

Construcción de perfiles granulométricos de depósitos piroclásticos por métodos ópticos

Damiano Sarocchi^{1,*}, Lorenzo Borselli² y José Luis Macías¹

¹ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, 04510 México D.F., México.

² Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Piazzale delle Cascine 15, 50144, Firenze, Italia.

* sarocchi@geofisica.unam.mx

RESUMEN

El análisis granulométrico de los depósitos piroclásticos proporciona información muy importante sobre los mecanismos de transporte y sedimentación de los flujos que los emplazaron. En este trabajo se presenta el método alternativo de las intersecciones de Rosiwal para el estudio de esta clase de depósitos. El método consiste en tomar fotografías de la pared del depósito desde una posición conocida. Por medio de un programa de análisis de imágenes, las fotografías se calibran dimensionalmente, procesándolas digitalmente para obtener un mejor detalle y se les sobreponen líneas horizontales paralelas a diferentes alturas. A lo largo de estas líneas se miden sus intersecciones con los clastos y, utilizando el método de Rosiwal, se obtienen las distribuciones granulométricas en los diferentes niveles del depósito. Comparando este método con el de conteo de puntos (análisis modal), que es ampliamente utilizado y ha sido ya comprobado, el resultado revela que el método de Rosiwal es aún más preciso.

Debido a que el análisis granulométrico óptico de un afloramiento puede ser alterado por la deformación debida a la perspectiva de la fotografía, se propone un método empírico, sencillo y riguroso para corregir los datos obtenidos. El método fue aplicado a dos afloramientos de un depósito de flujo de bloques y ceniza del volcán de Colima, el cual, aparentemente, se emplazó a partir de un flujo piroclástico. El análisis de las variaciones verticales de la granulometría con el método aquí propuesto, evidencia estructuras que no son apreciables a simple vista. Los resultados indican que el depósito está compuesto por dos unidades, las cuales probablemente representan dos flujos diferentes o dos pulsaciones del mismo flujo piroclástico. La técnica es muy útil para estudiar depósitos piroclásticos; sin embargo, los resultados obtenidos sugieren que podría aplicarse a otro tipo de depósitos granulares, ya sean de origen volcánico o no.

Palabras clave: análisis granulométrico, método de Rosiwal, volcán de Colima, depósitos piroclásticos.

ABSTRACT

Granulometric analysis of pyroclastic deposits provides important information about the transport and sedimentation mechanisms of the flows that generated them. In this paper, we introduce the alternative method of Rosiwal's intercepts to study this type of deposits. The method consists in taking photographs of the outcrop from a known position. By means of an image-analysis software, the images are calibrated and digitally processed in order to improve the resolution. Successively, a set of line probes are established at different heights in the deposit and parallel to the stratification surfaces. The clasts that intercept these lines are measured. By using the Rosiwal's method, we obtain the granulometric distribution at different levels of the deposit. A comparison of this method, with the more widely used and largely tested point-counting method, shows that de Rosiwal's intercept method is more reliable. Because all

the photographs taken from an outcrop are altered by the perspective of the photograph, we propose an empirical, practical, and yet rigorous method to correct the obtained data. The method was applied to two outcrops of an apparent single block- and ash-flow deposit at Colima volcano. The study of the vertical variations of granulometry by means of the Rosiwal's intercept method allowed us to recognize structures, not evident to the naked eye. The observed variations are probably related to the presence of two different flow units in the block-and-ash flow deposit that might be due to pulsating flow waves at the time of deposition. This technique is very useful to study pyroclastic deposits and the results suggest that it could be also applied to other kind of granular deposits.

Key words: granulometric analysis, Rosiwal's method, Colima volcano, pyroclastic deposits.

INTRODUCCIÓN

Las características texturales más importantes de una roca constituida por clastos consolidados o de un depósito sin consolidar son su granulometría, grado de selección y estructuras sedimentarias. Las estructuras reconocibles en el afloramiento (lentes, gradación, estratificación, etc.) permiten establecer la naturaleza del evento que las generó, el tipo de transporte y sedimentación. Para efectuar este tipo de análisis es necesario utilizar las técnicas clásicas como el muestreo en campo y el análisis granulométrico en el laboratorio (Taddeucci y Wohletz, 2001). Cuando los afloramientos tienen varios metros de espesor es necesario emplear técnicas de montañismo como el rapel (Capaccioni y Sarocchi, 1996), por lo que el trabajo se vuelve difícil, tedioso, y con un alto grado de riesgo. Para describir estructuras observables en paredes verticales, generalmente se efectúa una descripción a simple vista, basada en la posición y en las dimensiones de los clastos (bloques, cuyo diámetro es mayor de 64 mm). Debido a la importancia de esta información, es necesario cuantificar estas características de manera rápida y eficaz. Los únicos métodos que permiten realizar análisis granulométricos, sin necesidad de efectuar el muestreo directamente en las paredes del depósito, son los métodos ópticos. En geología, dichos métodos se emplean para efectuar los siguientes análisis: el análisis granulométrico de depósitos consolidados, el de grandes bloques imposibles de analizar con métodos volumétricos clásicos, y el de paredes verticales del afloramiento que no se pueden alcanzar directamente (Olgun y Norman, 1993). En este trabajo se utilizaron los siguientes métodos ópticos: el método de las intersecciones (Rosiwal, 1898) y el de conteo de puntos propuesto por Thomson en 1930 (Chayes, 1956, DeHoff y Rhines, 1968). Estos métodos se pueden automatizar sólo parcialmente, pero tienen la ventaja de que es posible aplicarlos también cuando el contraste de tono o color entre clastos y matriz es muy bajo.

En este trabajo se propone un método óptico que consiste en tomar fotografías con una perspectiva conocida para cuantificar las variaciones granulométricas del material grueso ($\leq -6\phi$) en una pared vertical de un depósito determinado. Esta información es muy valiosa para comprender los mecanismos de transporte y emplazamiento de algunos tipos de depósitos, como aquellos originados por flujos

granulares (Wright y Walker, 1981; Boudon y Lajoie, 1989; Schwarzkopf *et al.*, 2005). La técnica se basa en la aplicación del método de Rosiwal que consiste en sobreponer una rejilla a la imagen del depósito. La rejilla está compuesta por líneas regularmente espaciadas, las cuales se orientan paralelamente a las superficies de discontinuidad entre unidades o a superficies de deslizamiento (reconocibles por la alineación de clastos o discontinuidades), en el caso particular de depósitos originados por flujos individuales.

El método fue aplicado a dos afloramientos de un depósito piroclástico del volcán de Colima, originado el 17 de julio de 1999 por el emplazamiento de un flujo de bloques y ceniza en las Barrancas San Antonio y Montegrande, (Saucedo *et al.*, 2002). El depósito es masivo, monolítico y tiene un espesor que varía entre 7 y 15 m, con estructuras burdas de alineación de clastos y gradación. Su cima está casi siempre erosionada por un depósito de lahar. Tres años después de la formación de estos depósitos piroclásticos, la erosión había formado profundas barrancas con paredes verticales y buena exposición de los depósitos, por lo que representaron un sitio de estudio adecuado para probar el método desarrollado.

MÉTODOS ÓPTICOS

La mayoría de los métodos ópticos empleados con el análisis de imágenes se basan en la medición del área de los rasgos (conteo de píxeles) en cortes bidimensionales (Figura 1a). De manera automática, estos métodos segmentan la imagen, producen una imagen binaria y miden cada objeto identificado (Saltikov, 1958; DeHoff y Rhines, 1968; Cruz-Orive, 1976; Russ, 1990; Russ y DeHoff, 1999). El método de las intersecciones de Rosiwal y el de conteo de puntos, son los métodos ópticos más antiguos. Las diferencias principales con respecto al método de conteo de píxeles, es que no requieren ningún tratamiento previo de la imagen (tratamiento estético y transformación binaria de la imagen) y la identificación y medición de los objetos es efectuada de manera semimanual (Russ, 1990). A pesar de que estos dos métodos requieren de una mayor intervención por parte del operador y de que pueden ser aplicados de manera totalmente manual, también es factible utilizarlos de manera eficiente mediante el análisis de imágenes. Las

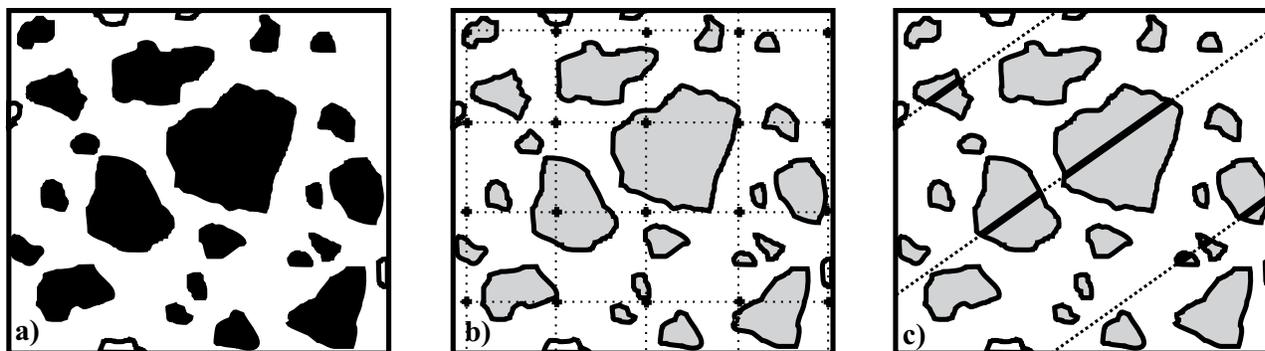


Figura 1. Métodos estereológicos básicos. a: conteo de píxeles; b: conteo de puntos; c: intersecciones de Rosiwal.

razones por las cuales se eligieron esos dos métodos en este trabajo son:

1) Se pueden emplear imágenes en donde los clastos no se pueden separar de la matriz (segmentación) considerando características sencillas como tonos o colores. Para segmentar estas imágenes sería necesario basarse en características más complejas como textura, sombras y relieve, que la mayoría de los programas comerciales de análisis de imágenes no manejen.

2) El método de conteo de puntos se considera más preciso y eficiente que el método de conteo de píxeles para la estimación de áreas (Gundersen *et al.*, 1981; Mouton, 2002).

3) El método de las intersecciones se puede corregir fácilmente por la deformación trapezoidal debida a la perspectiva fotográfica.

Desde un punto de vista teórico, los métodos ópticos pueden ser aplicados a cualquier escala, como lo demuestran los estudios aplicados en diferentes disciplinas (biología, ciencias de materiales, astronomía, etc.). Sus limitaciones son más bien de orden práctico, como la resolución de la imagen con respecto a la dimensión del objeto a medir y la calidad general de la imagen (presencia de sombras, contraste de tonos, deformaciones, etc.), que representan posibles causas de incertidumbre.

Método de conteo de puntos

Por su sencillez, el conteo de puntos es el método óptico más ampliamente utilizado. Esta técnica, propuesta por primera vez por Thomson (1930), llamada en petrografía “análisis modal”, consiste en medir el componente (mineral, partícula, fase, etc.), que se encuentra en cada punto de medición llamado nodo (Figura 1b). Se basa en la siguiente relación:

$$\frac{Pa}{Pt} = \frac{Va}{Vt}$$

en donde Pa es el número de puntos de la malla que se superponen a los rasgos de las partículas en el corte considerado, Pt es el número total de puntos de la malla utilizada, Va es

el volumen ocupado por las partículas y Vt es el volumen total analizado.

Los puntos de medición deben ser distribuidos al azar, dado que las condiciones estereológicas básicas, IUC, son la Isotropía del material, la Uniformidad de los resultados obtenidos en diferentes partes de la muestra y la Casualidad de los puntos de muestreo (Mouton, 2002). Si asumimos que la distribución de las partículas es casual en el volumen de material analizado, entonces se puede utilizar una malla regular de puntos. La distancia entre los hilos de la malla puede variar y se establece basándose en las leyes estadísticas del muestreo. La condición ideal es que dos puntos nunca caigan dentro del rasgo de una misma partícula (la distancia entre los nodos se determina por el diámetro del rasgo más grande de la muestra) y, en el caso que esto ocurra, la partícula debe ser contada en dos ocasiones (Kellerhals y Bray, 1971). De esta forma se mide el tamaño de cada rasgo interceptado por un nodo (Figura 1b). Por lo que concierne al tamaño de las partículas, como ocurre en otras técnicas granulométricas, existe el problema de escoger entre diferentes opciones. Este problema está relacionado con el método, dado que no existe ninguna justificación teórica para definir cuál es el diámetro más apropiado de la partícula; la selección errónea del mismo puede resultar en una causa constante de error. Para las aplicaciones en sedimentología, en muchos casos, se utiliza el diámetro máximo aparente en la superficie del corte, que desde un punto de vista probabilístico es el que más se aproxima al diámetro intermedio utilizado en la separación con el método de tamizado (Kellerhals *et al.*, 1975; Adams, 1979; Bunte y Abt, 2001). Este argumento se afronta en la discusión de este trabajo.

La reproducibilidad del método es muy buena, siempre y cuando se mida una cantidad suficiente de puntos. La cantidad de puntos necesarios para obtener datos confiables varía mucho (50 a 500 puntos por sección) según diferentes autores (Krumbein, 1935; Pettijohn *et al.*, 1987; Glicken, 1998, Capra y Macías, 2000; Bunte y Abt, 2001; Rossotti y Carrasco-Núñez, 2004). En la mayoría de los estudios publicados consideraron la medición de al menos 100 puntos, por lo que es recomendable no usar una cifra menor a ésta.

Método de las intersecciones de Rosiwal

En 1898, Rosiwal descubrió que sobreponiendo líneas rectas a un corte al azar de material y midiendo las intersecciones (rasgos sobresalientes) a lo largo de estas líneas (Figura 1c), la razón entre la longitud total de las intersecciones y la longitud total de las líneas utilizadas, era igual a la razón entre la superficie ocupada por los rasgos y la superficie total medida. Las intersecciones constituyen un *set* de Cantor unidimensional, un teorema clásico de la geometría fractal, que no se conocía cuando Rosiwal propuso su método, por medio del cual estas relaciones pueden ser demostradas (Kaye, 1999; Peitgen *et al.*, 1991). La relación entre intersecciones y áreas se puede extender a la relación entre áreas y volúmenes por medio de la relación descubierta por Delesse (1847):

$$\frac{Ll}{Lt} = \frac{Aa}{At} = \frac{Va}{Vt}$$

en donde Ll es la longitud de las intersecciones sobresalientes de los rasgos; Lt , la longitud total de la línea analizada; Aa , el área ocupada por los rasgos de las partículas; At , el área total analizada; Va , el volumen ocupado por las partículas; y Vt , el volumen total analizado. Estas relaciones, al igual que aquella entre los puntos y volúmenes propuesta por Thomson (1930), representan las ecuaciones básicas de la estereología (Russ, 1990; Mouton, 2002).

En este caso también se debe realizar un número suficiente de mediciones para obtener resultados confiables. Dado que en geología este método ha sido menos difundido que el de conteo de puntos, no existen aplicaciones prácticas conocidas en la literatura. Según estudios teóricos (Járai *et al.*, 1997) y algunas aplicaciones prácticas (DeHoff y Rhines, 1968), el número de intersecciones medidas debería comprender entre 300 y 600. La razón por la cual este método ha tenido una menor difusión con respecto al conteo de puntos, es porque contar puntos es más sencillo que medir y transcribir las longitudes de las intersecciones. Sin embargo, sus fundamentos teóricos y su aplicación en diferentes disciplinas, sugieren que no existen limitaciones del método, salvo aquellas limitaciones prácticas ya mencionadas.

Comparación entre ambos métodos

Con el fin de comparar los resultados proporcionados por el método de Rosiwal y el de conteo de puntos, se elaboraron cinco rocas artificiales (Figura 2), compuestas por una población monolitológica de granos con cinco distribuciones granulométricas distintas y conocidas. El material disgregado de las muestras fue secado, tamizado e inmerso sucesivamente en un cemento líquido fino de color blanco. Una vez solidificados, los bloques de cemento fueron cortados en losas con una superficie aproximada de 15 cm² y un espesor de 3 cm. Las secciones fueron pulidas

en una de las dos superficies con polvo abrasivo de carburo de silicio N. 800, con el fin de obtener una superficie suficientemente lisa. De cada muestra se analizaron entre cinco y nueve superficies, pertenecientes a diferentes puntos del volumen. El número de superficies se eligió de acuerdo con el tamaño de los clastos para obtener un número suficientemente elevado de mediciones. Las imágenes de las superficies fueron grabadas por medio de un escáner plano con una resolución de 800 dpi (puntos por pulgada). Las imágenes obtenidas fueron mejoradas por medio del programa Photoshop 7.0 (Adobe Systems Inc.), calibradas dimensionalmente y analizadas utilizando el programa Image Pro Plus 4.5 (Media Cybernetics Inc.). Aunque las mediciones se efectuaron de manera manual a lo largo de la malla de puntos o de la rejilla de líneas superpuestas, el trabajo se limitó a mover el cursor de un punto a otro en las partes por medir. Todas las mediciones fueron efectuadas automáticamente y transcritas directamente a una hoja de cálculo, eliminando el largo trabajo de medición y escritura manual que limitaba seriamente la eficiencia del método.

Las cinco muestras deleznables, a partir de las cuales se realizaron las cinco rocas artificiales, se procesaron con el método de tamizado en seco. Se utilizó un juego de mallas desde -5ϕ hasta $+4\phi$ a intervalos de 1ϕ . Los tamices fueron agitados por un tiempo de 12 minutos. Las mismas superficies de las cinco rocas artificiales fueron medidas con los dos métodos ópticos. En el caso del método de conteo de puntos se contó el número de rasgos en cada clase granulométrica (1ϕ); en el caso del método de las intersecciones se calculó la proporción entre la suma de las intersecciones pertenecientes a cada clase granulométrica (1ϕ) y la longitud total de las líneas utilizadas. Para los tres métodos utilizados se construyeron las curvas de frecuencia acumulativa (CDF) de cada muestra (Figura 3). La frecuencia calculada no se refiere a una dimensión (volumen o peso) en particular, dado que cuando los datos están asociados a partículas de la misma densidad, no hay ninguna diferencia

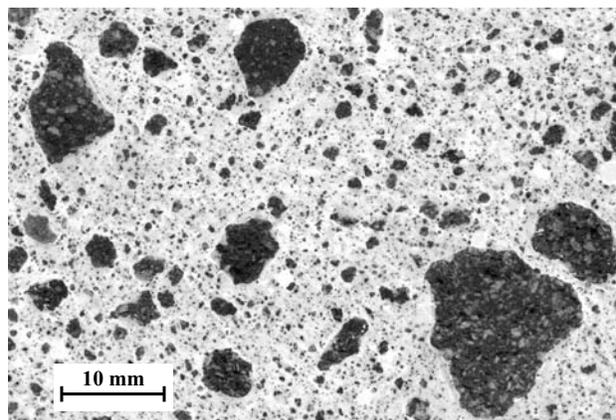


Figura 2. Aspecto de una de las superficies de roca artificial que fueron analizadas (muestra RA3).

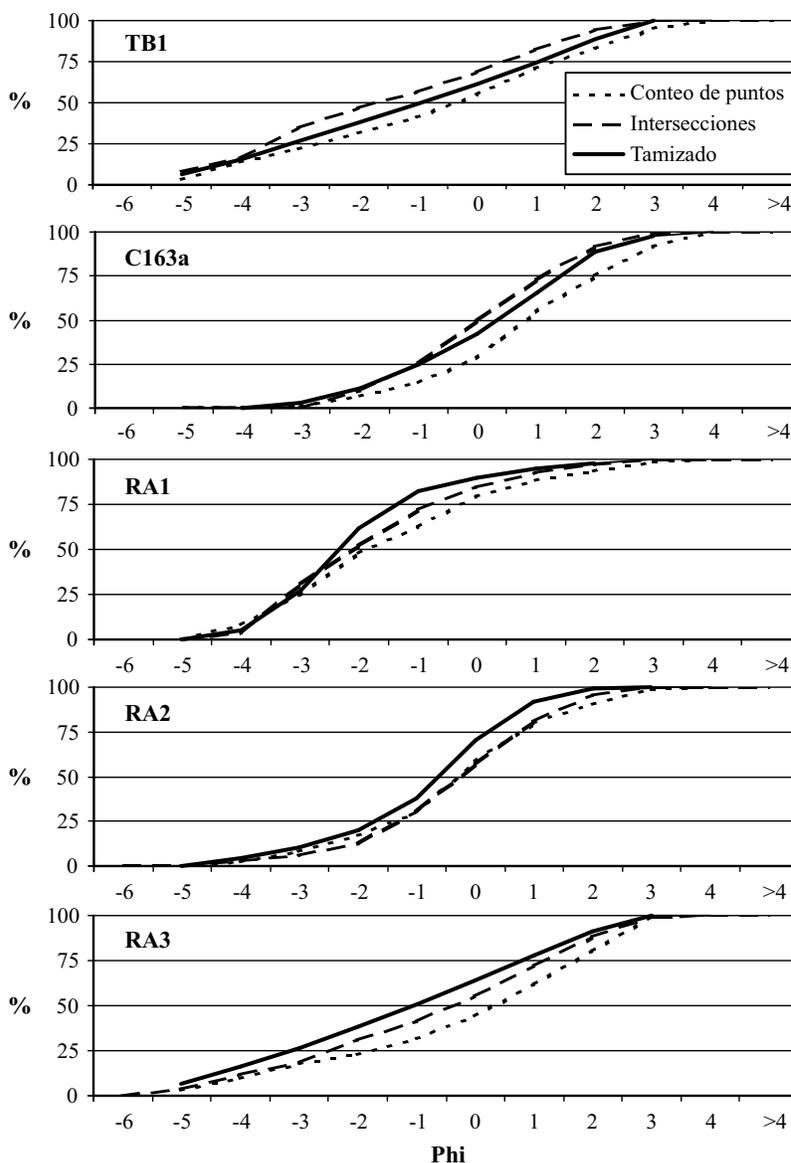


Figura 3. Curvas de frecuencia acumulativa obtenidas mediante la aplicación de los métodos de tamizado, conteo de puntos e intersecciones de Rosiwal en las muestras artificialmente preparadas.

entre las distribuciones expresadas como volumen o como peso. En el caso del conteo de puntos se midieron entre 322 y 512 rasgos por muestra. Aplicando el método de Rosiwal, se midieron entre 741 y 1,747 rasgos, más del doble, en promedio, con respecto al conteo de puntos. También se observó que la eficiencia de este método, con respecto al de conteo de puntos, aumenta conforme aumentan los valores de la clasificación.

Un análisis a simple vista de todas las curvas de frecuencia acumulativa denota que el método de las intersecciones de Rosiwal se acerca más a las curvas obtenidas mediante tamizado (Figura 3). Esta comparación (Tabla 1) ha sido verificada y cuantificada empleando la prueba estadística no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov (Davis, 1986). La ventaja de este *test*, con respecto a los métodos

estadísticos clásicos (paramétricos), es que permite comparar las curvas aunque las distribuciones no sean de tipo normal (distribución de Gauss). Se trata de una prueba estadística particularmente eficiente para comparar curvas de frecuencia acumulativa, que es sensible a la forma de las curvas (*skewness* y *kurtosis*). La prueba consiste en evaluar, clase por clase, la distancia en frecuencia entre las dos curvas cumulativas (CDF). La distancia máxima encontrada entre las curvas representa el Coeficiente (D_0) de Kolmogorov-Smirnov. Entre más pequeño sea este coeficiente, más similares serán las dos curvas de frecuencia acumulativa; en nuestro caso, un valor promedio apropiado fue de $D_0 = 10\%$. Como se puede apreciar, el método de las intersecciones de Rosiwal, con respecto al método de conteo de puntos, proporciona datos que, en promedio, son

Tabla 1. La primera prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov, evidencia que, en promedio, el método de las intersecciones de Rosiwal (Int.) proporciona distribuciones más parecidas a las distribuciones obtenidas por tamizado, que aquellas obtenidas por medio de conteo de puntos (C.P.).

Muestra	Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
	C.P. vs. tamizado %	Int. vs. tamizado %
TB1	7.94	8.89
C163A	13.40	7.88
RA1	19.86	10.22
RA2	11.86	13.05
RA3	19.92	9.40
D_o promedio	14.60	9.89

1.5 veces más cercanos a aquellos obtenidos con el método de tamizado.

Con respecto al método de conteo de puntos podemos afirmar que es difícil elegir el diámetro de referencia de las partículas para expresar el tamaño de los objetos, lo que introduce una fuente de incertidumbre evidente. En nuestro caso (experimento en rocas artificiales), la mejor opción fue medir el diámetro máximo aparente de la partícula en la superficie del corte. Las distribuciones resultantes están subestimadas con respecto a aquellas obtenidas con el método de tamizado. Si por el contrario utilizamos un diámetro más pequeño (diámetro menor aparente), la subestimación es aún más evidente (Figura 3).

CONSTRUCCIÓN DE PERFILES VERTICALES MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS INTERSECCIONES DE ROSIWAL

Tanto el conteo de puntos como las intersecciones de Rosiwal permiten efectuar mediciones a lo largo de líneas, que pueden ser utilizadas para realizar perfiles verticales. Entre éstas fue elegida la técnica de Rosiwal por dos razones principales: 1) la medición de las intersecciones se efectúa solamente a lo largo de la línea de medida y la deformación de la perspectiva debe ser corregida solamente en la dirección de esta línea, y 2) los resultados proporcionados se aproximan más a aquellos obtenidos por tamizado.

La técnica de Rosiwal permite efectuar la granulometría óptica a lo largo de una línea que se sobrepone al depósito, y que es lo suficientemente larga para medir un número considerable de intersecciones. Colocando sobre una imagen del afloramiento una rejilla de líneas regularmente espaciadas (Figura 4) y paralelas a las superficies de discontinuidad de las unidades internas del depósito o a superficies de deslizamiento, es posible reconstruir cuantitativamente, de manera rápida y precisa, el perfil granulométrico vertical del afloramiento.

La imagen del afloramiento debe tomarse con una técnica fotográfica consistente. Por ejemplo, si la imagen se toma a una distancia de 5 a 15 m, es posible reconocer

y medir objetos del orden de una decena de milímetros (-3ϕ). Sin embargo, dado que esta dimensión mínima es una variable que depende de muchos factores (óptica utilizada, distancia, iluminación etc.), en este trabajo se limita al estudio de clastos con una dimensión de bloques, o sea con tamaño superior a 64 mm (-6ϕ). Este límite, además de tener un significado sedimentológico (límite de clase entre lapilli gruesa y bloques), permite desprestigiar las variaciones verticales de resolución, el efecto del tipo de equipo fotográfico utilizado y las dificultades al tomar la fotografía. A lo largo de cada línea de análisis se obtienen datos estadísticos de los bloques como dimensión promedio, mediana, grado de clasificación (*sorting*), razón bloques/matriz (B/M), etc. Cuando la longitud y homogeneidad del afloramiento lo permiten, se pueden analizar líneas lo suficientemente largas, obteniendo así una precisión muy alta. Sin embargo, se consideraron líneas con una longitud máxima de 5 a 6 metros, con el fin de limitar la deformación lateral de la perspectiva y para reducir el tiempo de análisis. Con estas longitudes de línea, se midieron entre 100 y 300 partículas, en el caso de los depósitos de flujo de



Figura 4. Aplicación del método de las intersecciones de Rosiwal para realizar perfiles granulométricos verticales en un afloramiento. Las intersecciones son los segmentos gruesos en la línea de medición en la fotografía inferior.

bloques y ceniza, utilizados como test. El paso de muestreo depende de las estructuras que se quieren medir. Cuando las características texturales del depósito varían rápidamente en la vertical y con el fin de no introducir errores de muestreo (*aliasing*), es necesario utilizar una distancia interlineal más pequeña. En el caso de los depósitos del Volcán de Colima se utilizó una distancia interlineal de 300–400 mm que, para los espesores analizados, se traduce en medir entre 16 y 20 líneas (90–100 metros totales) por afloramiento. En las Figuras 5 y 6 se reportan ejemplos de la aplicación del método a dos afloramientos (ColSA1 y ColSA3, ver Figura 7) de un depósito de flujo de bloques y ceniza del volcán de Colima (México).

Corrección de las deformaciones debidas a la perspectiva

Para aplicar los métodos ópticos al estudio granulométrico de afloramientos (espesor $\geq 3-5$ m) se toma una fotografía del lugar, la cual, dependiendo de la distancia de la toma, introduce un error debido a la perspectiva de la misma. Por ejemplo, los objetos de forma cuadrada o rectangular aparecen como trapecios cuando se observan desde una posición que no es perpendicular al centro geométrico de la figura. La deformación aumenta conforme la toma esté más descentrada del baricentro.

Aunque existen métodos muy sofisticados para rectificar imágenes (Russ, 1999), aquí se propone un método empírico y sencillo para corregir las imágenes deformadas

por la perspectiva. Dado que las líneas a lo largo de las cuales se efectúan los análisis son paralelas al plano horizontal de la imagen, la única corrección que se debe realizar es en esta misma dirección.

Construcción de las curvas de corrección

Para construir las curvas de los coeficientes de corrección C_k , se utilizó un objeto cuadrado como escala en la pared de un edificio de 15 m de altura, manteniendo uno de sus lados paralelo a una línea vertical imaginaria. El objeto fue fotografiado a diferentes alturas y a diferentes distancias (de la toma) con una cámara fotográfica colocada a 1.65 m del piso, el eje del objetivo formando un ángulo de 90° (considerando el plano Azimutal, ver Figura 8) con la pared del edificio. Se utilizó una cámara Reflex 24×36 , equipada con un objetivo estándar y una longitud focal de 50 mm. El resultado es independiente de la longitud focal del objetivo (los resultados se comprobaron repitiendo las mediciones con objetivos de 70 mm y 135 mm de longitud focal). Es muy importante que no se utilicen objetivos de longitud focal inferior a 50 mm, los cuales introducirían una deformación esférica debido a la óptica.

Midiendo el lado inferior (ancho) del cuadrado a diferentes alturas, hemos construido la curva de deformación relativa para cada distancia de la toma. En la Figura 9 se reportan, como ejemplos, las curvas construidas para una distancia de la toma de 4 m (círculos) y 12 m (rombos). $L\%$ representa la dimensión aparente del lado del cuadrado expresado como porcentaje de la medida real. Como se puede apreciar, para una distancia de la toma de 4 m y una

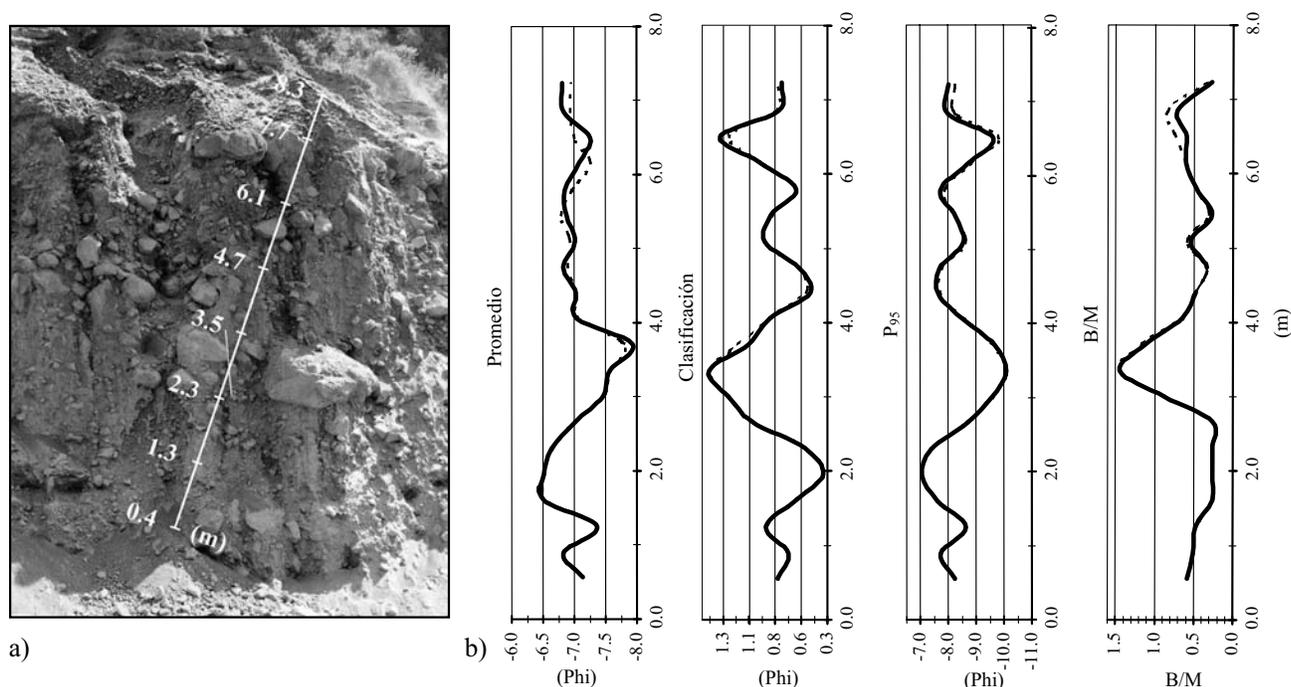


Figura 5. Perfiles verticales de varios parámetros estadísticos [diámetro promedio, clasificación, 95° percentil (P_{95}), razón bloques/matriz (B/M)] en el afloramiento ColSA1, antes (curvas continuas) y después (curvas punteadas) de la corrección de la perspectiva.

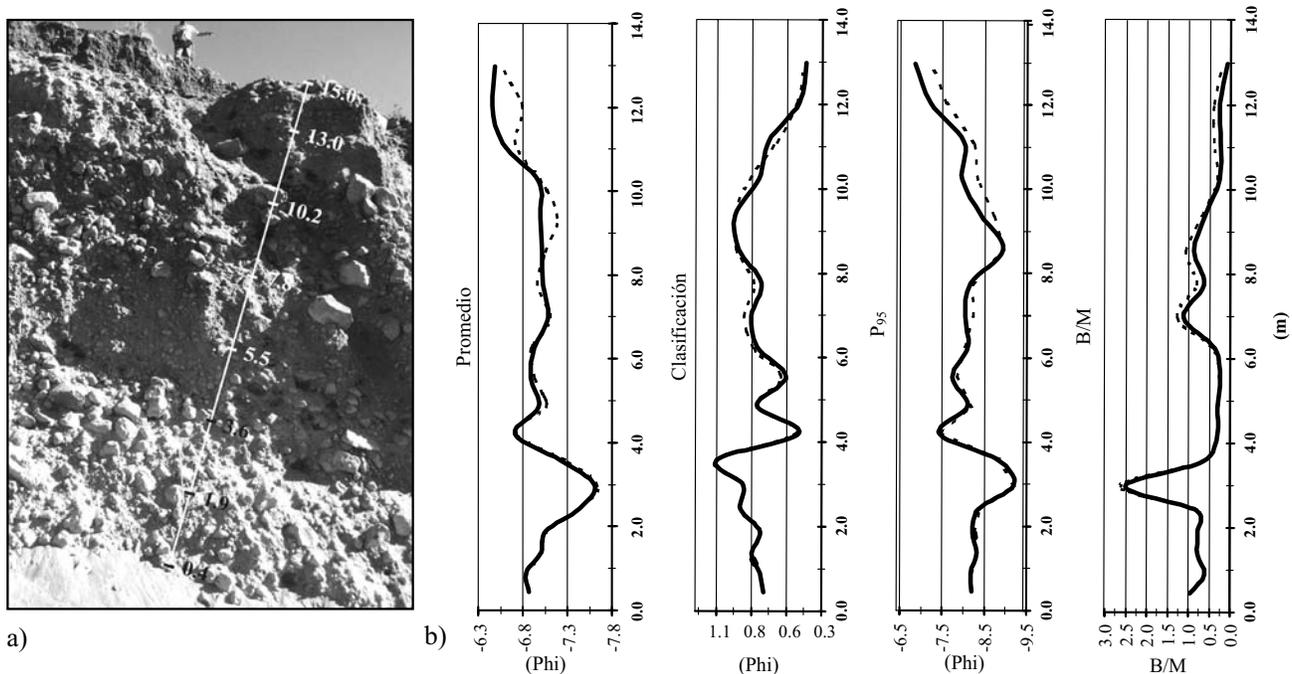


Figura 6. Perfiles verticales de varios parámetros estadísticos [diámetro promedio, clasificación, 95° percentil (P_{95}), razón Bloques/Matriz (B/M)] en el afloramiento ColSA3, antes (curvas continuas) y después (curvas punteadas) de la corrección de la prospectiva.

altura de 11 m, el ancho aparente $L_{\%}$ del cuadrado se reduce al 40% de la dimensión real. El factor de corrección C_k es un número que multiplicado por el valor aparente medido (L) corrige el dato reconduciéndolo a la dimensión real. C_k corresponde al recíproco de la dimensión aparente (L) expresada como fracción de la dimensión real. En la Figura 10 se reportan las curvas de los valores de C_k obtenidos a diferentes distancias de la toma ($D=4, 6, 8, 12, 16$ y 20 m). Estos datos de C_k han sido interpolados por medio de una función doble de potencia con asíntota horizontal igual a 1, obteniendo la función (1). La función no tiene mínimos relativos y se proyecta para que tenga continuidad en el intervalo de variaciones de H y D .

$$C_{k_{horizontal}} = 1 + 0.2428165 \left(\frac{H}{1804.29} \right)^{2.2914} D^{-1.60034} \quad (1)$$

en donde H es la altura en milímetros del afloramiento y D la distancia desde la pared expresada en metros. Por medio de la función (1) se pueden calcular los parámetros de corrección horizontal C_k para cualquier altura y distancia. La función es válida en todas las condiciones cuando $H > 1.65$ m; para valores de $0 < H < 1.65$ m, la corrección es mínima y se asume como $C_k = 1$.

Utilizando el parámetro correctivo específico para cada línea y dependiendo de la altura, se modifican todos los valores de las intersecciones medidas y la longitud total de la línea. Esto determina un paso de las intersecciones desde una clase dimensional inferior, hasta otra más grande. El número de intersecciones que caen en el intervalo de los

bloques puede aumentar mucho después de la corrección, así como la longitud total de las mismas. Por ejemplo, en el afloramiento ColSA3, la longitud total de las intersecciones de los bloques aumenta 1.2 veces a 6 m de altura, 2.5 veces a 12 m y 4 veces a 13 m (Figura 11). Después de la corrección, la distribución puede cambiar significativamente y también los parámetros estadísticos calculados.

En las Figuras 5b y 6b se comparan algunos perfiles verticales de varios parámetros estadísticos, antes (curvas continuas) y después (curvas punteadas) de la corrección. En estos casos, las fotografías habían sido tomadas desde una distancia de 10 m y se puede ver que la deformación no afecta hasta una altura de 3.5 a 4 m. En el afloramiento ColSA3, cuya altura alcanza 14 m, se puede ver que la corrección cambia sensiblemente los valores promedio y del 95° percentil, mientras que la clasificación no cambia de manera significativa.

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ROSI WAL A DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS

Como ejemplo de las técnicas descritas se reportan los resultados obtenidos en dos afloramientos de un depósito de flujos de bloques y ceniza del volcán de Colima (México). Los flujos de bloques y ceniza (BAF) son flujos piroclásticos de volumen pequeño ($\ll 1$ km³), compuestos por clastos juveniles densos poco vesiculosos, los cuales son transportados como flujos granulares en una corriente de densidad piroclástica (Bursik, 2004; Francis

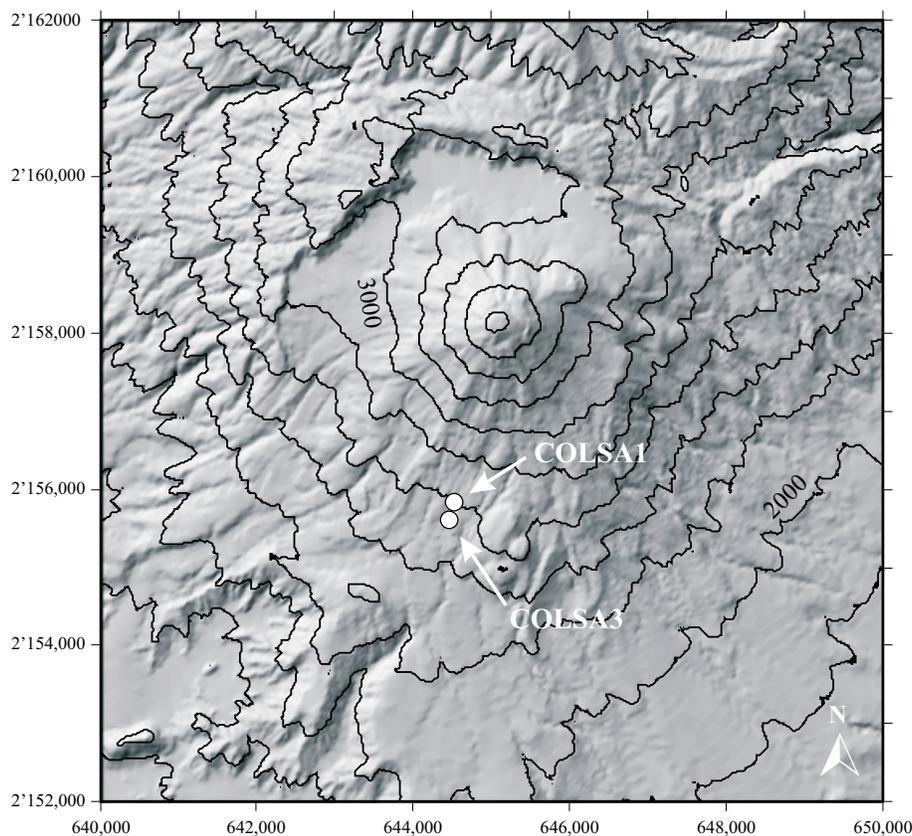


Figura 7. Mapa de localización de los afloramientos del flujo de bloques y ceniza (BAF) muestreados en la ladera sur del volcán de Colima. Las coordenadas son UTM (Universal Transverse Mercator) y la separación entre curvas de nivel es de 200 m.

y Oppenheimer, 2004). El 17 de julio de 1999 tuvo lugar una explosión en el volcán de Colima que produjo una columna eruptiva de 10 km de altura. El colapso parcial de la columna produjo un flujo piroclástico que se dirigió a las barrancas San Antonio y Montegrande en la ladera sur del volcán (Saucedo *et al.*, 2002). La topografía preexistente fue modificada completamente y ambas barrancas fueron enteramente rellenas entre las cotas de 2,400 y 2,500 m snm. El depósito tiene un espesor máximo de 15 m, con una extensión total de 3 km desde la cumbre y un volumen total estimado en $7.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ (BGVN, 1999; Saucedo *et al.*, 2002). La erosión durante los meses sucesivos a la erupción actuó rápidamente, produciendo lahares y formando nuevas barrancas. Este estudio se realizó en los cortes de una barranca formada cerca de la anterior barranca de San Antonio. Esta nueva barranca confluye, aguas abajo, con la barranca de Montegrande. Nos referiremos a esta última barranca como San Antonio–Montegrande, aunque no aparece en la cartografía oficial.

Los afloramientos estudiados (Figura 7) están localizados a una distancia de 2,820 m (ColSA1) y 3,030 m (ColSA3) desde la cumbre del volcán. El primer afloramiento (Figura 5a) tiene un espesor aparente de 8 m, el contacto inferior del flujo de bloques y ceniza no se observó.

Se trata de un depósito monolitológico, aparentemente masivo, localmente con alineaciones burdas de clastos de composición andesítica. El depósito está soportado por una matriz de ceniza (media a gruesa), con concentraciones locales de bloques (diámetro promedio 60–70 cm) en la parte central y en la cima, que es erosionada por un depósito de material reabajado. El otro afloramiento (Figura 6a), más lejano, tiene un espesor de 15 m; el contacto inferior no es visible en el punto de muestreo. La base se encuentra a 2–3 m por debajo de la base aparente del depósito. El depósito es monolitológico, aparentemente masivo y con alineaciones locales de clastos gruesos de composición andesítica. Por lo general está soportado por matriz (arena media a gruesa), con concentraciones locales de bloques (diámetro promedio 40–50 cm) en la parte central y el techo. En la parte alta del depósito se observan canales de erosión con dimensiones de 3–6 m de ancho, rellenos por material reabajado.

De cada afloramiento se tomaron fotografías con una cámara reflex 24×36 y un objetivo de 50 mm de longitud focal, a una distancia de 10 metros. El lado ancho de la imagen se orientó paralelamente a las discontinuidades observadas en el depósito, que también son paralelas al techo del mismo. Con la finalidad de tener una escala dimensional en las foto-

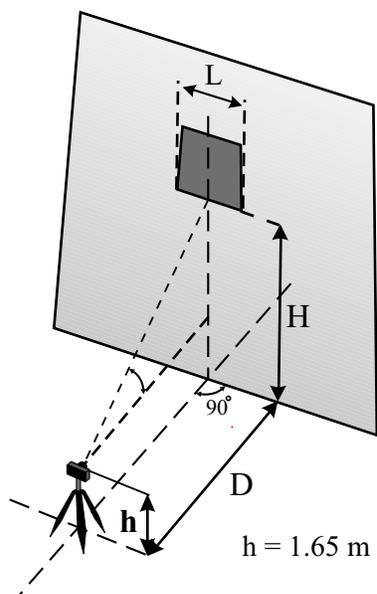


Figura 8. Esquema que muestra la geometría de la toma fotográfica utilizada para construir las curvas de corrección de la perspectiva. H: altura del punto de medición; D: distancia horizontal entre la cámara fotográfica y la pared; h: altura de la cámara fotográfica con respecto a la base, correspondiente a 1.65 m; L: lado del cuadrado utilizado para las mediciones.

grafías, se incluyó una regla de 1 m de longitud a la misma altura del objetivo de la cámara, para que no fuera afectada por las deformaciones de la perspectiva. En el laboratorio, las fotografías fueron digitalizadas y dimensionadas. Las imágenes fueron tratadas con el programa Image Pro Plus 4.5 (Media Cybernetics Inc.) para mejorar los contrastes y la definición. Una rejilla con una separación entre líneas de 400 mm se superpuso digitalmente a la imagen y a lo largo de estas líneas se efectuaron las mediciones (Figura 4). Todas las intersecciones sobresalientes observadas a lo largo de la línea fueron medidas. Las longitudes fueron multiplicadas por el coeficiente de corrección C_k correspondiente a la altura de la línea considerada y sucesivamente repartidas entre las clases granulométricas con un paso de 1ϕ . En cada línea se calculó la función de distribución de probabilidad (fdp) y se efectuó el estudio estadístico.

Los parámetros estadísticos que consideramos fueron: el diámetro promedio, la clasificación (*sorting*), el 95° percentil (dimensión de los bloques más grandes) y la proporción de bloques/matriz. En este trabajo el término matriz se refiere a todo el material cuyo tamaño es inferior a 64 mm (-6ϕ), que por las razones mencionadas anteriormente no se mide en la imagen. El valor promedio y la clasificación son parámetros comúnmente aplicados en el análisis textural de depósitos piroclásticos. El 95° percentil (P_{95}) considera la tendencia general de la distribución y constituye un filtro en caso de que aparezcan valores extremos anómalos (*outliers*). La razón bloques/matriz es una proporción que indica la cantidad de bloques que eran transportados por la matriz a diferentes alturas del flujo.

Como se aprecia en las Figuras 5b y 6b, las variaciones verticales obtenidas de manera cuantitativa coinciden con las observaciones realizadas a simple vista. Sin embargo, se pueden reconocer variaciones graduales y saltos abruptos de los parámetros estadísticos que no se observan a simple vista en el campo. Por ejemplo, en ambos afloramientos se notan tendencias comunes en todos los parámetros (sobre todo el P_{95} , clasificación y B/M), que se repiten en dos niveles diferentes. En cada nivel se aprecia un aumento gradual del tamaño de las partículas y del valor de la clasificación, con picos localizados aproximadamente entre 3–4 m y 7–9 m. Estas variaciones sugieren la presencia de dos unidades de flujo distintas, cada una caracterizada por un espesor aproximado de 4 m y una gradación inversa, con los bloques más grandes ubicados hacia la cima de cada unidad. Es probable que estas dos unidades hayan sido originadas, ya sea por dos flujos diferentes o por inestabilidad cinemática al interior de un mismo flujo piroclástico. Esto coincide con las características generalmente observadas en avalanchas basales de los flujos de bloques y ceniza (Boudon y Lajoie, 1989; Schwarzkopf *et al.*, 2005). En la parte superior del afloramiento ColSA3, entre 8 y 9 m, se nota una gradación directa con una clara disminución de los bloques e incremento paralelo de la matriz. Estas características indican que se trata de material retrabajado.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A pesar de que el método de las intersecciones de Rosiwal es poco conocido en geología, tiene la misma validez y es más eficiente que el método de conteo de puntos (análisis modal), que muchos autores suponen que proporciona resultados parecidos a aquellos obtenidos con el tamizado (Gundersen, 1981; Bunte y Abt, 2001). Los resultados de este estudio indican que las distribuciones obtenidas mediante el método de las intersecciones de Rosiwal son más cercanas a las obtenidas con el método

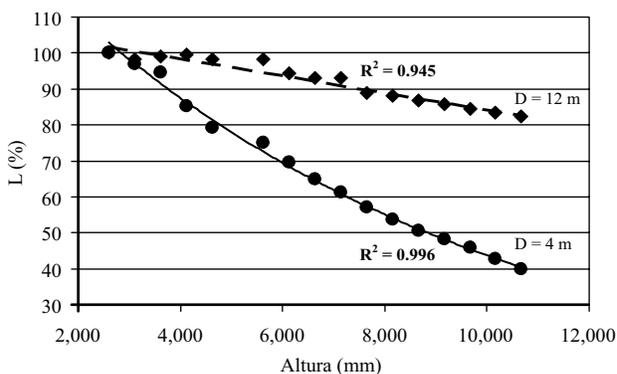


Figura 9. Curvas de deformación obtenidas para tomas realizadas a distancias de 4 m (círculos) y 12 m (rombos). Se aprecia que la deformación geométrica es más sensible entre menor sea la distancia entre la cámara fotográfica y la pared.

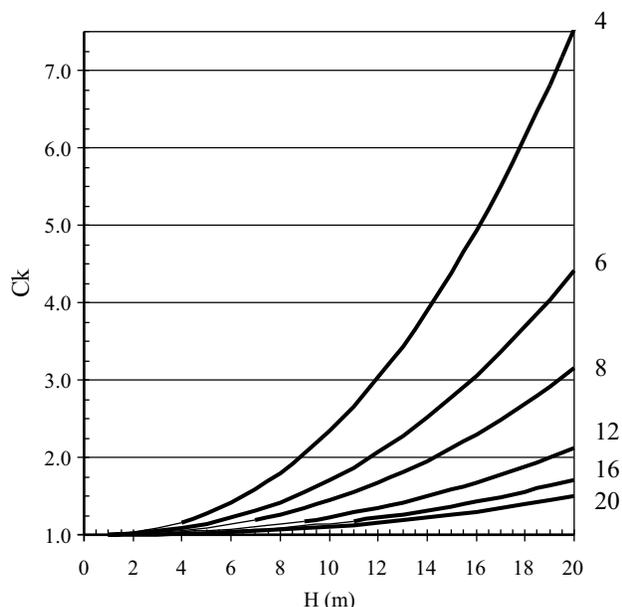


Figura 10. Curvas de los valores del coeficiente de corrección lineal C_k obtenidas para tomas realizadas a diferentes distancias ($D = 4, 6, 8, 12, 16, \text{ y } 20 \text{ m}$). Las curvas son válidas en todas las condiciones cuando $H > 1.65 \text{ m}$.

de tamizado que aquéllas proporcionadas por el conteo de puntos y por lo tanto, pueden considerarse como las más adecuadas y precisas.

El método de Rosiwal permite obtener la granulometría de un depósito, utilizando una línea trazada horizontalmente a lo largo del mismo en un área homogénea desde un punto de vista sedimentológico (paralela, por ejemplo, a los planos de deslizamiento de un depósito de flujo piroclástico). Mediante la sobreposición de n líneas analizadas independientemente se pueden cuantificar las variaciones verticales de los parámetros estadísticos del depósito. El problema de la deformación trapezoidal debida a la perspectiva que afecta a todos los métodos ópticos, es muy fácil de corregir en el caso del método de las intersecciones, en donde las líneas de medición, son horizontales. La longitud de la línea y la de las intersecciones son corregidas solamente mediante el coeficiente de corrección C_k horizontal. La corrección resulta ser muy eficaz y sencilla, por medio de la función que relaciona C_k con la distancia D y la altura H de las líneas, la cual fue obtenida empíricamente.

Con excepción de aquéllas tomas realizadas muy cerca de la pared del afloramiento, la deformación debida a la perspectiva comienza a percibirse a partir de algunos metros de altura e influye muy poco hasta los 5 o 6 m. En los afloramientos que superan los 10 a 15 m de altura, aunque las fotografías se tomen desde una distancia bastante grande (10 a 15 m), las deformaciones son aún significativas. A estas distancias, las diferencias debidas a la corrección pueden ser del orden de 0.7ϕ en lo que concierne al valor promedio y de 0.4ϕ para el 95° percentil. Obviamente, las correcciones son aún mayores cuando por falta de espacio es necesario

tomar las fotografías a distancias menores.

Aunque el método permite medir partículas de algunos milímetros con el fin de obtener datos verticalmente homogéneos (el tamaño mínimo que se puede medir varía con la altura del punto analizado) y estandarizar estos análisis (con cualquier cámara fotográfica y desde cualquier distancia razonable se pueden medir clastos de 64 mm), la aplicación práctica se enfocó únicamente a las partículas del tamaño de bloques. El método resultó muy efectivo para cuantificar variaciones verticales que pueden percibirse a simple vista y, además, para evidenciar variaciones que son más sutiles e imposibles de distinguir a simple vista. El método fue aplicado al estudio de dos afloramientos de flujo de bloques y ceniza de la Barranca San Antonio–Montegrande (Colima, México). Los resultados evidenciaron y cuantificaron variaciones que no eran perceptibles a simple vista. Algunas estructuras burdas fueron también aclaradas por medio del estudio estadístico. Los parámetros complementarios del diámetro promedio, selección, P_{95} y el cociente Bloques/Matriz, mostraron que el depósito en realidad consistía en dos unidades de flujo, cada una con estratificación inversa y bloques hacia su cima. Esto tiene implicaciones importantes dado que sugiere que el evento eruptivo no ocurrió como un flujo piroclástico único (Saucedo *et al.*, 2002) si no más bien como dos flujos piroclásticos o dos pulsos del mismo flujo piroclástico, características que se están estudiando actualmente en varios volcanes del mundo.

Este método es definitivamente útil para estudiar las estructuras existentes en los depósitos piroclásticos, ya sea como apoyo o como una alternativa a las técnicas tradicionales. Además puede ser muy útil cuando un afloramiento no es accesible, si debido a su cementación no se puede efectuar el muestreo o cuando las paredes son altas y demasiado deleznable haciendo necesario utilizar técnicas de rapel, lo que involucra cierto riesgo. Finalmente, el método puede ser empleado no sólo en estudios vulcanológicos, sino también en otro tipo de estudios sedimentológicos.

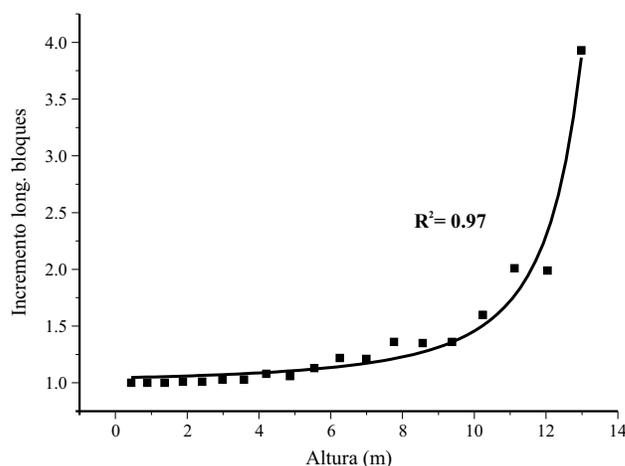


Figura 11. Incremento en la longitud de las intersecciones correspondientes a partículas del tamaño de los bloques, a diferentes alturas del depósito, después de la corrección de la perspectiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo logístico brindado. Un agradecimiento especial a J.C. Gavilanes y R. Saucedo por la ayuda que nos proporcionaron durante el trabajo de campo, a B. Capaccioni, L. Capra y J.M. Espíndola por sus invaluables consejos y revisión de la versión preliminar del manuscrito. Los comentarios y sugerencias de los árbitros K. Wohletz, G. Carrasco y A. Rossotti, mejoraron substancialmente las ideas de este trabajo. Se agradece el apoyo técnico de A.M. Rocha. Este trabajo fue financiado por un proyecto bilateral CNR-CONACYT oficio J200.293/2003.

REFERENCIAS

- Adams, J., 1979, Gravel size analysis from photographs: Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), 105(HY10), 1247-1255.
- Boudon, G., Lajoie, J., 1989, The 1902 Peléean deposits in the Fort Cemetery of St. Pierre, Martinique; a model for the accumulation of turbulent nuées ardentes: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 38, 113-129.
- Bulletin of Global Volcanism Network (BGVN), 1999, Explosion on 17 July produces 11-km plume and pyroclastic flows [en línea]: Washington, D.C., Smithsonian Institution, <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/index.cfm>, Agosto 1999, 24(8).
- Bunte, K., Abt, S.R., 2001, Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel-and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulic, and Streambed Monitoring: Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research Station, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report, 74, 428 p.
- Bursik, M.I., 2004, Block and Ash Flows: Volcanic Granular Flows: Neogene-Quaternary continental margin volcanism, *en* Aguirre-Díaz, G.J., Macías-Vázquez, J.L., Siebe, C. (eds.), Neogene-Quaternary continental margin volcanism, Proceedings of the GSA Penrose Conference, Metepec, Puebla: Geological Society of America, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Universidad Nacional Autónoma de México, 89-94.
- Capaccioni, B., Sarocchi, D., 1996, Computer-assisted image analysis on clast shape fabric from the Orvieto-Bagnoregio ignimbrite (Vulsini District, central Italy): implications on the emplacement mechanisms: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 70, 75-90.
- Capra, L., Macías, J.L., 2000, Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102, 149-168.
- Chayes, F., 1956, Petrographic modal analysis; an elementary statistical appraisal: New York, John Wiley, 113 p.
- Cruz-Orive, L.M., 1976, Particle size-shape distributions: the general spheroid problem: Journal of Microscopy, 107, 112-153.
- Davis, J.C., 1986, Statistic and Data Analysis in Geology: New York, John Wiley & Sons, 2nd edition, 646 p.
- DeHoff, R.T., Rhines, F.N., 1968, Quantitative Microscopy: New York, McGraw-Hill, 422 p.
- Delesse, M.A., 1847, Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 25, 544-545.
- Francis, P., Oppenheimer, C., 2004, Volcanoes: Oxford, Oxford University Press, 521 p.
- Glicken, H., 1998, Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington: Bulletin of the Geological Survey of Japan, 49(2/3), 55-106.
- Gundersen, H.J.G., Boysen, M., Reith, A., 1981, Comparison of semiautomatic digitizer-table and simple point counting performance in morphometry: Virchows Archives, 37, 3-45.
- Járai, A., Kozák M., Rózsa P., 1997, Comparison of the methods of rock-microscopic grain-size determination and quantitative analysis: Mathematical Geology, 29(8), 977-991.
- Kaye, B.H., 1999, Characterization of Powders and Aerosols: New York, Wiley-VCH, 312 p.
- Kellerhals, B., Bray, J.D., 1971, Sampling procedures for coarse fluvial sediments: Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), 97(HY8), 1165-1180.
- Kellerhals, R., Shaw, J., Arora, V.K., 1975, On grain size from thin section: Journal of Geology, 83, 79-96.
- Krumbein, W.C., 1935, Thin-Section Mechanical Analysis of Indurated Sediments: Journal of Geology, 43, 482-496.
- Mouton, P.R., 2002, Principles and Practices of Unbiased Stereology: Baltimore and London, The John Hopkins University Press, 214 p.
- Olgun, E., Norman T., 1993, Grain size analysis of some olistostromes between Balkuyumcu and Alci (SW Ankara): Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 115, 31-48.
- Peitgen, H., Jürgensen, H., Saupe, D., 1991, Fractals for the classroom; complex systems and Mandelbrot set: New York, Springer-Verlag, 500 p.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987, Sand and Sandstone: New York, Springer-Verlag, 553 p.
- Rosiwal, A., 1898, Über geometrische Gesteinsanalysen; ein einfacher Weg zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter Gesteine: Verhandlungen der Kaiserlich-Koeniglichen Geologischen Reichsanstalt, Wien, 5/6, 143-175.
- Rossotti, A., Carrasco-Núñez, G., 2004, Stratigraphy of the 8.5–9.0 ka B.P. Citlaltépetl pumice fallout sequence: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21(3), 353-370.
- Russ, J.C., 1990, Computer-assisted microscopy: New York, Plenum Press, 453 p.
- Russ, J.C., 1999, The Image Processing Handbook: Raleigh, North Carolina, CRC Press, IEEE Press, 769 p.
- Russ, J.C., DeHoff, 1999, Practical Stereology: New York, Plenum Press, 2nd edition, 307 p.
- Saltikov, S.A., 1958, Stereometric Metallography: Moscow, USSR, Metallurgizdat, 2nd edition, 446 p.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Mora, J.C., Gavilanes, J.C., Cortés, A., 2002, Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of volcán de Colima, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 129-154.
- Schwarzkopf, L.M., Schmincke H.U., Cronin S.J., 2005, A conceptual model for block-and ash flow basal avalanche transport and deposition, based on deposit architecture of 1998 and 1994 Merapi flows: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139, 117-134.
- Taddeucci, J., Wohletz, K.H., 2001, Temporal evolution of the Minoan eruption (Santorini, Greece), as recorded by its Plinian fall deposit and interlayered ash flow beds: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 109, 299-317.
- Thomson, E., 1930, Quantitative microscopic analysis: Journal of Geology, 38, 193.
- Wright, J.V., Walker, G.P., 1981, Eruption, transport and deposition of ignimbrite: a case study from México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 9, 111-131.

Manuscrito recibido: Marzo 15, 2005

Manuscrito corregido recibido: Junio 8, 2005

Manuscrito aceptado: Junio 16, 2005