, M.J., 2002, Dynamic simulation of the motion of fragmenting rock avalanches: *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 789-798.
- Davies, T.R., McSaveney, M.J., 2009, The role of rock fragmentation in the motion of large landslides: *Engineering Geology*, 109, 67-79.
- Ferrari, L., Garduno, V. H., Pasquaré, G., Tibaldi, A., 1994, Volcanic and tectonic evolution of central Mexico, Oligocene to present: *Geofisical International*, 33, 91-105.
- Garduño, V.H., Saucedo, R., Jiménez, S., Gavilanes, J.C., Cortés, A., Uribe, R.M. 1998, La Falla Tamazula, límite suroriental del bloque Jalisco, y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15, 132-144.
- Glicken H., 1991, Sedimentary architecture of large volcanic-debris avalanches, *en* Fisher R.V., Smith G.A. (eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings*: Tulsa, OK, Society for Sedimentary Geology, SEPM Special Publication 45, 99-106.
- Glicken H., 1996, Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington: Vancouver, Cascades Volcano Observatory, Open-file Report 96-677, 90 pp.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2007, Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America, Special Paper* 422, 129-181.
- Komorowski, J.C., Glicken, H., Sheridan, M.F., 1991, Secondary electron imagery of microcracks and hackly fractures in sand- size clasts from the 1980 Mount St. Helens debris-avalanche deposits, implications for particle-particle interactions: *Geology*, 19, 261-264.
- Komorowski J.C., Navarro, C., Cortés, A., Siebe, C., Rodríguez, S., 1993, Multiple collapse of Volcán Colima, Mexico, Since 10000 y. BP: Implications for eruptive style, magma yield, edifice stability and volcanic risk, *en* International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) General Assembly, Abstract Volume, Camberra, Australia, Sept. 25-Oct. 1 1993, p. 60.
- Komorowski, J.C., Navarro, C., Cortés, A., Saucedo, R., Gavilanes, J.C., Siebe, C., Espíndola, J.M., Rodríguez-Elizarrarás, S.R., 1997, The Colima Volcanic Complex: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) General Assembly, Puerto Vallarta, México, Field Guide 3.
- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1980, The Colima volcanic complex, Mexico; Part I. Postcaldera andesites from Volcán Colima: Contributions to Mineralogy and Petrology, 71, 343-372.
- Luhr, J.F., Prestegard, K.L., 1988, Caldera formation at Volcan the Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35, 335-348.
- McGuire, W.J., 1996, Volcano instability: A review of contemporary themes, *en* McGuire, W.J., Jones, A.P., Neuberg, J. (eds.), *Volcano Instability on Earth and Other Planets*: Geological Society, London, Special Publication, 110, 1-23.
- Neall, V.E., 1979, Sheets P19, P20 and P21 New Plymouth, Egmont and

- Manaia, esc. 1:50,000: Wellington, New Zealand Department of Science and Industrial Research, Geological Map of New Zealand, 3 mapas y notas, 36 pp.
- Neall, V.E., 2003, The volcanic history of Taranaki: Massey University, Institute of Natural Resources, Soil & Earth Sciences Occasional Publication, 2, 18 pp.
- Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., Agliardi, F., Pola, A., Cortés, A. 2010, The structural architecture of the Colima Volcanic Complex: *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 115, B12209.
- Palmer, B.A., Alloway, B.V., Neall, V.E., 1991, Volcanic debris-avalanche deposits in New Zealand - lithofacies organization in unconfined, wet avalanche flows, *en* Fisher R.V., Smith G.A., (ed.), *Sedimentation in volcanic settings*: Tulsa, Oklahoma, USA, Society for Sedimentary Geology, SEPM Special Publication 45, 89-98.
- Pardo, M., Suarez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20, 2391-2394.
- Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987, A rheologic classification of subaerial sediment-water flows: *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Ponce, L., Gaulon, R., Suárez, G., Lomas, E., 1992, Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico: *Geophysical Research Letters*, 19, 773-776.
- Platz, T., Cronin, S.J., Procter, J.N., Neall, V.E., Foley, S.F., 2012, Non-explosive, dome-forming eruptions at Mt. Taranaki, New Zealand: *Geomorphology*, 136, 15-30.
- Price, R.C., Stewart, R.B., Woodhead, J.D., Smith, I.E., 1999, Petrogenesis of high-K arc magmas: Evidence from Egmont Volcano, North Island, New Zealand: *Journal of Petrology*, 40, 167-197.
- Robin, C., Mossand, P., Camus, G., Cantagrel, J.M., Gourgaud, A., Vincent P.M., 1987, Eruptive history of the Colima volcanic complex (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 99-113.
- Rosiwal, A., 1898, Über geometrische Gesteinsanalysen: Ein einfacher weg zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter gesteine: *Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt Wien*, 143-175.
- Roverato, M., Capra, L., Sulpizio, R., Norini, G., 2011, Stratigraphic reconstruction of two debris avalanche deposits at Colima Volcano (Mexico): Insights into pre-failure conditions and climate influence: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 207, 33-46.
- Roverato, M., 2012, Estratigrafía, mecanismos disparadores, transporte y emplazamiento de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima: comparación con el Volcán Taranaki (NZ): Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis doctoral, 148 pp.
- Sarocchi, D., Borselli, L., Macias, J.L., 2005, Construcción de perfiles granulométricos de depósitos piroclásticos por métodos ópticos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23, 371-382.
- Shea, T., van Wyk de Vries, B., Pilato, M., 2007, Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis: *Bulletin of Volcanology*, 70, 899-921.
- Scott, K.M., Vallance, J.W., Pringle, P.T., 1995, *Sedimentology, behaviour, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington*: United States Geological Survey, Professional Paper 1547, 56 pp.
- Siebert, L., Glicken, H., Ui, T., 1987, Volcanic hazard from Bezymianny and Bandai type eruption: *Bulletin of Volcanology*, 49, 435-459.
- Siebert, L., Kimberly, P., Pullinger, C. R., 2004, The voluminous Acajutla debris avalanche from Santa Ana volcano, western El Salvador, and comparison with other Central American edifice-failure events: *Geological Society of America, Special Paper* 375, 5-24.
- Stoopes, G.R., Sheridan, M.F., 1992, Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico, Implication for long runout landslides (>100 km): *Geology*, 20, 299-302.
- Takarada, S., Ui, T., Yamamoto, Y., 1999, Depositional features and transportation mechanism of valley-filling Iwasegawa and Kaida debris avalanches, Japan: *Bulletin of Volcanology*, 60, 508-522.
- Turner, M.B., Cronin, S.J., Bebbington, M.S., Smith, I.E.M., Stewart, R.B., 2011, Integrating records of explosive and effusive activity from proximal and distal sequences: Mt. Taranaki, New Zealand: *Quaternary International*, 246, 364-373.
- Ui, T., Yamamoto, H., Suzuki-Kamata, K., 1986, Characterization of debris avalanche deposits in Japan: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 231-243.
- Van Wyk 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.
- Velbel, M.A., 1989, Weathering of hornblende to ferruginous products by a dissolution-reprecipitation mechanism: *Petrography and Stoichiometry: Clays and Clay Minerals*, 37, 515-524.
- Zernack, A.V., Cronin, S.J., Neall, V.E., Procter, J.N., 2010, A medial to distal volcanoclastic record of an andesite stratovolcano: detailed stratigraphy of the ring-plain succession of south-west Taranaki, New Zealand: *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 100, 1937-1966, doi 10.1007/s00531-010-0610-6.

Manuscrito recibido: Febrero 22, 2013

Manuscrito corregido recibido: Junio 20, 2013

Manuscrito aceptado: Agosto 10, 2013