

ORIGEN DEL DEPÓSITO FREATOMAGMÁTICO DE LA CABAÑA, CUENCA BAJA DEL RÍO CHINCHINÁ, CALDAS-COLOMBIA

Borrero, C. A.¹; Parra, Y. A.²; Ospina, J. C.³

RESUMEN

El depósito piroclástico de La Cabaña aflora al Oeste de Manizales (Departamento de Caldas, Colombia), entre los Ríos Chinchiná y Guacaica en la zona de La Cabaña, Tres Puertas y La Manuela, en un área de aproximadamente 6 Km². La distancia aproximada recorrida por la corriente de densidad piroclástica que lo generó desde la probable fuente, el Volcán Nevado del Ruiz, hasta el Río Cauca (probable límite de la zona de influencia del flujo) es de 50 Km.; esta corriente presentó un alto grado de fluidización y un comportamiento dinámico turbulento de una fase menos densa de la corriente piroclástica, lo cual evitó su confinamiento a lo largo de los valles de los drenajes principales. Comparando los resultados de los parámetros del software SFT, fracción (k) y del factor de fragmentación (ϕ_m/γ) contra la moda de cada subpoblación de éste depósito, se concluye que todas las subpoblaciones se ubican en el campo freatomagmático, según gráficos presentados por Wohletz (1983), y aunque éste es el principal mecanismo de fragmentación no involucra volúmenes de agua importantes. Se encontró que la tendencia de la moda con respecto al factor gamma, promedio ponderado de la dispersión entre la Toba Napolitana Amarilla (*Campi Flegrei*, Italia) y el depósito piroclástico de La Cabaña son muy similares, lo que induce a pensar en un origen común asociado con una caldera, propuesta que se puede relacionar con los resultados de Londoño & Sudo (2002) donde una estructura caldérica es predefinida en el volcán Nevado del Ruiz. La creciente acumulación de grandes cantidades de gas en algunas áreas (especialmente alrededor del Cráter Arenas-Volcán Nevado del Ruiz) a profundidades someras puede producir la inestabilidad del sistema volcánico-magmático-hidrotermal y podría disparar erupciones freáticas o freatomagmáticas, similares a las que originaron el depósito piroclástico de La Cabaña.

Palabras clave: Caldera, corriente de densidad piroclástica, freatomagmatismo, Volcán Nevado del Ruiz.

ORIGIN OF THE LA CABAÑA FREATOMAGMATIC DEPOSIT, LOWER BASIN OF THE CHINCHINÁ RIVER, CALDAS-COLOMBIA

ABSTRACT

The pyroclastic deposit of La Cabaña outcropping to the west of Manizales (Department of Caldas, Colombia) between Chinchiná and Guacaica rivers in the area of La Cabaña, Tres Puertas and La Manuela, shows an areal distribution of about 6 Km². The approximated distance runout by pyroclastic density current, which generated it, from the probable source, the Ruiz Volcanic Massif area, to the Cauca river (probable limit to the influence area) is 50 Km.; this pyroclastic density current attained a high degree of fluidization and turbulence of a less dense phase, avoiding the confinement along the major drainages valleys. Comparing the estimates of the parameters fraction (k) and fragmentation factor (ϕ_m/γ), obtained from SFT software, with the mode of each subpopulation from this deposit, we concluded that all subpopulations are located in the phreatomagmatic field, according to Wohletz (1983), and although the fragmentation mechanism was mainly phreatomagmatic, this involved little amounts of water. We found that the tendency of the Mode with respect to gamma factor, weighted average of the dispersion between the Neapolitan Yellow Tuff (*Campi Flegrei*, Italia) and the pyroclastic deposit of La Cabaña are very similar; from this is possible to infer a common origin associated with a caldera. This proposal could be relate with Londoño & Sudo (2002), whose conclusions predefined a calderic structure in the Nevado del Ruiz volcano. The increasing accumulation of enormous gas volumes in some areas (mainly around of the Crater Arenas-Nevado del Ruiz Volcano) at shallow depths, could produce instability in the volcanic-magmatic-hydrothermal system and could trigger phreatic or phreatomagmatic eruptions, in a similar way to the ones that gave origin to the pyroclastic deposit of La Cabaña.

Key words: Caldera, phreatomagmatism, pyroclastic density current, Nevado del Ruiz Volcano.

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales. Correo electrónico: borrero_c@yahoo.com.

² Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología Cumanday (GIEV Cumanday). Correo electrónico: yimialejandro@yahoo.es.

³ Correo electrónico: juliocesar0404@yahoo.com.mx.

DEPÓSITO PIROCLÁSTICO DE LA CABAÑA

El depósito piroclástico de la Cabaña aflora al Oeste de Manizales (Caldas - Colombia), entre los Ríos Chinchiná y Guacaica, presenta una distribución areal de aproximadamente 6 Km², cubriendo a manera de manto la topografía. De acuerdo con su granulometría y rasgos macroscópicos observados en campo se separaron tres niveles, con partículas gruesas (arena media) en los Niveles Inferior y Superior, mientras en el Nivel Medio las partículas son un poco más finas (limo). Composicionalmente presenta una asociación mineralógica similar en los tres niveles: cuarzo, anfibol, plagioclasa (andesina-labradorita), moscovita, y biotita, y fragmentos de pómez (FIGURA 1). Los tres niveles son masivos (carecen de estructuras internas) y los contactos entre ellos son gradacionales (Ospina & Parra, 2004).

Se propone que el Depósito Volcánico de La Cabaña fue originado a partir de una corriente de densidad piroclástica, cuya probable área fuente es el Volcán Nevado del Ruiz (VNR), generada a partir del colapso de una columna eruptiva. Esta corriente de densidad piroclástica alcanzó un alto grado de fluidización y turbulencia en su recorrido, lo que le permitió depositarse en zonas altas y bajas (cubriendo la topografía), siendo su principal área de influencia el sector Oeste de la cuenca del Río Chinchiná (FIGURA 2b). Como esta no fue una corriente valle-confinada, varía significativamente su localización con respecto al área amenazada de la propuesta por Villegas (2001) para los flujos piroclásticos del sector occidental del VNR (FIGURA 2a).

De acuerdo con los resultados granulométricos, resolución de los parámetros estadísticos, la separación en subpoblaciones por medio del programa SFT y los análisis de imágenes SEM de fragmentos de pómez (Borrero *et al.*, 2005) se propone que el mecanismo de fragmentación fue principalmente freatomagmático aunque con poca abundancia de agua.

En las imágenes SEM, la mayoría de las partículas estudiadas tienen formas *blocky - equant* (paralelepípedos con similares dimensiones en todas direcciones) (FIGURA 3), las cuales son predominantes en los tres niveles indicando un fracturamiento frágil (*brittle fracture*), siendo formas indicativas de fragmentación freatomagmática y debido a su tamaño (> 63 μm) sugieren que la interacción agua/magma fue relativamente baja. El agua involucrada en este proceso puede ser de origen freático, por la probable infiltración en el sistema volcánico de agua lluvia o agua

proveniente del deshielo del casquete glacial, a través de fracturas, planos de falla y otras discontinuidades en el edificio volcánico.

Aunque la presencia de líticos es un rasgo común en la gran mayoría de depósitos de origen freatomagmático, su ausencia en el depósito probablemente se deba a que la fragmentación solo aconteció en la parte superior de la cámara magmática sin involucrar roca caja, o que en la zona estudiada sólo se encuentran las facies distales del depósito.

Un cálculo aproximado del volumen inicial (pre-erosión) para el área de estudio, se realizó a partir de un mapa isópaco del depósito, obteniéndose un valor de 0,119 Km³. Teniendo en cuenta que este depósito se encuentra distribuido en áreas aledañas, se hizo una aproximación al volumen inicial del flujo que lo originó, multiplicando el valor calculado por un factor de 4, que es el número aproximado de veces en que se relaciona el área estudiada con el área total que cubre el depósito, obteniendo un volumen inicial probable (pre-erosión) aproximado de 0,476 Km³. Un cálculo aproximado del volumen actual (post-erosión), para el área de estudio arrojó un volumen de 0,0207 Km³ (Ospina & Parra, 2004).

Este depósito es masivo en todos los puntos donde aflora y carece de estructuras ó estratificaciones; se puede dividir en tres niveles de acuerdo con los cambios granulométricos observados a nivel de afloramiento. No hay superficies límite claras entre los niveles, tales como superficies erosivas, paleosuelos, etc., que puedan mostrar una separación de eventos o cambios marcados en la dinámica de depositación. Una definición detallada de los niveles se encuentran en Ospina & Parra (2004) y Borrero *et al.* (2005).

La distancia aproximada recorrida desde la probable fuente (Volcán Nevado del Ruiz), en línea recta, hasta el Río Cauca (probable límite de la zona de influencia del flujo) es de 50 Km. Aproximadamente a 35 Km. desde la fuente (unos kilómetros antes de la población de Chinchiná) la distribución areal del depósito comienza a ser apreciable (FIGURA 1).

Debido a que el depósito cubre zonas elevadas, se puede inferir que la corriente de densidad piroclástica que lo generó, presentó un alto grado de fluidización y un comportamiento dinámico turbulento de la fase menos densa de la corriente piroclástica, lo cual evitó su confinamiento a lo largo de los valles de los drenajes principales. Debe aclararse que el comportamiento inicial

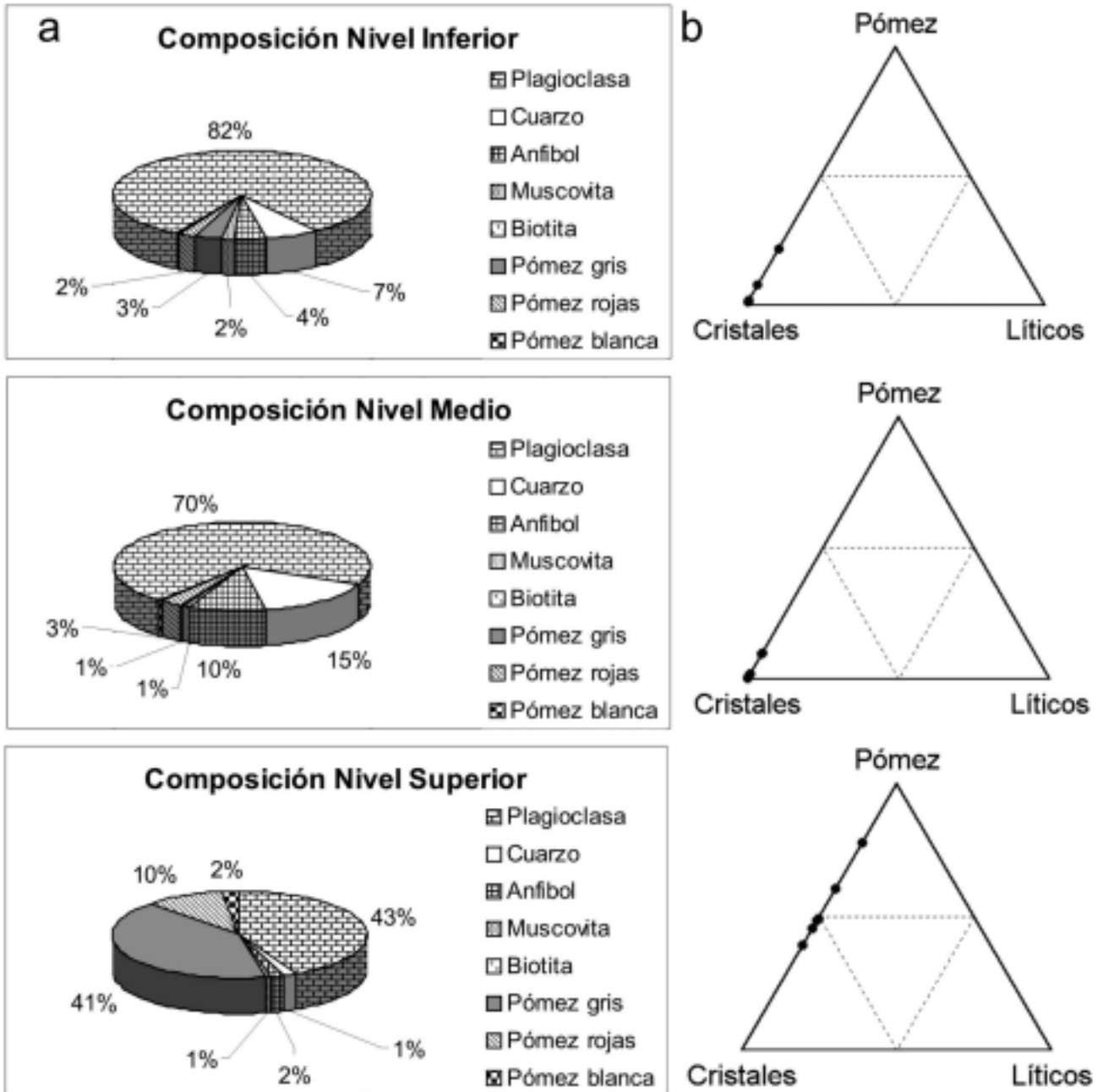


FIGURA 1. a. Composición mineralógica promedio por cada nivel. b. Diagrama triangular mostrando la relación entre cristales, pómez y líticos en cada uno de los niveles.

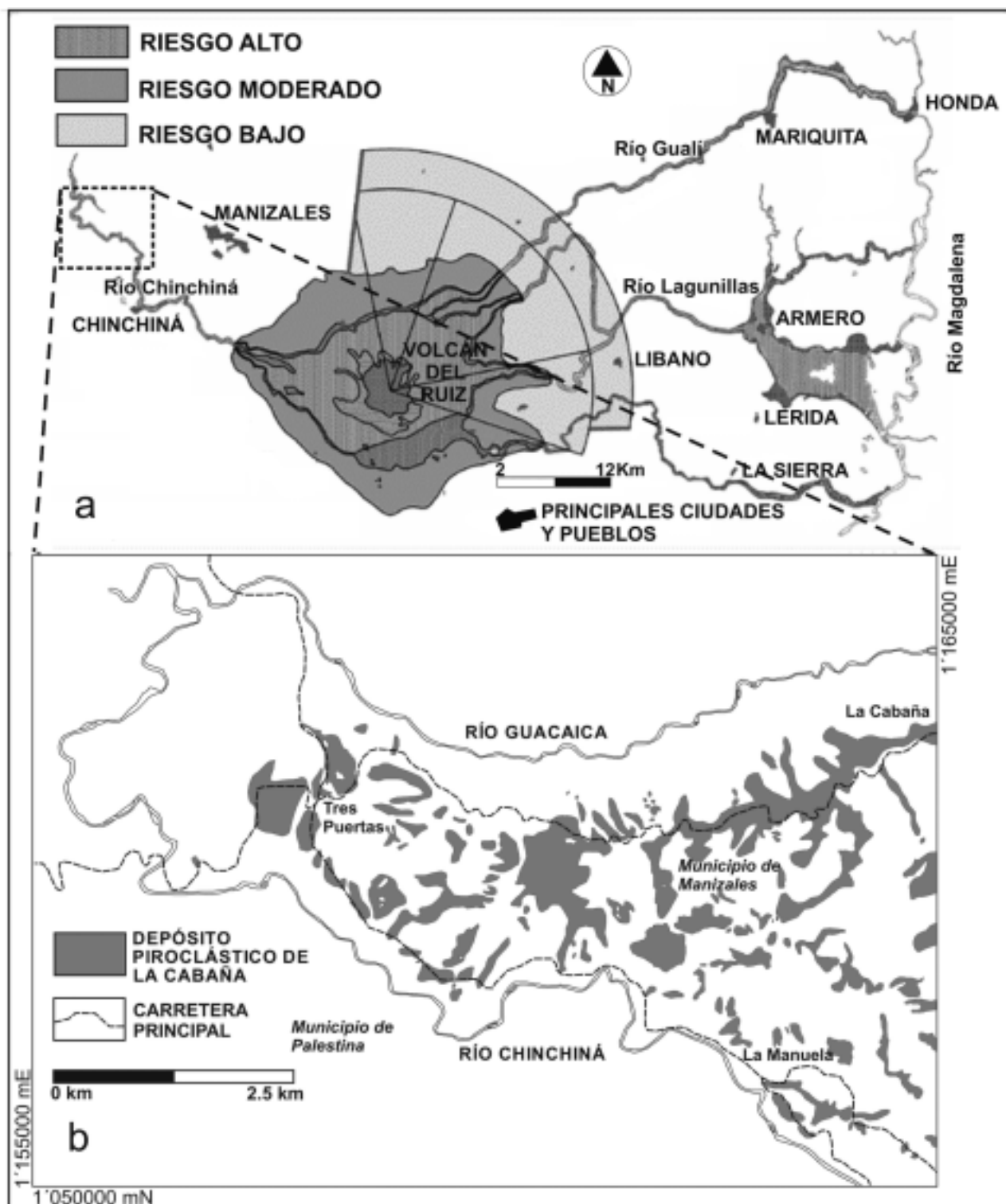


FIGURA 2. a. Mapa de amenaza volcánica para el Nevado del Ruiz (modificado de Villegas, 2001) mostrando áreas en riesgo por flujos de lava, flujos piroclásticos y lahares; en el recuadro rojo se observa la cuenca baja del Río Chinchiná. b. Distribución areal del Depósito Piroclástico de La Cabaña, cubriendo tanto zonas elevadas como zonas bajas.

de esta corriente fue posiblemente valle-confinado en las cercanías del área fuente, alcanzando un mayor grado de fluidización y turbulencia a medida que avanzaba en su recorrido.

De acuerdo a las características granulométricas y morfológicas observadas en el Depósito Volcánico de La Cabaña, este se originó a partir de una corriente de densidad piroclástica (*pyroclastic density current*, según Fisher, 1990, en Wohletz, 1998) de ceniza y pómez que cubrió gran parte de la topografía preexistente a manera de manto, como lo muestran las modelaciones de corrientes de densidad piroclástica (Gladstone *et al.*, 2004), en las cuales las partes más finas de estas corrientes que pueden ser débilmente estratificadas (como los niveles definidos en este trabajo) u homogéneas, siendo menos afectadas por la topografía, y sólo las partes más densas de las mismas son valle-confinadas.

En algunas localidades el depósito estudiado se encuentra suprayaciendo unidades recientes, algunas de ellas correlacionables con la Terraza Poligénica de Chinchiná, la cual agrupa una serie de depósitos cuaternarios volcánico-clásticos.

ORIGEN

Las erupciones volcánicas explosivas, las cuales descargan grandes cantidades de energía mecánica en un corto período de tiempo y produce grandes cantidades de piroclastos de tamaño de grano fino (ceniza volcánica), son causadas por la interacción de magma con agua subterránea y/o superficial y son llamadas explosiones freatomagmáticas, los piroclastos son de dos tipos (1) fragmentos de magma (juveniles) y (2) clastos líticos de la roca encajante, los cuales pueden constituir hasta un 90% en volumen del material eruptado como es el caso de los volcanes tipo *maar* (Raue, 2004).

El entendimiento del volcanismo explosivo es limitado por la dificultad de documentar muchos de los parámetros físicos involucrados, además las observaciones de los procesos y el movimiento de los productos volcánicos siempre ha sido a distancia, lo que conlleva al desarrollo de los modelos experimentales para evaluar las condiciones energéticas de las erupciones y los parámetros más importantes como los mostrados por Wohletz (1983), Wohletz *et al.* (1989) y Wohletz & Brown (1995). En Borrero *et al.* (2005) (FIGURA 4 a-b) se muestran las subpoblaciones de los niveles del Depósito Piroclástico de La Cabaña y todas se ubican en el campo freatomagmático de Wohletz (1983), resultados

obtenidos por medio de la Teoría de Fragmentación/Transporte Secuencial (*Sequential Fragmentation/Transport Theory, SFT*) (Wohletz & Brown, 1995).

La teoría de Fragmentación/Transporte Secuencial, relaciona las curvas de distribución de masa/tamaño de partículas con un determinado tipo de mecanismo de fragmentación/transporte; se basa en el principio de que la fragmentación y los mecanismos de transporte operan de manera secuencial, a partir de una masa original que se rompe en grupos de partículas cada vez menores, las cuales se seleccionan de acuerdo a la masa. La integración de los resultados de cada etapa de fragmentación/transporte en una secuencia dada, predice una distribución similar a las distribuciones log-normal y de Weibull (Borrero *et al.*, 2005).

El *software* SFT permite al usuario identificar subpoblaciones a partir de la distribución de los tamaños de grano en una muestra. Las subpoblaciones poseen 4 propiedades gráficas importantes (Wohletz, 2002):

Moda (ϕ_m): identifica el tamaño Phi de un pico de una subpoblación.

Dispersión (γ): este parámetro es análogo a la desviación estándar y a la selección. Es una medida de la amplitud de la curva de la subpoblación.

Cambio: muestra el número de unidades Phi que la moda de la subpoblación está desplazada de donde debería estar si su valor de dispersión fuera aproximadamente $\gamma = -1$.

Fracción (k): es la proporción de la muestra total representada por la subpoblación.

Promedio: es el promedio ponderado con respecto a la fracción para cada parámetro.

Se separaron subpoblaciones en todas las muestras analizadas (cada muestra corresponde aproximadamente a 1 kg. de material piroclástico, previamente tamizado), a cada una de las cuales puede asignarse un mecanismo de transporte de acuerdo con el parámetro de dispersión (γ) calculado con el programa SFT para cada subpoblación: **subpoblación 1**, tracción y/o saltación; **subpoblación 2**, saltación y/o suspensión; **subpoblación 3**, saltación y/o suspensión. Debe aclararse que la interpretación de este parámetro depende en gran medida de los efectos físicos del proceso de transporte (p.e. flujo piroclástico, oleada piroclástica, avalancha de escombros, etc., según Wohletz *et al.*, 1989).

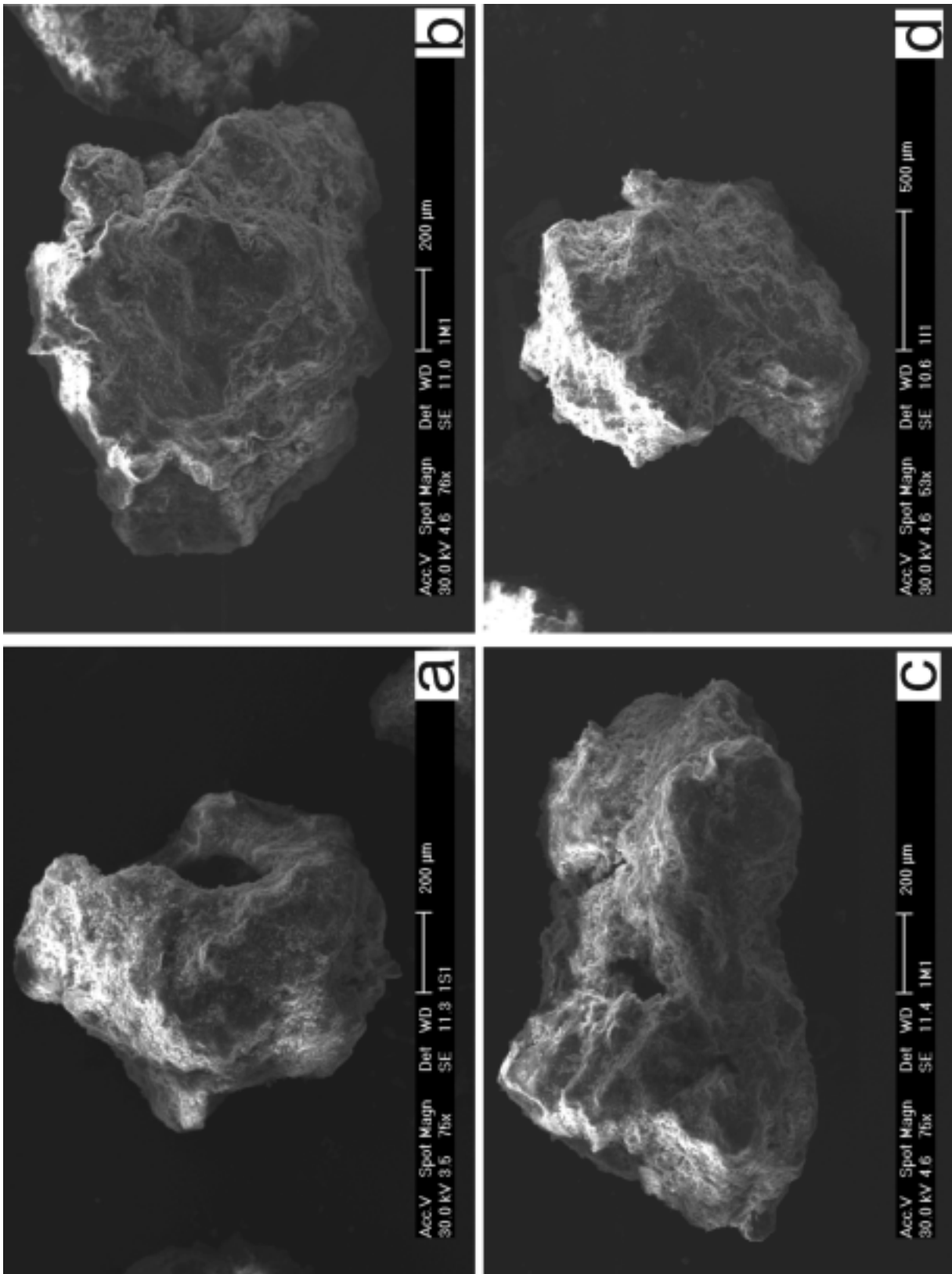


FIGURA 3. Imágenes SEM de fragmentos pumáceos obtenidos en diferentes niveles del depósito. Formas típicas *blocky - equant* de los niveles Superior (a) y medio (b - c), y fragmento pumáceo con bordes irregulares (d), indicativos de abrasión por transporte en flujo.

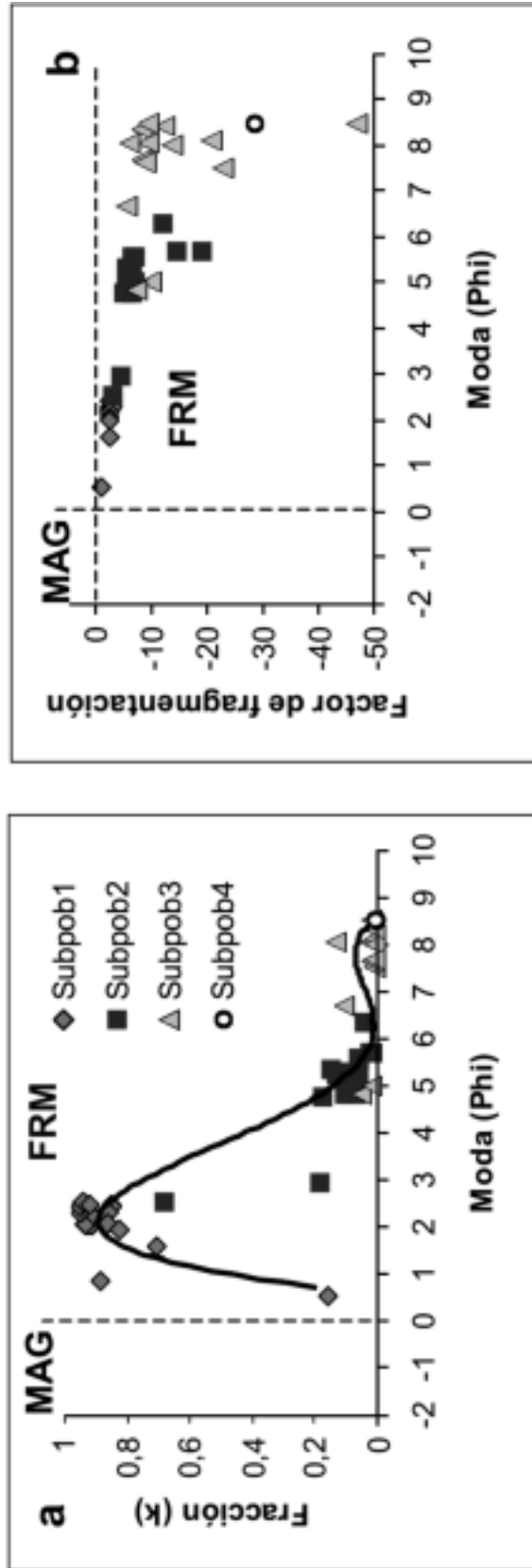


FIGURA 4. a. Gráfico de fracción (k) contra la moda de cada subpoblación, se puede observar que todas las subpoblaciones obtenidas se ubican en el campo freatomagnético (FRM) y que la subpoblación 1 corresponde a la mayor parte de la muestra. b. Gráfico del factor de fragmentación (fm/g) contra la moda, todas las muestras se ubican en el campo freatomagnético (FRM).

Teniendo en cuenta que la **Subpoblación 1** corresponde aproximadamente al 80% de cada muestra analizada (de un total de 18 muestras), los mecanismos de transporte predominantes son la tracción y/o saltación para los tres niveles del Depósito Piroclástico de La Cabaña (Borrero *et al.*, 2005).

Comparando los resultados de los parámetros SFT (Borrero *et al.*, 2005) con los de otros estudios realizados (Wohletz *et al.*, 1995), se puede decir que aunque el mecanismo de fragmentación es claramente freatomagmático no involucra volúmenes de agua tan altos (Wohletz, 1983), y que puede presentarse una componente de fragmentación magmática, como es el caso de algunas erupciones freatoplínicas. En la FIGURA 5 se puede apreciar la similitud de la relación gamma vs. moda, entre *The Neapolitan Yellow Tuff* (Wohletz *et al.*, 1995) y el depósito estudiado.

La Toba Napolitana Amarilla (*The Neapolitan Yellow Tuff*, NYT) es el producto de una de las dos erupciones

formadores de caldera de más alta magnitud reconocidas, que ocurrió en *Campi Flegrei* (Italia) hace aproximadamente 15.000 años (Deino *et al.*, 2004), y es de lejos el más grande depósito freatoplínico traquíutico conocido, cubre un área de aproximadamente 1.000 Kms² con un volumen estimado de 40 kms³. La erupción resultó en la formación de una caldera con una extensión areal de 90 Kms² que colapsó 600 m. en su parte central. Esta caldera está anidada dentro de la caldera inicial formada con la erupción de la Ignimbrita Campaniana.

La coincidencia de la tendencia de la moda con respecto al factor gamma, promedio ponderado de la dispersión, entre la Toba Napolitana Amarilla y el Depósito Piroclástico de La Cabaña, a pesar de la diferencia enorme en su volumen conduce a pensar en la formación de este depósito en relación a una caldera; aunque no se cuenta con una edad absoluta del depósito, en un sector cercano al área de estudio se encontró al Depósito Piroclástico de La Cabaña suprayaciendo la Ignimbrita de Río Claro-Molinos (Naranjo *et al.*, 1991), que fue datado por

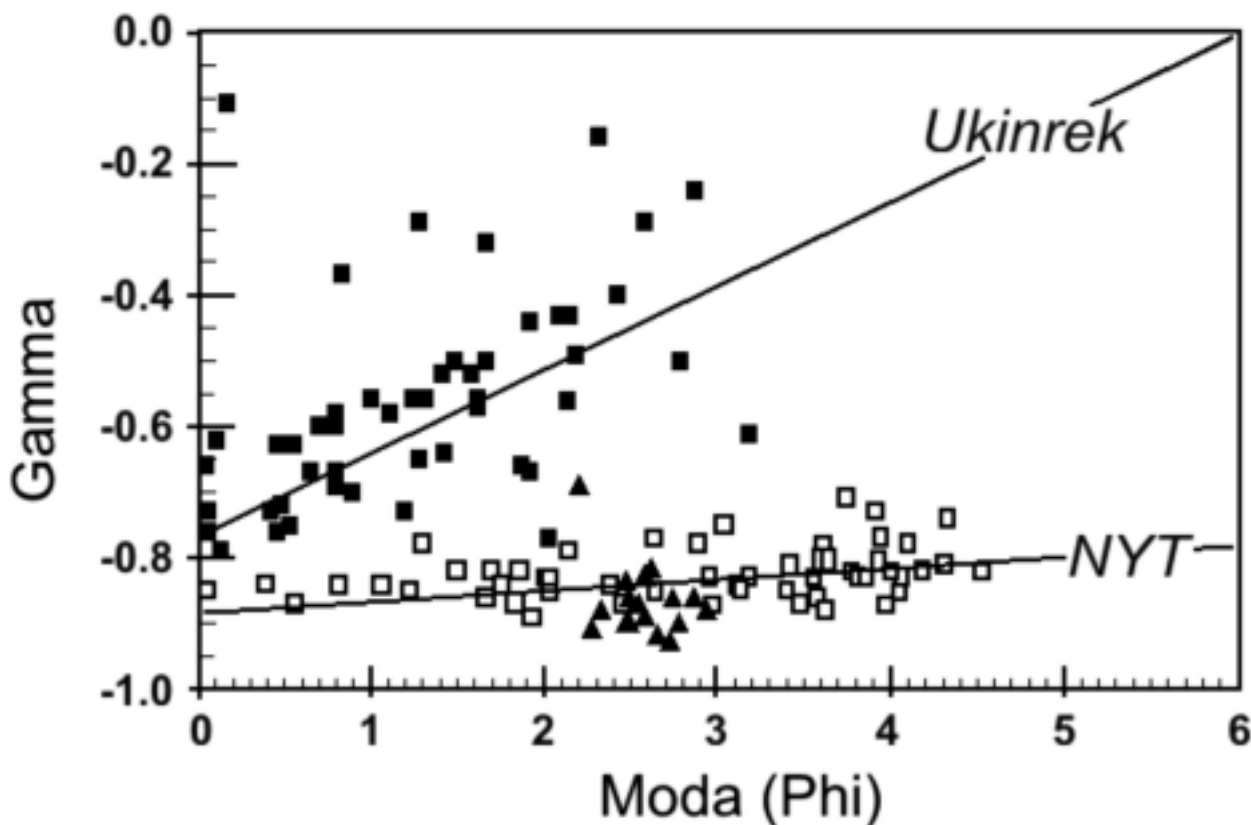


FIGURA 5. Comparación entre el promedio ponderado de dispersión gamma (γ) contra el promedio ponderado de la moda de cada muestra, en triángulos sólidos (este trabajo), parte inferior al centro; se observa una tendencia de crecimiento de γ con respecto a la moda. Las tendencias de las otras muestras corresponden con *The Neapolitan Yellow Tuff* (NYT) en cuadros vacíos, y *Ukinrek maar volcano* en cuadros sólidos (gráfico modificado de Wohletz, 1995).

Schaefer (1995), por el método Ar^{39}/Ar^{40} en plagioclasa obtenida de una pómez, con una edad de 89 ± 7 Ka; esta ignimbrita estaría relacionada con la caldera propuesta de manera interrogada en su modelo sísmico del VNR por Londoño & Sudo (2002) especialmente en la figura 14, donde una estructura caldérica y una falla separan la sismicidad de largo período de la sismicidad volcanotectónica al Oeste del actual cráter activo.

La FIGURA 6 muestra un esquema de la situación al momento de producirse la caldera hace aproximadamente 100.000 años en el VNR, la cual dio lugar a depósitos piroclásticos en el sector occidental de la Cordillera Central, magmáticos correspondientes a la Ignimbrita de

Río Claro-Molinos y freatomagmáticos como el Depósito Piroclástico de La Cabaña; se presume una actividad continua durante este último período caldérico del VNR para la producción de estos dos depósitos. Esta estructura caldérica ha sido cubierta y modificada por los productos volcánicos generados en erupciones posteriores (principalmente domos lávicos), así como por los procesos glaciares que han afectado la parte superior del volcán.

Desde el punto de vista de amenaza, según Londoño & Sudo (2002), la presencia de muchas fuentes termales en diferentes áreas del edificio volcánico, así mismo como las anomalías negativas de Bouguer sugieren que muchas

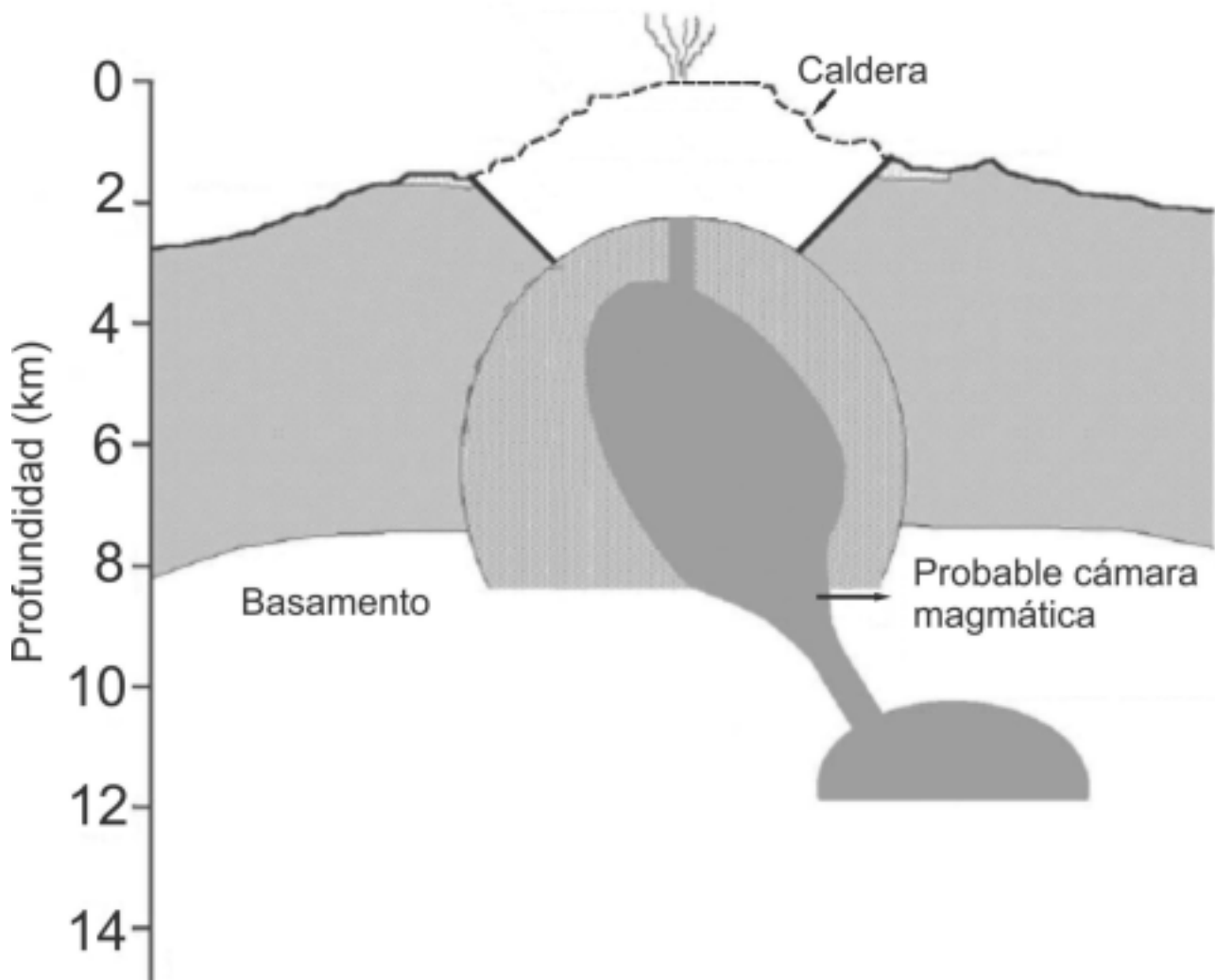


FIGURA 6. Diagrama esquemático en el que se presenta la situación del edificio volcánico del Nevado del Ruiz hace 100.000 años, mostrando la probable caldera (gráfico modificado de Londoño & Sudo, 2002). La actividad volcánica y glaciaria subsiguiente han cubierto y erosionado la estructura caldérica original.

fuentes de calor están activas a diversas profundidades, entre 2 a 3, 5 a 10 y 10 a 15 Km. por debajo del edificio actual del VNR. La creciente acumulación de grandes cantidades de gas en algunas áreas (especialmente alrededor del Cráter Arenas) a profundidades someras puede producir la inestabilidad del sistema volcánico–magmático–hidrotermal y podrían disparar erupciones freáticas o freatomagmáticas (Giggenbach *et al.*, 1990) similares a las que originaron los mencionados depósitos piroclásticos de Río Claro-Molinos y el de La Cabaña.

CONCLUSIONES

- Se propone el Macizo Volcánico del Ruiz como posible área fuente para la corriente de densidad piroclástica que originó el Depósito Volcánico de La Cabaña.
- De acuerdo a los datos granulométricos, a los parámetros estadísticos, a la separación en subpoblaciones y el análisis de imágenes SEM del Depósito Piroclástico de La Cabaña, se propone que el mecanismo de fragmentación fue principalmente freatomagmático.
- Se graficó la fracción (k) contra la moda de cada subpoblación, y se determinó que todas las subpoblaciones obtenidas se ubican en el campo freatomagmático. Al igual que graficando el factor de fragmentación (ϕ_m/γ) contra la moda, todas las muestras se ubican en el campo freatomagmático.
- La similitud entre la relación de gamma vs. moda entre el Depósito Piroclástico de La Cabaña y *The Neapolitan Yellow Tuff* (Wohletz *et al.*, 1995) sugieren un mecanismo común en su origen a partir de la formación de una caldera.
- La estructura caldérica en el VNR puede ser la que propone Londoño & Sudo (2002) y puede también estar relacionada con el origen de la Ignimbrita de Río Claro-Molinos que tiene una edad de 89 ± 7 Ka (Schaefer, 1995), la cual infrayace el Depósito Piroclástico de La Cabaña.

REFERENCIAS

- Borrero, C.A., Ospina, J.C., Parra, Y.A. (2005). El depósito volcánico de La Cabaña, evidencia de vulcanismo freatomagmático sobre el flanco centro-occidental de la Cordillera Central. *Geología Colombiana*, No. 30, pp. 15-32.
- Deino, A.L., Orsi, G., de Vita, S. and Piochi, M. (2004). The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei caldera – Italy) assessed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 133, pp. 157-170.
- Giggenbach, W.F., García, N., Londoño, A., Rodríguez, L., Rojas, G. and Calvache, M.L. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 42, pp. 13- 39.
- Gladstone, C., Ritchie, L.J., Sparks, R.S.J. and Woods, A.W. (2004). An experimental investigation of density-stratified inertial gravity currents. *Sedimentology*, Vol. 51, pp. 767-789.
- Londoño, J.M. and Sudo, Y. (2002). Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 119, pp. 61-87.
- Naranjo, J.L., Borrero, C.A., Ancochea, E., Fuster, J.M., Grand, M. y Handszer, A. (1991). Los flujos piroclásticos de Río Claro-Chinchiná y su dinámica de emplazamiento. Simposio sobre Magmatismo Andino y su Marco Tectónico, Tomo I, Manizales, pp. 247-264.
- Ospina, J.C. y Parra, Y.A. (2004). Caracterización geológica de los depósitos volcanogénicos del área comprendida entre La Cabaña y Tres Puertas (Manizales). Trabajo de Grado. Universidad de Caldas, Manizales, 89 p.
- Raue, H. (2004). A new model for the fracture energy budget of phreatomagmatic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 129, pp. 99-108.
- Schaefer, S.J. (1995). Nevado del Ruiz Volcano Colombia: magmatic system and evolution. Thesis Degree of Doctor of Philosophy. Arizona State University, Arizona. 147 p.
- Villegas, H. (2001). Imaging Notes, September-October 2001, Educating Policy Makers about Volcanic hazards, <<http://www.imagingnotes.com/sepoct01/villegas.htm>>
- Wohletz, K.H. (1983). Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 17, pp. 31-63.

Wohletz, K.H. (1998). Pyroclastic surges and compressible two-phase flow. In: From magma to tephra: modelling physical processes of explosive volcanic eruptions (Freundt, A. and Rosi, M. Eds.), Elsevier Science Ltd., Amsterdam, pp. 247-306.

Wohletz, K.H. (2002). SFT: Sequential Fragmentation/Transport Analysis, version 2.19 [on line].- <<http://www.geo.lanl.gov/Wohletz/SFT.htm>>], Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.

Wohletz, K.H., Sheridan, M.F. and Brown, W.K. (1989). Particle size distribution and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, pp. 703-721.

Wohletz, K.H. and Brown, W. (1995). Particulate size distributions and Sequential Fragmentation/Transport Theory. NSF/ISPS AMI-IMI Seminar. Santa Barbara, CA., pp. 235-241.

Wohletz, K.H., Orsi, G. and Vita, S. (1995). Eruptive mechanisms of the Neapolitan Yellow Tuff interpreted from stratigraphic, chemical, and granulometric data. *Journal of Volcanology and Geothermal Energy*, Vol. 67, pp. 263-290.

Trabajo recibido: octubre 21 de 2005
Trabajo aceptado: marzo 24 de 2006