

# INTERPRETACIÓN DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA (COLOMBIA), 2007 – 2009: ANÁLISIS DE COMPONENTES DE MATERIALES EMITIDOS

María Luisa Monsalve<sup>1</sup>; Bernardo Alonso Pulgarín<sup>2</sup>; Jaime Mojica<sup>3</sup>;  
Cristian Camilo Santacoloma<sup>2</sup>; Carlos Eduardo Cardona<sup>2</sup>.

## RESUMEN

La reactivación de volcán Nevado del Huila en el 2007 y actividad posterior, han dado lugar a la formación de grietas a gran escala en la cima, pequeñas emisiones de ceniza, emisión continua de lodo en octubre – noviembre de 2008, generación de importantes lahares, destacándose los generados el 18 de abril de 2007 y el 20 de noviembre de 2008, en los cuales hubo un aporte de 10 y 77 millones de m<sup>3</sup> de agua respectivamente, a la Represa de Betania, cantidad muy superior a la generada por la fusión de hielo-nieve debida a la actividad y, como fase magmática, la extrusión de domos coalescentes en el flanco SW del Pico Central en 2007 y 2008. Análisis de cenizas emitidas durante las actividades eruptivas se caracterizan por presentar en cantidad variable minerales de origen hidrotermal tales como cuarzo, sílice, feldespato, pirita, alunita, anhidrita, yeso, clorita, muscovita, esmectita, caolinita e ilmenita, mientras que el material juvenil es muy poco o ausente. Este hecho, así como el volumen inusual del agua involucrada en la generación de los lahares indicarían que, a excepción de los domos, el material emitido por el volcán Nevado del Huila, está asociado a eventos de actividad freática, debida a la interacción de fluidos y gases magmáticos con agua proveniente de acuíferos superficiales y posiblemente reservorio hidrotermal bajo el edificio volcánico. Los resultados de los análisis de cenizas emitidas así como los de sedimentos, aguas y precipitados en el río Páez, sustentan esta hipótesis.

**Palabras clave:** Volcán Nevado del Huila, erupciones freáticas, cenizas de caída, minerales hidrotermales, lahares, domos.

## INTERPRETATION OF 2007 - 2009 ERUPTIVE ACTIVITY OF NEVADO DEL HUILA VOLCANO (COLOMBIA): COMPONENT ANALYSIS OF EMITTED MATERIAL.

## ABSTRACT

The reactivation of the Nevado del Huila volcano in 2007 and subsequent activity, led to the formation of large cracks at the top, small emissions of ash and continuous emissions of mud in October-November 2008. There were also major lahars, notably those generated on April 18 2007 and on November 20 2008 in where an excess of 10 and 77 million m<sup>3</sup> of water respectively, was reported in Betania Reservoir (which was substantially higher than the water that could be generated by the fusion of ice-snow due to the activity). Magmatic episode led to the extrusion of coalescent domes in the SW flank of Pico Central in 2007 and 2008. Analysis of emitted ash during the eruptive episodes are characterized by varying amounts of hydrothermal mineral such as quartz, silica, feldspar, pyrite, alunite, anhydrite, gypsum, chlorite, muscovite, smectite, kaolinite and ilmenite, while the juvenile material is few or absent. These facts and the unusual volume of water involved in the generation of lahars indicate that, except for the domes, the material emitted by the volcano Nevado del Huila are associated to phreatic activity due to the interaction of fluids and magmatic gases with water from shallow aquifers and possibly with a hydrothermal reservoir beneath the volcano. The results of the analysis of ash as well as sediment, water and precipitates taken from the Páez River support this hypothesis.

**Keywords:** Volcán Nevado del Huila, phreatic eruptions, ash fall, hydrothermal minerals, lahars, dome.

<sup>1</sup> Servicio Geológico Colombiano, Subdirección de Geología Básica, Bogotá. [mmonsalve@ingeominas.gov.co](mailto:mmonsalve@ingeominas.gov.co)

<sup>2</sup> Servicio Geológico Colombiano, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán. [bpulgarin@ingeominas.gov.co](mailto:bpulgarin@ingeominas.gov.co), [csantacoloma@ingeominas.gov.co](mailto:csantacoloma@ingeominas.gov.co), [cecardona@ingeominas.gov.co](mailto:cecardona@ingeominas.gov.co)

<sup>3</sup> Servicio Geológico Colombiano, Subdirección de Geología Básica, Cali. [jmojica@ingeominas.gov.co](mailto:jmojica@ingeominas.gov.co)

## INTRODUCCIÓN

Emisiones menores de ceniza son generadas por la actividad explosiva de los volcanes, y representan un fenómeno común que precede o se asocia a fases eruptiva mayores donde, además, se emiten otro tipo de productos. Las emisiones de ceniza pueden ser generadas por actividad de carácter freática (por interacción agua - calor pero sin intervención directa del magma), freatomagmática (interacción directa del magma con agua) o magmática (sin intervención de agua).

Erupciones hidrotermales y / o freáticas han sido descritas para varios volcanes o áreas volcánicas del mundo, muchas de ellas precediendo erupciones freatomagmáticas y/o magmáticas (Barberi *et al.*, 1992; Ohba *et al.*, 2007; Nakada, 2000; Newhall, 2000). Aunque aún hay debate sobre la terminología y en ocasiones se usa explosión o erupción hidrotermal como sinónimo de freática y /o hidrovulcánica (Sheridan and Wohletz, 1983; Wohletz and Heiken, 1992; Delmelle and Bernard, 2000), en este trabajo, el término erupción o explosión freática se utiliza en el sentido de Barberi *et al.*, (1992): “para todos los casos de explosiones de una “bolsa” confinada de vapor y gas sin intervención directa del magma (todo el material emitido son fragmentos de rocas pre-existentes), independiente de la fuente del vapor (sistema freático o hidrotermal) y de si están o no involucrados fluidos juveniles”.

El volcán Nevado del Huila (VNH) (5364 msnm), situado en la parte central de la Cordillera Central de Colombia (FIGURA 1), es definido como un complejo volcánico de composición andesítica, con predominio de erupciones de tipo efusivo, cuya cima está compuesta por cuatro picos: Norte, La Cresta, Central y Sur (Pulgarín *et al.*, 2001). Hasta su reactivación en febrero de 2007, no presentaba registro de erupciones históricas y su actividad estaba reflejada por la presencia de fuentes termales alrededor del volcán y fumarolas en los picos Norte y Central.

Su reactivación, marcada por un incremento en la sismicidad, generó pequeñas emisiones de ceniza y un lahar, además de incremento en la actividad fumarólica y formación de importantes grietas en su cima; otras emisiones de ceniza se presentaron de manera aislada precediendo dos episodios de extrusión de domos en 2008 y 2009.

Con excepción de los depósitos de lahar en los valles bajos de los ríos, el muestreo de los productos emitidos

por la actividad del volcán fue afectado por la dificultad de acceso al volcán (especialmente para el caso de los nuevos domos generados), y la poca dispersión de las cenizas emitidas, que hace que normalmente no puedan ser colectadas en cantidad suficiente, antes de ser removidas por el viento o las lluvias.

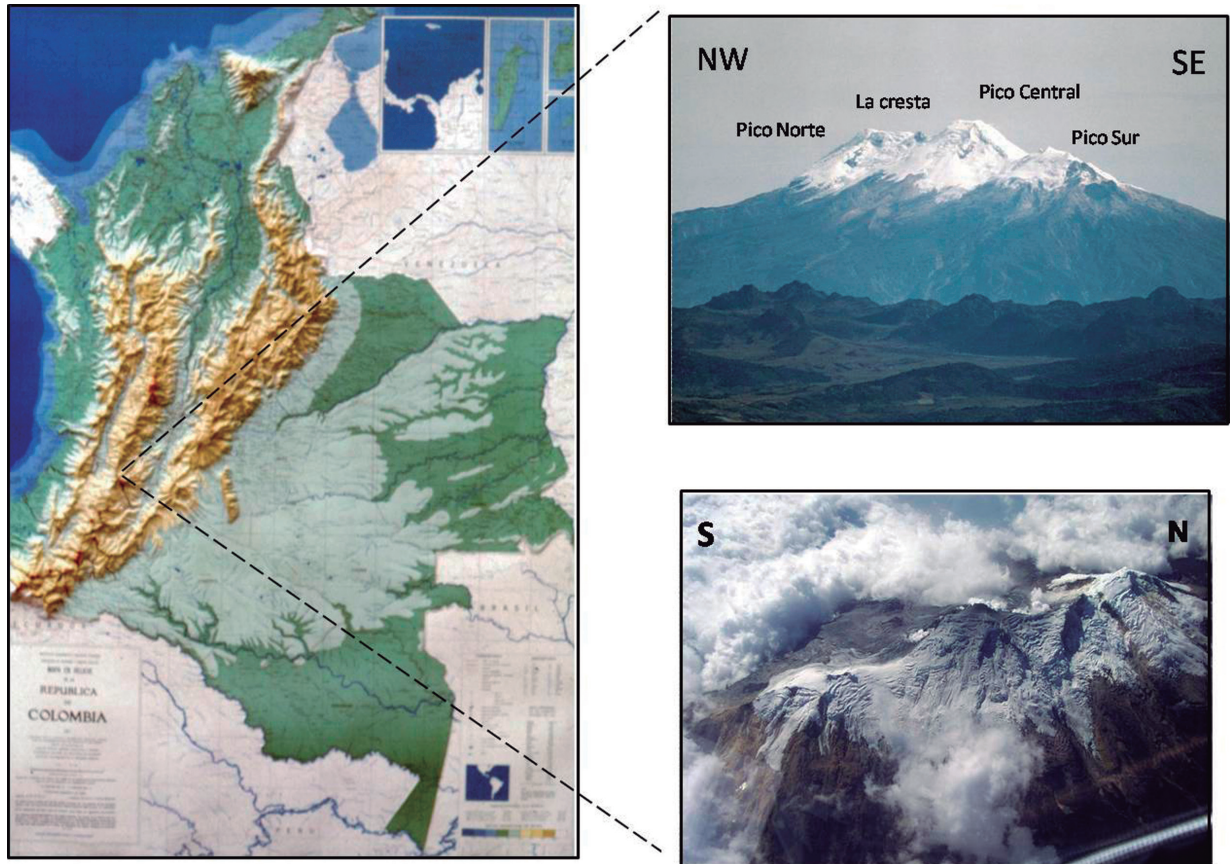
En este trabajo se resume la actividad del volcán Nevado del Huila en el periodo 2007-2009, se describen las características de muestras de cenizas emitidas en pequeños eventos aislados, o que acompañaron la generación de lahares o precedieron la extrusión de domos y se interpretan los resultados de análisis de difracción de rayos X (DRX) efectuados en muestras de cenizas y otros productos en el marco de la actividad más reciente.

La actividad sísmica asociada a los procesos eruptivos de este volcán, han sido descritos por Cardona *et al.* (2009) y Santacoloma *et al.* (2009); los aspectos relacionados con la generación de lahares y sus características por Worni (2008), Pulgarín *et al.* (2009 a y b) y el seguimiento al proceso eruptivo del volcán puede consultarse en la página institucional: <http://intranet.ingominas.gov.co/popayan>.

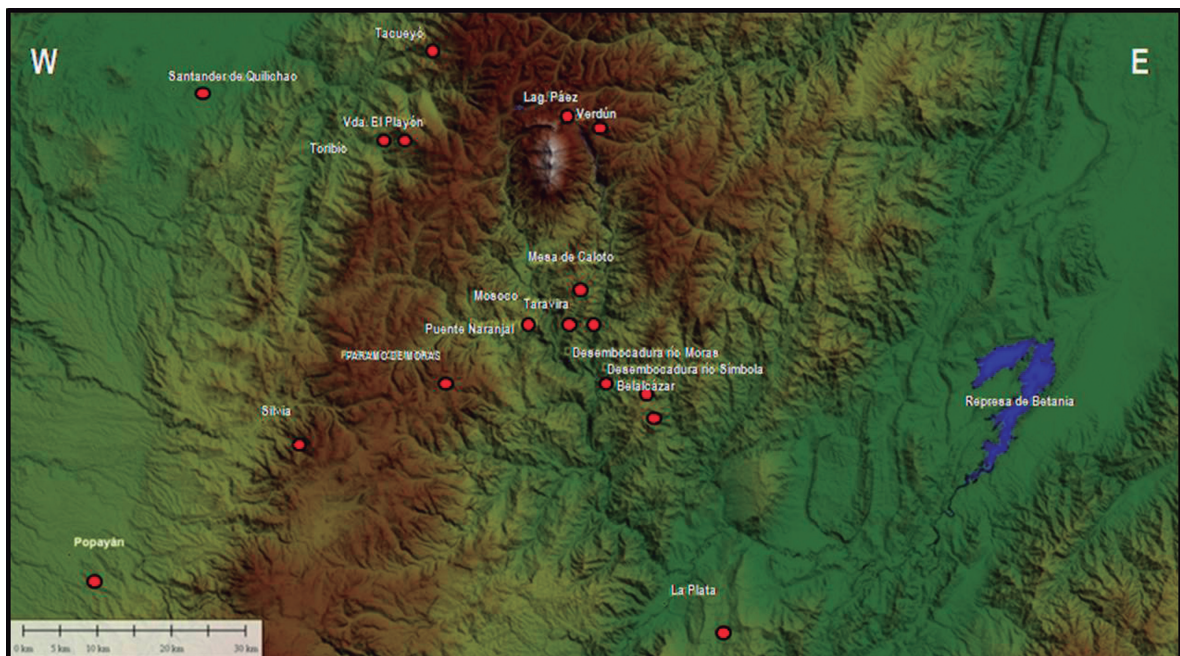
## METODOLOGÍA

Muestras de cenizas colectadas después de las emisiones de febrero 19 y 27 de mayo de 2007, 3 y 20 de noviembre de 2008 y agosto 3, octubre 16, 19 y 24 de 2009, fueron analizadas mediante lupa binocular Nikon (10X2) previa preparación de la muestra mediante lavado y secado según metodología seguida en los observatorios vulcanológicos (Méndez, 2004), y por difracción de rayos X en los laboratorios de INGEOMINAS Cali con Difractómetro RIGAKU Rint 2200, geometría Bragg-Brentano, con las siguientes condiciones de operación: Tubo de rayos-X de Cu; Velocidad de escaneo: 5 grados/min.; Paso: 0.020 grados, Rango: 2.0 a 70.0 grados 2teta; Voltaje: 40kV Amperaje: 30mA. Los análisis cuantitativos fueron efectuados con JADE (9.1).

Adicionalmente se llevaron a cabo análisis por difracción de rayos X de sedimentos en el río Páez y análisis físico/químico de aguas, de muestras colectadas los días 28 de octubre y 4 de noviembre de 2008, época en la cual este río presentó turbidez y cambio en la coloración en sus aguas. Los análisis de aguas se efectuaron en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. La FIGURA 2 muestra la ubicación con respecto al volcán, de los sitios en que se colectaron muestras para su análisis.



**FIGURA 1.** Localización del volcán Nevado del Huila, en la Cordillera Central de Colombia, y aspecto del mismo en el año 2001 (Parte superior derecha), y en febrero de 2007 (Parte inferior derecha), después de su reactivación. Fotografías tomadas por INGEOMINAS.



**FIGURA 2.** Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de caídas de cenizas y material suspendido en agua, analizadas en este informe. El período de recolección es de febrero de 2007 a octubre de 2009.

## ACTIVIDAD EN 2007

### Reactivación del Volcán Nevado del Huila

Sin conocerse registros de erupciones históricas, el VNH presentó signos de reactivación en el 2007, con la ocurrencia de un primer enjambre sísmico el día 18 de febrero, seguido por un aumento en la actividad sísmica de fractura y largo periodo (LP) que dio lugar a la formación, en la parte alta del edificio volcánico entre los picos Central y la Cresta, de una fisura de 2 km de largo con dirección N-S (FIGURA 1), y una emisión de cenizas el día 19 de febrero a las 8: 53 am hora local asociada a una columna eruptiva de 1.500 m de altura, la cual se dispersó hacia el W, reportándose caída de ceniza muy fina a distancias de 30 km (INGEOMINAS, 2007a; Pulgarín *et al.*, 2007, 2009 a). A su vez, se formaron lahares, canalizados por quebradas del sector occidental del volcán en la parte alta, los cuales continuaron a lo largo del río Páez por cerca de 40 km (INGEOMINAS, 2007 b y c; Pulgarín *et al.*, 2007, 2009 a, b); El volumen estimado para éste fue de menos de 2.000.000 m<sup>3</sup>, pero no se observaron cambios fundamentales en la masa glaciaria que pudieran explicar el aporte de agua necesario para la generación del lahar. (Pulgarín *et al.*, 2009 b)

### Análisis de las muestras de cenizas emitidas durante febrero 19 de 2007

Las muestras de ceniza correspondientes a las emitidas durante esta fase de reactivación del volcán fueron colectadas en los sectores de la laguna de Páez a 8.6 km y El Playón a 20 km del volcán respectivamente. Estas presentan características similares, son de color gris claro y corresponden a ceniza fina. Bajo la lupa binocular se identifican como cenizas cristalino-líticas, conformadas por fragmentos líticos, xenocristales y minerales secundarios de alteración:

Aproximadamente el 45% de la muestra corresponde a fragmentos líticos, donde los más abundantes están fuertemente alterados, algunos de ellos presentan una leve coloración rojiza por oxidación, pero la mayoría son de color blanco y apariencia terrosa, alcanzándose a observar textura porfirítica en la cual los fenocristales han sido disueltos y donde la piritita y minerales opacos son comunes. Aproximadamente 10% de los líticos en la laguna de Páez y 20% en la de El Playón, son de color gris, angulares porfiríticos con cristales de plagioclasa y opacos en una matriz afanítica.

Cerca del 55% de la muestra está conformada por cristales, siendo más abundantes los de plagioclasa,

los cuales son subhedrales a anhedrales translúcidos maclados a semitranslúcidos o se presentan alterados, de color blanco opaco, reconocibles por su hábito tabular y maclas, otros presentan una coloración rojiza o amarillenta. Fragmentos anhedrales, algo redondeados de cristales de cuarzos son comunes, constituyendo aproximadamente el 10% de la fracción: Son translúcidos con hábito bipiramidal mal desarrollado, algunos presentan inclusiones y muy poca coloración rojiza. Del 5 % al 10% de la fracción está compuesta por piroxenos con hábito prismático corto color negro o verdoso semitranslúcidos subhedrales. En menor proporción se encuentran cristales de anfíbol, anhedrales con hábito prismático, color negro, brillo seroso, algo “corroídos” y es común que se presenten alterados. Finalmente, en bajo porcentaje (1%), se encuentran cristales de biotita y magnetita.

Además de estos minerales, en la muestra colectada en El Playón, se observaron en baja proporción mica blanca translúcida, clorita en hojas color verde, fragmentos de color amarillo opaco (posiblemente azufre), y minerales arcillosos en hojas de color café translúcidos.

En la TABLA 1 se muestra los resultados de los análisis efectuados en las muestras de ceniza correspondientes al 2007, en los cuales se corrobora la presencia de los minerales observados bajo la lupa binocular los cuales indican una asociación de minerales hidrotermales, asociados a una zona de alteración al interior del edificio volcánico.

Después de este primer evento eruptivo el volcán continuó su actividad, caracterizada por sismicidad relacionada con pequeños rompimientos de roca y movimiento de fluidos en la porción superficial del volcán (<3 km de longitud), la cual algunas veces estuvo acompañada por pequeñas emisiones de ceniza, destacándose las ocurridas el 28 de febrero a las 7: 18 UT, 2 de Marzo 14:57 UT, 29 de Marzo 9:40 UT. (INGEOMINAS 2007 c).

### Actividad eruptiva del 18 de abril de 2007

La actividad ocurrida el 18 de abril a las 2:56 am, (hora local), se caracterizó por un incremento previo en la sismicidad, similar a la que precedió la actividad de febrero 19, dando lugar a una nueva fisura que atravesó los costados SW y NE del pico central, con una longitud de 2.3 km (Pulgarín *et al.*, 2009 a), generación de una pequeña emisión de cenizas que cubrió parcialmente el Pico Central, pérdida de una porción de masa del glaciario el Oso (al E) y (3) formación de un nuevo lahar (FIGURA 3) que alcanzó un volumen cercano a los

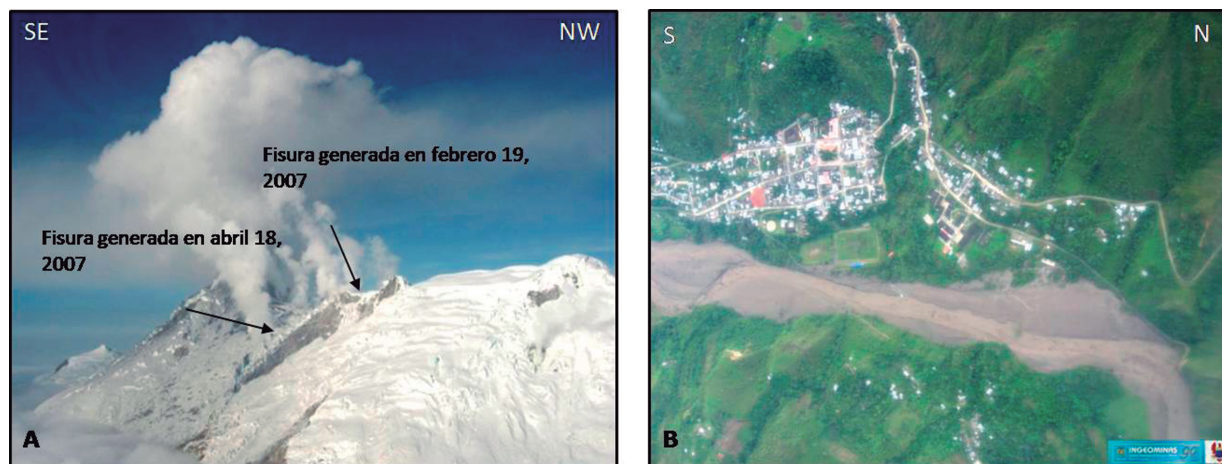
50'000.000 m<sup>3</sup> (Pulgarín *et al.*, 2007; Pulgarín *et al.*, 2009 a; Worni, 2008) encauzado por los ríos Símbola y Páez, con velocidades máximas de 80 km/h en los primeros 50 km y recorriendo más de 160 km hasta la

represa de Betania (en el río Magdalena) donde, según los datos suministrados por la Central Hidroeléctrica de Betania, un volumen de 10 Millones de m<sup>3</sup> fueron adicionados a esta represa (Pulgarín *et al.*, 2009 a).

**TABLA 1.** Análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) de cenizas muy finas (polvo), emitidas por el volcán Nevado del Huila en Febrero 19 y Mayo 27 de 2007.

MUESTRA	CUARZO	FELDSPATO (ND)	ANFIBOL (ND)	PIROXENO (ND)	CRISTOBALITA	TRIDIMITA	PIRITA	MAGNETITA	MICA	MUSCOVITA	CLORITA (ND)	ESMECTITA (ND)	MATERIAL AMORFO
NHC-19-02-07-1	++	++++	*	+	++	*		*		*	*		++
NHC-19-02-07-2	++++	++		+		+	+	+	*		+	++	++
NHC-27-05-07	++++	++		*		+	*	+	*		+	++	++

++++ Abundante (>40%) +++ Común (20-40%) ++ Pobre (10-20%) + Escaso (3-10%) \* Trazas (< 3%) ? :Dudoso ND: No determinada



**FIGURA 3. A:** Fotografía del costado E del volcán Nevado del Huila, tomada en sobrevuelo de abril 22 de 2007. Se aprecia la nueva fisura de dirección SW NE generada en la actividad de abril 18, además parte de la fractura generada en febrero 19, y la gran actividad fumarólica en ellas. **B:** Flujo de lodo generado por la erupción del 18 de abril de 2007, en el sector de Belalcázar. Foto tomada en sobrevuelo del 18 de abril de 2007 por INGEOMINAS-FAC.

El volumen del lahar en esta erupción fue muy superior al que debía haberse generado por la pérdida de masa glaciar de los glaciares involucrados, además si se tiene en cuenta que la pequeña emisión de cenizas no indujo a deshielo, ni tampoco se generaron otros productos que lo hubieran causado, el agua involucrada tuvo que ser producto de otro fenómeno adicional, como lo plantearon Pulgarín *et al.* (2007). Worni (2008) sugiere que la erupción involucró agua caliente la cual fluyó desde las

terminaciones de la fisura recién formada; erupciones de este tipo son denominadas hidromagmáticas o hidrotermales (Wohletz and Heiken, 1992, Delmelle and Bernard, 2000) y pueden ocurrir sin la participación de magma somero en sistemas geotérmicos. Una de las más famosas erupciones de este tipo fue la generada por el denominado “swarm” de Matsushiro en 1965 -1967, (una serie de sismos generados por una falla geológica al pie del Monte Minakami en Japón y a su vez un área con

numerosas fuentes termales), donde una gran cantidad de agua fue liberada, aunque no de manera súbita, a causa de los sismos (Asano *et al.*, 1973; Yoshida *et al.*, 2003). De acuerdo con las características de la actividad subsiguiente, se podría pensar que el Nevado del Huila presentó una erupción freática con descarga de agua y/o lodo generado por la interacción de gases provenientes del magma en ascenso, ya sea con agua subterránea localizada en zonas alteradas del volcán o en un sistema hidrotermal.

La emisión de ceniza solo afectó las partes altas del Pico Central por lo cual no se obtuvo muestra para su análisis. Otras pequeñas emisiones de cenizas fueron registradas en mayo 21 y 27, junio 14 y 24 y en julio 15, luego el sistema adquirió paulatinamente estabilidad en su comportamiento sísmico con una disminución tanto en el número de eventos como en la energía liberada de los mismos (INGEOMINAS, 2007 c y e ). De éstas emisiones se obtuvo muestra de la correspondiente al 27 de mayo.

#### **Emisión de ceniza de mayo 27 de 2007**

La emisión de cenizas de mayo 27 a las 7:19 AM hora local, estuvo precedida, por aumento en la actividad sísmica, pero a diferencia de las de febrero y abril, no hubo generación de lahares. Se trató de una pequeña emisión, de gas y ceniza que fue captada por personal de INGEOMINAS durante el sobrevuelo que se efectuaba a la misma hora sobre el volcán (FIGURA 4), observándose una columna que se levantó a una altura calculada en 4 km (INGEOMINAS, 2007 d y f), la cual se dispersó hacia el W, depositando material hacia ese sector en cercanías al edificio volcánico.



**FIGURA 4.** Emisión de cenizas en mayo 27, 2007. Foto INGEOMINAS, emisión ocurrida mientras se realizaba un sobrevuelo sobre el volcán. Nótese la dispersión de la columna hacia el W.

#### **Análisis de la muestra de cenizas emitidas durante mayo 27 de 2007**

Una muestra de ceniza correspondiente a esta emisión, fue recogida en la localidad de Verdún a 5.5 km del volcán. Bajo la lupa binocular la muestra es de color gris de tamaño fino y está conformada por fragmentos líticos y xenocristales. La mayor parte de la fracción (30%) está compuesta por fragmentos color blanco grisáceo de aspecto seroso, que podrían corresponder a ópalo. Aproximadamente el 15% de la fracción está compuesta por fragmentos de roca color gris, aparentemente no alterados (?); son muy comunes los fragmentos subangulares de color blanco opaco los cuales presentan incrustaciones de pirita muy fina. Estos fragmentos, corresponden aproximadamente a un 20% de la fracción. Otros líticos, presentes en menor cantidad, son subangulares, color rojizo, porfiríticos finos, y en muy poca cantidad se encuentran pequeños fragmentos de rocas foliadas (menos del 1%).

En la fracción cristalina, el cuarzo es el mineral más común, representando aproximadamente el 15% de la muestra analizada; éste se presenta como cristales translúcidos, anhedrales y en cantidad menor se encuentra cuarzo con pátina de coloración rosada o amarillenta. La plagioclasa, en menor proporción, se presenta como cristales subhedrales semitranslúcidos. La pirita es un mineral común, se encuentra suelto, en pequeños fragmentos de cristales de color amarillo metálico.

Aproximadamente el 5% de la muestra está conformada por otros fragmentos cristalinos, enumerados de acuerdo con su abundancia relativa en la muestra: Mica: cristales tabulares anhedrales de color negro, posiblemente biotita, cuando se encuentra alterada es de color dorado y de color blanco perlado. Piroxenos: cristales subhedrales de color verde oscuro, semitranslúcidos. Fragmentos cristalinos negros, subhedrales parecen corresponder a anfíboles. Pequeños cristales de magnetita de color gris azulado metálico. Pocos cristales de clorita en hojas de color verde.

En la TABLA 1 se encuentra el análisis por DRX de la misma muestra de cenizas, en la cual se puede observar que, en general, hay concordancia entre los componentes identificados bajo la lupa binocular y con este método. Diferencias principales se encuentran en la cantidad de pirita reportada por este último (trazas), el no haberse identificado clorita (muy escasa en la muestra) y la identificación de ópalo bajo la lupa, el cual puede corresponder al material amorfo identificado por DRX, y que en muestras más recientes se identificó, por éste método, como se verá más adelante.

## Interpretación de la actividad eruptiva del VNH durante 2007

A partir de los análisis bajo lupa binocular, de las muestras del material piroclásticos, en las cuales no se identificó material juvenil, así como de los resultados de difracción de rayos X, se concluye que los componentes de las cenizas emitidas durante el 2007 en las primeras fases de actividad del volcán Nevado del Huila, corresponde a una asociación hidrotermal, consistente en sílice + pirita + esmectita + clorita.

Llama la atención la gran cantidad de cuarzo encontrada en las muestras; según Gigenbak, 2000 (en Ohba and Nakagawa, 2002), éste es formado por lixiviación de la mayoría de los elementos por agua ácida en el núcleo del edificio volcánico. La asociación de minerales encontrada en las cenizas emitidas posteriormente parece confirmar esta situación, ya que según reacciones hidrotermales por hidrólisis de feldespatos y algunas arcillas formadas en estos procesos, es común que el cuarzo esté presente como residuo en muchas de ellas (Corbett and Leach, 1998).

Tanto las características de la actividad eruptiva en el 2007, así como las de las cenizas emitidas, indican que la reactivación del volcán Nevado del Huila fue esencialmente de tipo freático. Las fracturas asociadas a la actividad de febrero y abril podrían corresponder entonces a hidrofracturas generadas durante ascenso del magma, fenómeno descrito para algunas intrusiones en la corteza terrestre (Wohletz and Heinken, 1992), y las cuales, en el volcán Nevado del Huila, podría estar relacionado con la sismicidad de largo período y tremor armónico ocurrido durante esta actividad (Santacoloma *et al.*, 2009) debido a la interacción de calor proveniente de magma en ascenso, con el sistema freático o hidrotermal del volcán dando lugar, a pequeñas emisiones de ceniza y, por descompresión, del sistema, a emisiones de agua/lodo pudiendo ser este, el aporte principal para la ocurrencia de los lahares.

## ACTIVIDAD EN 2008

En el 2008, algunos pulsos de tremor, ocurridos en los primeros meses fueron asociados con pequeñas emisiones de cenizas (enero 2, 7 y 12, marzo 2 y 17), y otras en mayo 9 de ese año (no pudieron ser muestreadas, debido a su dispersión cercana al área glaciar). La actividad sísmica en el volcán sólo mostró un incremento a partir de finales del mes de marzo, el cual se hizo más notorio desde finales del mes de octubre, fecha en la cual ocurrieron pulsos de tremor continuo y espasmódico de gran duración y disparos sísmicos

que desencadenaron una sismicidad LP continua y de amplitud cuasi-constante denominada tipo “Drumbeat” (INGEOMINAS, 2008, a, b; Cardona *et al.*, 2009).

A partir de octubre 27, al mismo tiempo del incremento en la actividad sísmica, fueron reportados cambios en la turbidez y coloración de las agua del río Páez, los cuales fueron observados hasta el final de la primera semana de noviembre. Adicionalmente, el día 28 de octubre se midió, mediante el método del Móvil DOAS, el valor más alto de SO<sub>2</sub> de este período, el cual se relacionó con procesos de movimiento y tránsito de fluidos dentro de los conductos volcánicos (INGEOMINAS 2008 b). Una imagen satelital del 30 de octubre de 2008, publicada por el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) muestra la columna de SO<sub>2</sub> que se extiende desde el volcán hasta el Océano Pacífico (FIGURA 5), demostrando la gran descarga de gases hacia la atmósfera, lo que posiblemente estuvo a su vez relacionado con los cambios observados en el río Páez. Emisiones de ceniza, con dispersión hacia el W se originaron en la cima del Pico Central, el 3 y el 9 de noviembre, alcanzando, la primera de ellas, distancias hasta de 50 km (municipio de Santander de Quilichao). La actividad descrita anteriormente, fue la antecesora de la erupción ocurrida el 20 de noviembre de 2008, a la cual estuvieron asociados emisiones de ceniza, generación de un lahar (el más importante hasta ahora generado por la actividad reciente del volcán Nevado del Huila) y la extrusión de un domo en el flanco SW del Pico Central (INGEOMINAS 2008 b, Cardona *et al.*, 2009), el cual fue visible en superficie por primera vez en sobrevuelo realizado el 21 de noviembre.

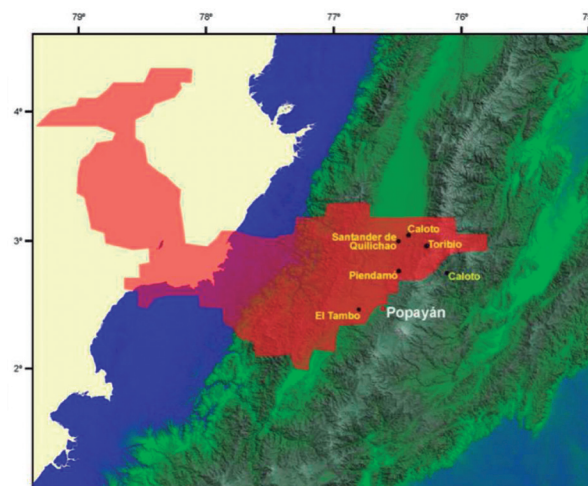


FIGURA 5. Imagen satelital del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), de la columna de gas emitida por el volcán Nevado del Huila el 28 de octubre de 2008 (la columna de gas representada en color rojo, sobre el DEM de la NASA de 30m). (Figura tomada de INGEOMINAS, 2008 b).

### **Cambios en el río páez entre finales de octubre y mediados noviembre**

Posterior a la ocurrencia sísmica de un tremor de baja frecuencia, que se registró por espacio de tres días, las aguas del río Páez presentaron cambios en la coloración y turbidez entre los días 27 de octubre y 7 de noviembre de 2008. El río, que nace en el sector norte y recorre todo el lado occidental del volcán, presentó una coloración gris plomiza, y gran turbidez (FIGURA 6 A y B), sin notarse un cambio apreciable

en su caudal. Adicionalmente, a lo largo de la ribera se depositó parte del material que era arrastrado en suspensión, el cual correspondía a lodo de color gris plomo, (FIGURA 6 C) y expedía un fuerte olor a “alumbre”. Teniendo en cuenta que la única emisión de ceniza registrada durante ese período ocurrió el 3 de noviembre y que el único drenaje afectado por la turbidez del agua fue el del río Páez, se descartó la posibilidad de que ésta se debiera al arrastre de cenizas depositadas en las partes altas del volcán.



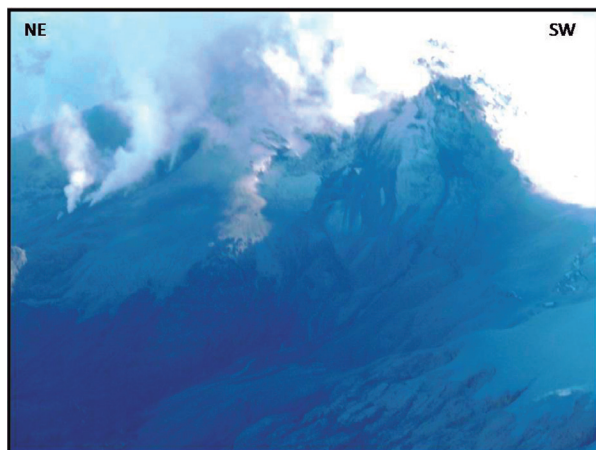
**FIGURA 6.** Aspecto del río Páez el día 4 de noviembre de 2008. **A.** Foto tomada a la altura de la desembocadura del río Moras (26.4 km al sur del pico Central) el cual no nace en el volcán. **B.** Foto tomada en el sector de la desembocadura del río Símbola (29.1 km al sur del pico Central), este río nace en el sector nororiental del volcán. Nótese la diferencia de coloración entre los ríos. **C.** Detalle de la turbidez y sedimentación en la ribera del río, sector de Llano Buco (15.5 km al sur del pico Central), el 29 de octubre de 2008. **D.** Sedimentos depositados sobre una roca sacada del lecho del río, la capa gris corresponde a los sedimentos dejados en la actividad de finales de octubre y principios de noviembre (foto tomada el 4 de noviembre de 2008).

El día 27 octubre de se tomaron muestras de agua del río Páez, a la altura del puente del río Símbola, y los días 29 de octubre y 4 de noviembre en la margen derecha del río, en el sector de Llano Buco, para análisis físico-

químicos; en este sector se observó sedimentación de material fino con un promedio de 3 mm de espesor (FIGURA 6 C y D), tomándose muestra para análisis por DRX.



Imágenes del día 7 de noviembre del sector W del volcán muestran una fina capa de ceniza cubriendo parte de este sector y huellas que se desprenden desde la parte alta sur-occidental del Pico Central, (FIGURA 7) por donde fluyó el material que causó la turbidez y cambio de coloración en el río Páez.



**FIGURA 7.** Sector W del volcán Nevado del Huila (parte SW del Pico Central); foto tomada en el sobrevuelo de noviembre 7 de 2008. Nótese parte de los glaciares cubiertos por ceniza y la huella de los sitios por donde fluyó el material que cambió el aspecto del río Páez en 2008.

### **Actividad eruptiva de noviembre 2008. emisión de cenizas, generación de lahar y extrusión de domo**

La agencia internacional NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), reportó 14 emisiones de ceniza entre el 3 y 20 de noviembre (INGEOMINAS, 2008 d). De éstas, se resaltan las ocurridas el 3, reportada por habitantes de la zona, el 7 y el 9, captadas en sobrevuelos, las del 13 a las 05:45 a m y el 14 a las 06:15 a m hora local, detectadas mediante imágenes satelitales, y la del 20 de noviembre que acompañó la extrusión de un domo. En general se trató de pequeñas emisiones de cenizas, de las cuales una porción fue depositada en la parte alta y hacia el sector W del edificio y otra fue transportada de acuerdo con el régimen de vientos. De éstas emisiones se colectaron muestras correspondientes a las del 3, el 9 y el 20 de noviembre.

En noviembre 20 de 2008, a las 9:45 pm hora local, se registró la erupción más importante de la actividad actual del volcán, la cual, además de la generación de emisiones de cenizas y un lahar sobre el río Páez, dio lugar a la extrusión de un cuerpo dómico en la parte media alta (zona glaciar) del flanco SW del Pico Central. Posterior a este evento se registraron al menos dos emisiones de ceniza menores en el 2008 (INGEOMINAS, 2008 c).

La erupción fue percibida de manera similar por los habitantes de la zona de influencia del volcán: ruidos como truenos, relámpagos, incandescencia en el volcán, fuerte olor a azufre, y el rápido paso de una “avalancha” (el lahar) por el valle del río Páez.

El lahar generado en la erupción, se encauzó por el río Páez, alcanzando velocidades mayores que las ocurridas anteriormente, con un promedio entre 71 y 100 km/h en la parte alta del río Páez (Pulgarín *et al.*, 2009 b), el volumen estimado del lahar es de alrededor de 340 a 400 millones de metros cúbicos, mayor a los generados en los eventos eruptivos del 2007 (Pulgarín *et al.*, 2009 a, b, Worni, 2008). El lahar alcanzó la represa de Betania, en el río Magdalena, donde se presentaba muy diluido (INGEOMINAS – NASA KIWE, 2009). Uno de los mayores efectos del lahar fue en la población de Belalcázar, a 48 km del Pico Central, a través del recorrido del río Páez (FIGURA 8), donde éste alcanzó alturas entre 19 y 23 m sobre el nivel del río y además se produjo importante sedimentación del material, lo que causó la elevación del cauce del río entre 7 y 11 m (Pulgarín *et al.*, 2009 b; Worni, 2008; INGEOMINAS – NASA KIWE, 2009).



**FIGURA 8.** Huella dejada por el lahar generado en la erupción del 20 de noviembre aguas abajo de la población de Belalcázar a 48 km del Pico Central, por el recorrido del río Páez. Foto INGEOMINAS.

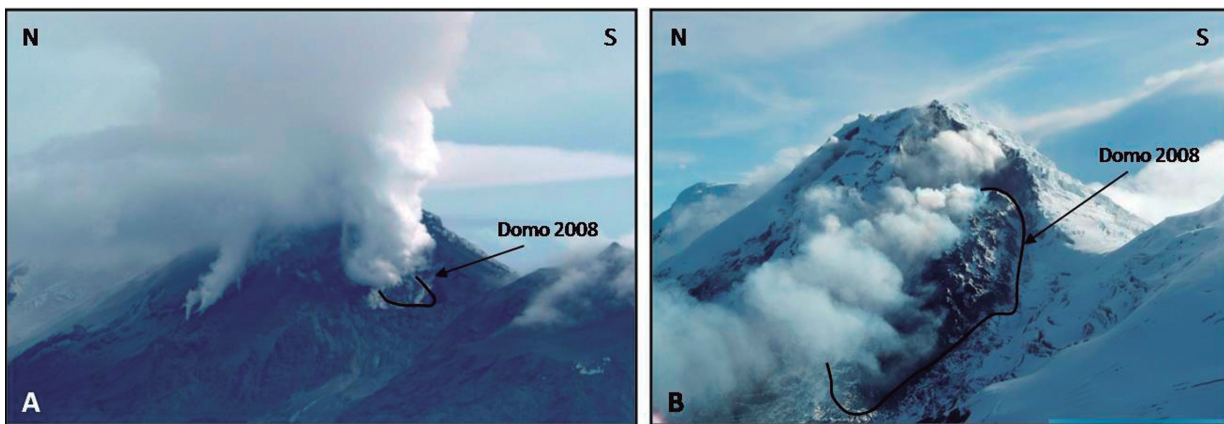
Al igual que para los lahares generados en el 2007, la cantidad de agua necesaria para su generación, así como el reporte de exceso de agua de 77 millones de m<sup>3</sup>, en la represa de Betania, no fue consecuencia del deshielo del casquete glaciar, ya que no se presentaron flujos piroclásticos que pudieran inducir al deshielo, o desestabilización en el glaciar que pudiera aportar material para la generación del lahar. Posiblemente el principal aporte del agua proviene del sistema volcánico, y la generación del flujo de lodo en la

erupción tendría que ver con un sistema freático o de reservorios someros donde, teniendo en cuenta a Wohletz and Heinke (1992), si la relación de masa, agua: magma es alta y la mayoría del vapor existente a alta presión se condensa a líquido cuando la presión decrece a niveles atmosféricos, el material emitido es muy húmedo (lodo), dando lugar a la formación de lahares a partir de este material.

Caídas de ceniza, como consecuencia de la erupción de las 9:45 pm, se reportaron en varias poblaciones al S - SW del área de influencia del volcán. Las imágenes de la agencia americana Volcanic Ash Advisory Center

(Centro para la Asesoría de Cenizas Volcánicas, VAAC por sus siglas en inglés), muestran dos direcciones principales de dispersión para las cenizas: hacia el W con un altura de 5.6 km sobre la cima del volcán y hacia el SE con 8.3 km de altura.

En sobrevuelo realizado el 21 de noviembre, se observó el domo emplazado en el flanco SW del Pico Central (FIGURA 9 a), y una importante acumulación de ceniza hacia el SSE del volcán. El domo continuó su crecimiento hasta mayo del 2009, alcanzando volúmenes cercanos a 35'000.000 m<sup>3</sup> (FIGURA 9 b).



**FIGURA 9.** A. Aspecto del volcán Nevado del Huila en el sobrevuelo de Noviembre 21 2008, en la mañana siguiente a la erupción. Nótese el domo y las fumarolas en superficie y la ceniza depositada en los sectores W y SW del volcán, cubriendo el área glaciar. B. Aspecto del domo en agosto 16 del 2009. Fotos INGEOMINAS.

## **Resultados de los análisis de las muestras de la actividad de vnh en el 2008**

### **Análisis de las cenizas emitidas en noviembre de 2008**

Muestras de ceniza de la emisión del 3 de noviembre fueron tomadas a 15 km del volcán en la localidad de la Mesa de Caloto. La ceniza es muy fina, de color gris claro, y bajo la lupa binocular es blanquecina. La mayor parte de la fracción de la ceniza (70%) está compuesta por minerales de alteración o pequeños fragmentos de rocas alteradas, de color blanco terroso posiblemente correspondiente a cristales de plagioclasa alteradas y sulfatos (?). Igualmente se presenta pirita en cristales diminutos, fragmentos de roca de color gris de apariencia vítrea, cuarzo translúcido, moscovita y anfíbol.

La muestra correspondiente a la emisión del 20 de noviembre, fue colectada en la Mesa de Caloto. Es ceniza fina a muy fina de color gris. Bajo la lupa binocular, está compuesta en mayor parte por fragmentos alterados hidrotermalmente, donde el 65% de ellos son de color

blanco mate de aspecto terroso y forma irregular, posiblemente correspondientes a agregados de arcillas, y/o sílice amorfa, algunos de éstos presentan pirita incorporada. Aproximadamente el 3% de la muestra analizada corresponde a fragmentos líticos color gris mate y el 2% está compuesta por fragmentos líticos aparentemente frescos.

La muestra, en un 3%, corresponde a cristales generalmente anhedrales a subhedrales, algunos de ellos rojizos o amarillos por alteración, los más comunes son cuarzos, seguidos por anfíboles y biotitas de color pardo rojizo. 2% corresponde a cristales aparentemente frescos de anfíbol color negro brillante, subhedral, mica café verdosa y cuarzo hialino. También se presenta pirita finamente diseminada de color dorado. Es importante anotar que no se observó presencia de cristales de plagioclasa, lo que hace suponer que todo el material es secundario y éstas estarían alteradas posiblemente incluidas dentro de los fragmentos blancos terrosos.

La TABLA 2 es el resultado del análisis por DRX de las cenizas emitidas durante las emisiones del 3, 9 y 20 de noviembre de 2008. La muestra, NHC 03 11-08-2

(colectada en un techo de la Mesa de Caloto) fue sujeta a análisis cuantitativo, para tener una mejor idea de la proporción entre los minerales (TABLA 3).

**TABLA 2.** Análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) de cenizas muy finas, emitidas por el volcán Nevado del Huila, los días 3, 9 y 20 de Noviembre de 2008.

MUESTRA	CUARZO	FELDSPATO (ND)	ANFÍBOL (ND)	PIROXENO (ND)	CRISTOBALITA	TRIDIMITA	ALUNITA	Na-ALUNITA	MINAMIITA	YESO	ANHIDRITA	PIRITA	TITANITA	CAOLINITA	MICA	MUSCOVITA	CLORITA (ND)	MATERIAL AMORFO
NHC-03-11-08-2	+	++	*		++++	+	*	*	+	*	*	++			*		*	++
NHC-03-11-08-3	++	++	*		++++	+	*	+	+		++++	++			*		*	++
NHC-03-11-08-4	++	+	*		+++	+		+	+	+	+	++			*		*	++
NHC-09-11-08	++	+++		+	++	+	++					+		+	*			+++
NHC-20-11-08	++	+++	+		++									+		+		++

++++ Abundante (>40%) +++ Común (20-40%) ++ Pobre (10-20%) + Escaso (3-10%) \* Trazas (< 3%) ? : Dudoso ND: No determinada

**TABLA 3.** Análisis cuantitativo de una muestra de ceniza analizada por Difracción de Rayos-X (DRX) emitidas por el volcán Nevado del Huila el 3 de noviembre de 2008, (Laboratorio INGEOMINAS – Cali).

**[Mesa Caloto techo.raw] Mesa Caloto techo, OVP Popayan**

SCAN: 2,0/70,0/0,02,0.24(sec), Cu, I(p)=546,0, 12/18/09 04:01p

Client Information:

Name: Name: jmojica  
 Voice: **NHC-03-11-08-2** Voice:  
 E-Mail: E-Mail:  
 Sample ID: Mesa Caloto techo OVP Popayan Sample ID: Mesa Caloto techo.raw

#	Phase ID	PDF#	Wt%
1	Albite - Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	98-000-0041	28,4%
2	Quartz - SiO <sub>2</sub>	98-000-0369	24,6%
3	Cristobalite - SiO <sub>2</sub>	98-000-0178	7,9%
4	Alunite - KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	98-000-0064	7,5%
5	Pyrite - FeS <sub>2</sub>	98-000-0363	6,3%
6	Gypsum - CaSO <sub>4</sub> -2H <sub>2</sub> O	98-000-0234	11,1%
7	Anhydrite - CaSO <sub>4</sub>	98-000-0090	2,7%
8	Actinolite - Ca <sub>2</sub> (Mg, Fe <sup>2+</sup> ) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	98-000-0008	11,5%

De los resultados de los análisis de las cenizas se observa que, con respecto a la actividad de febrero y mayo de 2007, hay una disminución en el contenido de cuarzo y un aumento considerable en la sílice especialmente, en cristobalita; a su vez, aparecen otros minerales

hidrotermales (sulfatos) como son los del grupo de la alunita, la anhidrita y el yeso. Según diferentes autores, (Rye, 2005; Zimbelmana, *et al.*, 2005; Luhr, 2008), éstos indican una zona de alteración argílica avanzada, formada a partir de la interacción de gases magmáticos

y fluidos ácidos con las rocas encajantes. Se interpreta, entonces la actividad anterior al 20 de noviembre del Nevado del Huila, como producto de la interacción de los gases magmáticos y aguas freáticas o de acuíferos someros, alojados en estas zonas alteradas.

Asociaciones similares han sido reportadas en actividad freática de volcanes del Japón como Akita Yakeyama (Ohba *et al.*, 2007), Hakkoda, Iwate, Kuju y Usu, (Ohba and Nakagawa, 2002; Ohba and Kitade, 2005), Papandayan en Indonesia (Mazot *et al.*, 2008). Asociaciones hidrotermales de este tipo también son reportadas en extensas zonas de alteración en la parte somital de varios volcanes andesíticos, en algunos de los cuales se ha llevado a cabo estudios sobre amenazas potenciales de deslizamientos facilitados por este tipo de alteración (Zimbelmana *et al.*, 2005).

A nivel de lupa binocular no hay evidencias de presencia de material juvenil, y aunque minerales como el cuarzo, feldespato, titanita y anfíbol pueden ser tanto de origen magmático como hidrotermal, se piensa, por las cantidades en que se encuentran y por la asociación en la que se presentan, que éstos podrían ser de origen secundario, o ser preexistentes.

### Análisis de muestras de sedimentos y precipitados de agua del río Páez

Los resultados de los análisis por DRX del precipitado de la muestra de agua del río Páez, colectada el 27 de Octubre de 2008, los de sedimentos de las muestras colectadas en octubre 28, 29 y noviembre 4 en las riberas del río y del lahar ocurrido el 20 de noviembre de 2008 (TABLA 4), muestran que, tanto el material en suspensión en las aguas y del sedimento depositado en el lecho y orillas del río tienen los mismos componentes, y que la asociación hidrotermal: Cuarzo, sílice, alunita, pirita, es similar a la de las muestras de las cenizas emitidas en noviembre. Llama la atención, la presencia de anhídrita en las cenizas y la ausencia de ésta en los sedimentos y precipitados de octubre, trazas de esta comienza a observarse sólo en los sedimentos del 4 de noviembre, lo que podría estar indicando un mayor aporte de la fuente magmática probablemente por sobresaturación o desequilibrio en SO<sub>2</sub>, (Luhr, 2008). A diferencia de los otros materiales analizados, las muestras de lodo del 20 de noviembre no presentan alunita, pero presentan yeso que es el equivalente hidratado de la anhídrita.

**TABLA 4.** Análisis mineralógico por Difracción de Rayos-X (DRX) de muestras de precipitados y sedimentos del río Páez de Octubre y noviembre de 2008.

MUESTRA	CUARZO	FELDESPATO (ND)	ANFÍBOL (ND)	CRISTOBALITA	TRIDIMITA	ALUNITA	Na-ALUNITA	MINAMIITA	YESO	ANHIDRITA	PIRITA	ESFALERITA	MAGNETITA	HEMATITA	CAOLINITA	MICA	MUSCOVITA	CLORITA (ND)	ESMECTITA (ND)	MATERIAL AMORFO
NHP-28-10-08-1	++++	*		+	*	+++		++			+	*?			+		*	*		+
NHS-28-10-08-2	++++	++	*	+	*	+					++						*			+
NHS-29-10-08	++++	++	*	+	*	+					++						*			+
NHS-04-11-08-3	++++	++		+	*	+	+			*	+					*		*		+
NHL-20-11-08-1	++	++++	*	+++					+	+		*?	*?	++			+	*	*	++
NHL-20-11-08-2	++	++++	*	++					+	+		*?	*?	++			+	+	*	++

++++ Abundante (>40%) +++ Común (20-40%) ++ Pobre (10-20%) + Escaso (3-10%) \* Trazas (< 3%) ? : Dudosos ND: No determinada

La TABLA 5 es el análisis cuantitativo de una de las muestras de sedimentos (NHS-28-10-08-2), para tener una mejor idea de la proporción de los componentes; en ella se aprecia la diferencia de los componentes con respecto a los de la ceniza emitida el 3 de noviembre,

donde además de los minerales en común, en la muestra de ceniza se reporta albita y actinolita (TABLA 3), minerales también de origen hidrotermal que indican una mayor temperatura y ambiente más neutro de formación (Corbett and Leach, 1998).

**TABLA 5.** Análisis cuantitativo de una muestra de sedimento analizadas por Difracción de Rayos-X (DRX), asociado a la actividad del volcán Nevado del Huila en octubre de 2008.

SCAN: 2,0/70,0/0,02,0.24(sec), Cu, I(p)=1913, 12/18/09 03:59p

Client Information:			
Name:		Name:	jmojica
Voice:	Fax:	Voice:	
E-Mail:		E-Mail:	
Sample ID:	NHS-28-10-08-2	Sample ID:	NHS-28-10-08-2
#	Phase ID	PDF#	Wt%
1	Quartz - SiO <sub>2</sub>	98-000-0369	57,8%
2	Alunite - KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	98-000-0064	5,0%
3	Anorthite - Ca(Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	98-000-0093	29,6%
4	Cristobalite - SiO <sub>2</sub>	98-000-0178	1,0%
5	Pyrite - FeS <sub>2</sub>	98-000-0363	6,6%

### Análisis de agua

La TABLA 6 presenta los resultados de los análisis llevados a cabo en muestras de agua tomadas en octubre y noviembre de 2008, en el río Páez. En estos resultados se destaca el pH ácido de las aguas así como la alta concentración en cloruros y sulfatos, que son indicadores de aporte magmático a un sistema hídrico superficial y que son los que reaccionan con

los minerales principales de las rocas (feldespatos, anfíboles, piroxenos) y con el vidrio volcánico, para comenzar su proceso de transformación o alteración. Estos resultados son coherentes con la paragénesis del material hidrotermal en los sedimentos, en el sentido que hay un ambiente muy ácido con abundancia de cuarzo y de alunite (de acuerdo con los análisis de DRX de los sólidos en suspensión) lo que indicaría un nivel superficial de ocurrencia de ambiente ácido.

**TABLA 6.** Análisis físico químico de muestras de agua tomadas en el río Páez, al presentarse cambios en coloración y turbidez, entre finales de octubre y principios de noviembre de 2008. (Análisis realizados en INGEOMINAS - Manizales).

MUESTRA	FECHA	pH	Conductividad a 25°C	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
RÍO PAÉZ PUENTE BELALCÁZAR	28/10/2008	3.60	886 S/cm	480.6	248.9	0	0
RÍO PAÉZ PUENTE NARANJAL	29/10/2008	4.09	1540 S/cm	686.5	284.2	0	0
RÍO PAÉZ PLAN CALOTO	29/10/2008	2.78	1812 S/cm	178.5	303.5	0	0
RÍO PAÉZ GUADUALES	29/10/2008	3.88	867 S/cm	13.7	234.6	0	0
RÍO PAÉZ C FUERTE	05/11/2008	2.31	3890 S/cm	2286.2	459.8	0	0
RÍO PAÉZ C TRANQUILO	05/11/2008	3.09	1817 S/cm	370.7	458.9	0	0

Con el fin de calcular la cantidad de material (sedimento) en suspensión que estaba bajando se colectaron dos muestras el 4 de noviembre, una en aguas tranquilas sobre la ribera, más cerca a la orilla derecha, y otra en la corriente fuerte, en el sector de Llano Bucu. El

cálculo arrojó un promedio de sedimento arcilloso de 3.6 gr/l en la corriente fuerte y de 3.5 gr/l en la corriente tranquila. Estas cifras traducidas a metros cúbicos serían de 3.6 kg/m<sup>3</sup> y 3.5 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

## Interpretación de la actividad eruptiva del VNH durante 2008

De la integración de los análisis, se concluye que la actividad de finales de octubre y principios de noviembre de 2008 fue una interacción continua de gases y fluidos ácidos del magma en ascenso, con aguas subsuperficiales, que podrían corresponder a nivel freático, acuíferos someros localizados en una zona de alteración argílica avanzada o drenajes subsuperficiales (ej. en el contacto roca hielo) dando lugar a pequeñas emisiones de cenizas y un arrastre y aporte continuo, a las aguas de las quebradas que nacen en la parte alta W del Pico Central, de material de alteración que acidificaron y enturbiaron las aguas del río Páez.

La composición del material emitido y la de las aguas del río Páez, indican la interacción de gases magmáticos con agua subsuperficiales, lo cual lleva a interpretar el fenómeno ocurrido como actividad generada a partir de un aporte lento pero continuo de líquido, con arrastre de material alterado que se explicaría por una relación de agua mayor a los gases aportados por el sistema magmático, haciendo que la fase vapor/gas se condense a líquido al decrecer la presión a niveles superficiales dando lugar así a la emisión de material lodoso (Wohletz and Heiken, 1992) en lugar de material de una manera explosiva. Esta situación podría también explicar los excesos de agua presentados tanto en los lahares de 2007 como en el ocurrido el 20 de noviembre de 2008.

Los cambios observados en el río Páez, coinciden con el incremento en la actividad sísmica del volcán, la cual, en el mes de octubre, fue evidente en la actividad relacionada con migración y tránsito de fluidos, siendo más predominante en los primeros días del mes de noviembre, con la ocurrencia de disparos sísmicos y tremor continuo. La sismicidad tipo “*drumbeat*” entre el 9 y el 20 de noviembre de 2008 fue la antecesora del evento eruptivo de este último día y estuvo asociada a la extrusión del domo en el flanco SW del Pico Central (INGEOMINAS, 2008 c).

A pesar de que la emisión de ceniza del 20 de noviembre precedió la extrusión del domo a superficie, la muestra analizada, no presenta evidencias de material juvenil, los componentes corresponden a una asociación hidrotermal similar a la obtenida en las muestras de ceniza provenientes de las emisiones ocurridas en las erupciones de febrero y abril del 2007, aunque en éstas se presenta esmectita y en la del 20 de noviembre de 2008 caolinita como mineral arcilloso.

## ACTIVIDAD EN 2009

Durante la mayor parte de 2009 los niveles de sismicidad se mantuvieron en niveles bajos. Aunque algunas emisiones de ceniza ocurrieron a partir de agosto, la sismicidad se incrementó notablemente a partir de octubre y asociadas a ésta se presentaron también incremento en las cantidades de SO<sub>2</sub> aportadas a la atmósfera y emisiones continuas de ceniza (INGEOMINAS 2009 a), las cuales se dispersaron en todas direcciones alrededor del volcán, afectando poblaciones como: Planadas (Tolima, a 35 km al NE), Belalcázar (Cauca, a 31 km al S), La Plata (Huila a 55 km al SE), Tacueyó (Cauca, a 20 km al W), Toribío (Cauca, a 27 km al W), Popayán (Cauca, a 80 km al SW), y Cali (Valle, a 65 km al W), entre otros (FIGURA 10). El 23 de octubre se notó la aparición en superficie de nuevo material magmático emitido como domo exógeno, coalescente al anterior, generado en 2008 (FIGURA 11).

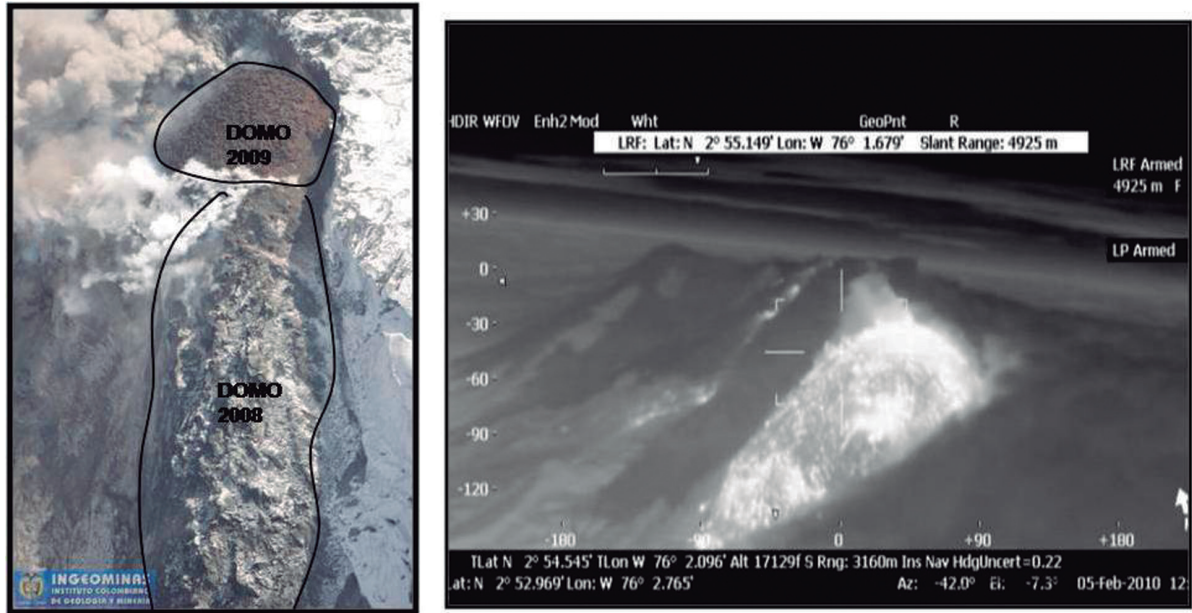


**FIGURA 10. A.** Aspecto del volcán Nevado del Huila en octubre de 2009, cubierto totalmente por una importante capa de ceniza producto de las continuas emisiones de este material, durante este mes.

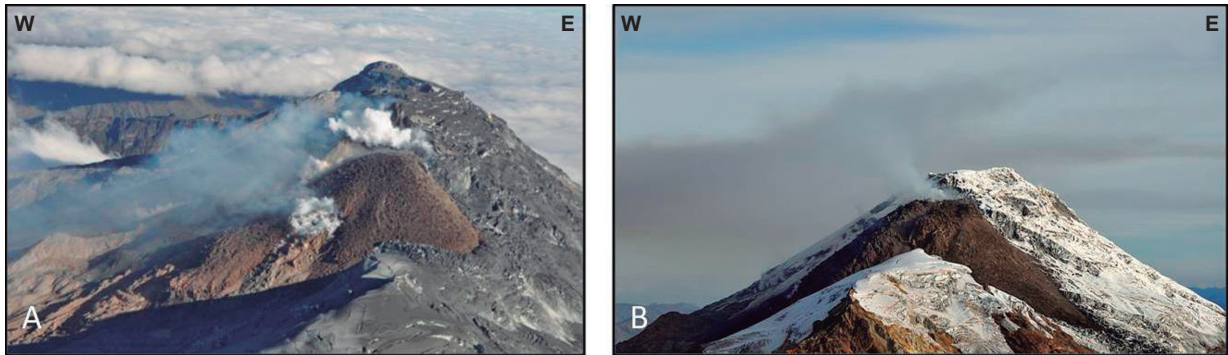
Asociados al crecimiento de el nuevo domo se observaron pequeñas caídas de rocas que, en las noches, por la incandescencia del material, asemejan flujos piroclásticos, sin embargo, hasta el momento no se han presentado eventos importantes de éste tipo. El domo tuvo un rápido crecimiento como se aprecia en las imágenes de comparación de la FIGURA 12, el cual ceso hacia el mes de julio de 2010.

## Análisis de muestras de cenizas asociadas a la actividad de octubre de 2009

Muestras de cenizas de octubre 16, 19 y 24 de octubre de 2009 fueron analizadas bajo lupa binocular; adicionalmente muestras de agosto 3 y octubre 9 también fueron analizadas por DRX (TABLA 7).



**FIGURA 11.** A. Vista del domo de 2008 y nuevo material extruido en su parte superior. Toma en sobrevuelo octubre 30 de 2009. Nótese la desgasificación del domo hacia los bordes del mismo y el foco de emisión de cenizas entre éste y la pared del Pico Central. B. Imagen del domo el 5 de febrero de 2010 tomada con cámara FLIR (Apoyo de la Fuerza Aérea), donde se observa la anomalía térmica asociada a la extrusión del nuevo material.



**FIGURA 12.** Desarrollo del domo emitido en la actividad de 2009 en el volcán Nevado del Huila. Nótese la poca desgasificación en el cuerpo del domo, la cual siempre ocurre en su periferia. A. Diciembre 15 de 2009. B. Enero 25 de 2011.

Bajo la lupa binocular las muestras tomadas durante la actividad de octubre 2009 corresponden a ceniza media a polvo volcánico, de color gris claro a habano dependiendo del sitio de la recolección y el tamaño de partículas predominantes.

En general, la fracción ceniza muy fina a polvo volcánico corresponde, en su mayoría, a fragmentos translúcidos posiblemente correspondientes a plagioclasa y cuarzo, fragmentos blancos mate posiblemente correspondiente a ópalo y fragmentos oscuros, entre los cuales es identificable pirita y esporádicamente magnetita.

Las fracciones más gruesas (ceniza media a fina), presentan en aproximadamente el 40 al 50 %,

fragmentos líticos subangulares a angulares, la mayoría de ellos correspondientes a roca ígnea color gris, afanítica, semitranslúcida, generalmente con pirita muy fina, diseminada; fragmentos líticos de color gris claro, afaníticos, a veces se ven semitranslúcidos (vidrio?). Fragmentos alterados color gris blanquecino, aparentemente silicificados, donde también es común la pirita diseminada y fragmentos de colores blanco a gris, cerosos, posiblemente correspondientes a ópalo.

En algunas muestras se observaron, en poca cantidad, fragmentos de roca metamórfica subangulares, correspondientes a esquistos (micáceos, verdes y negros) y otros fragmentos alterados de color amarillento a rojizo.

**TABLA 7.** Análisis mineralógico por difracción de rayos X, de polvo de muestras de ceniza emitidas por el volcán Nevado del Huila en el 2009. (Laboratorio de INGEOMINAS – Cali).

MUESTRA	CUARZO	FELDSPATO (ND)	ANFÍBOL (ND)	PIROXENO (ND)	CRISTOBALITA	TRIDIMITA	ÓPALO CT	SÍLICE AMORFA	ALUNITA	YESO	ANHIDRITA	PIRITA	MAGNETITA	HEMATITA	CAOLINITA	BIOTITA	MICA	ILLITA (ND)	CLORITA (ND)	ESMECTITA (ND)	MATERIAL AMORFO
NHC-03-08-09-1	+	++++	+	*	++				*	+	++	+					+		*		++
NHC-03-08-09-4	+	++++	+	*	+				* ??	*	+	+					+				++
NHC-16-10-09	+++	++	+	+	++	*	+	+	+	+	++	+	*					*		*	
NHC-17-10-09	+++	++	+	*			+			++	+++	+	*	+				+			
NHC-19-10-09-1	++++	++	+	*	+						++++	+		+				++	*		
NHC-19-10-09-2	+++	++	+	*	+					+	++	+	*					+	+		
NHC-21-10-09-2	++	+++	+	+	+++	*	++	++		+	+++	++	*		+	*		*	*		
NHC-24-10-09	++	++++	*	*	+++	*	+	++	++			+						*			

++++ Abundante (>40%) +++ Común (20-40%) ++ Pobre (10-20%) + Escaso (3-10%) \* Trazas (< 3%) ? :Dudoso ND: No determinada

La fracción cristalina está compuesta por 10-15% plagioclasa subhedral semitranslúcida. Algunos cristales presentan tintes rojizos o anaranjados en la superficie. Aproximadamente el 3% son anfíboles subhedrales a euhedrales de color negro a café verdoso. 1-2% es de piroxenos en cristales cortos subhedrales color verde semitranslúcidos. Alrededor del 2% es cuarzo subhedral a anhedral translúcido a semitranslúcido con fractura concoide. El 2% es biotita euhedral a subhedral, hexagonal, negra brillante y en xenocristales alterados de color dorado. También se encuentra un 5% de pequeños cristales de piritita, color dorado y lustre metálico. En menor cantidad (1%) se presenta magnetita, en cristales rómbicos, color gris plomo y lustre metálico y además, se encuentran en baja proporción xenocristales micáceos, de color blanco a semitranslúcido. En algunas muestras se observan muy escasos cristales anhedrales de color amarillo terroso correspondientes a azufre. Algunos cristales semitranslúcidos, con formas de plaquetas, podrían corresponder a sulfatos.

Los resultados de los análisis por DRX, muestran una coincidencia general con los minerales identificados bajo la lupa binocular, pero en ellos además, se identifican en una cantidad considerable sulfatos, notablemente anhídrita y yeso los cuales se encontraban en menor cantidad en las épocas anteriores de actividad del volcán; igualmente que se nota la disminución y desaparición de minerales del grupo de la alunita, especialmente

en la actividad inmediatamente anterior a la extrusión del nuevo domo, lo que podría estar indicando que no hubo interacción eficiente de los gases magmáticos con acuíferos superficiales. El mineral arcilloso illita aparece por primera vez y al detallar mejor los análisis fue posible la identificación del ópalo, el cual se había detectado bajo lupa binocular en las muestras de los años anteriores y en los análisis por DRX posiblemente se incluía dentro del resultado de material amorfo.

### Interpretación de la actividad eruptiva del vnh durante 2009

A diferencia de la actividad en 2008, la extrusión del nuevo domo estuvo precedida y/o acompañada por gran cantidad de emisiones de pulsos de ceniza cuyo foco principal se localizó entre el nuevo domo y el Pico Central, sin presentarse cambios previos en el río ni generación de lahares lo que puede indicar, o un sistema hídrico empobrecido, sin capacidad de aportar agua suficiente para la generación de este tipo de material, o reflejar fragmentación a niveles más profundos, donde no hubo interacción directa de agua con los gases en ascenso (Wohletz and Heiken, 1992).

Del análisis de las cenizas correspondientes a éste periodo de actividad y que precedió la extrusión del nuevo domo, se concluye que continuó prevaleciendo la asociación hidrotermal en el material emitido,



en este caso correspondiente a: sílice + alunita + anhidrita + yeso + pirita + illita, que corresponde a una asociación hidrotermal argílica avanzada a filica de baja intensidad (marcada por la presencia de illita), que además estaría indicando una mayor profundidad del nivel de fragmentación.

Algunos minerales podrían ser primarios, como son cuarzo, plagioclasa, anfíboles piroxenos y magnetita; en el caso del cuarzo éste podría diferenciarse mediante análisis petrográficos, los cuales no son disponibles debido al tamaño de las muestras. Sin embargo, éstos minerales también puede presentarse como producto de alteración hidrotermal; teniendo en cuenta que no se identifica bajo lupa binocular, vidrio volcánico como material juvenil y la cantidad en que se presentan algunos de estos minerales (especialmente el cuarzo), es factible pensar que estos correspondan a minerales hidrotermales, aunque, se debe tener en cuenta que, en las últimas emisiones de cenizas se observaron fragmentos líticos semitranslúcidos, y por lo tanto no se descarta la posibilidad de que este pueda corresponder a material juvenil del domo en ascenso. De todas maneras, las emisiones de ceniza no provienen directamente de la actividad en el domo, y al igual que para las anteriores, el foco de emisión principal se localiza entre éste y la pared del Pico Central.

## **DISCUSIÓN – CONCLUSIONES**

Las cenizas emitidas por el volcán Nevado del Huila desde su reactivación, se caracterizan por presentar poca dispersión, ser de tamaño fino, no presentar material juvenil (como vidrio volcánico) y presentar minerales de origen hidrotermal (cuarzo, sílice amorfa, cristobalita, tridimita, alunita, anhidrita, yeso, pirita, esmectita, caolinita, illita y clorita), provenientes de zonas de alteración, cuya asociación presenta una variación según a cual de las tres fases eruptivas, ocurridas hasta la fecha, han estado relacionadas.

De acuerdo con Ohba and Nakagawa (2002), el origen de estos minerales hidrotermales estaría relacionados con agua externa (alteración hidrotermal, reacciones agua/magma, o precipitación de fluidos volcánicos), los cuales habrían sido incorporados al material emitido por: - Extracción mecánica de rocas alteradas hidrotermalmente, ya sea por magma ascendente, vapor o agua. - Interacción agua/magma. - Incorporación mecánica desde acuíferos o aguas superficiales dentro de una pluma eruptiva o - Precipitación directa desde fluidos volcánicos.

Corbett and Leach (1998), separan grupos de minerales que caracterizarían zonas de alteración específicas; según esto, los grupos minerales reconocidos en el material emitido por el volcán Nevado del Huila, durante la actividad de estos últimos años, son los siguientes:

Grupo de la Sílice que sería, según Stoffregen (1987, en Corbett and Leach, 1998), los únicos minerales estables en forma significativa en fluidos de pH bajo (<2), donde el ópalo, cristobalita y tridimita ocurren en ambientes superficiales de un sistema hidrotermal, a temperaturas < de 100° C, mientras que el cuarzo sería el mineral principal a mayores temperaturas, y a pH más altos se formaría sílice amorfa.

El grupo de la alunita, se formaría en un amplio rango de temperatura a partir de un fluido con pH ligeramente superior a 2 y el ambiente y las condiciones de formación puede inferirse con base en datos isotópicos (Rye, 2005), por la forma cristalina, marco geológico y paragénesis mineralógica. Los ambientes de formación incluyen: - oxidación de fluidos con gas H<sub>2</sub>S, derivados de un sistema hidrotermal en ebullición; - Meteorización de sulfuros; - Derivados de fluidos magmáticos (Africano and Bernard, 2000; Rye, 2005) y - Precipitación directa de fluidos ricos en volátiles y depositados en brechas y vetas.

Sulfatos como la anhidrita se forma a pH más alto y temperaturas entre 100 - 150°C y el yeso en ambientes más fríos. La formación de anhidrita también ocurre cuando aguas subterráneas y sistemas magmáticos ricos en sulfuros, entran en contacto, esto incluye fumarolas en volcanes activos y sistemas más profundos de interacción agua – roca, entre otros (Luhr, 2008).

El grupo del caolín, se derivan de fluidos con pH moderadamente bajo (aproximadamente 4) y se forman a profundidades someras en condiciones de baja temperatura.

El grupo de la Illita, dominan en pH 4-6; a baja temperatura se presenta esmectita (< 100° - 150°C), mientras que la illita se presenta a temperaturas de 200° - 250° C y la muscovita se presenta a temperatura mayores.

El grupo de la clorita, se formarían en condiciones levemente ácidas a neutras.

Las asociaciones encontradas en los productos emitidos por el volcán Nevado del Huila en los últimos años, estarían indicando una profundización progresiva del nivel de generación del material, en zonas de alteración

que se forman a mayor temperatura alrededor del conducto volcánico, correspondientes a zonas de alteración argílica avanzada a filica (Corbett and Leach, 1998, Mas *et al.*, 2006).

Las cenizas asociadas a la reactivación del volcán en 2007, presentan una asociación mineralógica compuesta por sílice, en sus diferentes formas, la cual es predominante, esmectita y otros minerales como piritita y clorita que se encuentran en menor cantidad e igualmente están presentes en todas las muestras de cenizas colectadas. La gran cantidad de cuarzo presente en las muestra, es explicada por Gigenbak (2000, en Ohba and Nakagawa, 2002), como formado por lixiviación de la mayoría de los elementos por agua ácida en el núcleo del edificio volcánico. Aunque no se tienen datos más detallados sobre la esmectita, se descarta que esta sea originada por meteorización, ya que las muestras fueron recogidas inmediatamente después de las emisiones.

En la actividad de 2008, que precedió la extrusión de un domo, la asociación mineralógica tanto de las cenizas como del precipitado del río y de la muestra del lahar, está caracterizada por la aparición de sulfatos, siendo la asociación: Cuarzo, sílice, alunita, anhidrita, yeso, piritita, caolinita y clorita. Esta asociación es considerada como producto de alteración hidrotermal, a la cual estaría sobrepuesta una alteración debida a la acción de gases magmáticos ácidos (Zimbelmana *et al.*, 2005).

Tanto la composición del material de lodo emitido durante octubre - noviembre de 2008 como la de las aguas del río Páez durante este período de tiempo, sugieren una interacción de gases ácidos con sistemas freáticos someros en los cuales debido a la mayor relación de agua con respecto a los gases y la reducción de la presión a niveles someros, daría lugar a la condensación de estos últimos dando como resultado la generación continua de lodos arcillosos; este mecanismo explicaría igualmente el aporte de agua/lodo que llevó a la generación del lahar del 20 de noviembre y podría también explicar los generados en el 2007.

De acuerdo con estudios en sistemas volcánicos la ocurrencia de alunita implica fluidos ricos en sulfatos y se han mostrado modelos indicando que estos sistemas de tipo ácido sulfatados están situados en el núcleo de los edificios volcánicos (Ohba and Kitade, 2005). Asociaciones de estos minerales hidrotermales implican que los edificios volcánicos podrían tener un sistema hidrotermal de este tipo y los minerales de alteración asociados provienen de estos edificios debido a erupciones freáticas.

Debido a la cantidad de agua involucrada en las erupciones del volcán Nevado del Huila (no explicable solamente por la participación de deshielo), no se descarta la posibilidad de que, además de acuíferos superficiales, también pueda estar interactuando un sistema hidrotermal, sin embargo los datos con que se cuenta hasta el momento indican un aporte principal de acuíferos someros. Un mejor seguimiento a la composición de las aguas, análisis de la matriz de los lahares y el continuo análisis de las cenizas emitidas, podrían dar mejores indicaciones sobre la evolución del sistema.

En el 2009, la actividad que precedió la extrusión del nuevo domo, se caracterizó por la generación de continuas emisiones de cenizas, reportadas a distancias mayores a las de los años anteriores (hasta 80 km, en el caso de Popayán). Esta actividad podría indicar, una mayor expansión de gases debida, posiblemente, a un menor contenido de agua (empobrecimiento del reservorio?) y, a su vez, podría explicar el hecho de no haberse generado lahares durante dicha actividad. Sin embargo, la asociación mineralógica de las cenizas emitidas es, como las anteriores, de origen hidrotermal, pero caracterizadas por disminución en el contenido de alunita, aumento de la anhidrita y aparición de illita, lo cual reflejaría la profundización del nivel de fragmentación en el conducto volcánico y que según Wohletz and Heinke (1992) podría inhibir la interacción con el acuífero más somero.

Finalmente se concluye de las características de la actividad eruptiva en el Nevado del Huila, que éste, desde su reactivación, ha tenido un importante componente de tipo freático, donde la interacción de calor proveniente de magma en ascenso, con un sistema freático o reservorio somero del volcán, dio lugar a pequeñas emisiones de ceniza de tamaño fino y a su vez, por descompresión del sistema, a emisiones de agua/lodo pudiendo ser este, el aporte principal para la generación de los lahares, más que el agua proveniente de la fusión de hielo-nieve causada por los eventos eruptivos.

La actividad magmática del volcán está representada por la extrusión de domos coalescentes, el último de los cuales tiene aspecto de domo colada fluyendo hacia el W, y presentando un crecimiento endógeno. Este magma en su ascenso no ha tenido contacto directo con acuíferos, pero si los gases y fluidos.

Las cenizas emitidas por el volcán Nevado del Huila, indican interacción de gases y fluidos ácidos con un reservorio superficial, y/o la presencia de un sistema hidrotermal de tipo ácido sulfatado cuyos minerales de

alteración provienen del núcleo del edificio volcánico debido a erupciones freáticas; igualmente, el sistema generador de lodo, el cual incluye un acuífero en profundidad y pequeñas explosiones superficiales, así como la formación de hidrofracturas en el inicio de la actividad del volcán son características típicas de éste tipo de erupciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a autoridades y habitantes de las diferentes poblaciones asentadas en inmediaciones del volcán, que contribuyeron con toma de muestras, relatos y descripciones valiosas de los fenómenos que observaron durante la actividad del volcán durante el 2007 al 2009, entre ellos: la Mesa de Caloto, Taravira, Mosoco, Belalcázar, Toribío, Wila, Tálaga, etc. Se extienden también los agradecimientos a INGEOMINAS y en especial al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán y a todo su equipo, por la gran colaboración y apoyo en todas las actividades desarrolladas durante la ejecución de éste trabajo así como en la parte logística. A INGEOMINAS Cali, por el decidido apoyo en la realización de los análisis por DRX y análisis cuantitativos de las muestras de cenizas. A las químicas Lucila Bobadilla de INGEOMINAS Bogotá y Zoraida Chacón de INGEOMINAS Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, encargadas de la realización de los análisis químicos de aguas y a la química Claudia Alfaro, de INGEOMINAS Bogotá, quien aportó invaluable comentarios y conocimiento en la interpretación química. A un revisor anónimo y a los geólogos Hugo Murcia y Francisco Velandia por la revisión y comentarios al documento.

## BIBLIOGRAFÍA

Africano, F. and Bernard, A. 2000. Acid alteration in the fumarolic environment of Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97: 475–495.

Asano, S. Okada, H., Kubota, S., Suzuki, S. and Yoshii, T. 1973. Crustal structure in the Matsushiro earthquake swarm area. *Tectonophysics*, 20:137-145.

Barberi, F., Bertagninia, A., Landia, P., Principe, C., 1992. A review on phreatic eruptions and their precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 52: 231-246.

Cardona, C., Santacoloma, C., White, R., McCausland, W., Trujillo, N., Narváez, A., Bolaños, R., Manzo, O. 2009. Sismicidad tipo “drumbeat” asociada a la erupción y emplazamiento de un domo en el volcán Nevado del Huila, noviembre de 2008. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geología*, 7-11 de Septiembre de 2009, Paipa.

Corbett, G.J. and Leach, T.M. 1998. Southwest Pacific Rim gold- copper systems: structure, alteration and mineralization. *Society of Economic geologist, Special Publication*, 6: 237p.

Delmelle, P. and Bernard, A. 2000. Volcanic Lakes. *Encyclopedia of volcanoes*. Haraldur Sigurdsson editor. 877- 896.

INGEOMINAS, 2007a. Informe de actividad del volcán Nevado del Huila, Febrero 2007. *Informe interno, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*, 19 p. Popayán.

INGEOMINAS 2007 b - INTRANET, Erupciones del volcán Nevado del Huila y escenarios futuros. Ingeominas Observatorio Vulcanológico y sismológico de Popayán.

INGEOMINAS, 2007 c - INTRANET, Boletín semestral de actividad de los volcanes Nevado del Huila y Puracé primer semestre de 2007.

INGEOMINAS, 2007 d. Informe de actividad del volcán Nevado del Huila, Marzo 2007. *Informe interno, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*, 15 p. Popayán.

INGEOMINAS, 2007 e - INTRANET, Boletín semestral de actividad de los volcanes Nevado del Huila y Puracé segundo semestre de 2007.

INGEOMINAS, 2007 f. Informe de actividad del volcán Nevado del Huila, Mayo 2007. *Informe interno, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*, 18 p. Popayán.

INGEOMINAS 2008 a - INTRANET, Boletín semestral de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé y Sotará, primer semestre de 2008.

INGEOMINAS 2008 b - INTRANET, Boletín semestral de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé y Sotará, segundo semestre de 2008.

- INGEOMINAS, 2008 c – INTRANET, Informe de la actividad del Nevado del Huila, noviembre 2008.
- INGEOMINAS, 2009 a – INTRANET, Boletín semestral de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé y Sotará, primer semestre de 2009.
- INGEOMINAS – NASA KIWE, 2009. Informe de los escenarios de amenaza por flujos de lodo “avalanchas” en la Cuenca del río Páez. Popayán, 78p.
- Luhr, J. F. 2008. Primary igneous anhydrite: Progress since its recognition in the 1982 El Chichón trachyandesite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175: 394–407.
- Mas, P., Beafort, D., Genter, A., Sanguine, B., and Girard, J. P. 2006. Clay minerals related to the hydrothermal activity of the Bouillante geothermal field (Guadeloupe). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158: 380–400.
- Mazot, A., Bernard, A., Fischer, T., Inguaggiato, S., and Sutawidjaja, I. S. 2008. Chemical evolution of thermal waters and changes in the hydrothermal system of Papandayan volcano (West Java, Indonesia) after the November 2002 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178: 276–286.
- Méndez, R. 2004. Metodología para el análisis sedimentológico de muestras volcánicas. *Informe interno*, INGEOMINAS OVS de Manizales. 12p.
- Nakada, S. 2000. Hazards from Pyroclastic flows and Surges. *Encyclopedia of volcanoes*. Haraldur Sigurdsson editor, 945-955.
- Newhall, C. G. 2000. Volcano Warnings. *Encyclopedia of volcanoes*. Haraldur Sigurdsson editor, 1185-1197.
- Ohba, T. and Nakagawa, M. 2002. Minerals in volcanic ash 2: Non magmatic minerals. *Global Environmental Research*. 6 (2): 53-59.
- Ohba, T. and Kitade Y. 2005. Subvolcanic hydrothermal systems: Implications from hydrothermal minerals in hydrovolcanic ash. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145: 249–262.
- Ohba, T., Taniguchi, H., Miyamoto T., Hayashi, S. and Hasenaka, T. 2007. Mud plumbing system of an isolated phreatic eruption at Akita Yakeyama volcano, northern Honshu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161: 35–46.
- Pulgarín, B.P., Correa, A.M., Cepeda, H. y Ancochea, E. 2001. Aspectos geológicos del complejo volcánico del Nevado del Huila (CVNH). *Memorias digitales del VIII Congreso Colombiano de Geología*, Manizales.
- Pulgarín, B., Cardona, C., Calvache, M., Lockhart, A. and White, R. 2007. Nevado del Huila lahars caused by rapid, voluminous water expulsion. *Abstracts Cities on Volcanoes IAVCEI*, Tokyo, Japan.
- Pulgarín, B., Cardona, C., Santacoloma, C., Agudelo, A., Calvache, M. and Monsalve, M. L. 2009a. Erupciones del volcán Nevado del Huila y cambios en su masa glaciar: 2007. *Boletín geológico INGEOMINAS*, 42: 113-122.
- Pulgarín, B., Cardona, C., Agudelo, A., Santacoloma, C., Monsalve, M.L., Calvache, M., Murcia, H. Ibáñez, D., García, J., Murcia, C., Cuellar, M., Ordóñez, M., Medina, E., Balanta, R., Calderón, Y. y Leiva, O. 2009b. Erupciones Históricas Recientes del Volcán Nevado del Huila, cambios morfológicos y lahares asociados. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geología*, 7-11 de Septiembre de 2009, Paipa.
- Rye, R. 2005. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chemical Geology*, 215: 5 – 36.
- Santacoloma, C., Cardona C. E., White, R., McCausland, W., Trujillo, N., Bolaños, R., Mamzo, O. y Narváez, A. 2009. Aspectos sísmicos de las erupciones freáticas y freatomagmática del volcán Nevado del Huila – Colombia. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geología*, 7-11 de Septiembre de 2009, Paipa.
- Sheridan, M. F. and Wohletz, K. H. 1983. Hydrovolcanism: basic considerations and review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17: 1-29.
- Wohletz, K. H. and Heinken, G. 1992. *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California Press, 432p.
- Worni, R. 2008. Volcanic eruption-related impacts on glaciers and modeling of lahars at Nevado del Huila, Colombia. Diploma Thesis Department of environmental sciences ETH Zurich. 106p.

Yoshida, N., Tsukahara, H., Okusawa, T. 2003. Andesitic Magmatic Water Which Generated Matsushiro Earthquake Swarm And S Wave Reflector. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2003*, abstract No. V52 B-0437.

Zimbelmana, D.R., Rye, R.O. and Breith, G.N. 2005. Origin of secondary sulfate minerals on active andesitic stratovolcanoes. *Chemical Geology*, 215: 37– 60.

### **Páginas Web**

<http://intranet.ingeminas.gov.co/popayan>: Página WEB Ingeominas, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán.

<http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>: Current Volcanic Ash Advisory Center, Washington VAAC.

<http://www.NEVADOHUILA.ES.TL>

---

Trabajo recibido: Octubre 18 de 2011  
Trabajo aceptado: Diciembre 14 de 2011