

Estudio granulométrico comparativo de los depósitos epiclásticos en ambientes volcánicos

Lia Ma. Carreras-Soriano^{1,*} y Lucia Capra-Pedol²

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus UNAM Juriquilla, 76230 Querétaro, México.

² Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus UNAM Juriquilla, 76230 Querétaro, México.

* liamariajuana@hotmail.com

RESUMEN

Los depósitos epiclásticos ligados a la inestabilidad y erosión de las vertientes de un edificio volcánico incluyen depósitos de facies de matriz de una avalancha de escombros, flujos de escombros cohesivos, flujos de escombros no cohesivos y tills. Estos depósitos presentan características texturales muy similares, haciéndose necesaria una comparación granulométrica cuantitativa con el fin de discutir sus similitudes y diferencias con base en su origen y en los procesos de transporte y sedimentación. Con base en las gráficas de contornos de densidad, se comparó la distribución granulométrica de 337 muestras utilizando el par estadístico de la media frente a la desviación estándar. De estas gráficas se puede afirmar que los depósitos con mejor grado de clasificación son los flujos de escombros no cohesivos, mientras que los cohesivos presentan el peor grado de clasificación; los depósitos de till muestran las medias más gruesas, mientras que los depósitos de los flujos de escombros no cohesivos presentan las más finas. También se observa que, a mayor contenido en partículas finas, la clasificación de los depósitos de flujos de escombros cohesivos empeora. Al analizar aisladamente la distribución granulométrica de la matriz ($<-I\phi$) se observa que a mayor proporción de arena frente a limo y arcilla el grado de clasificación mejora. Estos resultados muestran que las partículas transportadas en una avalancha de escombros, en un flujo de escombros cohesivo y en los glaciares se caracterizan por no sufrir fragmentación ni segregación significativa durante el transporte. Por el contrario, las partículas transportadas por un flujo de escombros no cohesivo sufren segregación debido a la falta de cohesión de la mezcla de agua y lodo pobre en arcilla. Por último, las curvas de distribución granulométricas de estos cuatro tipos de depósitos epiclásticos asociados a las laderas volcánicas (conos, edificios) dependen sobretudo de la distribución granulométrica del material fuente y no del proceso de transporte y depósito que sufren los escombros. Con base en los resultados obtenidos se observa que las características granulométricas de los depósitos epiclásticos no permiten discriminar de manera exclusiva entre estos cuatro tipos, siendo necesario un conjunto de datos texturales adicionales para su mejor identificación.

Palabras clave: distribución granulométrica, gráficas de contornos de densidad, depósitos epiclásticos, avalanchas de escombros, flujos de escombros cohesivos, flujos de escombros no cohesivos, till.

ABSTRACT

The epiclastic deposits related to volcanic slope instability and erosion include matrix facies of debris avalanche, cohesive debris flow, non-cohesive debris flow and tills. Because of their similarity in textural features, a granulometric approach is here presented in attempt to compare these four types of epiclastic deposits and discuss their similarities or difference on the basis of their origin, transport and sedimentary processes. We compared the granulometric distribution of 337 samples on the basis of density diagrams, where mean and standard deviation are compared. Main achievements are: best sorted

deposits are non-cohesive debris flows, whereas the poorest sorted are cohesive debris flows; till deposits are the coarsest, whereas non-cohesive debris flows are the finest. By looking only at the granulometric distribution of the matrix ($<-1\phi$), better sorting corresponds to higher content of sand respect to silt and clay fraction. These results show that particles transported by debris avalanches, debris flows and glaciers do no suffer fragmentation or significant grain segregation during transport. In contrast, non-cohesive debris flow particles are easily segregated and yield better sorting. Finally, the granulometric distribution of these four types of epiclastic deposits associated to volcanic aprons (cones, edifices) depends more on the granulometry of the source material than on transport and depositional processes. This work shows that the granulometric characteristics of epiclastic deposits should be supported by additional textural information to better constrain their classification.

Keywords: granulometric distribution, density countered plot, epiclastic deposits, debris avalanches, cohesive debris flows, non-cohesive debris flows, till.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la sedimentología ha estudiado todos los depósitos clásticos típicos de ambientes sedimentarios fluviales, marinos, eólicos y glaciares, dejando a un lado los depósitos volcanosedimentarios debido a su particular ambiente de sedimentación. Por otro lado, en la vulcanología se ha privilegiado el estudio de depósitos efusivos y explosivos, por su evidente espectacularidad e impacto sobre las poblaciones. Fue a partir de la década de 1960 que se comenzaron a estudiar los depósitos generados por erosión en ambientes volcánicos (p. ej., Mullineaux y Crandell, 1962; Schmincke, 1967). Sin embargo, el gran auge en la investigación de depósitos resultantes de la inestabilidad de laderas se dió a partir de la década de 1980 tras la erupción del Monte Santa Elena en 1980 (p. ej. Voight *et al.*, 1981; Pierson, 1985). Este evento motivó el estudio de los depósitos clásticos de las vertientes volcánicas y áreas adyacentes a éstas, considerando la inestabilidad y erosión de las laderas volcánicas como un peligro más de la dinámica volcánica. Distinguir correctamente entre estos tipos de depósitos es necesario para reconstruir la geología del área, interpretar la historia de formación, transporte y depósito de los sedimentos y estimar el tiempo involucrado en su desarrollo (Crandell *et al.*, 1984; Hewitt, 1999). Las implicaciones de peligro no son las mismas para un evento súbito (100 m/s), como por ejemplo una avalancha de escombros (Siebert, 1992), que las de un evento lento (cm/día), como por ejemplo el movimiento de un glaciar (Hewitt, 1999), o para eventos más discretos y limitados a pequeñas barrancas como los lahares post-eruptivos (Capra *et al.*, 2004).

Existen trabajos muy puntuales en la literatura que definen las diferencias cualitativas (Ui, 1989; Smith y Lowe, 1991; Vallance, 2000) y cuantitativas entre los depósitos epiclásticos en ambiente volcánico (Pierson y Costa, 1987; Vallance y Scott, 1997; Carrasco-Núñez *et al.*, 1993). Estos trabajos se limitan en definir desde un punto de vista reológico los distintos tipos de flujos con base en la proporción de fracción sólida con respecto al fluido intersticial y al contenido de la fracción arcillosa (Pierson y Costa, 1987;

Vallance y Scott, 1997). Sin embargo, no existe en estos trabajos un análisis exhaustivo de las diferencias en las características granulométricas entre los distintos tipos de depósitos.

El presente artículo pretende cuantificar las diferencias entre cuatro tipos de depósitos epiclásticos asociados a edificios volcánicos y proponer un criterio de discriminación con base en sus características granulométricas. En particular se comparan depósitos de: 1) facies de matriz de las avalanchas de escombros; 2) flujos de escombros cohesivos; 3) flujos de escombros no cohesivos; y 4) tills. La granulometría ofrece la posibilidad de evaluar cuantitativamente los tamaños de las partículas que estuvieron involucradas durante la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos, procesos variables entre los distintos tipos de depósitos aquí analizados.

TERMINOLOGÍA

Los depósitos volcanoclásticos ligados a la inestabilidad y erosión de las vertientes de un edificio volcánico y que pueden presentar dificultad en el reconocimiento de su origen (formación, transporte y depósito), son aquellos que presentan facies de *diamicton*, que comprende sedimentos tamaño arena y/o partículas más grandes dispersas en una matriz de lodo sin litificar. Estos depósitos son: las facies de matriz de las avalanchas de escombros, los flujos de escombros cohesivos, los flujos de escombros no cohesivos y los tills. Los depósitos de flujos piroclásticos responden a esta descripción textual pero no fueron incluidos en este estudio dado que son flujos parcialmente fluidizados por su elevada temperatura y alto contenido de gases volcánicos, lo cual facilita la pérdida de las partículas más finas antes del depósito.

Excluir a los depósitos piroclásticos hace necesario escoger un término más adecuado para los depósitos en estudio que el de “depósitos volcanoclásticos”. La definición de volcanoclástico fue realizada por Fisher (1966) para incluir el espectro entero de los materiales clásticos compuestos en parte o enteramente por fragmentos volcánicos,

formados por algún mecanismo de formación de partículas (p. ej. explosiones magmáticas, interacción agua-magma, meteorización y erosión de rocas preexistente), transportados por algún mecanismo, depositado en algún ambiente fisiográfico o mezclados con algún otro tipo de fragmento no volcánico (Fisher y Smith, 1991). La clasificación de los sedimentos volcanoclásticos (piroclástico, hidroclástico, epiclástico, autoclástico, alloclástico) está en función del origen de las partículas. Pero la clasificación de los depósitos volcanoclásticos también debe incluir el proceso de transporte o depósito de las mismas. En esta línea, Cas y Wright (1987) utilizaron el término epiclástico para describir depósitos o rocas que han sido producidas por procesos de fragmentación superficial normal (meteorización, abrasión física, colapso gravitacional) o depositados finalmente por procesos superficiales normales (tracción, suspensión, flujo en masa). Posteriormente, McPhie *et al.* (1993) propusieron utilizar el término “depósitos sedimentarios volcanogénicos” frente a “depósitos epiclásticos” para aquellos agregados volcanoclásticos que contienen partículas derivadas de la erosión de los depósitos volcánicos preexistentes y que son sujetos a un significativo retrabajo previo al depósito final, y/o que son redepositados mucho después de la erupción. Este término engloba los procesos de formación de los clastos, de transporte y de depósito de los mismos. Sin embargo, este término excluye las partículas derivadas de la inestabilidad de las laderas volcánicas y los depósitos sineruptivos como, por ejemplo, un depósito de flujo de escombros no cohesivo derivado directamente de un flujo piroclástico que interactúa con un glaciar.

En el presente trabajo se hará referencia a los depósitos epiclásticos para aquellos depósitos formados por partículas epiclásticas, es decir, partículas derivadas de la meteorización y/o erosión de rocas volcánicas y/o depósitos o partículas volcanoclásticas preexistentes, incluyendo los procesos de fragmentación asociados al colapso gravitacional, transportadas y depositadas por procesos superficiales normales (tracción, suspensión, flujo en masa).

Origen y clasificación de los depósitos epiclásticos en ambiente volcánico

La formación de los depósitos epiclásticos está directamente relacionada con eventos desencadenados por la inestabilidad de las laderas volcánicas y la erosión de las mismas. La inestabilidad de las laderas (por actividad magmática o por alteración hidrotermal) genera avalanchas de escombros y flujos de escombros cohesivos, mientras que los procesos de erosión por aguas superficiales (meteórica, derretimiento de glaciar o ruptura de lago cratérico) generan flujos de escombros no cohesivos e hiperconcentrados (Mc Guire, 1996; Vallance, 2000). Finalmente, para los glaciares es la presencia de nieve y hielo con un balance de masas positivo y la fuerza de la gravedad.

Pierson y Costa (1987) propusieron una clasificación

basada en los umbrales del comportamiento reológico de los flujos de agua y sedimentos subaéreos (excluyendo los glaciares y el escombros que transportan) en función de la velocidad media y la concentración de sedimentos. Según estos autores, las avalanchas de escombros son flujos granulares inerciales cuyos fluidos intersticiales de agua-aire-finos se encuentra en una proporción menor al 10% en peso. Se caracterizan por comportarse como un flujo granular donde la energía se disipa a través de la colisión inelástica entre los granos, y el transporte sobre grandes distancias se debe a distintos procesos de fluidización (Glicken, 1996). Los flujos de escombros tienen un contenido de fracción sólida variable entre el 70 y el 90 % en peso (Costa, 1988), y si la matriz contiene más del 3% de arcilla se definen como cohesivos (Vallance y Scott, 1997). Dependiendo de la proporción de sedimentos y de la cantidad de arcilla en la matriz, los clastos se separan del flujo por gravedad provocando una progresiva dilución del flujo, o se transportan sobre grandes distancias (Iverson, 1997; Vallance, 2000). Finalmente, los glaciares transportan el escombros que cae supraglaciariamente o que incorpora subglaciariamente por erosión. La trayectoria de transporte de los sedimentos atraviesa zonas englaciadas y si los escombros emergen bajo la línea de neviza pueden alcanzar zonas supraglaciarias (Boulton, 1978).

METODOLOGÍA

Para evitar la subjetividad de las descripciones cualitativas, la metodología del presente estudio granulométrico se centra en dos tipos de análisis: el primero se basa en el análisis de las proporciones de las clases granulométricas de Wentworth (1922) a través de los diagramas triangulares de Grava-Lodo-Arena (GLA) y de Arena-Arcilla-Limo (AAL) propuestos por Folk (1954, 1974) para los diferentes depósitos epiclásticos (Figura 1); y el segundo consiste en un análisis estadístico de los parámetros descriptivos de la curva de distribución granulométrica, el cual se realizó a partir de los diagramas de cajas y bigotes para cada uno de los parámetros de los diferentes depósitos epiclásticos (Figura 2).

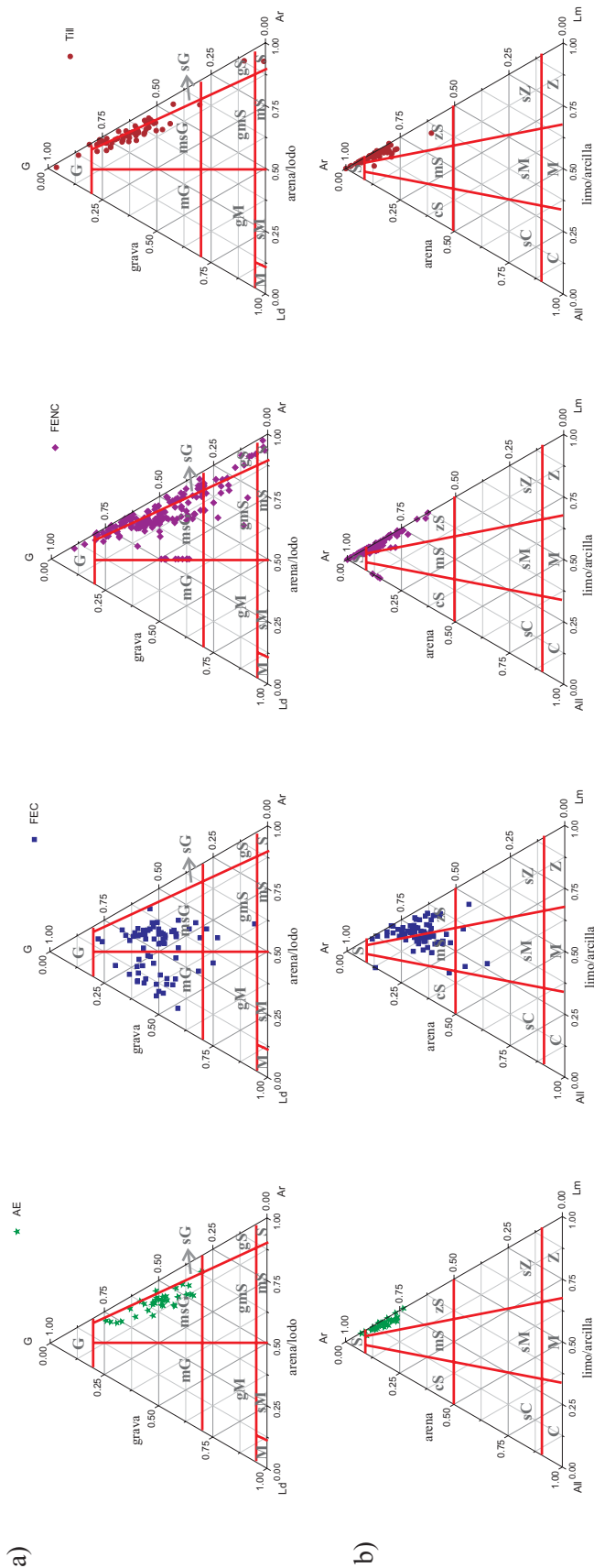
La distribución granulométrica se obtiene calculando el porcentaje en peso de cada fracción de tamaño de grano en la escala logarítmica ϕ de Wentworth (1922). El rango granulométrico aquí utilizado varía entre -8 (256 mm, grava) y 8 ϕ (0.004 mm, arcilla). El porcentaje en peso de las fracciones granulométricas se obtuvo combinando tres técnicas analíticas distintas en función de los tamaños de grano: 1) el método de muestreo de red con análisis de frecuencia por número para la fracción mayor que -4 ϕ (Kellerhals y Bray, 1971); 2) tamizado en seco para las fracciones entre -4 ϕ y 4 ϕ ; y 3) análisis por sedimentación por vía óptica utilizando un sedimentógrafo para las fracciones de tamaño menores que 4 ϕ , técnicas ya aplicadas en depósitos volcanoclásticos por Major y Voight (1986), Scott (1988), Vallance y Scott (1997) y Capra y Macías (2000).

Tills

Flujos de escombros no cohesivos

Flujos de escombros cohesivos

Avalanchas de escombros
(facies de matriz)



msG, sG

msG, gmS, sG

msG, mG

msG

S, zS

S, zS

mS, sZ, zS

zS

Figura 1. Diagramas ternarios para el conjunto de la base de datos de los depósitos epiclásticos estudiados (según la clasificación textural de Folk, 1954, 1974). a: Diagrama ternario de Grava-Lodo-Arena; y b: diagrama ternario de Arena-Arcilla-Limo. Donde G es grava, S es arena, M es lodo, Z es limo y C es arcilla y c es arcilloso.

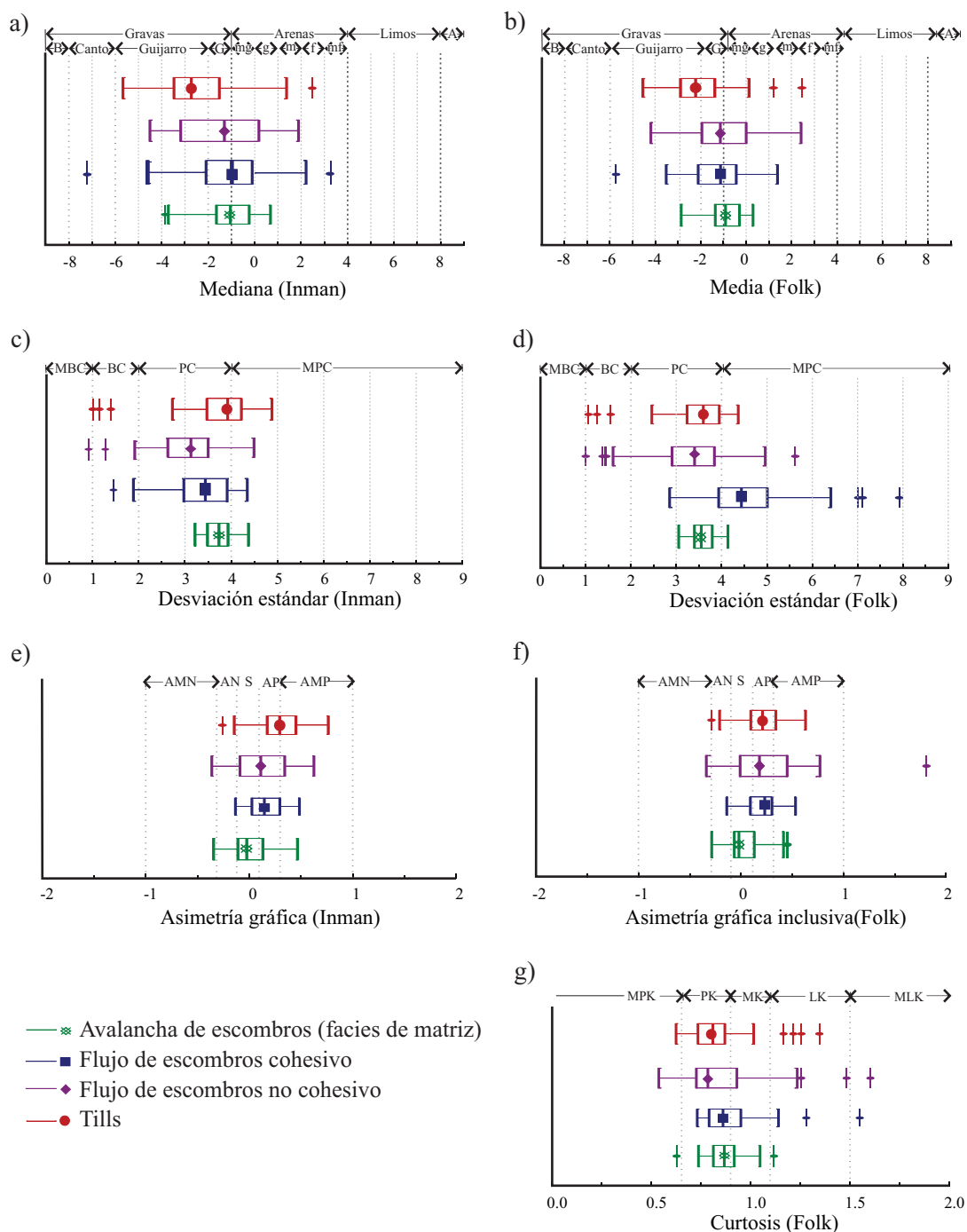


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes para los momentos estadísticos obtenidos de las curvas de distribución de los depósitos epiclásticos en estudio. La columna de la izquierda corresponde a los estadísticos calculados según el método de Inman (1952): a) mediana, c) desviación estándar, e) asimetría gráfica; y la columna de la derecha a los de Folk y Ward (1957): b) media, d) desviación estándar inclusiva, f) asimetría gráfica inclusiva, g) curtosis. Las líneas discontinuas corresponden a los límites de las clases verbales definidas por Wentworth (1922) para los tamaños de grano, por Cas y Wright (1987) para la desviación estándar (MBC: muy bien clasificado; BC: bien clasificado; PC: pobremente clasificado; MPC: muy pobremente clasificado), y por Folk y Ward (1957) para la asimetría (AMN: asimetría muy negativa; AN: asimetría negativa; S: simétrica; AP: asimetría positiva; AMP: asimetría muy positiva) y la curtosis (MPK: muy platicúrtica; PK: platicúrtica; MK: mesocúrtica; LK: leptocúrtica; MLK: muy leptocúrtica). B: bloque; G: gránulo; A: arcilla; mg: muy gruesa; g: gruesa; m: media; f: fina; mf: muy fina.

Una vez calculada la distribución de frecuencias de las fracciones granulométricas se obtuvo la proporción de grava, arena, limo y arcilla (Tabla 1), y los parámetros estadísticos que describen la distribución (media, mediana,

desviación estándar, asimetría y curtosis). La obtención de estos parámetros sirve para comparar entre sí las distintas distribuciones de tamaños de granos y para correlacionar los diferentes tipos de sedimentos y sus ambientes de depósito

Tabla 1. Límites máximos y mínimos de las proporciones de Grava-Arena-Lodo y Arena-Limo-Arcilla de los diferentes depósitos epiclásticos. Donde DE son los depósitos epiclásticos, AE (fm) son los depósitos de las facies de matriz de las avalanchas de escombros, FEC son los depósitos de flujos de escombros cohesivos, FENC son los depósitos de flujos de escombros no cohesivos y Tills son los depósitos de till.

	Grava		Arena		Lodo		Arena		Limo		Arcilla	
	Máx.	min.	Máx.	min.	Máx.	min.	Máx.	min.	Máx.	min.	Máx.	min.
DE	96	1	96	2	52	0	100	36	47	0	37	0
AE (fm)	74	30	34	22	13	4	93	73	27	7	4	0
FEC	78	6	58	7	52	6	88	36	47	0	37	0
FENC	89	1	96	10	32	1	100	63	37	0	15	0
Tills	96	1	92	2	11	0	100	61	34	0	6	0

(Inman, 1952). Existen varias formas de calcular los momentos estadísticos a partir de las curvas de distribución, y para el presente trabajo se utilizaron los cálculos propuestos por Inman (1952) y Folk (1974).

Tanto el análisis de las proporciones de las clases de tamaños por medio de diagramas triangulares, como el análisis estadístico de los parámetros descriptivos de las curvas de distribución a través de diagramas de cajas y bigotes, permite evaluar cuáles de ellos son los que realzan las características intrínsecas de cada tipo de depósito. Una vez definidos los dos parámetros que mejor discriminan a los depósitos se enfrentarán en un diagrama binario (Figura 3). Estos diagramas son muy utilizados en estudios sedimentológicos de depósitos clásticos para encontrar características representativas de los ambientes de depósito y génesis de los depósitos (Folk y Ward, 1957; Friedman, 1962; Folk, 1966). También han sido utilizados en sedimentología volcánica para clasificar los depósitos piroclásticos (Walker, 1971).

Dada la amplitud de nuestra base de datos se planteó realizar diagramas de contornos sobre el diagrama binario del par estadístico que resulte más discriminatorio.

Diagramas de contornos o curvas de densidad

Con base en el diagrama binario del par estadístico más discriminatorio se dibujaron las curvas de contorno según Walker (1971), las cuales muestran la densidad de puntos (ver Figura 4). Las curvas de densidad son generadas a partir de una nube de puntos resultante de la proyección de dos variables (Figura 4a). Una vez proyectados los puntos se calcula el número de vecinos que presenta cada uno de ellos dentro de un radio conocido (Figura 4b). El radio se establece en función del tamaño de la muestra de datos. En el trabajo de Walker se consideró un radio de 0.5ϕ para un tamaño de muestra de más de 1,600 datos sedimentológicos de depósitos piroclásticos. La base de datos aquí utilizada asciende a 345 muestras, por lo que un radio de 1ϕ resulta ser adecuado. Si se considera un radio de 1ϕ , el área que encierra la mayoría de los datos corresponde a la isolínea de densidad del 10% (Figura 4d). Por el contrario, si consideramos un radio de 0.5ϕ , la isolínea del 10% ya no cumple esta misma función (Figura 4c).

Para reproducir la metodología empleada por Walker (1971) se calculó el número de puntos en torno a cada uno de ellos utilizando la función *find.neighbor* del programa informático *S-Plus 6.0 Professional* (Insightful Corp.; Seattle, Washington) y para realizar el mapa de contornos con base en la red generada por interpolación de tipo *Kriging*, se utilizó el programa *Surfer 8.00* (Surface Mapping System; Golden Software, Inc.; Golden, Colorado). Las curvas de densidad generadas a partir de una nube indican el % de muestra que hay en torno a cada punto. De esta forma, la gráfica muestra que tan agrupados están los datos y si las características de la media y la desviación estándar son o no homogéneas en el conjunto de la base de datos.

En la Figura 5 se abstraen las curvas de contornos del 10% sobre la nube de puntos y se puede observar como las isolíneas de densidad para un radio de 0.5ϕ no son del todo representativas del conjunto de las distribuciones de los flujos de escombros no cohesivos, ya que excluyen muchos puntos, mientras que para un radio de 1ϕ se incluyen áreas donde no se proyecta ningún dato. Buscando la mejor forma de trazar un área representativa de las distribuciones se utilizó el método de análisis espacial de la intensidad (propiedad espacial de primer orden), calculando el número medio de puntos por unidad de área. Como los datos son estacionarios en el tiempo se puede hablar de densidad en vez de intensidad. La densidad de los puntos puede variar en el espacio de proyección y es precisamente esta variación la que se pretende representar. La función aquí utilizada es la densidad de *kernel*, la cual calcula la densidad de las características (puntos) de los vecinos alrededor de estas características (puntos). Como se observa en la Figura 5, la isolínea del 10% de la densidad de *kernel* se ciñe mejor al conjunto de la nube de puntos en función a la densidad de los mismos, sin incluir ni excluir áreas no representativas. Esto la convierte en la herramienta más adecuada para comparar depósitos cuyas características granulométricas son muy similares.

BASE DE DATOS

La base de datos del presente estudio se compone de las proporciones en porcentajes de las diferentes clases de

tamaños (grava, arena, limo, arcilla) y de los parámetros estadísticos descriptivos de las curvas de distribución granulométrica (media, mediana, moda, desviación estándar, asimetría y curtosis) de al menos 50 muestras de cada tipo de depósito epiclástico.

El Nevado de Toluca representó el marco idóneo para poder obtener una base de datos completa ya que en ese volcán coexisten los cuatro tipos de depósitos epiclásticos a estudiar. Dicho estratovolcán, de 2.6 Ma (de Beni, 2001, García-Palomo *et al.*, 2002), ha sufrido a lo largo de su historia por lo menos cuatro colapsos sectoriales del edificio:

dos hacia el sur, reconocidos a través de un depósito de avalancha de escombros (DAD1, Macías *et al.*, 1997) y del depósito de flujo de escombros cohesivo Pilcaya (Capra y Macías, 2000); uno más hacia el E-NE denominado depósito de avalancha de escombros El Zaguán (Macías *et al.*, 1997; Caballero-García, 2007); y el cuarto hacia el N-NW que fue descrito como depósito de avalancha de escombros por Norini *et al.* (2004). A lo largo de la columna estratigráfica de los últimos 40,000 años del Nevado de Toluca (García-Palomo *et al.*, 2002) se pueden reconocer en campo más depósitos de flujos de escombros no cohesivos formados

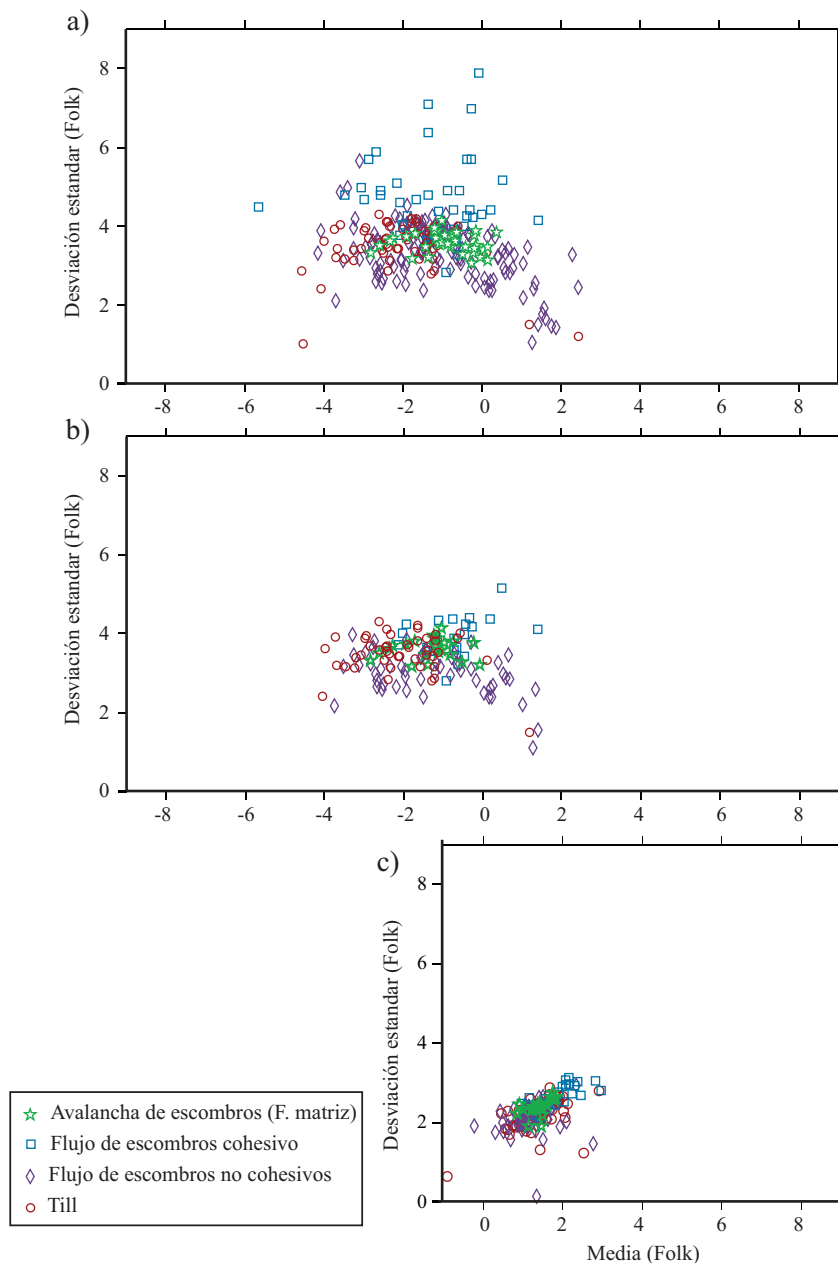


Figura 3. Proyección del par estadístico media vs. desviación estándar (según Folk y Ward, 1957) para (a) el rango granulométrico completo (-8 a 8ϕ) del conjunto de la base de datos de los depósitos epiclásticos, (b) el rango granulométrico completo (-8 a 8ϕ) de los depósitos epiclásticos del Nevado de Toluca, y (c) el rango granulométrico de la matriz (-1 a 8ϕ) de los depósitos epiclásticos del Nevado de Toluca, donde los parámetros estadísticos fueron recalculados para dicho rango.

por actividad erosiva. Además, el Nevado de Toluca, junto con los grandes estratovolcanes mexicanos, registra las glaciaciones del Pleistoceno tardío, las cuales se ven reflejadas en los depósitos de morrenas localmente denominadas M-I (>32.000 ¹⁴C años BP), M-II (>11.500 ¹⁴C años BP) y M-III (<11.500 ¹⁴C años BP) (Vázquez-Selem y Heine, 2004).

Se analizaron 141 muestras de sedimento obtenidas en el Nevado de Toluca, de las cuales 22 corresponden a los depósitos de flujos de escombros cohesivos estudiados por Capra y Macías (2000), 10 a la avalancha del sector N-NW (Bellotti, sin publicar) y 109 a depósitos epiclásticos no estudiados previamente (9 de facies de matriz de avalancha de escombros, 55 de flujos de escombros no cohesivos y 45 de tills). Los datos de tills fueron complementados con 11 muestras obtenidas en las morrenas de las laderas septentrionales del Iztaccihuatl. La base de datos fue ampliada hasta un número de 337 muestras gracias a los datos publicados sobre los depósitos de avalancha de escombros del Monte

Santa Elena y el Nevado del Ruiz (Glicken, 1996; Pierson *et al.*, 1990), de varios flujos de escombros cohesivos del Monte Rainier (Vallance y Scott, 1997, Crandell, 1971), de flujos de escombros no cohesivos del Popocatepetl, Monte Santa Elena, Nevado del Ruiz y Monte Rainier (Crandell, 1971; Major y Voight, 1986; Pierson *et al.*, 1990; Capra *et al.*, 2004). Esta compilación de datos publicados tiene como objetivo de darle mayor peso estadístico al estudio.

DESCRIPCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS DEPÓSITOS EPICLÁSTICOS

En esta sección se presenta una descripción cuantitativa de la distribución granulométrica obtenida a partir de la base de datos. Como primera aproximación se visualizaron las proporciones de Grava-Lodo-Arena (GLA) y las proporciones de Arena-Arcilla-Limo (AAL) en diagramas

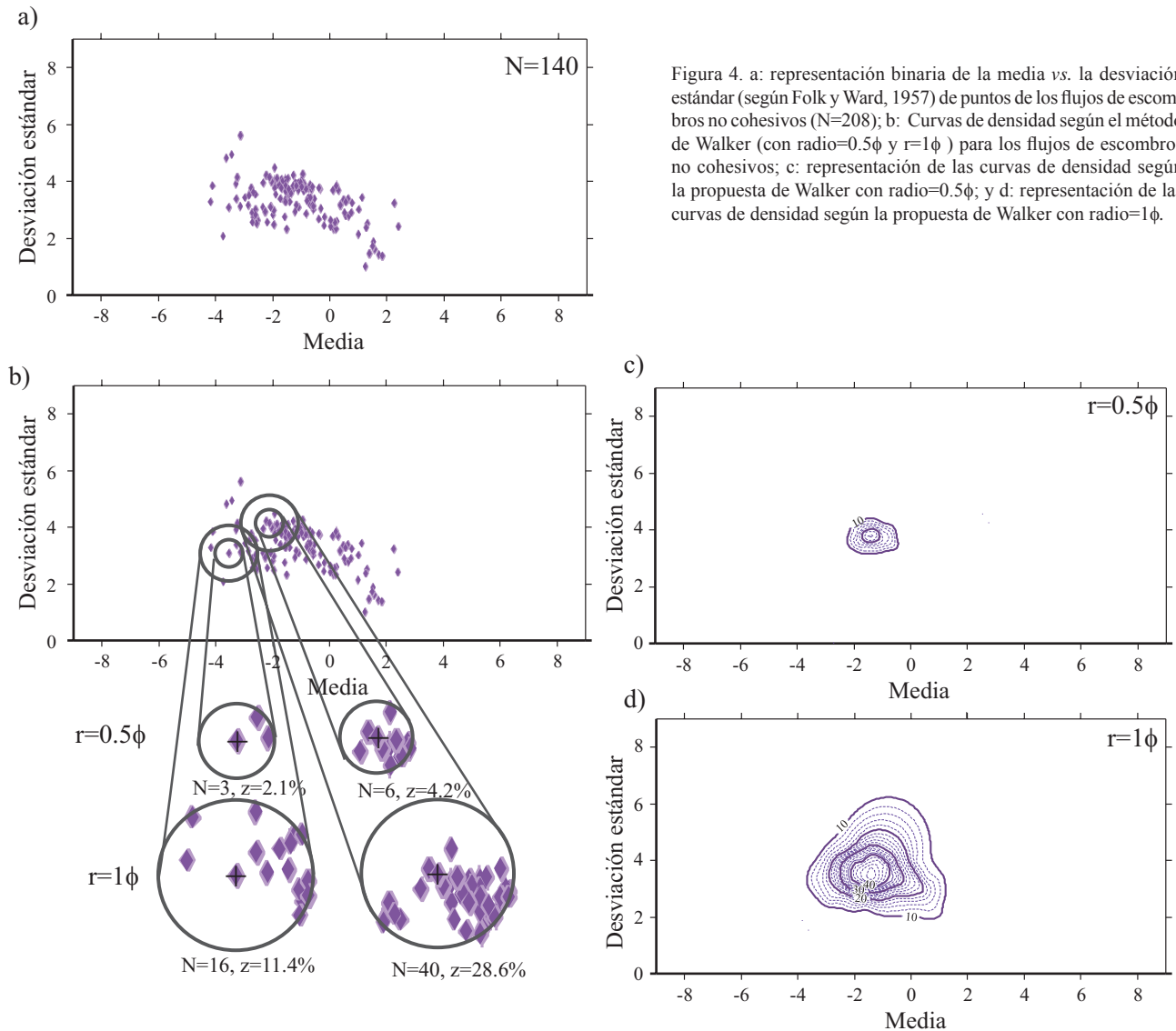


Figura 4. a: representación binaria de la media vs. la desviación estándar (según Folk y Ward, 1957) de puntos de los flujos de escombros no cohesivos (N=208); b: Curvas de densidad según el método de Walker (con radio=0.5φ y r=1φ) para los flujos de escombros no cohesivos; c: representación de las curvas de densidad según la propuesta de Walker con radio=0.5φ; y d: representación de las curvas de densidad según la propuesta de Walker con radio=1φ.

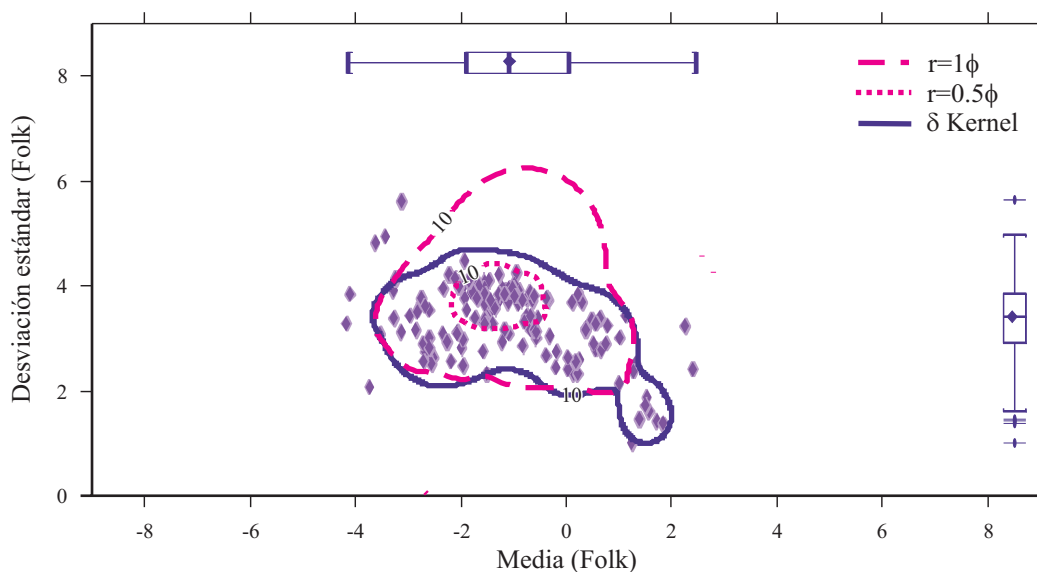


Figura 5. Comparativa de métodos para obtener la curva de densidad a través de la curva de densidad del 10%. Las curvas discontinuas corresponden a los resultados según la interpolación tipo *Kriging* del conteo de vecinos en un radio de 0.5ϕ (curva de puntos discontinuos) y de 1ϕ (curva de líneas discontinuas). La curva continua corresponde a los resultados obtenidos empleando la función de densidad de *kernel*. La función *kernel density* está disponible en el programa informático *ArcGis 9.1* y se basa en la función cuadrática descrita por Silverman (1987, p. 76, ecuación 4.5).

ternarios. En estos diagramas (Figura 1) se puede observar que aun cuando los diferentes depósitos epiclásticos presentan proporciones granulométricas similares, existen ciertas tendencias que los distinguen. Las más características son: el enriquecimiento en lodo, concretamente en arcilla para los flujos de escombros cohesivos, el enriquecimiento en arena de los flujos de escombros no cohesivos y el enriquecimiento en grava y empobrecimiento en arcilla y limo de los depósitos de till. Numéricamente, los depósitos epiclásticos en estudio tienen en común presentar menos de 52% de lodo, menos de 37% de arcilla y menos de 47% de limo. En la Tabla 1 se pueden observar con más detalle los distintos rangos, muy amplios para cada categoría, en donde resalta que los depósitos de till presentan el contenido más bajo de lodo, mientras que los depósitos de flujos de escombros cohesivos muestran los valores más altos de arcilla y las avalanchas de escombros los más bajos. Con respecto a la composición de la matriz (arena+limo+arcilla), es importante observar la variación en el contenido de arcilla. En particular, las facies de matriz de las avalanchas de escombros pueden alcanzar valores de hasta un 4% de arcilla, los flujos de escombros cohesivos hasta un 37%, los flujos de escombros no cohesivos hasta un 15% y los tills hasta un 6% de arcilla.

A continuación se evalúan, mediante un diagrama de cajas y bigotes, los parámetros estadísticos de cada tipo de depósito (Figura 2). En este diagrama se visualiza rápidamente la media, mediana y la dispersión de los datos al 50% (caja) representados por el 1^{er} y el 3^{er} cuartil (ver Tabla 2) y la dispersión de los datos al 90% (bigotes). Aunque se exponen los resultados para los momentos estadísticos calculados según Inman (1952) y Folk y Ward (1957), se

resumen aquí solamente las observaciones realizadas con los valores estadísticos de Folk y Ward (1957) ya que consideran en sus cálculos las colas de distribución y por lo tanto sus resultados son más precisos.

De la gráficas de la Figura 2 se desprende que los depósitos de facies de matriz de avalanchas de escombros y los flujos de escombros no cohesivos presentan un tamaño de grano promedio menor (arena muy gruesa y gránulo) y los depósitos de till muestran un tamaño promedio mayor (gránulo y guijarro). Los depósitos de flujos de escombros no cohesivos pueden presentar un tamaño promedio desde arena muy gruesa hasta guijarro. La desviación estándar de los depósitos epiclásticos puede ser de pobremente clasificada a muy pobremente clasificada, siendo los flujos de escombros cohesivos los más pobremente clasificados (Figura 2d). La asimetría de las curvas de distribución granulométrica de los depósitos epiclásticos suele ser de muy positiva a simétrica, en donde los flujos de escombros cohesivos y los depósitos de till son los más enriquecidos en finos (asimétricas positivas y muy positivas) y las avalanchas de escombros las menos enriquecidas (de simétricas a asimétricamente positivas). Los depósitos de flujos de escombros no cohesivos pueden presentar una distribución desde simétrica hasta asimétricamente muy positiva. La curtosis de las curvas de distribución granulométrica de los depósitos epiclásticos puede ser platicúrtica, mesocúrtica o leptocúrtica, siendo los depósitos de till más platicúrticos, mientras que el resto de los depósitos en estudio suelen ser de mesocúrtico a platicúrtico.

En estos diagramas de cajas y bigotes se observa cómo la desviación estándar es el parámetro que presenta mayor diferencia entre los depósitos epiclásticos. Así que

Tabla 2. Descripción numérica de la distribución de los datos de los momentos estadísticos correspondientes a la distribución granulométrica de los depósitos epiclásticos. Donde 1Q es el primer cuartil y 3Q el tercer cuartil.

	Mínimo	1 Q	Mediana	Media	3 Q	Máximo	N
<i>Mediana.Inman</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	-3.70	-1.45	-0.90	-1.03	-0.10	0.83	36
Flujo de escombros cohesivos	-7.20	-2.07	-0.93	-1.09	-0.07	3.32	65
Flujo de escombros no cohesivos	-4.49	-3.21	-1.40	-1.4	0.16	1.82	62
Till	-5.71	-3.51	-2.77	-2.59	-1.56	2.45	56
<i>Desviación Estandar.Inman</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	3.21	3.49	3.73	3.72	3.92	4.37	36
Flujo de escombros cohesivos	2.87	4.19	4.75	4.67	5.11	6.10	65
Flujo de escombros no cohesivos	0.91	2.77	3.18	3.17	3.58	4.80	62
Till	1.00	3.47	3.92	3.74	4.20	4.87	56
<i>Asimetría Gráfica.Inman</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	-0.34	-0.10	-0.02	0.02	0.13	0.47	36
Flujo de escombros cohesivos	-0.13	0.04	0.15	0.18	0.30	0.49	43
Flujo de escombros no cohesivos	-0.37	-0.10	0.10	0.11	0.33	0.61	55
Till	-0.34	0.08	0.19	0.18	0.34	0.64	56
<i>Media.Folk</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	-2.86	-1.32	-0.91	-0.98	-0.30	0.31	36
Flujo de escombros cohesivos	-5.70	-2.07	-1.12	-1.297	-0.45	1.38	43
Flujo de escombros no cohesivos	-4.22	-1.98	-1.17	-1.08	-0.04	2.38	166
Till	-4.56	-2.88	-2.24	-2.12	-1.40	2.44	56
<i>Desviación Estandar Inclusiva.Folk</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	3.07	3.43	3.57	3.58	3.80	4.15	36
Flujo de escombros cohesivos	2.85	3.98	4.43	4.67	4.95	7.90	43
Flujo de escombros no cohesivos	1.01	2.91	3.41	3.32	3.84	5.62	140
Till	1.04	3.34	3.61	3.50	3.94	4.35	56
<i>Asimetría Gráfica Inclusiva.Folk</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	-0.27	-0.05	-0.01	0.56	0.14	0.47	36
Flujo de escombros cohesivos	-0.13	0.10	0.24	0.22	0.31	0.54	43
Flujo de escombros no cohesivos	-0.33	0.00	0.19	0.55	0.46	3.46	166
Till	-0.29	0.10	0.21	0.20	0.34	0.63	56
<i>Curtosis.Folk</i>							
Avalancha de escombros (f. matriz)	0.63	0.82	0.87	0.87	0.92	1.12	36
Flujo de escombros cohesivos	0.73	0.79	0.86	0.91	0.95	1.55	43
Flujo de escombros no cohesivos	0.54	0.73	0.79	0.84	0.94	1.61	140
Till	0.63	0.74	0.82	0.84	0.87	1.35	56

este parámetro será utilizado junto con la media para describir las diferencias en la distribución granulométrica de los depósitos.

Al proyectar el par estadístico media vs. desviación estándar (Figura 3a) y resaltando los puntos que se refieren a las muestras recolectadas en el Volcán Nevado de Toluca (Figura 3b), se observa una tendencia común para las distintas categorías, de manera independiente de si los datos corresponden a un volcán u otro. Esta tendencia indica que los depósitos epiclásticos presentan un amplio rango de tamaños medios desde guijarro hasta arena (medias o gruesas) y una desviación estándar que define las muestras entre bien clasificadas y muy pobremente clasificadas. Finalmente, se incluyó el análisis de la matriz para las muestras del Nevado de Toluca (Figura 3c), en el cual se observa que el rango de

tamaños medios va de arena muy gruesa a arena media y la selección varía desde muy bien clasificado a pobremente clasificado. Se incluyó el análisis de la matriz con el fin de evaluar las posibles diferencias a una escala menor.

En estos diagramas podemos observar ciertas tendencias según el tipo de depósito, como el enriquecimiento en la media de la distribución hacia tamaños más finos para los depósitos de flujos de escombros no cohesivos, el enriquecimiento en la media de la distribución hacia tamaños gruesos para los depósitos de till y la peor clasificación de tamaños en los depósitos de flujos de escombros cohesivos. Dada la dificultad de analizar comparativamente los diferentes tipos de depósitos epiclásticos se hizo uso de las curvas de densidad de *kernel* para la descripción e interpretación de los resultados.

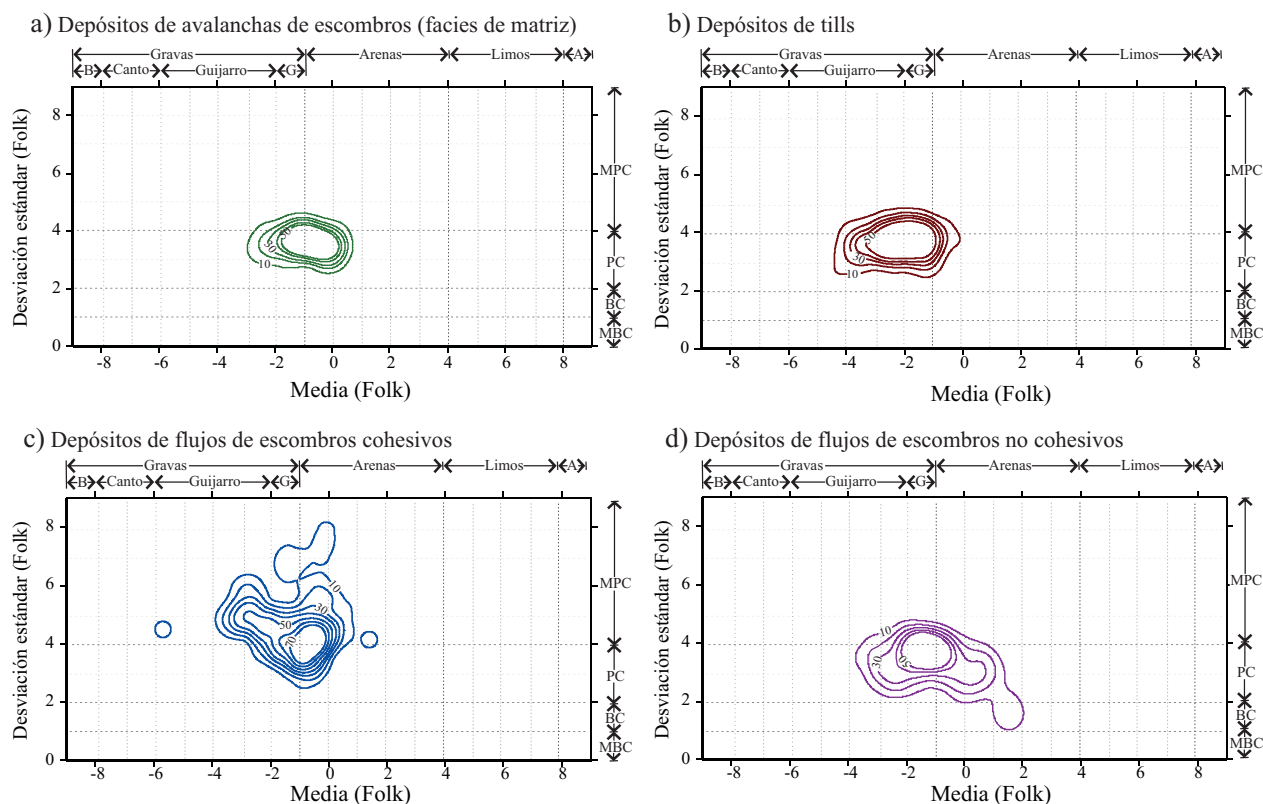


Figura 6. Curvas de densidad de *kernel* de los depósitos epiclásticos en estudio. a: depósitos de facies de matriz de avalancha de escombros; b: depósitos de till; c: depósitos de flujos de escombros cohesivos; y d: depósitos de escombros no cohesivos. A: Arcilla; B: Bloque; G: gránulo; MBC: muy bien clasificado; BC: bien clasificado; PC: pobremente clasificado; MPC: muy pobremente clasificado.

DESCRIPCIÓN DE LAS CURVAS DE DENSIDAD DE LOS DEPÓSITOS EPICLÁSTICOS

La distribución granulométrica de los depósitos de facies de matriz de avalanchas de escombros (Figura 6a) se caracteriza por presentar una dispersión máxima de los valores de la media entre -3.2 y 0.5ϕ . La máxima agrupación de los datos se da entre -1.2 y -0.6ϕ . El 90% de la muestra presenta valores de media comprendidos entre -3 y 0.4ϕ , es decir, los depósitos de facies de matriz de una avalancha de escombros presentan valores de media de tamaño de grano entre arena muy gruesa y gránulo. La desviación estándar de las distribuciones granulométricas presentan su máxima dispersión entre 2.7 a 4.7 , de pobremente clasificado a muy pobremente clasificado, y la máxima concentración de la desviación estándar se da en un intervalo entre 3.5 y 3.8 . Finalmente, la distribución granulométrica se identifica por ser simétrica y platicúrtica y puede presentar todo tipo de distribución modal, predominando la bimodal y polimodal (Figura 7).

La distribución granulométrica de los depósitos de flujos de escombros cohesivos (Figura 6c) se caracteriza por presentar una dispersión máxima de los valores de la media entre -3.8 y 1ϕ , con algunos valores aislados en -5.5 y 1.5ϕ . La máxima agrupación de los datos está entre -1

y -0.5ϕ . El 90% de la muestra presenta valores de media en un intervalo entre -3.5 y 0.8ϕ , es decir, los depósitos de flujos de escombros cohesivos presentan valores de media de tamaño de grano entre arena muy gruesa y guijarro. La desviación estándar de la distribución granulométrica presenta su máxima dispersión entre 2.5 a 6.2 , de pobremente clasificado a muy pobremente clasificado, con valores aislados entre 6 y 8 . La máxima concentración de la desviación estándar está en valores comprendidos entre 3.8 y 4.2 , justo en el límite entre pobremente y muy pobremente clasificadas. En la Figura 8 se observa que, al empeorar la clasificación, el contenido de arcilla aumenta. Esta tendencia se comprueba tras calcular el coeficiente de correlación derivado del análisis de covarianza de la desviación estándar y la proporción de arcilla vs. matriz (arena + limo + arcilla) (Tabla 3), observándose que la correlación es directa para estas dos variables (Figura 9a). Por el contrario, la correlación entre la desviación estándar y la proporción de arena vs. matriz (arena + limo + arcilla) es inversa (Figura 9b). La distribución granulométrica presenta asimetrías muy positivas y son platicúrticas con distribuciones bimodales y polimodales (Figura 7).

La distribución granulométrica de los depósitos de flujos de escombros no cohesivos (Figura 6d) se caracteriza por presentar una dispersión máxima de los valores de la

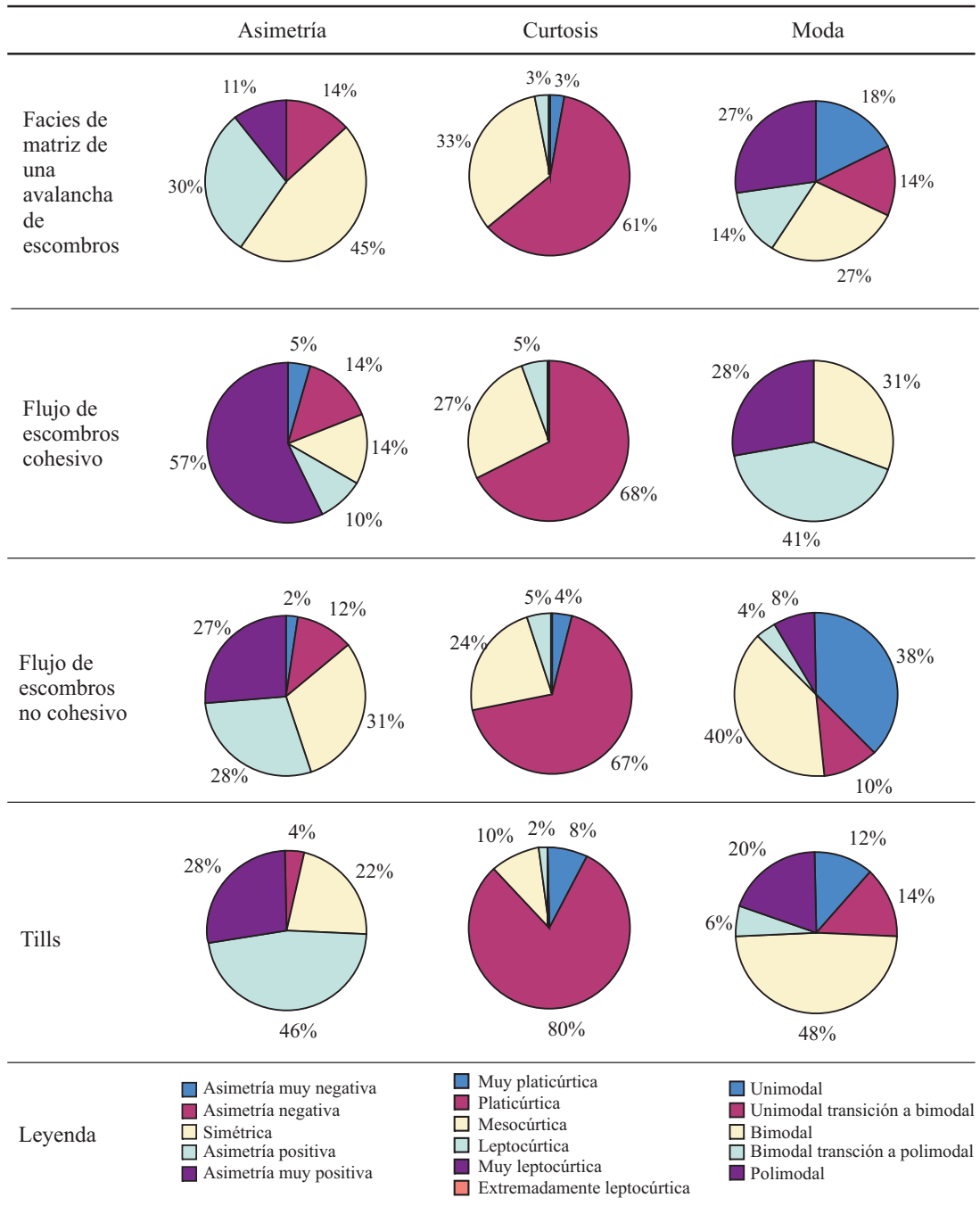


Figura 7. Parámetros estadísticos de la asimetría, curtosis y moda más comunes de las muestras localizadas dentro del área de la isolínea del 10%, es decir, el 90% de la muestra total, para cada uno de los depósitos epiclásticos.

media entre -3.5 y 2ϕ . La máxima agrupación de los datos se da entre -1.5 y -0.8ϕ . El 90% de la muestra presenta valores de media en un intervalo entre -3.2 y 1.5ϕ , es decir, los depósitos de flujos de escombros no cohesivos presentan valores de media de tamaño de grano entre arena gruesa y guijarro. La desviación estándar de la distribución granulométrica presenta su máxima dispersión entre 1 y 4.5, de bien clasificado a muy pobremente clasificado, y su máxima concentración está en valores comprendidos entre 3.5 y 4,

pobremente clasificadas. La distribución granulométrica tiene valores de asimetría desde asimétrica muy positiva a simétrica, con formas platicúrticas y distribuciones bimodales y unimodales (Figura 7). La Figura 10 muestra que los depósitos de flujos de escombros no cohesivos peor clasificados son los depósitos del SW del Monte Santa Elena frente a los depósitos del mismo tipo del Nevado de Toluca y del Popocatepetl (Figura 10).

Los depósitos de till (Figura 6b) se caracterizan por

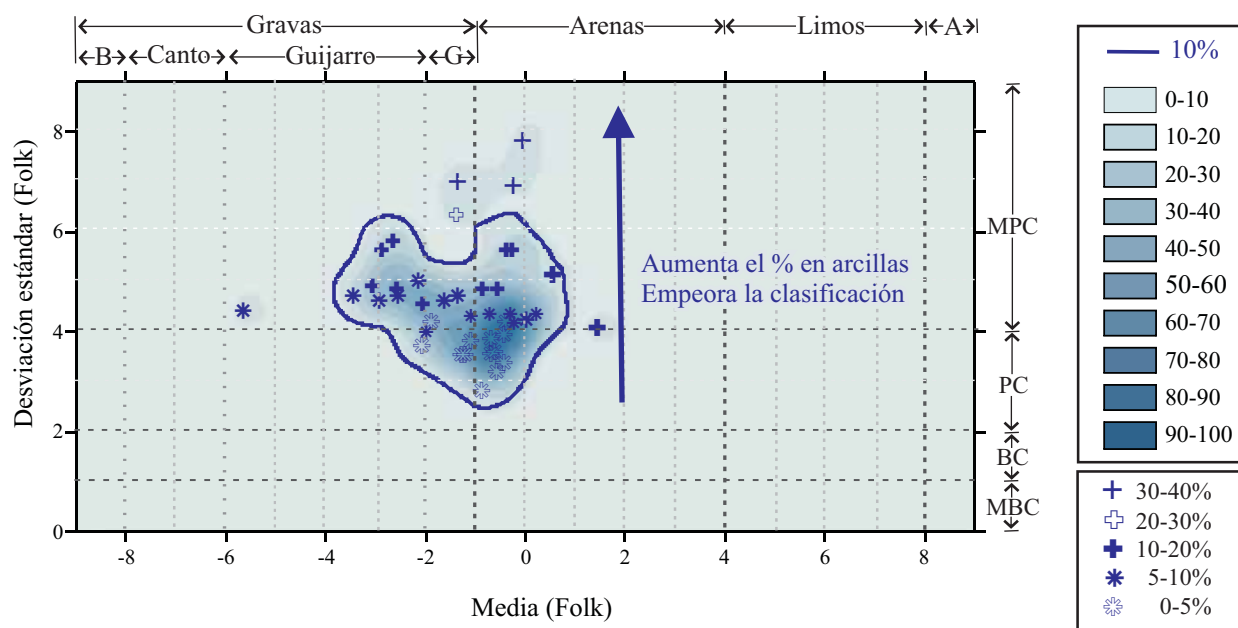


Figura 8. Visualización en la curva de densidades de los flujos de escombros cohesivos del empobrecimientos de la clasificación de los depósitos a medida que se incrementa el contenido en arcilla. A: arcilla; B: Bloque; G: gránulo; MBC: muy bien clasificado; BC: bien clasificado; PC: pobremente clasificado; MPC: muy pobremente clasificado.

presentar una dispersión máxima de la media entre -4.2 y 0ϕ . La máxima agrupación de los datos se da entre -2.5 y -1.5ϕ . El 90% de la muestra presenta valores de media comprendidos entre -4 y -0.5ϕ , lo que indica que los depósitos de till fundamentalmente presentan valores de media de un tamaño entre arena muy gruesa y guijarro. La desviación estándar presenta su máxima dispersión entre 2.5 a 4.8, de pobremente clasificado a muy pobremente clasificado, y la máxima concentración se da en valores comprendidos entre 3.5 y 4, pobremente clasificadas. La distribución granulométrica presenta asimetría positiva y muy positiva y formas fundamentalmente platicúrticas con distribución bimodal (Figura 7).

COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS DEPÓSITOS EPICLÁSTICOS A TRAVÉS DE SUS CURVAS DE DENSIDAD

Las curvas de densidad del 10% de la desviación estándar (Figura 11a) indican que los depósitos de till, los depósitos de las facies de matriz de las avalanchas de escombros y los depósitos de los flujos de escombros no cohesivos son bastante similares; generalmente son pobremente clasificados, aunque con una tendencia de los flujos de escombros no cohesivos a ser bien clasificados. Por el contrario, los flujos de escombros cohesivos muestran una clara tendencia a ser muy pobremente clasificados y presentan una clasificación pobre en las muestras con media entre -2.5 y -1ϕ . Finalmente, los tills presentan una tendencia

hacia un aumento en el tamaño de grano medio mientras que las facies de matriz de las avalanchas de escombros y los flujos de escombros no cohesivos tienden hacia un tamaño de grano medio más fino. Al analizar los datos del Nevado de Toluca (Figura 11b) se observa que las tendencias son muy similares a las anteriormente descritas para el conjunto de la base de datos, a excepción de los flujos de escombros

Tabla 3. Resultados del cálculo de la covarianza y el coeficiente de correlación entre la desviación estándar y la proporción de las distintas clases granulométricas (x) frente al espectro granulométrico completo de la muestra (grava+arena+lodo) o frente al espectro de la matriz (arena+lodo+arcilla) de los diferentes depósitos epiclásticos.

	x/(arena+lodo+arcilla)			x/(grava+arena+lodo)		
	arcilla/	lodo/	arena/	grava/	arena/	lodo/
AE (fm)						
Covarianza	0.00	0.01	-0.01	-0.04	0.02	0.01
Coefficiente de correlación	0.37	0.45	-0.48	-0.42	0.36	0.52
FEC						
Covarianza	0.07	0.01	-0.08	0.01	0.04	-0.05
Coefficiente de correlación	0.95	0.23	-0.85	0.12	0.49	-0.47
FENC						
Covarianza	0.00	-0.01	0.01	0.05	-0.07	0.02
Coefficiente de correlación	-0.19	-0.19	0.19	0.39	-0.59	0.40
TILL						
Covarianza	0.00	0.01	-0.01	0.01	-0.02	0.01
Coefficiente de correlación	0.11	0.23	-0.23	0.14	-0.24	0.51

AE (fm): depósitos de las facies de matriz de las avalanchas de escombros; FEC: depósitos de flujos de escombros cohesivos; FENC: depósitos de flujos de escombros no cohesivos; y TILL: depósitos de till.

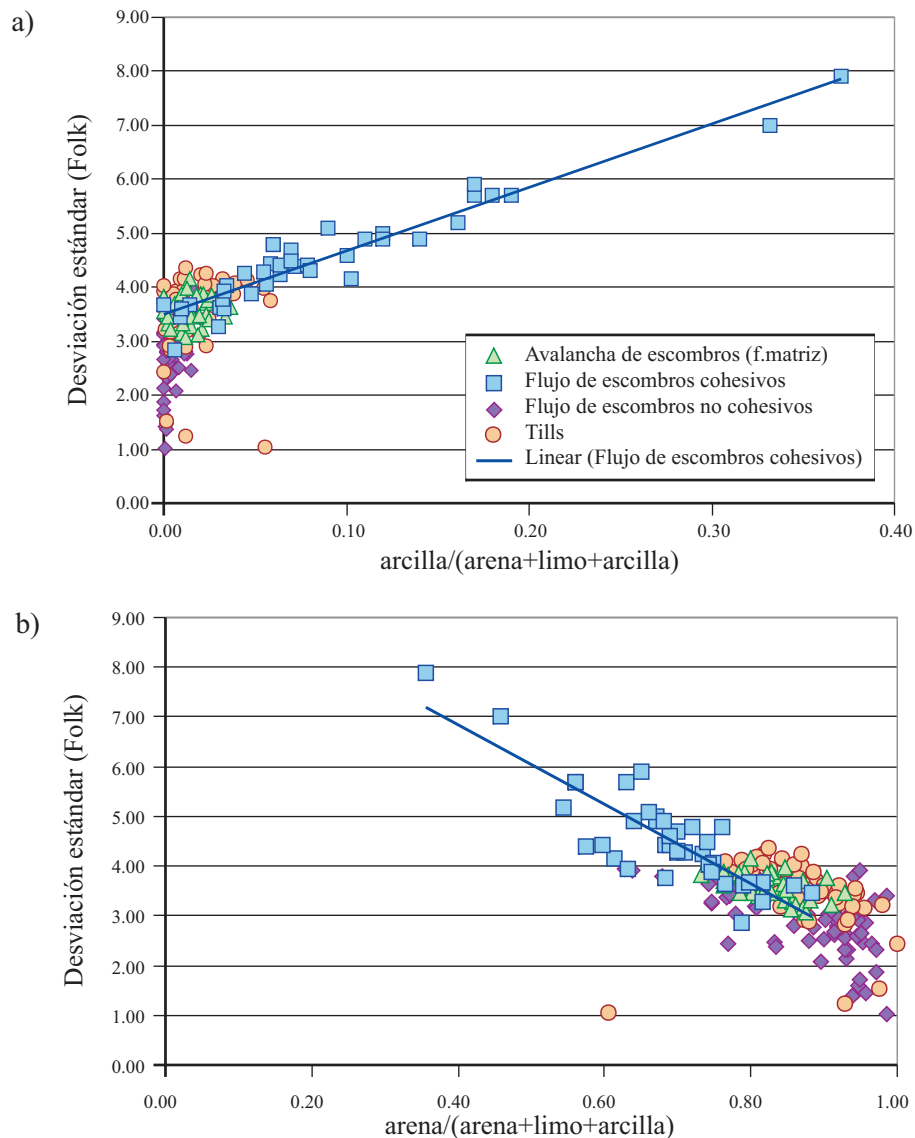


Figura 9. Coeficiente de correlación entre (a) la proporción entre la desviación estándar y la proporción de arcilla vs. matriz (arena + limo + arcilla) y (b) entre la desviación estándar y la proporción de arena vs. matriz (arena + limo + arcilla). De la gráfica se desprende que la clasificación empeora al aumentar el contenido de la fracción arcillosa.

cohesivos que se muestran mejor clasificados cuando no se incluyen las muestras de las otras localidades de la base de datos.

En el análisis comparativo de las curvas de densidad para la matriz (arena+lomo+arcilla) de estos cuatro depósitos (Figura 11c) se puede apreciar que la clasificación empeora con la disminución del tamaño de grano medio, donde los flujos de escombros cohesivos tienen una matriz muy fina y pobremente clasificada, mientras que la matriz de los flujos de escombros no cohesivos y tills presenta una tendencia a ser más gruesa y mejor clasificada. Analizando conjuntamente las curvas de densidad para los dos rangos granulométricos (el completo y el de la matriz), se pueden explicar mejor algunas características en la distribución granulométrica de los depósitos epiclásticos. La mejor o

peor clasificación de un depósito está relacionada con la proporción de arena respecto a lodo (lomo+arcilla) en la matriz. A mayor contenido de arena, mejor clasificación, y a mayor contenido de lodo, peor clasificación, tanto en la matriz como en el total de la muestra. Los depósitos más enriquecidos en arena son los flujos de escombros no cohesivos mientras que los más enriquecidos en lodo son los flujos de escombros cohesivos.

Es evidente que la comparación de las características granulométricas hasta aquí descrita no permite aislar campos para cada uno de los depósitos analizados. Sin embargo, se han evidenciado tendencias importantes para cada una de estas categorías. Cabe recordar que tampoco en la gráfica propuesta por Walker (1971) se logró definir áreas únicas para cada tipo de depósito piroclástico, lo que revela la

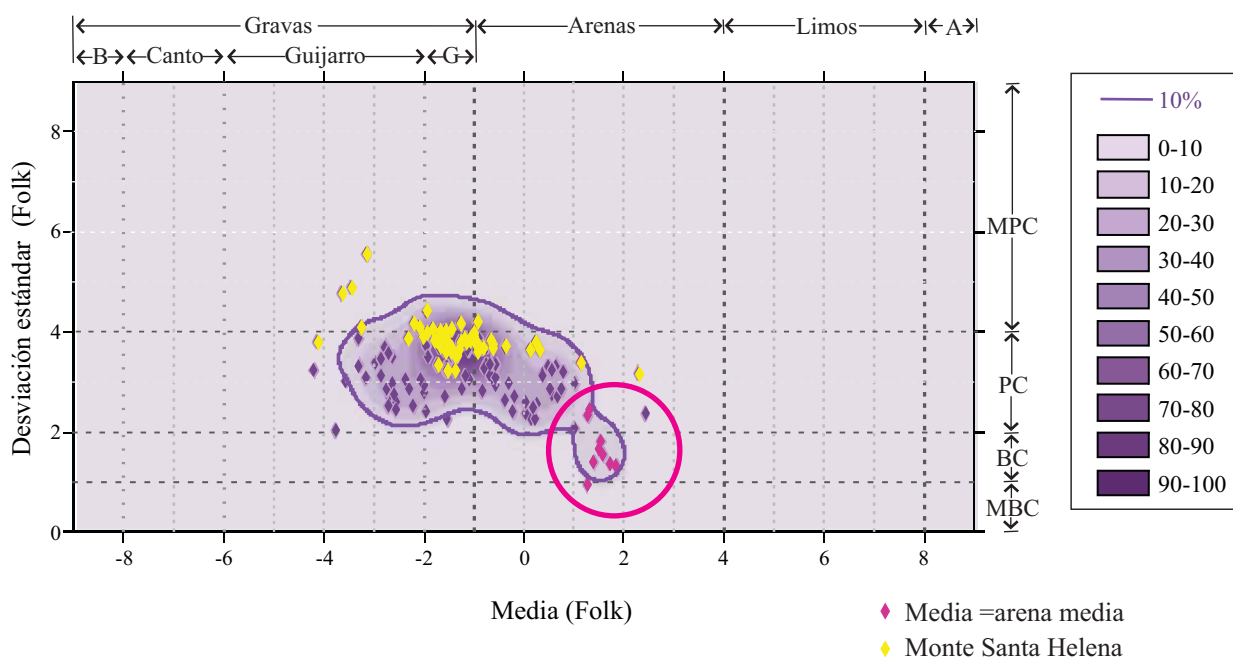


Figura 10. Visualización en la curva de densidades de los flujos de escombros no cohesivos. Las muestras con mejor grado de clasificación y con medias arenosas están en el círculo rosa. Las muestras con peor grado de clasificación corresponden a los depósitos del SW del Monte Santa Elena. B: Bloque; G: gránulo; A: arcilla; MBC: muy bien clasificado; BC: bien clasificado; PC: pobremente clasificado; MPC: muy pobremente clasificado.

innegable similitud granulométrica entre los depósitos volcanoclásticos.

A continuación se tratará de dar una explicación genética a las diferencias observadas, las cuales tienen una clara implicación en el origen y mecanismo de transporte y emplazamiento.

Los depósitos de facies de matriz de las avalanchas de escombros presentan una distribución “central” con respecto a los otros depósitos analizados, sin tener una tendencia clara (Figura 11a). Para este estudio se analizaron avalanchas claramente asociadas a eventos magmáticos, en volcanes de composición dacítica, en donde el fluido presente era probablemente inferior al 10% en volumen de la masa total, por lo que no representa una fase fluida capaz de saturar los sedimentos. Como ya han descrito muchos autores, el emplazamiento de las avalanchas de escombros generalmente ocurre en masa sobre de un horizonte basal con elevados esfuerzos de cizalla. La fragmentación del material normalmente ha sido asociada a la dilatación del material al momento del colapso (Glicken, 1996), mientras que durante el transporte domina un proceso de dilatación de la masa, producto del esfuerzo de dispersión generado por la colisión entre las partículas. Por este motivo, la línea de contornos de densidad del 90% que representa los depósitos de avalancha de escombros es quizás más regular y pequeña indicando un proceso de fragmentación muy limitado durante el transporte. Eso hace muy difícil poder discriminar desde de un punto de vista granulométrico las avalanchas de escombros de otro tipo de depósitos epiclásticos, ya que podría ser muy similar a los flujos de escombros y tills en su

posición proximal respecto a su fuente. Sin embargo, cabe mencionar que las avalanchas de escombros son quizás los depósitos epiclásticos más fáciles de discriminar (frente a los depósitos de flujos de escombros y tills) por sus características texturales a nivel de afloramiento, como son la presencia de estructuras en rompecabezas y de marcas de percusión en sus facies de bloques (Ui, 1989).

Los depósitos de flujos de escombros cohesivos son claramente peor clasificados que cualquier otro de los depósitos epiclásticos estudiados debido a un elevado contenido en sedimentos finos. Los flujos de escombros cohesivos generalmente son derivados del colapso de un edificio volcánico, y el abundante contenido en finos se debe en gran medida a la elevada alteración hidrotermal de la masa antes del colapso. El elevado contenido en arcilla (y de lodo en general) determina que los flujos sean muy competentes y las fuerzas de cohesión ejercitadas por la mezcla de agua y sedimentos son capaces de transportar las partículas de mayor tamaño inhibiendo la colisión y separación por gravedad durante el emplazamiento, proceso que llevaría a una mejor clasificación del mismo. La presencia de grava ha sido explicado por un proceso de *bulking*, que corresponde a erosión e introducción de material bien clasificado desde el cauce de río (Vallance, 2000).

Los flujos de escombros no cohesivos son los depósitos con mayor rango de distribución de la media y son también los más enriquecidos en arena, lo cual mejora el grado de clasificación. El proceso de erosión e incorporación de escombros exóticos secundarios (conocido por *bulking*) puede ser nuevamente el responsable de la mejora de la

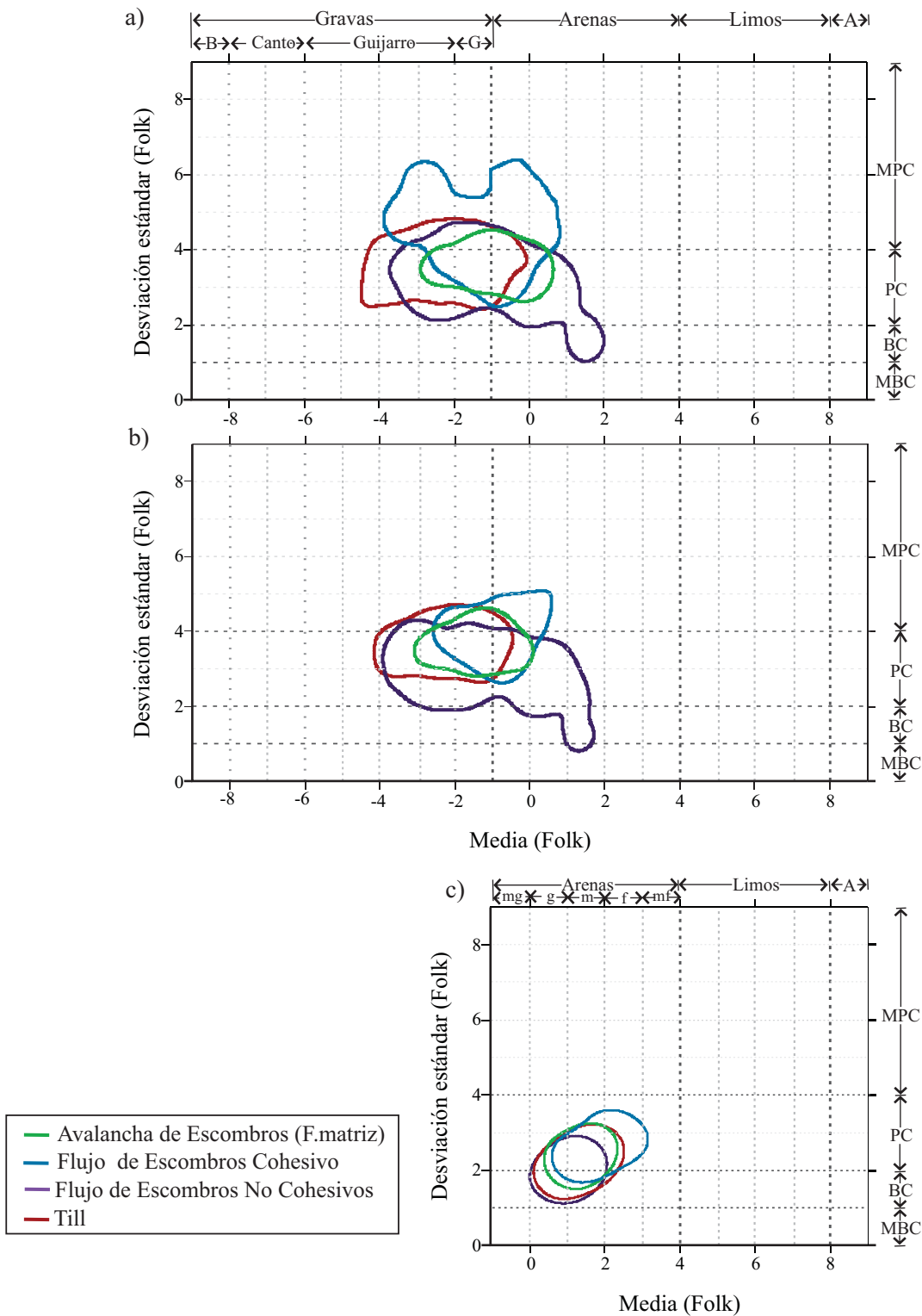


Figura 11. Superposición de las curvas de densidad del 10% de todos los depósitos epiclásticos. a: Todos los datos; b: depósitos epiclásticos del Nevado de Toluca considerando su rango granulométrico completo (-8 a 8φ); c: depósitos epiclásticos del Nevado de Toluca considerando el rango granulométrico sólo de la matriz (-1 a 8φ). Donde, B: bloque; G: gránulo; A: arcilla; mg: muy gruesa; g: gruesa; m: media; f: fina; mf: muy fina; MPC: muy pobremente clasificada; PC: pobremente clasificada; BC: bien clasificada; MBC: muy bien clasificada.

clasificación de los flujos de escombros no cohesivos al incorporar material grueso y mejor clasificado de los cauces de los ríos (Vallance, 2000). En la Figura 10a se observa cómo los flujos de escombros no cohesivos muestran una tendencia clara a la disminución tanto del tamaño medio como del grado de clasificación, en comparación con el resto de los depósitos epiclásticos. Las muestras con mejor clasificación y con valores de la media en tamaños de arena media son los flujos de escombros no cohesivos. Se puede interpretar que el material fuente ya era rico en partículas de tamaño arena, como puede ser un flujo piroclástico de pómez o de bloques y cenizas, o bien flujos de escombros no cohesivos más diluidos que empiezan a comportarse como un flujo hiperconcentrado. La menor proporción de lodo en los flujos de escombros no cohesivos en comparación a los flujos de escombros cohesivos es la causa de las diferencias en los mecanismos de transporte y depósito de ambos tipos de eventos debido al diferente grado de cohesión. La ausencia de arcilla en el flujo hace que los clastos de mayor tamaño se vayan separando del flujo durante el emplazamiento.

Las características sedimentológicas de los depósitos de till están asociadas al transporte reducido (<5 km en las laderas del Nevado de Toluca) y lento (cm/día) del escombros. Se considera que la máxima aportación de escombros al glaciar es de origen supraglaciar, lo que explicaría la media más grande con respecto a los demás depósitos epiclásticos. La mala clasificación de los depósitos de till responde, en cierta medida, a la ausencia de fragmentación durante el transporte glaciar. Teóricamente la única fragmentación que puede darse es por gelifración. El origen de la arcilla (menos del 6 %) podría estar relacionado con la abrasión entre los escombros y el hielo durante el transporte. Este porcentaje de arcilla puede no ser representativo de toda la arcilla que puede generarse durante el transporte glaciar, la cual se deposita fundamentalmente en la zona subglaciar y sólo una pequeña proporción de ésta es transportada a posiciones marginales de crecimiento de morrenas cuando un obstáculo subglaciar provoca divergencias en las líneas de flujo (Boulton, 1978). Además, se debe considerar la pérdida de material fino que puede ser transportado en suspensión por el agua de fusión.

CONCLUSIONES

Del presente estudio granulométrico de cuatro tipos de depósitos epiclásticos asociados a las laderas volcánicas destaca que las partículas transportadas en flujos dominados por mecanismo de transporte masivos (avalancha de escombros, flujos de escombros cohesivos y glaciar) no sufren fragmentación ni segregación significativa. Por el contrario, debido a la falta de cohesión de la mezcla de agua y sedimentos, las partículas transportadas por flujos de escombros no cohesivos sufren segregación llevando a un cambio evidente en la granulometría del depósito. Además,

la incorporación de sedimentos durante el flujo hace que se enriquezca de un determinado tipo de tamaño y que presente mejor clasificación que el resto de depósitos epiclásticos.

Se puede afirmar que la desviación estándar es el parámetro descriptivo que más diferencias presenta entre los depósitos epiclásticos, y que una mejor o peor clasificación de la distribución granulométrica se relaciona con la proporción de arena frente a lodo en la matriz y en particular con el contenido de fracción arcillosa. Por último, las curvas de distribución granulométrica de los depósitos epiclásticos son más dependientes de la distribución granulométrica del material fuente que del proceso de transporte y depósito que sufren los escombros.

Las gráficas comparativas de las curvas de densidad de los parámetros estadísticos de la media frente a la desviación estándar son una herramienta útil para el análisis granulométrico de los depósitos, aunque presentan algunas deficiencias. Para poder utilizarla como criterio de discriminación se requiere un número mínimo de muestras del mismo depósito epiclástico para describir su tendencia granulométrica y así poderla comparar con las ya analizadas.

Un estudio complementario de la forma y la fábrica de los depósitos podría ayudar a encontrar una relación de parámetros que caracterice y diferencie los depósitos epiclásticos desde un punto de vista integral de la textura y no solamente por su granulometría.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por CONACYT (proyectos 37889 y 46340 a Lucia Capra) y por la Dirección de Intercambio Académico de la S.R.E. por medio de una beca de doctorado a Lia M^a Carreras. Agradecemos muy especialmente a Norma Dávila, Lizeth Caballero, Fernando Bellotti, Esmeralda González, Giovanni Sosa y Marcos Luna por el soporte técnico a lo largo del trabajo de campo desarrollado en el Nevado de Toluca. Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem por su asesoría en campo y gabinete sobre el muestreo y estudio de los depósitos de till del Nevado de Toluca y el Iztaccíhuatl. Y las revisiones de los doctores Cupul, Kasper-Zubillaga y Martín Barajas, las cuales mejoraron sustancialmente la versión final del trabajo.

REFERENCIAS

- Boulton, G.S., 1978, Boulder shapes and grain-size distributions of debris as indicators of transport paths through a glacier and till genesis: *Sedimentology*, 25(6), 773-798.
- Caballero-García, A.M.L., 2007, Análisis textural del depósito de avalancha de escombros "El Zaguán", Volcán Nevado de Toluca: Dinámica de transporte y mecanismo de emplazamiento: México, D.F., Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 107p.
- Capra, L., Macías, J.L., 2000, Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico: *Journal of Volcanology and*

- Geothermal Research, 102, 149-168.
- Capra, L., Poblete, M.A., Alvarado, R., 2004, The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 351-369.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J.W., Rose, W.I., 1993, A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 35-46.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. Modern and ancient: London, Allen & Unwin, 528p.
- Crandell, D.R., 1971, Postglacial lahars from Mount Rainier Volcano, Washington: United States Geological Survey, Professional Paper, 677, 75 p.
- Crandell, D.R., Miller, C. D., Gicken, H.X., Christiansen, R.L., Newhall, C.G., 1984, Catastrophic debris avalanche from ancestral Mount Shasta volcano, California: *Geology*, 12, 143-146.
- Costa, J.E., 1988, Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hiperconcentrated flows and debris flows, *en* Baker, V.R., Kocheil, R.C., Patton, P.C. (eds.), *Flood Geomorphology*: New York, Wiley, 113-122.
- de Beni, E., 2001, Evolucion e geológica del vulcano Nevado de Toluca, Messico. Analisis stratigrafica, petrografica e geoquimica: Milano, Università degli studi di Milano, Tesi di Laurea, 266p.
- Fisher, R.V., 1966, Rocks composed of volcanic fragments and their classification: *Earth-Sciences Reviews*, 1, 287-298.
- Fisher, R.V., Smith, G.A., 1991, Volcanism, tectonics and sedimentation, *en* Fisher, R.V., Smith, G.A. (eds.), *Sedimentation in volcanic settings*: Tulsa, Oklahoma, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, 45, 1-5.
- Folk, R.L., 1954, The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature: *Journal of Geology*, 62, 344-359.
- Folk, R.L., 1966, A review of grain-size parameters: *Sedimentology*, 6, 73-93.
- Folk, R.L., 1974, *Petrology of sedimentary rocks*: Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 105p.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957, Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters: *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- Friedman, G.M., 1962, On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones: *Journal of Geology*, 70, 737-756.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., Espindola, J.M., 2002, Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central México: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Map and Chart Series MCH089.
- Glicken, H., 1996, Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington: United States Geological Survey, Open File Report, 96-677, 90 p.
- Hewitt, K., 1999, Quaternary moraines vs catastrophic rock avalanches in the Karakoram Himalaya, Northern Pakistan: *Quaternary Research*, 51, 220-237.
- Inman, D.L., 1952, Measures for describing the size distribution of sediments: *Journal of Sedimentary Petrology*, 22(3), 125-145.
- Iverson, R.M., 1997, The physics of debris flows: *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296.
- Kellerhals, R., Bray, D., 1971, Sampling procedures for coarse fluvial sediments: *Journal of the Hydraulics Division*, 97(8), 1165-1180.
- Macías, J.L., García-Palomo, A., Arce, J.L., Siebe, C., Espindola, J.M., Komorowski, J.C., Scott, K., 1997, Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlán volcanoes, Central México, *en* Link, P.K., Kowallis, B.J. (eds.), *Proterozoic to Recent Stratigraphy, Tectonics, and Volcanology*, Utah, Nevada, Southern Idaho, and central Mexico: Brigham Young University, Geology Studies, 42(1), 493-528.
- Major, J.J., Voigt, B., 1986, Sedimentology and clast orientation of the 18 May 1980 southwest-flank lahars, Mount St. Helens, Washington: *Journal of Sedimentary Petrology*, 56(5), 691-705.
- Mc Guire, W.J., 1996, Volcano instability: a review of contemporary themes, *en* Mc Guire, W.J., Jones, A.P., Neuberger, J. (eds.), *Volcano Instability on the Earth and Other Planets: Geological Society Special Publication*, 110, 1-23.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, D., 1993, *Volcanic textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*: Tasmania, University of Tasmania, Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, 169 p.
- Mullineaux, D.R., Crandell, D.R., 1962, Recent lahars from Mount St. Helens, Washington: *Geological Society of America Bulletin*, 73, 855-870.
- Norini, G., Gropelli, G., Capra, L., de Beni, E., 2004, Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): new insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano: *Geomorphology*, 62(1-2), 47-61.
- Pierson, T.C., 1985, Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars, Mount St. Helens, Washington: *Geological Society of America Bulletin*, 96, 1056-1069.
- Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987, A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, *en* Costa J.E., Wieczorek, G.F. (eds.), *Debris flow/avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*: Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., Borrero, C.A., 1990, Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- Schmincke, H.U., 1967, Graded lahars in the type sections of the Ellensburg Formation, South-Central Washington: *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(2), 438-448.
- Scott, K.M., 1988, Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system: United States Geological Survey, Professional Paper 1447-A, 74 p.
- Siebert, L., 1992, Threats from debris avalanches: *Nature*, 356, 658-659.
- Silverman, B.W., 1987, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*: London, Chapman & Hall, 175 p.
- Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991, Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum, *en* Fisher, R.V., Smith, G.A. (eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings*: Tulsa, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, 45, 59-70.
- Ui, T., 1989, Discrimination between debris avalanches and other volcanoclastic deposits, *en* Latter, J.H. (ed.), *Volcanic Hazards: Assessment and Monitoring*, IAVCEI Proceedings in Volcanology, v. 1: Berlin, Springer-Verlag, 201-209.
- Vallance, J.W., 2000, Lahars, *en* Sigurdsson, H. (ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*: London, Academic Press, 601-616.
- Vallance, J.W., Scott K.M., 1997, The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow: *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 143-163.
- Vázquez-Selem, L., Heine, K., 2004, Late Quaternary glaciation of Mexico. *en* Ehlers, J., Gibbard, P.L. (eds.), *Quaternary Glaciation-Extent and Chronology, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*: Amsterdam, Elsevier, 233-242.
- Voigt, B., Glicken, H., Janda, R.J., Douglas, P.M., 1981, Catastrophic rockslide-avalanche of May 18, *en* Washington, P., Lipman, W., Mullineaux, D.R. (eds.), *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens*: United States Geological Survey, Professional Paper, 1250, 347-378.
- Walker, G.P.L., 1971, Grain-size characteristics of pyroclastics deposits: *Journal of Geology*, 79, 696-714.
- Wentworth, C.K., 1922, A scale of grade and class term for calstic sediment: *Journal of Geology*, 30, 377-392.

Manuscrito recibido: Junio 13, 2007

Manuscrito corregido recibido: Octubre 2, 2007

Manuscrito aceptado: Noviembre 5, 2007