

Jean-Luc Le Pennec^{1,2}
Andrés G. Ruiz²
Patricia Mothes²
Minard L. Hall²
Patricio Ramón²

ESTIMACIONES DEL VOLUMEN GLOBAL DEL DEPÓSITO DE CENIZA DE LA ERUPCIÓN DE AGOSTO DEL 2001 DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

1. Institut de Recherche pour le Développement, Whympier 442 y Coruña, casilla 17-12856, Quito.
2. Instituto Geofísico/
Departamento de Geofísica.
Escuela Politécnica Nacional,
Quito.

Resumen

La fase eruptiva relativamente intensa del volcán Tungurahua durante el mes de agosto del 2001 produjo un notable depósito de ceniza, ubicado principalmente al oeste del edificio. Se midió los espesores de la capa de ceniza en noventa sitios para establecer un mapa con doce isópachas. En este artículo, se presentan las estimaciones preliminares del volumen global del depósito de ceniza, las cuales fueron calculadas utilizando varios modelos propuestos recientemente en la literatura especializada. Según el modelo utilizado, los resultados obtenidos caen en el rango entre 3.3 a 8.75×10^6 m³. Sin embargo, los modelos que más se acercan a la realidad muestran valores entre 4 y 6×10^6 m³. De estos valores podemos concluir que el índice de explosividad volcánica ("VEI") de la fase eruptiva de agosto del 2001 fue de 3.

Abstract

The relatively intense eruption of Tungurahua volcano during August, 2001, produced a notable quantity of ash which was deposited to the west of the edifice. Ash thickness was measured in 90 sites to establish a map with 12 isopachs. In this article are presented the preliminary estimates of the global volume of the ash deposit which are calculated with various models which have been recently published in the literature. According to the employed model, the results which were obtained range from 3.3 to 8.75×10^6 m³. However, the models that result in values of 4 and 6×10^6 m³ are the most realistic. From these values we can conclude that the eruptive phase of August 2001 had a VEI (Volcano Explosivity Index) value of 3.

Jean-Luc.Le-Pennec@ird.fr

INTRODUCCIÓN

Después de ocho décadas de tranquilidad, el estrato volcán Tungurahua (5023 m, Cordillera Real) (Hall, *et al.*, 1999) se reactivó progresivamente entre agosto y octubre del año 1999. La actividad magmática, que se inició después de una fase freática de apertura del conducto, fue caracterizada por emisiones de ceniza, explosiones breves 'vulcanianas' y fases estrombolianas esporádicas (Le Pennec, *et al.*, 2001). Durante el año 2000, la actividad se ha mantenido en niveles moderados pero se notó un decrecimiento importante a partir de octubre. Una nueva fase empezó durante el mes de mayo del 2001 con eyección de material incandescente. Explosiones con cañonazos fueron reportadas al inicio de junio, marcando una nueva etapa del proceso eruptivo iniciado en el 1999. De manera súbita, el 4 de agosto del 2001, se registró una importante señal de tremor que marcaba el inicio de una fase eruptiva intensa que duró hasta el 23 del mismo mes. Esta fase eruptiva emitió una gran cantidad de ceniza, produciendo daños importantes a algunas casas y sobre todo al ganado y a los cultivos de la región oeste del volcán en la zona entre Guano, Quero y el Cerro Iqualata (ver mapa en Ruiz, *et al.*, en este volumen).

Hasta el momento no se ha podido estimar cuantitativamente el volumen de material grueso y/o fino (ceniza) expulsado durante las fases eruptivas de 1999-2000.

Varias razones explican esto: la cantidad de material era pequeña; la ceniza ha sido dirigida hacia todos los rumbos durante este período (Ruiz, 2001); el viento y las lluvias removilizaron las tefras rápidamente; el acceso a los sitios de depositación ha sido difícil. Todo estos factores no han permitido realizar isópacas precisas.

La fase eruptiva relativamente intensa del mes de agosto del 2001 produjo un depósito de ceniza notable, el establecimiento de las isópacas de este depósito se facilitó porque, los vientos durante el mes de agosto del 2001 tenían un rumbo general y muy constante hacia el occidente (desde el SW hasta el NW). Segundo, las lluvias fuertes que acompañaron la erupción provocaron el endurecimiento del depósito en varios sectores, lo que permitió hacer medidas confiables pocas semanas después de la erupción.

En este artículo presentamos las estimaciones preliminares del volumen global del depósito de ceniza de la fase eruptiva de agosto de 2001. Estas estimaciones, realizadas a partir de un mapa de isópacas que será publicado en otro trabajo, resultan de la aplicación de modelos recientes de cálculo de volúmenes de caídas de tefras. No trataremos el problema de la evaluación del volumen de material balístico o del volumen global de magma ('equivalente roca densa'). Tampoco discutiremos los parámetros eruptivos como la magnitud o la intensidad de la fase eruptiva. Esos temas serán detallados en trabajos futuros.

LOS DATOS

La evaluación del volumen del depósito de ceniza es basada en las isópacas obtenidas a partir de más de noventa medidas de espesor realizadas durante y después de la erupción, en la zona ubicada entre el cráter del volcán y el Cerro Igualata. Hemos obtenido doce isópacas cuya precisión es considerada como buena a bastante buena. También se intentó hacer una estimación de la superficie de dos isópacas adicionales. En la Panamericana se ha medido un tamaño T de alrededor de 0.2 cm de ceniza. Considerando una isópaca de forma elíptica de 28 km de eje mayor por 14 km de eje menor, se obtiene una superficie A de $308 \times 10^6 \text{ m}^2$. Al final de la erupción se vio también que el glaciar del volcán Chimborazo estaba totalmente "negro". Por analogía con lo que hemos visto en otros lugares, pensamos que se necesita un tamaño mínimo de 0.05 cm de ceniza para obtener una capa tan continua de ceniza negra.

Tabla 1. Datos de superficie de las isópacas utilizadas para las estimaciones de volumen del depósito de ceniza.

Eso nos permite evaluar la superficie de la isópaca 0.05 cm con una elipse de 50 km de largo por 20 km de ancho. Los datos de tamaño T de la ceniza y de la superficie A de las isópacas correspondientes están reunidos en la Tabla 1.

PATRÓN DE DISMINUCIÓN DEL TAMAÑO DE LA CENIZA CON LA DISTANCIA

Casi todos los modelos de cálculo de volumen de caídas de tefras se apoyan sobre la hipótesis de que existe una ley matemática simple que describe la relación entre la distancia, o la superficie de una isópaca, y el espesor de la caída de tefras. Los estudios recientes (Houghton, *et al.*, 1999) admiten que el tamaño de los depósitos proximales e intermedios de tefras decrecen de manera exponencial aunque los límites de lo que es 'proximal' e 'intermedio' no son claros.

Los datos obtenidos en este trabajo nos permiten hacer una inspección de esta idea. La figura 1 muestra la disminución del tamaño de la ceniza medido muy cerca del eje principal de la caída, el cual pasaba justo al Sur del Cerro Igualata. Se ve que una ley exponencial describe bastante bien la disminución del tamaño ($R^2=0.975$), pero una ley potencial también se acerca mucho de los datos ($R^2=0.948$), con la excepción notable de dos puntos ubicados a ~11-13 km del cráter (zona de Santa Fe de Galán-Sabañag). Esta observación está en favor de un decrecimiento exponencial aunque no se puede descartar totalmente la idea de que los datos siguen una ley potencial en ciertos rangos de espesor. Por eso, a continuación se comparará los volúmenes utilizando ambas leyes.

Tamaño T de la capa de ceniza en cm	Error máximo del tamaño en cm	Superficie A incluida en la isópaca en m^2
12.00	0.4	2025000
10.00	0.4	3820000
8.00	0.3	6740000
7.00	0.3	9100000
5.00	0.2	12520000
4.00	0.2	14980000
3.00	0.2	20120000
2.00	0.2	37310000
1.50	0.1	60000000
1.00	0.1	80680000
0.50	0.05	116360000
0.30	0.05	165270000
0.20	0.05	307876080
0.05	---	785398163

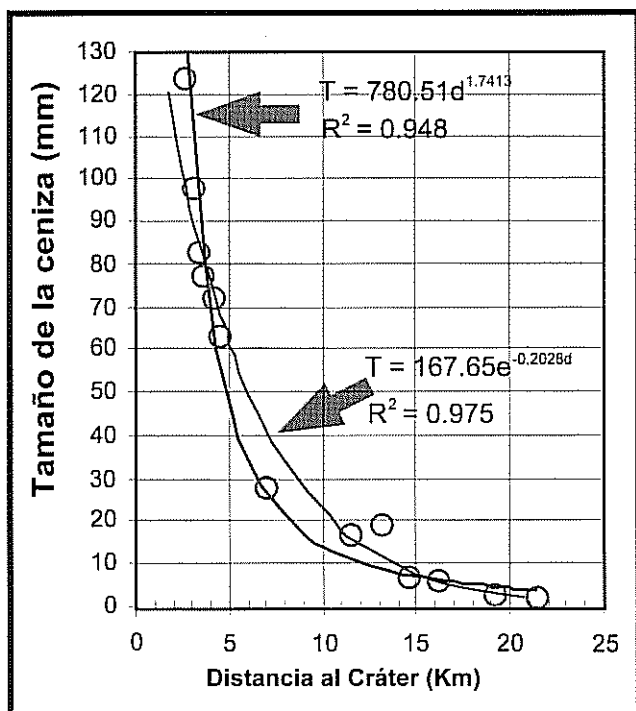


Figura 1. Disminución del tamaño de la ceniza debajo del eje principal de la caída.

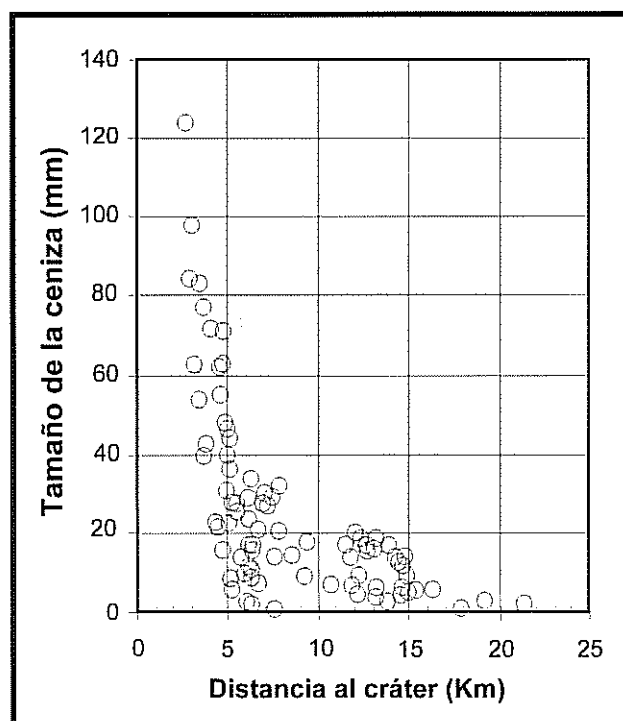


Figura 2. Relación entre el tamaño de la ceniza y la distancia al cráter.

En la figura 2 se ha reportado el espesor de la ceniza con respecto a la distancia al cráter. Se ve que el tamaño no decrece de manera continua y regular en el rango de datos obtenidos. Observamos que las medidas de tamaño máximo parecen limitadas por dos líneas rectas. Esas líneas tienen pendientes muy diferentes y se unen en un 'punto de inflexión'. Este fenómeno de cambio brutal de pendiente con la distancia ha sido observado en muchas otras caídas de tefras y corresponde a lo que se califica como la 'segmentación' de los depósitos. El origen de esta segmentación es complejo ya que depende de las condiciones atmosféricas -viento, lluvia-, del comportamiento de sedimentación dependiendo del tamaño de grano, agregación de los granos de ceniza, etc. Este tema está fuera del asunto de esta nota pero el lector interesado podrá leer por ejemplo Bonadonna, *et al.*, (1998), o Carey (1996), para tener más informaciones.

INTERPOLACIÓN POR UNA SERIE DE TRAPEZOIDES

El modelo de cálculo más simple, y tal vez más confiable en ciertas condiciones, consiste en integrar la función $T=f(A)$, en el rango de valores para las cuales se tiene datos, suponiendo un decrecimiento lineal del tamaño con el área entre dos datos consecutivos. Ese modo de cálculo está descrito por ejemplo en Froggatt (1982) o en Fierstein y Nathenson (1992). En nuestro caso, considerando que el tamaño de ceniza al viento era de

40 cm, se obtiene un volumen de $3.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ dentro de la isópaca 0.3 cm, y $4.01 \times 10^6 \text{ m}^3$ dentro de la isópaca 0.05 cm (ver los resultados en la Tabla 2). Aquí se plantea el problema de los depósitos distales.

Considerando la distribución de la pluma monitoreada por los satélites de la NOAA, podemos sugerir que la isópaca $T=0$ pasaba cerca de la costa del Ecuador, al nivel de Manglaralto-Salinas, es decir muy cerca del meridiano 81° . El volumen total sería de $8.52 \times 10^6 \text{ m}^3$. Este valor debe ser evaluado con cuidado: primero, el modelo supone que el tamaño disminuye linealmente con la superficie entre 2 datos sucesivos. Eso permite tener valores aceptables si las isópacas son cercanas (Fierstein and Nathenson, 1992), al contrario, si las isópacas son muy alejadas, y es el caso de nuestras isópacas distales, el volumen será sobre estimado de manera significativa. Además, es muy difícil saber precisamente por donde pasaba la isópaca $T=0$.

También esto tiene un gran efecto sobre el volumen final. Sin embargo, consideramos que el valor de $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ debe representar un volumen 'máximo' para la caída de ceniza del Tungurahua.

INTERPOLACIÓN POR UNA LEY POTENCIAL

Rose, *et al.*, (1973), y otros autores han mostrado que los datos de ciertas caídas de ceniza se alinean sobre

uno o dos segmentos en un gráfico $\ln A = f(\ln T)$. Fierstein y Nathenson (1992) han obtenido una expresión simple que permite calcular el volumen en el caso de una interpolación por dos segmentos de forma potencial.

En el caso del Tungurahua hemos hecho tres modelos que corresponden a 3 posibles puntos de inflexión identificados al revisar los gráficos: $T=3$ cm, 2 cm y 0.3 cm. Los volúmenes obtenidos son de $6.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ y $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ respectivamente. La mejor regresión esta obtenida para el segundo modelo (inflexión en 2 cm, figura 3). Los parámetros utilizados para los cálculos se encuentran en la Tabla 2.

Interpolación por una ley $T = f(A^2)$

1. Interpolación por un solo segmento

El caso de una interpolación de datos por un segmento único corresponde al modelo de Pyle (1989, 1995). Este autor indica que el tamaño T de la capa de ceniza puede ser descrito por la relación exponencial siguiente:

$$T = T_0 \exp(-kA^{1/2}) \quad (1)$$

En esa expresión T_0 es el tamaño 'teórico' de la ceniza al viento, k es una constante y $A^{1/2}$ es la raíz cuadrada de la superficie cubierta de T cm de ceniza. Pyle (1989) explica que el volumen puede ser estimado simplemente utilizando la fórmula:

$$V = 13.083 \times T_0 \times b_t^2 \quad (2)$$

V representa el volumen global de ceniza, y b_t corresponde a la distancia definida por la siguiente expresión: $b_t = \ln(2)/(k\sqrt{\pi})$.

Si aplicamos una ley de tipo (1) al conjunto de nuestros datos (figura 4), obtenemos $T_0=9.16$ cm y $b_t=1.82$ km. De la expresión (2) sacamos un volumen global de $3.96 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pero, observamos en la Tabla 2 que el coeficiente de regresión no están bueno para la colección completa de datos ($R^2=0.93$).

Si se utiliza las isópacas 12 cm hasta 0.3 cm, es decir que se quita las isópacas mal controladas con $T < 0.3$ cm, los datos se acercan a una línea de regresión por la cual se tiene $k=0.3201$ y $T_0=16.543$ cm. De allí se puede sacar $b_t=1.22$ km, y se obtiene un volumen de $3.23 \times 10^6 \text{ m}^3$. En ese caso tenemos $R^2=0.986$, pero se debe recordar que no se ha tomado en cuenta los depósitos distales ni los depósitos balísticos proximales.

Para tomar en cuenta los depósitos distales Pyle (1995) propone utilizar la expresión:

$$V/V_{\text{total}} = 1 - (T_{\text{last}}/T_0)(1 - \ln(T_{\text{last}}/T_0)), \quad (3)$$

En la cuál T_{last} corresponde a la última isópaca mapeada. Pyle indica que si $T_{\text{last}}/T_0 < 0.05$, por lo menos

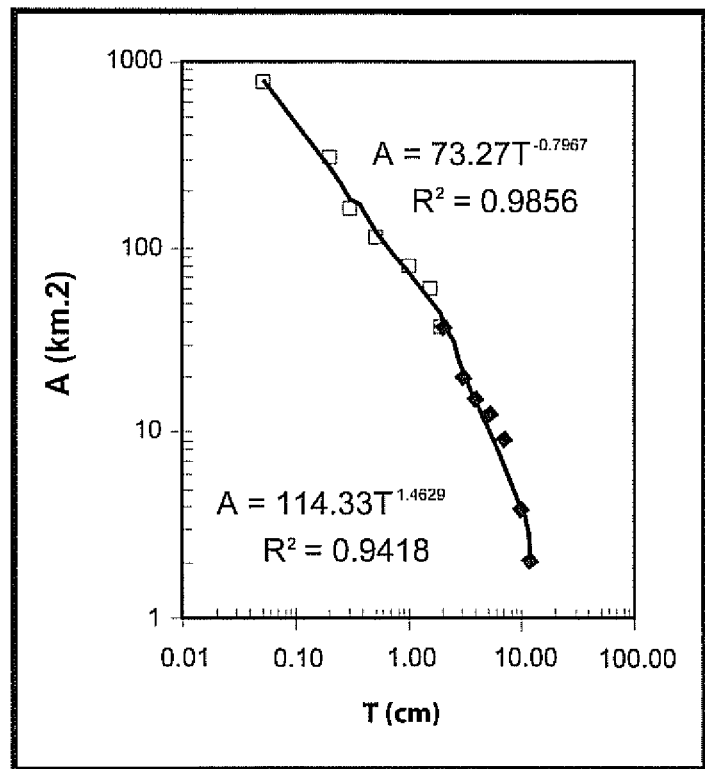
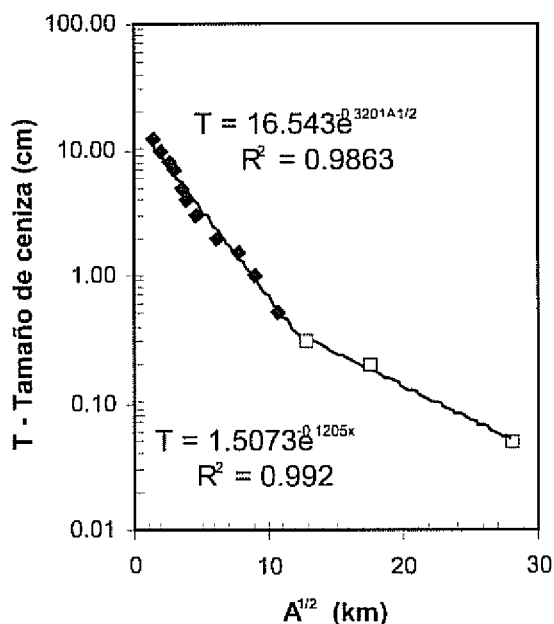


Figura 3. Gráfico $\log(T) = f(\log A)$ con interpolación a dos segmentos e inflexión a 2 cm.

80% del volumen calculado será incluido dentro de la isópaca correspondiendo a T_{last} . En el último caso precedente tenemos $T_{\text{last}}/T_0 = 0.018$, y el ratio V/V_{total} vale 0.91, lo que implica que V_{total} sería de $3.55 \times 10^6 \text{ m}^3$.

2. Interpolación por dos segmentos

En el caso de una interpolación por dos segmentos (figura 4), Fierstein y Nathenson (1992) obtienen una formulación simple que necesita determinar pocos parámetros, como los parámetros de las distribuciones obtenidas para cada segmento y las coordenadas del punto de inflexión (A_{ip} y T_{ip} en la Tabla 2). Las fórmulas completas se encuentran en Fierstein y Nathenson (1992). Aquí también hemos hecho 3 modelos. En el primer modelo (i.e. sacando las isópacas $T < 0.3$ cm, y una inflexión a 3 cm) se obtiene un volumen de $3.25 \times 10^6 \text{ m}^3$. En el segundo modelo (que incluye las isópacas con $T < 0.3$ cm y una inflexión a 2 cm) llegamos a un volumen de $4.74 \times 10^6 \text{ m}^3$. Finalmente, en el tercer modelo (14 isópacas con inflexión en 0.3 cm) se calcula unos $3.91 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cabe mencionar que la aproximación a dos segmentos representa una simplificación de la realidad dado que se puede identificar hasta cinco segmentos en los gráficos. Todo depende del nivel de calidad de regresión que se quiere aceptar o exigir. De todos modos, se ve que los modelos con 2 segmentos exponenciales brindan



◀ **Figura 4.** Gráfico $\log(T) = f(\log A^{1/2})$ para dos segmentos con una inflexión en 0.3 cm.

Tabla 2. Parámetros y resultados de las estimaciones de volumen de ceniza depositado por el volcán Tungurahua en agosto del 2001 (las fórmulas para los cálculos se encuentran en los trabajos mencionados en la tabla).

* Los volúmenes mencionados no toman en cuenta la eq. (3).
 ** IP se refiere al Punto de Inflexión. T_{first} es la isópaca más cerca a la fuente, y T_{last} es la última (más alejada) isópaca mapeada.

**Escala LnT - $A^{1/2}$
 (1 segmento)***

Pyle 1989	T_{first} cm	T_{last} cm	T_0 cm	b_t km	R^2	k	Volumen $10^6 m^3$
Modelo 1	12	0.05	9.1617	1.8172	0.9863	0.2152	3.96
Modelo 2	12	0.3	16.5430	1.2217	0.9293	0.3201	3.23

**Escala LogA-logT
 (2 segmentos)****

Fierstein & Nathenson 1992	T_{first} cm	T_{last} cm	A^*_0 km	c_1	R_1^2	c_2	R_2^2	A_{ip} km	T_{ip} cm	Volumen $10^6 m^3$
Modelo 1 (IP = 3 cm)	12	0.3	66.991	-0.857	0.9397	-1.544	0.9159	28.05	2.773	6.85
Modelo 2 (IP = 2 cm)	12	0.05	73.27	-0.797	0.9856	-1.463	0.9418	43.039	1.95	5.94
Modelo 3 (IP = 0.3 cm)	12	0.05	69.873	-0.82	0.9643	-1.133	0.9499	84.476	0.79338	8.75

Escala LnT - $A^{1/2}$ (2 segmentos)**

Fierstein & Nathenson 1992	T_{first} cm	T_{last} cm	T_0 cm	k	R_1^2	T_1	R_2^2 cm	k_1	$A_{ip}^{1/2}$ km	Volumen $10^6 m^3$
Modelo 1 (IP = 3 cm)	12	0.3	24.909	0.4596	0.9808	11.519	0.9878	0.2818	4.48553	3.25
Modelo 2 (IP = 2 cm)	12	0.05	21.789	0.4094	0.9771	36.729	0.9424	0.1553	6.10819	4.74
Modelo 3 (IP = 0.3 cm)	12	0.05	16.543	0.3201	0.9863	36.729	0.992	0.1205	12.8557	3.91

**Trapezoides
 (14 segmentos)**

Froggatt 1982	T_{first} cm	T_{last} cm	Volumen $10^6 m^3$
Modelo 1 (12 segmentos)	12	0.3	3.21
Modelo 2 (13 segmentos)	12	0.2	3.53
Modelo 3 (14 segmentos)	12	0.05	4.01
Modelo 4 (15 segmentos)	12	0	8.52

unos volúmenes similares a los que resultan de los modelos con un solo segmento.

CONCLUSIONES

Nuestras estimaciones del volumen global de ceniza dependen fuertemente del modelo utilizado para obtenerlas. Si consideramos todos los modelos, obtenemos valores en el rango 3.3 a 8.75×10^6 m³. Sin embargo, el modelo de trapezoides nos indica que el volumen muy probablemente no sobrepasa unos 8.5×10^6 m³. Los modelos que más se acercan a los datos (ver Tabla 2) brindan valores entre 4 y 6×10^6 m³ y pensamos que tal vez reflejan de mejor manera la realidad.

Como se ha dicho anteriormente, esos resultados no incluyen el volumen de los depósitos balísticos que cubrieron la parte superior del volcán. Sin embargo, estimamos que el volumen global de tefras (ceniza + balísticos) alcanza unos 10^7 m³. La incertidumbre es importante pero podemos concluir que el índice de explosividad volcánica (VEI) de la fase eruptiva de agosto del 2001 era de tres. Entonces, la actividad del Tungurahua de agosto del 2001, que se puede calificar como 'moderada' según Newhall y Self (1982), fue la más débil de los tiempos históricos, dado que las erupciones de 1773, 1886 y 1916-18 posiblemente alcanzaron unos valores del VEI entre 3 y 4.

REFERENCIAS

- Bonadonna, C., Ernst, G.G.J. y R.S.J. Sparks, 1998. *Thickness variations and volume estimate of tephra fall deposits: the importance of particle Reynolds number*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 81: 173-187.
- Carey, S. N., 1996. Modeling of tephra fallout from explosive eruptions. In Scarpa, R. and Tilling, R.I. (coord.) "monitoring and mitigation of volcano hazards", Springer, Berlin, 429-461.
- Fierstein, J. y M. Nathenson, 1992. *Another look at the calculation of fallout tephra volumes*. Bull. Volcanol., 54: 156-167.
- Froggatt, P.C., 1982. *Review of methods of estimating rhyolitic tephra volumes: applications to the Taupo volcanic zone, New Zealand*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 14: 301-318.
- Hall, M.L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P. y M. Monzier, 1999. *Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 91: 1-21.
- Houghton, B.F., Wilson, C. J. N. y D. M. Pyle, 1999. Pyroclastic fall deposits. In Sigurdsson, *et al.*, (coord.) "Encyclopedia of volcanoes" 555-570.
- Le Pennec, J.-L., M.L. Hall, P. Mothes, M. Monzier, P. Ramón, P. Samaniego, M. Ruiz y B. Beate, 2001. *Fenomenología eruptiva e interpretación de la actividad del volcán Tungurahua en Noviembre-Diciembre de 1999*. Jornadas de Ciencias de la Tierra, EPN. Resumen extendido, 60-62.
- Newhall, C.G. y S. Self, 1982. *The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. J. Geophys. Res., 87: 1231-1238.
- Pyle, D.M., 1989. *The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits*. Bull. Volcanol., 51: 1-15.
- Pyle, D. M., 1995. *Assessment of the minimum volume of tephra fall deposits*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 69: 379-382.
- Rose, W.I. Jr, Bonis, S., Stoiber, R.E., Keller, M. y T. Bickford, 1973. *Studies of volcanic ash from two recent Central American eruptions*. Bull. Volcanol., 37: 338-364.
- Ruiz, A. G., 2001. *Dispersión de cenizas del volcán Tungurahua entre octubre 1999-Noviembre 2000*. Jornadas de Ciencias de la Tierra, EPN. Resumen extendido, 78-80.