

# Métodos e integración de análisis granulométrico para depósitos volcanoclásticos

## INTEGRATION OF GRANULOMETRIC ANALYSIS METHODS FOR VOLCANICLASTIC DEPOSITS

HUGO F. Murcia<sup>1</sup>

GLORIA P. Cortés<sup>2</sup>

BLANCA O. Hurtado<sup>3</sup>

### RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión y descripción de algunos métodos y conceptos que abordan la aplicación de metodologías existentes para la evaluación granulométrica de depósitos volcanoclásticos. Se describen los métodos del conteo de puntos o de la malla, del tamizado y de la pipeta, además de un método de unificación que permite llevar en conjunto los resultados de cada método a una curva de distribución equivalente. Igualmente, se hace énfasis en la importancia de este tipo de análisis, teniendo en cuenta principalmente el desarrollo y utilización, cada vez más común, de los diagramas empíricos de clasificación. De esta forma, la información suministrada por estos métodos permite discriminar entre diferentes procesos y efectuar una descripción cuantitativa de los depósitos volcanoclásticos.

### Palabras clave

Granulometría, método del conteo de puntos, método del tamizado, método de la pipeta, depósitos volcanoclásticos.

### ABSTRACT

This work presents a review and description of some methods and concepts which explain the application of methodologies to the granulometric evaluation of volcaniclastic deposits. Point counting, sieve and pipette methods are described along with a unification methodology which combines the results of each method in an equivalent distribution curve. Equally, an emphasis on the importance of this type of analysis is made taking into account the increasingly common development and utilization of empirical classification diagrams. In this way, the information given by these methods do not discriminate among different processes and make a quantitative description of the volcaniclastic deposits.

### Key words

Granulometric, point counting method, sieve method, pipette method, volcaniclastic deposits.

Artículo recibido el 19 de agosto de 2008. Aprobado el 16 de diciembre de 2008.

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, INGEOMINAS. hmurcia@ingeominas.gov.co

<sup>2</sup> Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, INGEOMINAS. gpcortes@ingeominas.gov.co

<sup>3</sup> Lewis Energy Colombia. hurtadoblanca@yahoo.com

## Introducción

Una de las principales características físicas de un depósito volcanoclástico es el tamaño de las partículas que lo constituyen. Para su descripción, es ampliamente utilizada la escala de Udden (1914), modificada por Wentworth (1922): arcilla, limo, arena, guijo, guijarro y bloque, con sus respectivas subdivisiones. También es usada la escala de Schmidt (1981): ceniza fina, ceniza gruesa, lapilli, bloques y bombas, o las modificadas de Sohn & Cough (1989) y White & Houghton (2006), que presentan subdivisiones. Sin embargo, el análisis del espectro completo del tamaño de partículas depende de metodologías de análisis diferentes, que deben ser integradas para definir cuantitativamente los tradicionales parámetros estadísticos determinados por Inman (1952) y Folk & Ward (1957), que permiten clasificar los depósitos volcanoclásticos en gráficos como el de Walker (1971) o el de Pearson & Scott (1999), entre otros. En este trabajo se presentan, además del comúnmente usado método del tamizado, los métodos de la malla y de la pipeta, ambos muy útiles para los análisis de fragmentos muy grandes o muy pequeños, respectivamente. Tales metodologías permiten la unificación de los resultados en una sola curva de comparación, evitando los efectos que producen las diferencias entre procedimientos de muestreo no unificables o la cuantificación a partir del común, método del tamizado, que en ocasiones es el único utilizado.

## Terminología

### Clases de tamaño de partículas

Para la descripción granulométrica en términos del tamaño de las partículas constituyentes de los depósitos volcanoclásticos, existen la escala de Udden (1914), modificada por Wentworth (1922) y la escala de Schmidt (1981), modificada por Sohn & Cough (1989) o White & Houghton (2006), tabla 1.

Aunque ambas escalas son consideradas apropiadas, Major et ál. (1996) aclaran que la escala modificada por Wentworth (1922), que describe exactamente la textura de los sedimentos, no

es ambigua y no tiene connotaciones genéticas, mientras que la inicial de Schmidt (1981), según Fisher & Schmincke (1984), representa categorías muy amplias de tamaño cuya subdivisión ha sido considerada insuficiente. Con las modificaciones de Sohn & Cough (1989) o White & Houghton (2006), la última apreciación desaparece. De manera independiente, la escala de Krumbein (1934) representa cualquier tamaño de grano mediante números enteros en unidades phi ( $\phi$ ), figura 1. Cada unidad phi es definida como el logaritmo negativo del tamaño de grano, en milímetros, dividido entre el logaritmo de 2:

$$\phi = -\frac{\log X}{\log 2}$$

donde,

X = tamaño de grano en milímetros.

### Parámetros estadísticos

Para tener una idea relativa de la energía asociada al movimiento de las partículas o energía cinética, existen grupos de parámetros de relación que representan estadísticamente las características granulométricas de un depósito, con base en las unidades phi. Tales grupos son definidos como parámetros estadísticos. Los más comúnmente usados son, además de la moda, los determinados por Inman (1952) como mediana *-median-* (Md), desviación estándar gráfica ( $\sigma_g$ ) y asimetría gráfica (SKg), y los determinados por Folk & Ward (1957) como media *-mean-* (Mz), desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_i$ ), asimetría gráfica inclusiva (SKi) y agudeza o *kurtosis* (Kg). A continuación se describe cada uno de ellos:

*Moda:* corresponde al tamaño de partícula más frecuente. Puede determinarse a partir de los histogramas o de las curvas de frecuencia simple (el pico más alto de la curva). Muchas distribuciones de tamaño tienen más de una moda.

*Media (Mz):* es la medida en el centro de la distribución granulométrica. En otras palabras es el promedio

**Tabla 1.** Clases de tamaño estándar que muestra la equivalencia entre algunas escalas de clasificación de clases de tamaño de partículas (Udden, 1914; Wentworth, 1922; Schmidt, 1981; Sohn & Cough, 1989; White & Houghton, 2006).

Límite del diámetro de partícula		Clase de tamaño epiclástico		Clase de tamaño volcánico primario	Clase de tamaño volcánico primario	Clase de tamaño volcánico primario	Clase de tamaño volcánico primario
(mm)	(unidades phi)	(esquema de Udden-Wentworth)		(Schmidt, 1981)	(Sohn & Cough, 1989)	(White & Houghton, 2006)	(Este trabajo)
2048	-11	Muy grande	Bloque	Bombas (Completa o parcialmente fundidas durante su formación y transporte)	Bloque grueso	Bomba	Bloque grueso
1024	-10	Grande					
512	-9	Medio					
256	-8	Pequeño					
128	-7	Grande	Gujarro	Bloques (Sólidos durante su formación y transporte)	Bloque fino	Bloque	Bloque grueso
64	-6	Pequeño					
32	-5	Muy grueso	Guijo	Lapilli	Lapilli grueso	Lapilli grueso	Lapilli grueso
16	-4	Grueso					
8	-3	Medio					
4	-2	Fino					
2	-1	Muy fino	(Granulado)		Lapilli fino	Lapilli fino	Lapilli fino
1	0	Muy grueso	Arena	Ceniza gruesa	Ceniza gruesa	Ceniza muy gruesa	Ceniza muy gruesa
1/2	1	Grueso					
1/4	2	Medio					
1/8	3	Fino					
1/16	4	Muy fino					
1/32	5	Grueso	Limo	Ceniza fina (polvo)	Ceniza fina	Ceniza extremadamente fina	Ceniza extremadamente fina
1/64	6	Medio					
1/128	7	Fino					
1/256	8	Muy fino					
1/512	9		Arcilla				

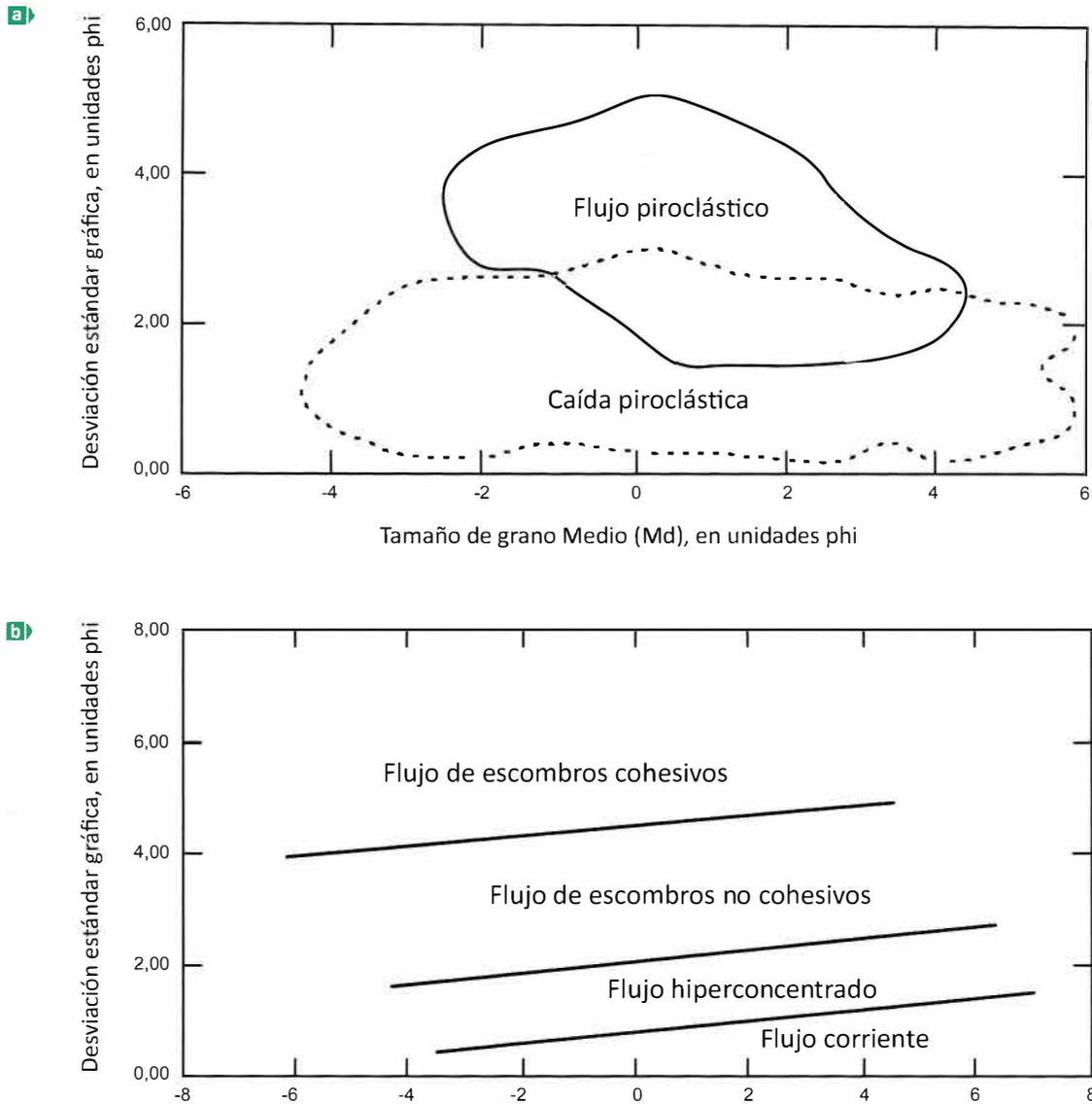


Figura 1. Diagramas empíricos de clasificación granulométrica. a. Clasificación propuesta por Walker (1971) para depósitos de corrientes de densidad piroclástica. b. Clasificación propuesta por Pierson & Scott (1999) para depósitos de lahar.

estadístico expresado en unidades phi ( $\phi_{50}$ ); puede hallarse sobre la curva de frecuencia acumulada, aplicando

$$Mz = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3$$

**Mediana (Md):** es el tamaño de grano en el cual la mitad de las partículas son gruesas y la otra mitad de las partículas son finas. Se mide fácilmente en las curvas de frecuencia acumulada. En una distribución normal la moda, la media y la mediana coinciden;

en curvas asimétricas, muestran diferentes valores.

$$Md = \Phi_{50}$$

**Desviación estándar:** También conocida como selección, mide la uniformidad en tamaño de grano en una muestra. Se define como desviación estándar gráfica ( $\sigma_g$ ), medida en la parte central (68%) de la curva acumulativa; y desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_i$ ) medida en el 90% de la mis-

ma. Este parámetro está directamente relacionado con la pendiente de las curvas de frecuencia acumulada (a mayor pendiente, mejor selección de la muestra).

$$\sigma_G = (\Phi 16 - \Phi 84)/2$$

$$\sigma_I = (\Phi 16 - \Phi 84)/4 + (\Phi 5 - \Phi 95)/6,6$$

Los siguientes valores son los descriptores propuestos por Folk & Ward (1957) para los diferentes grados de selección.

<0,35φ	Muy bien seleccionado
0,35φ a 0,49φ	Bien seleccionado
0,50φ a 0,99φ	Moderadamente seleccionado
1,00φ a 1,99φ	Pobrementemente seleccionado
2,00φ a 3,99φ	Mal seleccionado
≥4,00	Muy mal seleccionado

Para depósitos volcánicos, Cas & Wright (1987), con base en Walker (1971), proponen valores diferentes para los descriptores teniendo en cuenta que el criterio de selección en vulcanología difiere del definido tradicionalmente. Los valores son:

<0,35φ a 0,99φ	Muy bien seleccionado
1,00φ a 1,99φ	Bien seleccionado
2,00φ a 3,99φ	Pobrementemente seleccionado
≥4,00	Mal seleccionado

**Asimetría:** mide la desigualdad de la distribución del tamaño de las partículas; geoméricamente, es independiente de la selección de las muestras. Representa la diferencia entre la media y la mediana en la curva, teniendo en cuenta que, en una curva simétrica, los dos valores coinciden. Se define como la asimetría gráfica (SKg), calculada sobre el 68% de la curva; y la asimetría gráfica inclusiva (SKi), calculada sobre el 90% de la curva. A diferencia de la desviación estándar, los valores de la asimetría están dados en números enteros. Las distribuciones con asimetría positiva indican un desvanecimiento de la curva a la derecha de la media y un exceso de

partículas finas; las curvas con asimetría negativa tienen exceso de partículas gruesas en la cola izquierda de la curva.

$$SKg = (\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50)/(\Phi 16 - \Phi 84)$$

$$SKi = (\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50)/2(\Phi 16 - \Phi 84) + (\Phi 5 - \Phi 95 - 2\Phi 50)/2(\Phi 5 - \Phi 95)$$

Los siguientes valores son los descriptores propuestos por Folk & Ward (1957) para los diferentes grados de asimetría.

-1,00 a -0,31	Muy negativamente asimétrico
-0,30 a -0,11	Negativamente asimétrico
-0,10 a 0,09	Cercanamente simétrico
0,10 a 0,29	Positivamente asimétrico
0,30 a 0,99	Muy positivamente asimétrico

**Agudeza o kurtosis:** es la medida de la agudeza en las distribuciones, es decir, la desviación simétrica o alejamiento de una curva normal (histogramas en forma gaussiana). Compara la selección de las colas y la porción central de la distribución. Si la porción central está mejor seleccionada, la curva es leptocúrtica o puntiaguda; si ocurre lo contrario, la curva es platicúrtica o achatada. Una *kurtosis* con un valor igual a 1 indica que la curva tiene distribución log-normal. Una aproximación a esta distribución da como resultado una curva mesocúrtica.

$$Kg = (\Phi 5 - \Phi 95)/2,44(\Phi 75 - \Phi 25)$$

Los siguientes valores son los descriptores propuestos por Folk (1974) para los diferentes grados de agudeza o *kurtosis*.

<0,67	Muy platicúrtica
0,67 a 0,89	Platicúrtica
0,90 a 1,09	Mesocúrtica
1,10 a 1,49	Leptocúrtica
1,50 a 2,99	Muy leptocúrtica
≥3,00	Extremadamente leptocúrtica

### **Análisis textural por el método del conteo de puntos o de la malla**

El método de la malla o método de conteo de puntos, originalmente descrito por Wolman (1954) para partículas mayores o iguales a  $-1 \phi$  (2 mm), es un método de análisis estadístico utilizado para complementar el análisis granulométrico en estudios de depósitos no consolidados debido a su utilidad para cuantificar las clases de tamaño grava de partículas de manera sistemática (Kellerhals & Bray, 1971). Dichos autores demostraron en laboratorio que la frecuencia por número, obtenida mediante la técnica del conteo de puntos, es equivalente a su porcentaje en peso y a cada clase  $\phi$  de tamaño de partículas, hallando una relación directa y equivalente a los porcentajes en peso obtenidos para partículas menores mediante otros tipos de análisis texturales. Asimismo, la eficacia de este método fue sustentada por el trabajo de Wolcott & Church (1991), quienes demostraron que los 100 puntos contabilizados por este método son equivalentes a aproximadamente 500 puntos obtenidos por un muestreo al azar, y que este es menos preciso que la técnica con malla para representar los porcentajes en peso de tamaño de partículas reales del depósito.

Generalmente, el método del conteo de puntos ha sido utilizado para análisis de partículas mayores o iguales a  $-3 \phi$  (8 mm) en diversos depósitos volcanoclásticos y epiclásticos (ver Vallance & Scott, 1997; Mothes et ál., 1998; Capra & Macías, 2000; Pulgarín, 2000; Herrera & López, 2003; Capra et ál., 2004; Murcia et ál., 2008 entre otros). No obstante, Pierson & Scott (1999) proponen que este análisis debe emplearse en partículas correspondientes a  $-2 \phi$  (4 mm), argumentando que solo se necesita una pequeña porción de matriz para efectuar los análisis de laboratorio. Scott (1988) realizó el análisis para partículas mayores o iguales a  $-1 \phi$  (2 mm), como sugirió Wolman (1954) inicialmente.

Para la aplicación de este método, es importante tener en cuenta que la distribución de tamaño de grano varía de un depósito a otro; por tanto, el procedimiento para el análisis textural depende

no solo de la precisión requerida, sino también del rango de tamaño de partículas disponible. Al respecto, Pierson & Scott (1999) argumentan que el tamaño de la malla que va a utilizarse depende del tamaño promedio de las partículas, aunque para la mayoría de depósitos sea adecuada una malla de  $1 \text{ m}^2$ . Los análisis de conteo de puntos se realizan directamente en campo. Otra opción es realizarlos por medio de fotografías, comenzando la medición de los clastos desde  $-3 \phi$  (8 mm) según lo sugieren Kellerhals & Bray (1971) o  $-5 \phi$  (32 mm) o  $-6 \phi$  (64 mm), de acuerdo con Pierson & Scott (1999). Ambos métodos son aceptables.

### **Análisis textural por el método del tamizado**

El método del tamizado permite establecer cuantitativamente la proporción de los tamaños de partículas presentes en una muestra. Es realizado por vía húmeda o por vía seca. Generalmente se utiliza para separar partículas entre  $-1 \phi$  (2 mm) y  $4 \phi$  (0.0625 mm) (e.g. Scott, 1988), aunque ha sido empleado para análisis de partículas con diámetros mayores (Capra & Macías, 2000, y Murcia et ál., 2008, cuantificaron partículas desde  $-2 \phi$  (4 mm), Vallance & Scott, 1997 desde  $-4 \phi$  (16mm) y Mothes et ál., 1998 lo hicieron desde  $-6 \phi$  (64 mm)). No obstante, independientemente del tamaño analizado por este método, es necesario tener claro que el límite superior de la cuantificación lo determina el límite inferior de partículas analizado en el conteo de puntos o método de la malla. Partículas grandes incluidas dentro del tamiz causan sobreestimación debido a su peso. Es importante tener en cuenta que en esta técnica se asume que el diámetro medido en los tamices corresponde al eje intermedio de los granos y está condicionado por la heterogeneidad de formas existentes en un sedimento (Fritz & Moore, 1988).

### **Análisis textural por el método de la pipeta**

El método de la pipeta permite separar las fracciones de tamaño limo y arcilla de un conjunto de par-

tículas de tamaños menores de 4 phi (0,0625 mm o 1/16 mm). Ha sido utilizado ampliamente para complementar los análisis granulométricos, con porcentaje en peso, de amplia variedad de depósitos volcánoclasticos (Scott, 1988; Vallance & Scott, 1997; Capra & Macías, 2000; Murcia et ál., 2008; entre otros), reemplazando métodos como el de Bouyucos (método de la probeta) y el hidrómetro, principalmente porque permite obtener el espectro completo de distribución de tamaño de partículas desde 5 phi (0,03125 mm o 1/32 mm) hasta el mínimo requerido de acuerdo con las necesidades del estudio. Sin embargo, las metodologías presentadas por Day (1965), Folk (1974) y algunos laboratorios de suelos como el Laboratorio de Edafología Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México (2001) y el Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (2001), presentan variaciones tanto en los tiempos como en las profundidades de extracción. En consecuencia, es difícil encontrar una metodología estandarizada.

El método se basa en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de asentamiento o sedimentación de las partículas, según su tamaño (diámetro), a través de un líquido de temperatura, densidad y viscosidad conocidas, dependientes de las condiciones específicas del sitio donde se lleve a cabo el análisis, mediante la siguiente ecuación

$$V = \frac{2}{9}(d - d_a) \frac{gr^2}{h} = Kr^2$$

donde,

$V$  = velocidad (cm/s<sup>2</sup>)

$d$  = densidad de la partícula (g/cm<sup>3</sup>)

$d_a$  = densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

$g$  = gravedad terrestre (cm/s<sup>2</sup>)

$r$  = radio de la partícula (cm)

$\eta$  = viscosidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

$K$  = constante

Posteriormente se determinan los tiempos de extracción a partir de la profundidad y la velocidad de sedimentación encontrada, mediante la ecuación

$$t = \frac{S}{V}$$

donde,

$S$  = Profundidad de extracción (cm)

$V$  = Velocidad de sedimentación (cm/s)

Por último, en este caso, se relacionan las profundidades sugeridas en el método de la pipeta de Day (1965) con la velocidad de sedimentación de las partículas correspondientes a los diámetros 5, 6, 7, 8 y 9 phi, obteniendo valores para la aplicación del método, según se consignan en la tabla 2. Tales valores fueron hallados utilizando agua destilada y desionizada como medio de dispersión, con 20 °C de temperatura que corresponden, según Nikolskyi (1963), a una densidad de 0,998203 g/cm<sup>3</sup>, a una viscosidad de 0,01005 g/cm<sup>3</sup> y a una densidad de partículas asumida en 2,65 g/cm<sup>3</sup> (equivalente a la del cuarzo), según lo indica Folk (1974) y el

Tabla 2. Relación de tiempo y profundidad de extracción con el tamaño de partículas.

Profundidad (cm)	Diámetro de partícula (phi)	Diámetro de partícula (mm)	Clase de tamaño epiclastico	Tiempo de extracción
10	5	0,031	Limo grueso	1 min. 56 s
10	6	0,0156	Limo medio	7 min. 39 s
10	7	0,0078	Limo fino	30 min. 37 s
5	8	0,0039 ≈ 0,004	Limo muy fino	58 min. 12s
5	9	0,0020	Arcilla	3 h 52 min. 49 s

Nota. Algunas clasificaciones utilizan el límite limo-arcilla en 0,002 mm (2μ), en vez de 0,004 mm (4μ), para estudios de suelos; sin embargo, este último es más comúnmente utilizado por los geólogos.

Laboratorio de Edafología Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México (2001). Con estos parámetros se obtuvo una constante  $K$  con un valor de 35.793,5.

## Dispersión

La dispersión es un paso muy importante para medir el tamaño individual de las partículas. En general, las partículas menores de 6 o 7 phi son afectadas por la forma de escamas y las cargas eléctricas de otras partículas, produciendo floculación y alterando la velocidad de asentamiento.

Para evitar la floculación es indispensable utilizar un dispersante y cerciorarse de que este funcione. Específicamente, ocurre lo siguiente:

Las partículas finas en escamas están usualmente cargadas eléctricamente; la mayoría tiene una rejilla con carga iónica negativa, la cual se neutraliza tomando iones cargados positivamente de la solución circundante (usualmente  $H^+$ , algunas veces  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  u otros), dejando la solución, en cercanía a las escamas de arcilla, carente de iones negativos ( $OH^-$ , etc.); así, cuando una de estas escamas con su "nube" de iones negativos aborda otra escama también con iones negativos, se repelen entre sí (Folk, 1974).

De allí que sea indispensable usar agua destilada y desionizada. Nunca debe utilizarse agua del grifo, ya que esta contiene pequeñas cantidades de iones que pueden causar floculación. Siempre deben probarse varios dispersantes y usar el que funcione mejor, ya que uno de ellos puede trabajar bien en un sedimento y fallar en otros. En consecuencia, deben realizarse pruebas para verificar que no esté ocurriendo floculación en el proceso, la cual puede ser reconocida por un coágulo, por un rápido asentamiento de cúmulos de partículas o por la presencia de una capa gruesa y pegajosa, generada dentro del agua relativamente clara.

También puede ponerse una gota sobre un portaobjetos para examinarla en el microscopio petrográfico. Si las partículas se presentan individuales y muestran movimiento browniano (caótico y constante), la dispersión está bien; si forman cúmulos o

cadenas, el agente dispersante o la cantidad no es adecuada (Folk, 1974).

Como dispersante, el hexametáfosfato de sodio ( $NaPO_3)_6$  ha arrojado mejores resultados en los diferentes laboratorios de análisis texturales de partículas finas, tanto en el método de la pipeta como en el del hidrómetro y el de Bouyucos. Arteta (2001) confirmó, con una serie de comparaciones entre tratamientos, dispersantes y métodos de análisis mecánico de suelos, que el hexametáfosfato de sodio produce que mejores resultados incrementando los porcentajes de arcilla obtenidos. Por esta razón, se sugiere en este trabajo empleando una cantidad de 50 ml, a una concentración 0,4 N con 10 gramos de muestra introducida en un *beaker* (previamente pesado en la balanza analítica) y llevado a la plancha agitadora durante 30 minutos con el agitador magnético en su interior. Finalmente, se sugiere realizar pruebas para descartar floculación utilizando el microscopio petrográfico.

## Integración de metodologías de análisis granulométrico

La metodología de Kellerhals & Bray (1971) para la integración de diferentes técnicas de muestreo se ha convertido en un análisis complementario que permite abordar un depósito volcániclastico de manera cuantitativa. Aplicado en diferentes estudios, se han obtenido resultados representativos, mostrando que es posible combinar varias técnicas de muestreo integrándolas mediante un factor de equivalencia. Su importancia radica en que la descripción de depósitos con fragmentos tamaño grava es una tarea difícil en términos cuantitativos, debido a que involucra una serie de decisiones subjetivas, como selección del sitio y procedimiento del muestreo. Un ejemplo de ello son los diferentes resultados a los cuales llegan los investigadores a pesar de estudiar el mismo caso. Usualmente la mayoría de estudios sobre transporte de sedimentos se basan en el análisis por tamizado; sin embargo, no es práctico cuando los depósitos contienen cantidades considerables de fragmentos tamaño grava, ya que las muestras grandes requieren representatividad.

Según Kellerhals & Bray (1971), en la literatura se encuentran diferentes gráficas donde los tamaños de las partículas obtenidos por varios métodos no equivalentes son fijados a una sola curva, ignorando un grupo de datos considerable, porque los efectos de las diferencias entre los procedimientos de muestreo no pueden ser evaluados. En consecuencia, desarrollaron un método para convertir el resultado de algún procedimiento a su equivalencia (tabla 3), basados en el siguiente argumento:

El método de conversión está respaldado por argumentos geométricos, los cuales se basan principalmente en el modelamiento experimental de un depósito no consolidado empaquetado densamente en tres cubos de diferente tamaño, con el fin de derivar factores de conversión para todas las combinaciones posibles de métodos de muestreo.

La tabla 3 muestra la lista de los factores resultantes. Se observa que los tipos de muestreos difieren por un factor de peso proporcional.

**Tabla 3.** Factores de peso para la conversión de procedimientos de muestreo (Kellerhals & Bray, 1971).

Conversión a					
Conversión de	Tamiz por peso	Malla por número	Malla por peso	Área por número	Área por peso
Tamiz por peso	1	1	$D^3$	$1/D^2$	D
Malla por número	1	1	$D^3$	$1/D^2$	D
Malla por peso	$1/D^3$	$1/D^3$	1	$1/D^3$	$1/D^2$
Área por número	$D^2$	$D^2$	$D^3$	1	$D^3$
Área por peso	$1/D$	$1/D$	$D^2$	$1/D^3$	1

**Notas:** 1. Los factores de peso son derivados por los argumentos geométricos de empaquetamiento denso en cubos.

2. El término D es el promedio de un rango de tamaños geométrico, ajustado en el factor de peso. El término D puede ser un eje intermedio o un tamaño en el tamiz.

Es importante clarificar que en la combinación del muestreo por conteo de puntos (malla por número) y el muestreo volumétrico (tamiz por peso) –dos de los métodos anteriormente descritos, y más usados para análisis granulométricos–, los factores de peso son iguales a la unidad según los análisis de Kellerhals & Bray (1971), lo cual indica que el muestreo por malla, con análisis de frecuencia por número, es un procedimiento capaz de describir la superficie de un afloramiento con granos gruesos en equivalencia con el usual análisis por tamizado.

Por último, se describe brevemente la relación e integración estadística de los tres métodos expuestos anteriormente, cuyos muestreos volumétricos para los análisis de pipeta y de tamizado por vía seca son integrados estadísticamente con los de la malla de la siguiente manera:

- Obtención de los porcentajes en peso de las fracciones calculadas por el método de la pipeta, teniendo en cuenta que debe recalcularse con respecto al peso total de la muestra retenida en el fondo del juego de tamices.
- Normalización de los porcentajes de las fracciones desde  $-2\phi$  (4 mm) hasta  $9\phi$  (0,002 mm) al porcentaje en número de las partículas menores o iguales a  $-2\phi$  (4 mm), obtenido del método de la malla. Los porcentajes resultantes de este cálculo son equivalentes automáticamente al porcentaje por peso, teniendo en cuenta que el factor de conversión es igual a 1 (tabla 3).
- Los porcentajes de las fracciones mayores o iguales a  $-3\phi$  (8 mm) guardan equivalencia con los porcentajes en peso del tamizado y la pipeta, por lo cual se pueden integrar en una sola curva,

que representa el tamaño de grano en unidades phi vs el porcentaje en peso de las mismas.

- Finalmente se obtienen los histogramas, las curvas de distribución y las curvas de frecuencia acumulada en un espectro de partículas desde el tamaño neto de arcilla < 8 phi (0,004 mm), o el mínimo phi requerido, hasta el máximo tamaño phi encontrado para todas las muestras colectadas.

### Diagramas de clasificación a partir de parámetros estadísticos

Es importante tener en cuenta que los parámetros estadísticos son utilizados para la descripción individual (cuantificación) de los depósitos, así como para el desarrollo y la aplicación de algunos métodos empíricos de clasificación, como los propuestos por Walker (1971, figura 1a,) y Pierson & Scott (1999, figura 1b).

### Referencias bibliográficas

- Arteta, R. (2001). Comparación de métodos de análisis mecánicos de suelos. *Terra*, 19, 219-225.
- 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 sedimentology constraints on their origin and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 351-369.
- Cas, R. A. F. & Wright, J. V. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*. London: Allen & Unwin Ltd.
- Day, R. P. (1965). Pipette method of particle size analysis. *Methods the Soils Analysis. Agronomy*, 9, 553-562.
- Fisher, R. V. & Schmincke, H. U. (1982). *Pyroclastic rocks*. Berlin: Springer-Verlag.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin: The University of Texas, Hemphill.
- Fritz, W. J. & Moore, J. N. (1988). *Basics of physical stratigraphy and sedimentology*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Herrera, S. & López, S. A. (2003). *Estratigrafía de la formación Manizales y propuesta de un modelo de depósito*. Tesis de pregrado. Manizales: Universidad de Caldas, Programa de Geología.
- Inman, D. L. (1952). Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 22, 125-145.
- Kellerhals, R & Bray, D. I. (1971). Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of Hydraulics Division*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1165-1180.
- Krumbein, W. C. (1934). Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 4, 65-77.
- Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. (2001). *Sistema de apoyo metodológico*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. Boletines no editados difundidos, a partir de 1982.

### Conclusiones

Uno de los principales inconvenientes en muchos centros de estudio e investigación para llevar a cabo un trabajo completo es la ausencia de información estandarizada y difundida a manera de protocolo de seguimiento. De este trabajo se obtiene la información en conjunto con respecto a los análisis granulométricos de depósitos volcániclasticos, teniendo en cuenta que la aplicabilidad en diferentes estudios sustentan la importancia y amplia difusión actual de los análisis y, por tanto, la clasificación de los depósitos en relación con los diversos tipos de parámetros estadísticos, su comportamiento (dependiendo del tipo de depósito) y, en consecuencia su origen. ▀

- Laboratorio de Edafología Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. (2001). *Determinación de la textura por el método de la pipeta en suelos no volcánicos*.
- Major, J. J., Janda, R. J. & Daag, A. S. (1996). Watershed disturbance and lahars on the East Side of Mount Pinatubo during the mid-june 1991 eruptions, in Newhall, C. G. and Punungbayan, R. S. (eds). *Fire and Mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines: Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, and University of Washington Press, Seattle, pp. 895-919.
- Mothes, P. A., Hall, M. L. & Janda, R. J. (1998). The enormous chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59, 233-244.
- Murcia, H. F., Hurtado, B. O., Cortés, G. P., Macías, J. L. & Cepeda, H. (2008). The ~2500 yr. B. P. Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 171, 201-214.
- Nikolskyi, B. I. (1963). *Spravochik khimika* (Manual de Química), I, 878, 985.
- Pierson, T. C. & Scott, K. M. (1999). Superficial hydrologic hazards at volcanoes: debris avalanches, lahars and floods: processes, interpretation of deposits, and techniques of hazard assessment and mitigation. Open-File Report U.S. Geological Survey. Washington.
- Pulgarín, B. A. (2000). *Depósitos masivos del Pleistoceno Tardío asociados al colapso del flanco Sur del Volcán Nevado del Huila, Colombia*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Schmidt, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 9, 41-43.
- Scott, K.M., 1988. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system. U.S. Geological Survey Professional Paper 1447-A.
- Sohn, Y. K. & Cough, S. K. (1989). Depositional processes of the Suwolbong tuff ring, Cheju Island (Korea). *Sedimentology*, 36, 837-855.
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Geological Society of America. Bulletin*, 25, 655-744.
- Vallance, J. W. & Scott, K. M. (1997). The Osceola Mudflow from Mount Rainier: sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *GSA Bulletin*, 9, 143-163.
- Walker, G. P. L. (1971). Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *Journal of Geology*, 79, 696-714.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediment. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- White, J. D. L. & Houghton, B. F. (2006). Primary volcanoclastic rocks. *Geology*, 34, 677-680.
- Wolcott, J. & Church, M. (1971). Strategies for sampling spatially heterogeneous phenomena: the example of river gravels. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 534-543.
- Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. *American Geophysical Union Transactions*, 35, 951-956.