

**SISMICIDAD TIPO “DRUMBEAT” ASOCIADA A LA ERUPCIÓN Y
EMPLAZAMIENTO DE UN DOMO EN EL VOLCAN NEVADO DEL HUILA,
NOVIEMBRE DE 2008.**

**Carlos Cardona.¹, Cristian Santacoloma.¹, Randall White.², Wendy McCausland.²,
Nancy Trujillo.¹, Andrés Narvaez.¹, Ruth Bolaños.¹, Oscar Manzo.¹**

¹ **INGEOMINAS**, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, correo electrónico: ccardona@ingominas.gov.co

² **USGS**, Servicio Geológico de los Estados Unidos, correo electrónico: rwhite@usgs.gov

RESUMEN

Una serie de eventos sísmicos de largo periodo registrados de forma regularmente espaciada y de amplitud constante en el tiempo (señales tipo “Drumbeat”) ocurrieron en días previos a la erupción y emplazamiento de un domo en el volcán Nevado del Huila (VNH) en Noviembre 21 de 2008. Este tipo de eventos han sido reconocidos en otros volcanes del mundo (Guagua Pichincha, Montserrat, Monte Santa Helena, entre otros) y los modelos de comportamiento propuestos para estos volcanes sugieren que el mecanismo de origen de este tipo de señales se asocia con el estilo de extrusión de material magmático hacia superficie y no con variaciones del flujo de magma dentro del conducto. Esta sismicidad se registró en dos períodos de tiempo: el primero en Octubre de 2008, que marcó un aumento significativo de la actividad sísmica del volcán, y el segundo se registró a comienzos de Noviembre de 2008, cuando ocurrieron cerca de 18998 eventos sísmicos en un lapso de 12 días; en este periodo, las señales llegaron a ser tan regulares en el tiempo que en horas previas a la erupción ocurrían a una tasa de ~4 eventos por minuto. En este artículo se describen las señales tipo “Drumbeat (DB)” asociadas con la etapa eruptiva y extrusión del Domo del VNH, y se realiza un análisis a la variación temporal de la duración, frecuencia dominante en el espectro, amplitud y espaciamiento entre eventos. Los resultados muestran que existen dos familias de eventos tipo “DB” bien identificadas. Además, el seguimiento de las variables indica que ocurrieron cambios importantes en las características de este tipo de señales horas previas a la erupción.

Palabras clave: Erupción, Domo, Drumbeats, Extrusión, Largo Periodo, Espaciamiento.

**DRUMBEAT SEISMICITY ASSOCIATED TO THE ERUPTION AND DOME
EMPLACEMENT IN THE NEVADO DEL HUILA VOLCANO, NOVEMBER 2008.**

ABSTRACT

A series of long period seismic events with regular spacing and constant amplitude in time (“Drumbeat” type, DB) were seen previously to the eruption and dome emplacement on Nevado del Huila volcano (NHV) on November 21st of 2008, this type of events was recognized in other worldwide Volcanoes (Guagua Pichincha, Montserrat, Monte Santa Helena, among others) and the behavior models developed for these volcanoes suggest that the source mechanism for these kind of signals is associated with the extrusion style of magmatic material towards surface instead of magma flow variations within the conduct. This seismicity was registered in two time periods: the first one on October of 2008, which marked a significant raise of the seismic activity on the volcano, meanwhile the second one was registered on early November 2008, when over 18998 seismic events occurred in a space of 12 days; in this episode, the signals became so regular in time that in previous hours prior the eruption they occurred at a rate of ~ 4 events per minute. On this article are described the seismic signals “Drumbeat” type which are related with the eruptive phase and dome extrusion of NHV, an analysis to the temporal variation of coda is made, dominating spectral frequency, amplitude and spacing between events. The obtained results show that two well identified families of type DB events exist, and the variables indicate that important changes occurred on the characteristics of this type of signals in previous hours prior the eruption happened on November 21st of 2008.

Key words: Eruption, Dome, Drumbeats, Extrusion, Long Period, Spacing.



1. INTRODUCCION

El volcán Nevado del Huila (5365 m.s.n.m) localizado en el sector suroccidental del territorio colombiano, en el límite de los Departamentos de Cauca, Huila y Tolima, en las coordenadas geográficas 2°59'N, 76°00'W (Figura 1a), no poseía registro de actividad eruptiva histórica, hasta inicios del año 2007, cuando dos erupciones freáticas marcaron la reactivación de este volcán. Posterior a la ocurrencia de las dos primeras erupciones, el sistema volcánico entró en periodos oscilantes de relajación e incrementos en su actividad sísmica. De marzo a noviembre de 2008, el volcán evidenció un aumento paulatino de su actividad sísmica representado por enjambres y disparos sísmicos de señales de diferentes tipos y características. Un resumen detallado del comportamiento sísmico adoptado durante este lapso de tiempo es descrito en Santacoloma, y otros (2009). Realizando una síntesis, durante este lapso de tiempo ocurrieron: 1)- Enjambres y disparos de eventos tipo LP de baja frecuencia, asociados con la intrusión y migración de un cuerpo magmático hacia superficie, 2)- Altas descargas de SO₂ a niveles superficiales con medidas de hasta 13.400 ton/día, 3)- 63 eventos Volcano-Tectónicos (VT) con magnitud local mayor a 2.0, algunos de ellos sentidos por los pobladores de la zona de influencia del volcán, siendo el más representativo y el de mayor magnitud (ML = 4.9) el ocurrido el 2 de septiembre de 2008, sentido a distancias de hasta 150 km del volcán. 4)- Pulsos de tremor espasmódico con salida de cenizas y gases hacia superficie, 5)- Pulsos de tremor continuo de baja frecuencia que anteceden incrementos significativos en la actividad sísmica del volcán, y finalmente 6)- eventos de Largo Periodo (LP) e Híbridos (HB) registrados de forma



repetitiva e igualmente espaciados en tiempo, con una amplitud cuasi-constante, registrados del 1 al 13 de Octubre y del 9 al 20 de noviembre de 2008, que antecedieron la erupción freatomagmática ocurrida el 21 de noviembre a las 02:45 UT. Dicho proceso tuvo como consecuencia la extrusión y emplazamiento de un domo lávico sobre el costado SW del pico central del VNH. La muestra de datos utilizada para el presente trabajo corresponde a 20961 eventos tipo LP e HB registrados por la red de estaciones del VNH durante los meses de octubre y noviembre de 2008, catalogados como eventos precursores de la erupción y emplazamiento del domo. La red de vigilancia sísmica del VNH está compuesta por cinco estaciones sísmicas, una de ellas ubicada en el Pico Sur (Cerro Negro) de tipo uniaxial de corto periodo provista de un sensor L4C, dos más ubicadas en el costado norte del volcán (Verdún2 y Diablo) son estaciones telemétricas análogas triaxiales de corto periodo, provistas de un sensor L4C-3D, con periodo natural de 1 s; y las dos estaciones restantes son estaciones sismológicas telemétricas digitales de banda ancha, marca Güralp serie CMG3T, con un periodo natural de 60 s instaladas en el costado sur del volcán. Dichas estaciones envían datos de manera continua y en tiempo real al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de la ciudad de Popayán. Las características de las estaciones son descritas en la tabla 1, y su ubicación es mostrada en la figura 1b.

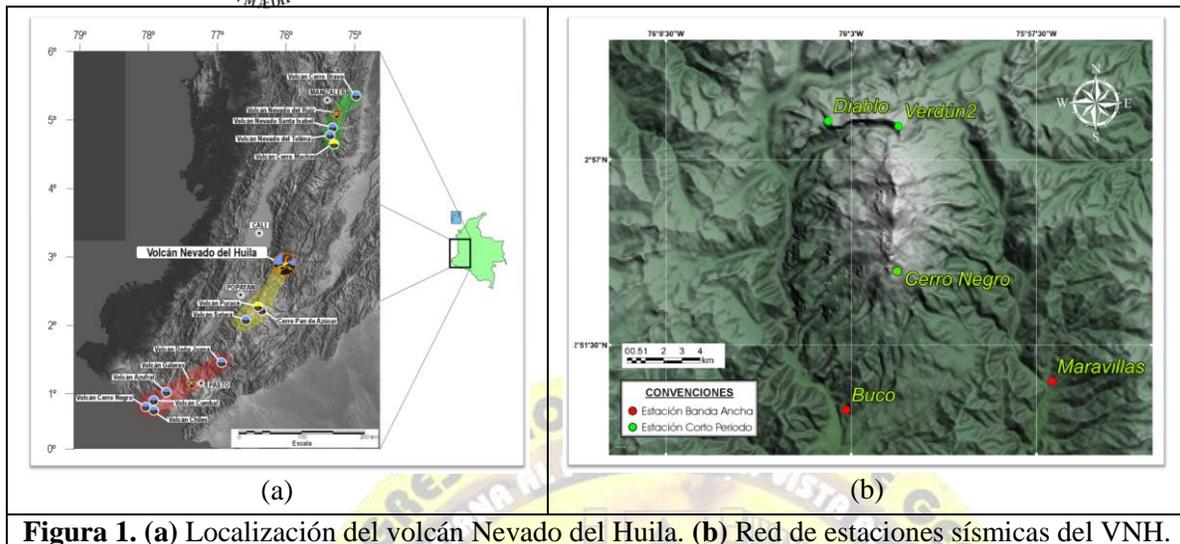


Figura 1. (a) Localización del volcán Nevado del Huila. (b) Red de estaciones sísmicas del VNH.

Tabla 1. Características de la red de vigilancia sísmica del volcán Nevado del Huila.

Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Distancia al Pico Central
<i>Cerro Negro</i>	Corto Periodo Vertical	2°53' 56.4"	76°01'48.6"	4440	3.0 km S
<i>Diablo</i>	Corto Periodo Triaxial	2°58' 30"	76°03'40.4"	4100	6.3 km NW
<i>Verdún-2</i>	Corto Periodo Triaxial	2°58'10.3"	76°01'55.7"	4534	4.8 km N
<i>Buco</i>	Banda Ancha 60s	2°50'26.7"	76°03'81.7"	2310	11.1 km SW
<i>Maravillas</i>	Banda Ancha 60s	2° 50' 33"	75° 57' 16"	2207	12.8 km SE

2. Actividad sísmica tipo Drumbeat del volcán Nevado del Huila entre Octubre y Noviembre de 2008.

Eventos sísmicos asociados con emplazamiento y extrusión de domos de composición andesítica a dacítica a superficie han sido reportados con anterioridad en otros volcanes del mundo, como en el Monte Santa Helena (Moran y otros, 2008), Soufriere Hills (Rowe y otros, 2004), y Galeras (Ingeominas, 2008), entre otros (Figura 2). Dichos episodios sísmicos constan de una serie de eventos LP e HB registrados de manera regular y de

amplitud constante que anteceden las extrusiones de cuerpos dómicos a superficie. En el caso del volcán Nevado del Huila, los eventos empezaron a registrarse dos meses antes de la extrusión y emplazamiento del domo. En este artículo se realiza una descripción de las principales características de este tipo de señales y se hace un seguimiento temporal a algunos parámetros como amplitud, frecuencia, forma de onda, separación y espectro, tomando la estación de Verdún2, ubicada a 5 km al norte del Pico central, como referencia para el análisis y seguimiento de las diferentes variables. El objetivo del trabajo es encontrar cambios en los diferentes patrones de comportamiento de los parámetros previo a la erupción.



2.1 Actividad “Drumbeat” Octubre 1 al 13 de 2008.

Las primeras señales tipo “DB” ocurrieron entre el 1 y el 13 de Octubre de 2008, en este lapso de tiempo se registraron en total 1963 eventos. La actividad sísmica comienza el 1 de octubre, con una serie de eventos repetitivos LP de baja frecuencia con picos dominantes en el espectro $f_0 = 0.8, 1.2$ y 1.8 Hz y tres armónicos principales en $2.8, 4.2$ y 6.2 Hz, en el espectro se destaca un decaimiento progresivo de la energía espectral en los armónicos de menor a mayor frecuencia (Figura 3b). Al inicio las señales presentan una amplitud constante, sin un patrón en su espaciamento; pero al final del episodio comienzan a

aumentar su amplitud y la separación entre eventos a medida que transcurre el tiempo (Figura 3a). Temporalmente se observaron algunos cambios importantes en las señales “DB” registradas en octubre de 2008 en el volcán Nevado del Huila. A inicios del mes (1-3 de Octubre) se presentaban a una rata de 8 - 16 eventos por hora, con amplitudes cercanas a $1.13 \mu\text{m}/\text{seg}$ ($\sim 2 \text{ cm}^2$ de desplazamiento reducido, asumiendo ondas superficiales), la separación de las señales era aproximadamente de 1 minuto. Posteriormente se observa que a medida que transcurre el tiempo las señales empiezan a tener una mayor separación entre ellas y la amplitud va incrementando hasta alcanzar valores cercanos a $3.34 \mu\text{m}/\text{s}$, notándose una disminución en su rata de ocurrencia, pasando a ser de 2 - 6 eventos por hora. En el mes se observan tres períodos claros con este comportamiento, del 1 al 3 de Octubre, del 4 al 7 de Octubre, y del 9 al 13 de Octubre, cuando secuencialmente el número de eventos disminuye y la amplitud y la separación de los eventos aumenta, hasta que finalmente tienden a desaparecer el día 14 de Octubre (Figura 3 c).

2.2 Pulsos de tremor continuo de baja frecuencia y disparos sísmicos con explosiones.

Posterior al 13 de octubre, la sismicidad presentó un decremento del número de eventos registrados y la energía sísmica asociada, con registro discreto de algunos eventos VT, LP e HB, hasta el día 26 de Octubre a las 15:30 UT, cuando se registró un pulso de tremor armónico continuo de baja frecuencia, con una duración aproximada de 4 días (figura 4a). Se asocia a su ocurrencia un flujo de SO_2 de 13.482 toneladas/día, medido el día 28 de octubre (Figura 4b) y el reporte de salida de material hidrotermal hacia superficie que saturó el Río Páez de sedimentos grisáceos finos aumentando su turbidez (Figura 4c).

Estudios de difracción de rayos X del material depositado en la rívera del Río Páez y de las cenizas de caída recolectadas, muestran que éste corresponde principalmente a material de origen hidrotermal, encontrándose entre otros minerales cuarzo, feldespato, alunita, piritita, cristobalita, tridimita (Ingeominas, reporte interno, 2009).

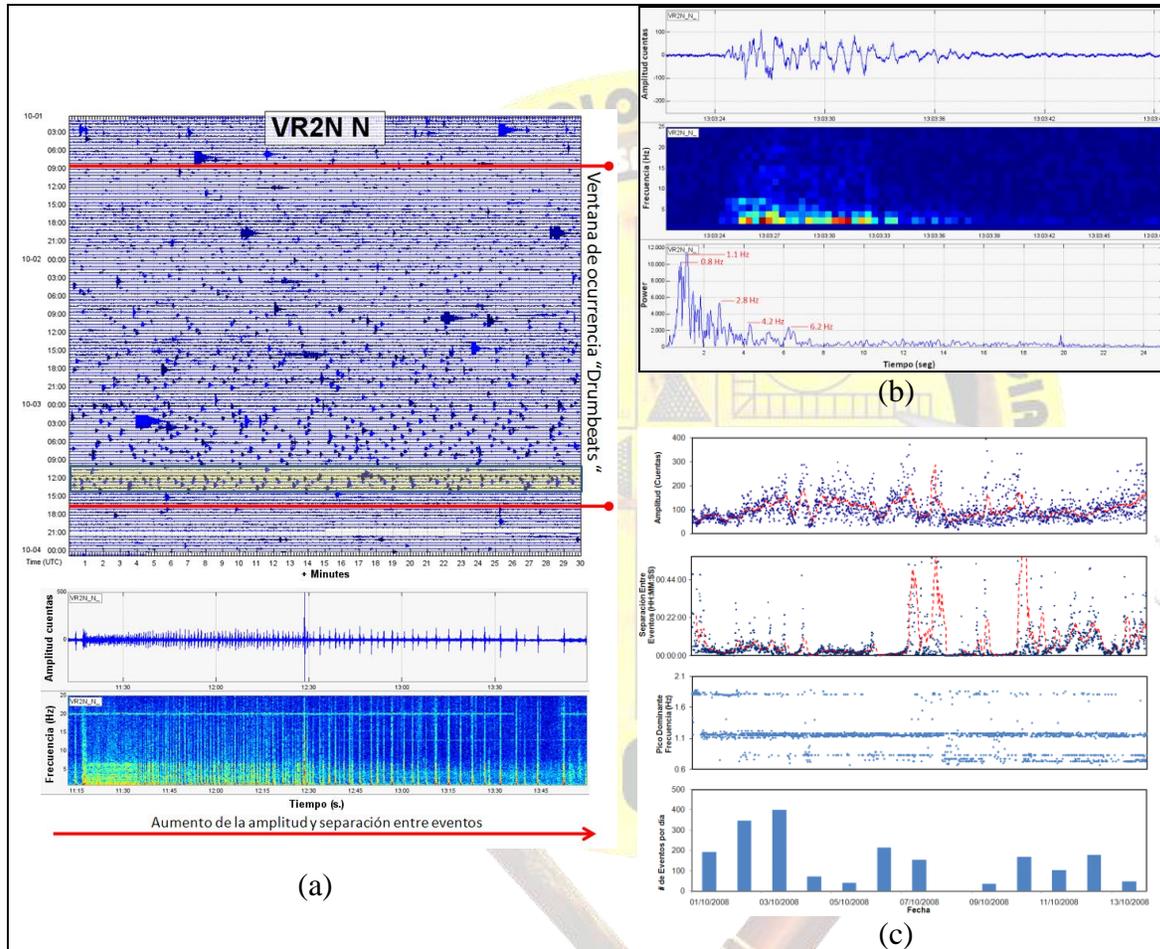


Figura 3. Eventos repetitivos LP “Drumbeats (DB)” registrados entre el 1-13 de Octubre de 2008. (a) En la parte superior se presenta el registro digital de la ventana de ocurrencia de las señales del 1-3 de octubre, y en la parte inferior se presenta el registro digital y el espectrograma de la parte final del disparo sísmico, nótese que a medida que pasa el tiempo las señales presentan una mayor amplitud y el espaciamiento entre ellas aumenta. (b) señal típica de un evento LP tipo “DB”, nótese que al inicio de la señal se observan frecuencias más altas, el espectro se caracteriza por tener picos dominantes en 0.8 y 1.1 Hz, y un decaimiento progresivo de la energía espectral de sus armónicos. (c) Seguimiento temporal a la amplitud, separación, frecuencia dominante en el espectro y número de eventos “DB” registrados en el VNH durante Octubre de 2008.

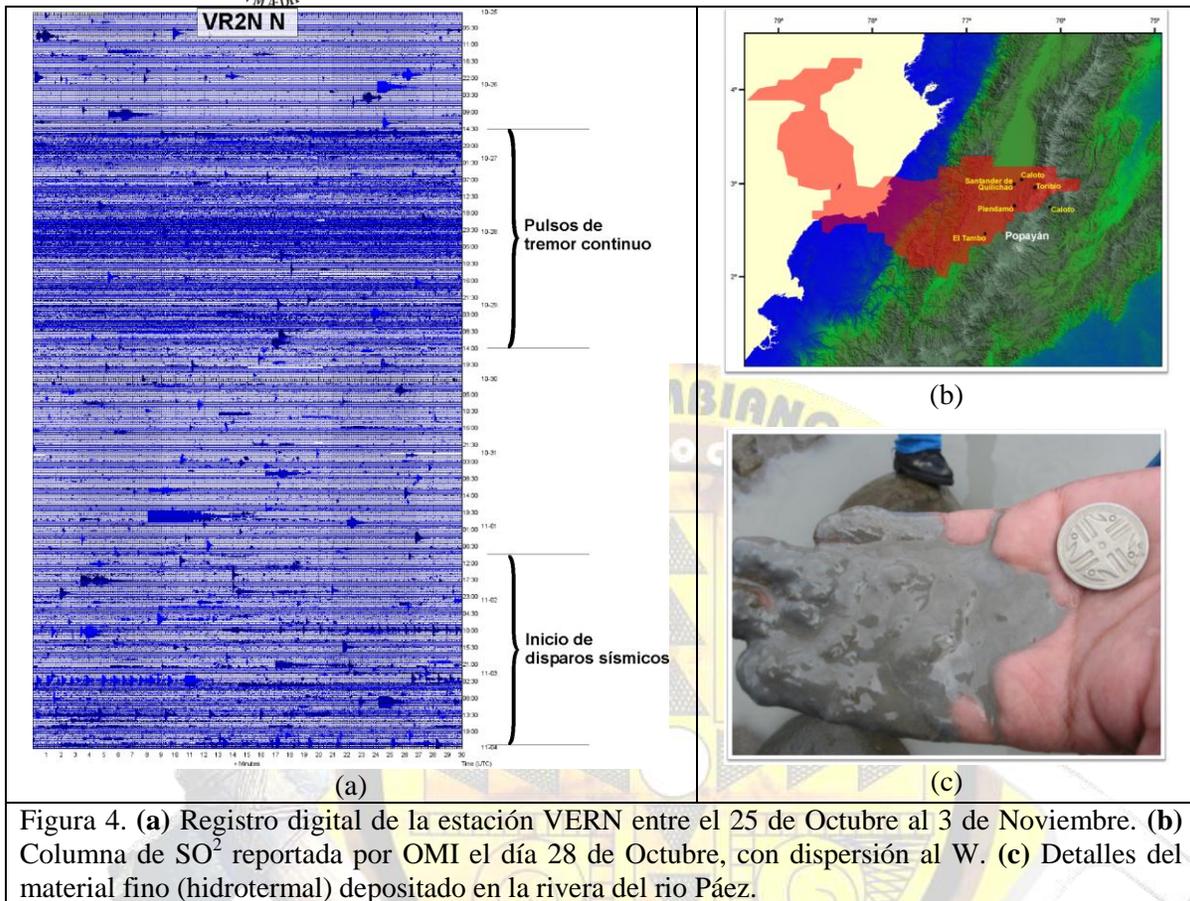


Figura 4. (a) Registro digital de la estación VERN entre el 25 de Octubre al 3 de Noviembre. (b) Columna de SO₂ reportada por OMI el día 28 de Octubre, con dispersión al W. (c) Detalles del material fino (hidrotermal) depositado en la rivera del río Páez.

El anterior episodio sísmico marca el inicio de una nueva fase en el volcán; el día 1 de noviembre se comienza a registrar una serie de disparos sísmicos compuestos por una mezcla de eventos (HB) y (LP), con duraciones promedio de cada disparo de 10 a 15 minutos, y con la ocurrencia de 20 a 40 eventos que anteceden una señal espasmódica de baja frecuencia ($f_0=0.8\text{Hz}$) asociada con pequeñas explosiones. Posterior al registro de estas señales sísmicas, pobladores del sector reportaron ruidos volcánicos y caídas de cenizas hacia los sectores ubicados en el occidente y suroccidente del volcán, sólo algunas pocas fueron confirmadas visualmente por medio de imágenes satelitales del VAAC (Volcanic Ash Advisories Center) y de observaciones directas realizadas por aeronaves que

sobrevolaron cerca al volcán. Desde el 1 de noviembre y hasta el 7 de noviembre a las 08:57 UT, un total de 49 disparos fueron registrados. Finalmente, el 7 de noviembre entre las 10:31 UT y las 17:57 UT los disparos sísmicos se incrementaron en ocurrencia y energía liberada, con un total de 9 disparos registrados en 8 horas, los cuales impulsaron un nuevo tremor continuo de baja frecuencia ($F_0=1.6$ Hz) que duró 7 horas, al cual se le calculó un desplazamiento reducido de 11 cm^2 (figura 5a). Tras este episodio sísmico, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPPOP) subió el nivel de actividad del volcán a Naranja II (Erupción probable en término de días o semanas). En ese mismo día se realizó un sobrevuelo a la parte alta del VNH, con el fin de reconocer cambios superficiales en el edificio, encontrándose un pequeño cráter de aprox. 50 m de diámetro, localizado sobre el costado sur de la cima del Pico Central, a través del cual se emitían continuamente cenizas y gases a superficie; además de nuevos agrietamientos sobre el glaciar que indicaban una cierta deformación del edificio en este sector (figura 5b). Posterior al cambio de nivel y hasta finales del 8 de noviembre, el número de disparos sísmicos presentados y su energía relacionada se incrementó notablemente, registrándose un total de 35 disparos sísmicos en tan solo 1.5 días (figura 5c). A comienzos del 9 de noviembre, los eventos registrados se presentaron de manera repetitiva, iniciándose nuevamente la ocurrencia de la sismicidad tipo “Drumbeat”.

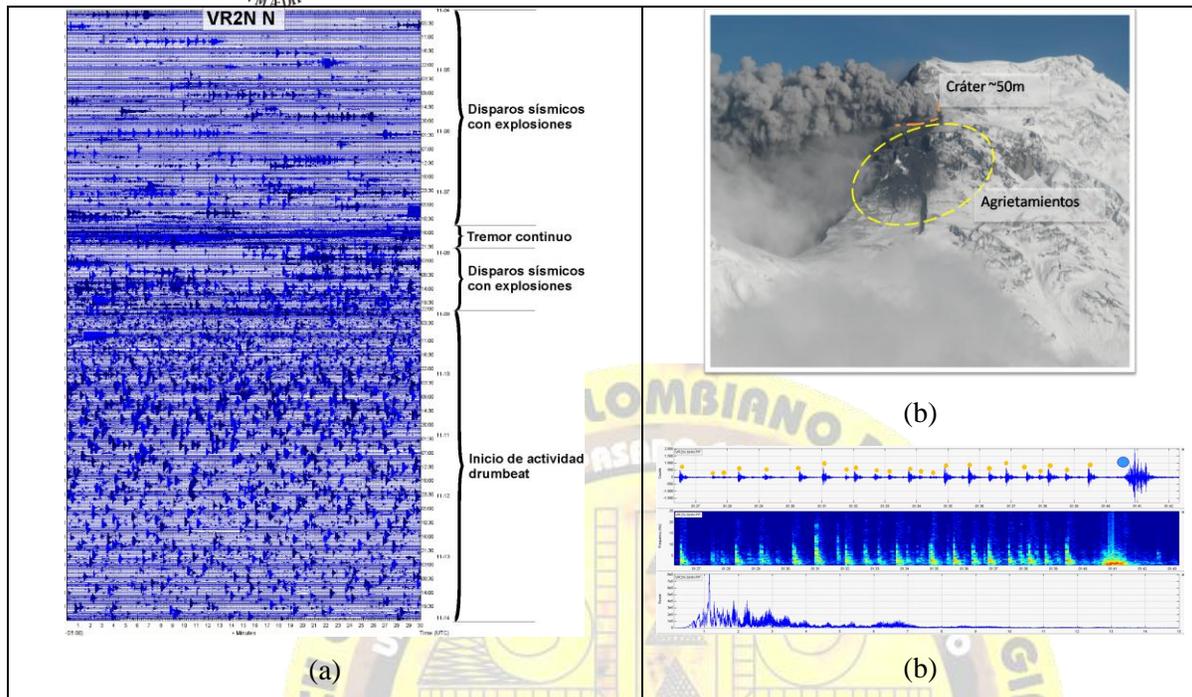


Figura 5. (a) Registro digital de la estación VERN del 4 al 14 de Noviembre. (b) Fotografía tomada el día 7 de noviembre, se resalta el pequeño cráter formado con emisión de cenizas y gases a superficie y la aparición de nuevos agrietamientos en la parte alta del edificio. (c) Señal, espectro y espectrograma de uno de los disparos registrados.

2.3 Señales LP y HB repetitivas (Drumbeats) de Noviembre de 2008.

El 9 de noviembre la actividad sísmica del VNH cambia drásticamente, evolucionando de registrarse de manera caótica y en forma de disparos a tener una cierta regularidad en el tiempo, ocurriendo una serie de eventos LP e HB de amplitud cuasi-constante a una tasa de ocurrencia de ~1 evento por minuto; cerca de 18980 eventos sísmicos se registraron entre el 9 y el 21 de noviembre (Figura 6a). Realizando un análisis de correlación cruzada de las señales registradas se encontraron por lo menos dos familias de ‘DB’ bien identificadas: la primera corresponde a sismos que espectralmente tienen una frecuencia dominante en 2.54 Hz, y que se registraron durante todo el período (9 al 21 de noviembre), a este tipo de eventos de les denominó ‘DB grandes’(figura 6c), debido a que presentan mayores

amplitudes, desplazamientos reducidos entre 5-10 cm² y magnitudes locales asociadas entre 1.0-1.5.

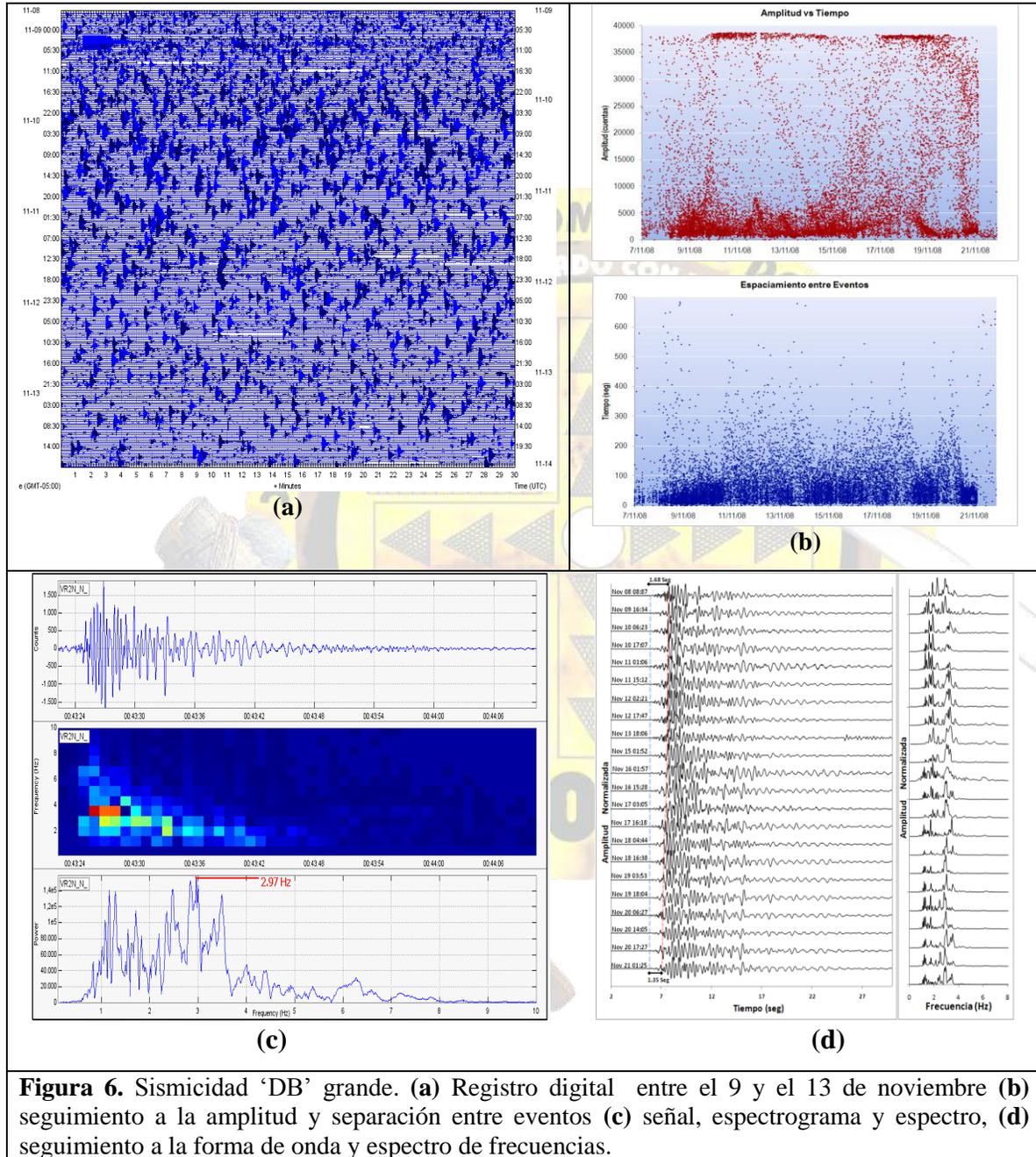


Figura 6. Sismicidad 'DB' grande. **(a)** Registro digital entre el 9 y el 13 de noviembre **(b)** seguimiento a la amplitud y separación entre eventos **(c)** señal, espectrograma y espectro, **(d)** seguimiento a la forma de onda y espectro de frecuencias.

Con relación al seguimiento de su amplitud y separación entre eventos a través del tiempo, no parece existir un patrón claro en su comportamiento, sin embargo, se observa una leve tendencia a presentar eventos con mayores amplitudes a medida que la separación entre ellos va aumentando, y una disminución de la separación cuando éstos decrecen en amplitud (Figura 6b), sugiriendo que la energía sísmica se conserva, registrando un mayor número de eventos en espacios de tiempo más cortos o eventos más grandes a espacios de tiempo más amplios. La forma de onda al inicio de la señal contiene una fase de alta frecuencia que para el 9 de noviembre presentaba una duración de 1.68 s. aproximadamente. Con el tiempo, esta fase se fue haciendo más corta, hasta presentar horas previas a la erupción un valor cercano a 1.35 seg. (Figura 6d), lo que probablemente sugiere movilidad del punto de origen de los eventos y/o migración del cuerpo magmático hacia niveles cada vez más superficiales.

El día 20 de noviembre a las 13:30 UT, 13 horas antes de la erupción, el registro de la sismicidad tipo 'DB' se incrementó notablemente, puesto que no solamente se registraron eventos 'DB grandes' sino que aparecieron una serie de eventos 'DB pequeños', los cuales se presentaron con una amplitud constante e igualmente espaciados, con una tasa de ocurrencia de ~4 eventos por minuto, amplitud promedio de 2.27 $\mu\text{m/s}$ y desplazamiento reducido entre 4-5 cm^2 , asumiendo ondas superficiales; en su forma de onda parece no existir la fase de alta frecuencia al inicio de la señal vista en los DB grandes (Figura 7a y 7b). El seguimiento de la forma de onda y del espectro de este tipo de señales muestra que presentan una forma de onda estable a través del tiempo y un espectro de frecuencia con un pico dominante igualmente estable en 1.16 Hz (Figura 7c). No obstante, existieron cambios



importantes con relación al número de eventos registrados por horas y la separación entre ellos, previo a la erupción del VNH. Al inicio de su ocurrencia existen dos patrones de espaciamiento: uno alrededor de 10 s. y otro alrededor de 40 s.

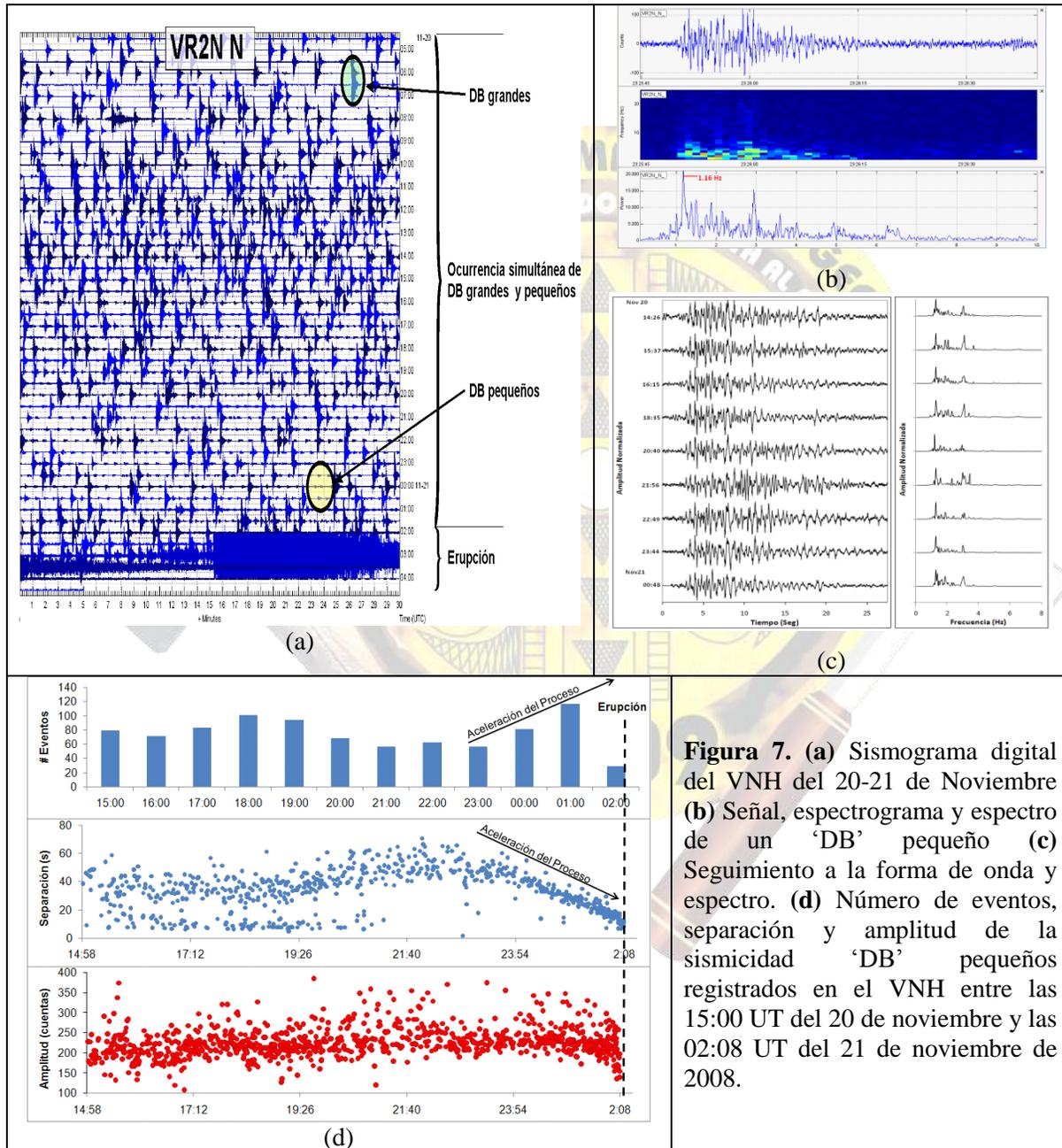
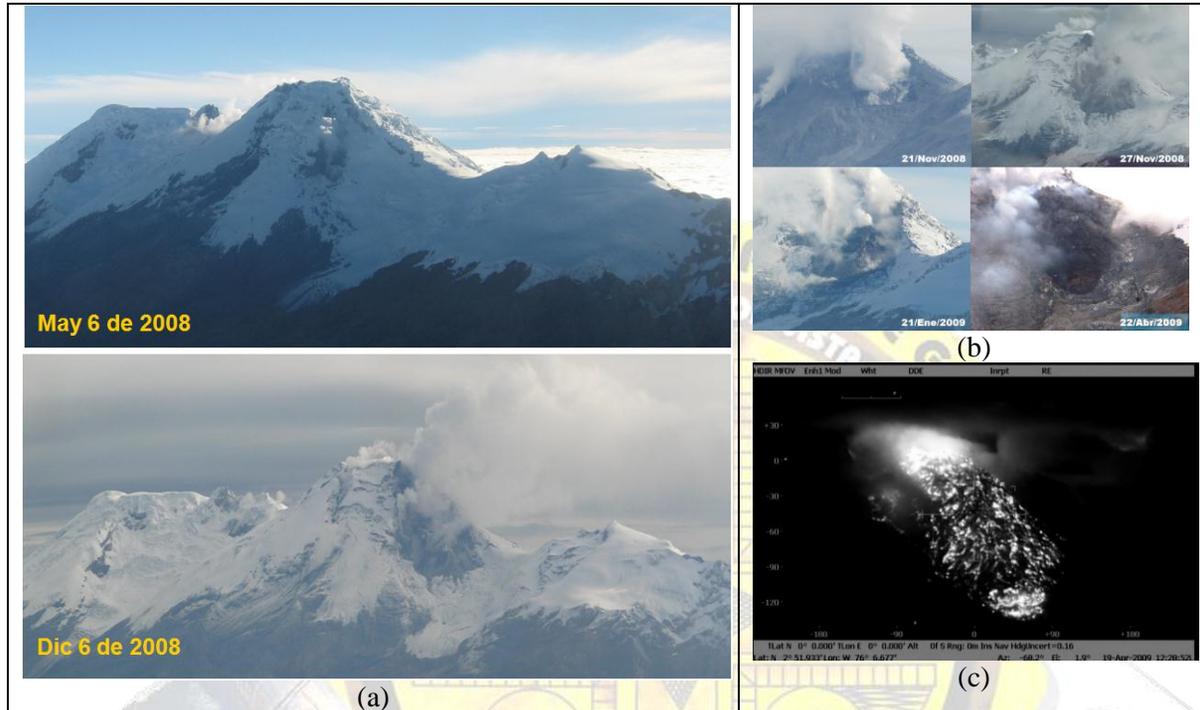


Figura 7. (a) Sismograma digital del VNH del 20-21 de Noviembre (b) Señal, espectrograma y espectro de un 'DB' pequeño (c) Seguimiento a la forma de onda y espectro. (d) Número de eventos, separación y amplitud de la sismicidad 'DB' pequeños registrados en el VNH entre las 15:00 UT del 20 de noviembre y las 02:08 UT del 21 de noviembre de 2008.

Al relacionar las gráficas del número de eventos y espaciamiento entre ellos parecen existir dos períodos de tiempo en que el proceso sufre una aceleración, uno entre las 15:00 UT y las 21:00 UT del día 20 de noviembre y otro en las 21:00 UT del día 20 noviembre y las 02:45 UT del día 21 de noviembre; en este último período y a las 23:00 UT (4 horas y 45 minutos antes de la erupción) se observa una clara aceleración del proceso cuando el número de eventos se incrementa progresivamente y la separación entre ellos es cada vez menor (Figura 7d), asociado posiblemente con el ascenso final del cuerpo magmático hacia superficie. Finalmente, a las 02:45 UT ocurre una erupción freatomagmática en el VNH, a la cual se asoció: 1- Una explosión con un señal sísmica que duró cerca de 10 minutos, 2- Generación de dos columnas eruptivas con alturas sobre la cima de 8.3 km y 5.6 km, las cuales se dispersaron hacia el SE y W del edificio volcánico respectivamente, 3- Formación de un nuevo cráter de 300 m de ancho y 1000 m de largo sobre el costado sur del pico Central (figura 8a), 4- generación de un lahar con un volumen involucrado entre 300 y 400 millones de m³, el cual posiblemente se formó por evacuación súbita de agua y material hidrotermal desde el interior del volcán. El flujo tuvo velocidades asociadas de 80 a 110 km/hora y viajó una distancia de hasta 180 km desde su origen, y finalmente 4- el emplazamiento de un cuerpo magmático en forma de domo sobre el cráter formado, con un volumen inicial de material extruido de aproximadamente 3 millones de m³. (figura 8a,b,c) Posterior a la ocurrencia de la erupción y emplazamiento del domo en el VNH, la actividad sísmica sufrió un descenso notorio con tasas de actividad sísmica en los meses subsiguientes inferiores a 30 eventos/día, mostrando una relajación parcial del sistema. A

pesar de ello, el domo continuó su crecimiento en los meses siguientes alcanzando alrededor de 52 millones de m³, según el cálculo realizado el 27 de enero.

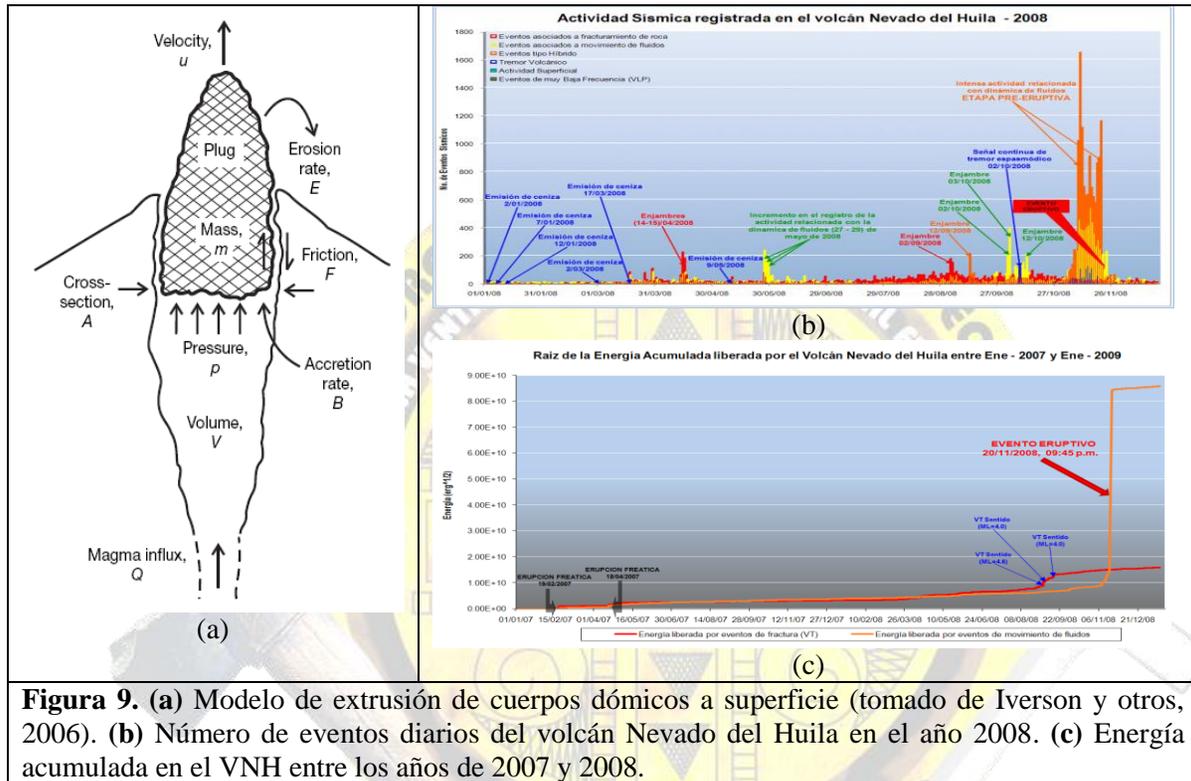


3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Varios modelos han sido propuestos como mecanismo generador de sismicidad tipo drumbeats en volcanes que emplazan domos andesíticos y dacíticos; algunos los asocian con la tasa de extrusión de material (Iverson y otros 2006 (figura 9 a), Mastin y otros, 2006), otros con pequeñas rupturas frágiles de material que acompañan la extrusión (Harrington y Brodsky, 2006); también con un Stick-Slip como mecanismo de fuente que

posteriormente impulsa una resonancia dentro de una grieta o conducto (Horton y otros, 2006), ó como un trasiente de presión en una grieta (Chouet, 1996). El estudio sobre el modelo de origen de esta clase de sismicidad todavía no es muy claro, sin embargo los mecanismos asociados con la tasa y estilo de extrusión de material magmático hacia superficie con un cuerpo parcialmente cristalizado que entra en contacto e interactúa con el medio sólido circundante, que involucra repetitivos movimientos Stick-Slip sobre las márgenes del sólido extruido, parecen explicar la presencia y periodicidad de esta clase de sismicidad y sus cambios en las etapas finales de emplazamientos de domo en superficie. Para el caso del volcán Nevado del Huila, la sismicidad drumbeat ocurrida a inicios de octubre podría estar asociada con la fase inicial de ascenso de material magmático a superficie, que posteriormente entró en contacto con un sistema hidrotérmico subsuperficial, generando el tremor continuo de finales de octubre y los numerosos disparos sísmicos y explosiones con salidas de gases y cenizas a superficie registrados durante los primeros días del mes de noviembre. Posteriormente, para el 9 de noviembre, la aparición de los drumbeats grandes continuos, pero con un patrón de espaciamiento caótico, podrían indicar un nuevo pulso de movimiento de magma hacia niveles cada vez más superficiales, pero por caminos de ascenso tortuosos, que explicaría los cambios temporales del tamaño de los eventos y la disposición caótica de sus espaciamientos. Por último, para el día 20 de noviembre, se registraron eventos tipo ‘DB pequeños’ con amplitudes y espaciamientos más constantes, y una clara aceleración del proceso 8 horas previas a la erupción (Figura 9^a y 9b), en esta fase el sistema magmático contaba con la suficiente potencia y caminos o conductos más limpios que facilitaron su ascenso final. La interacción de este cuerpo con

el sistema hidrotérmico superficial generó una sobrepresión del medio que a la postre disparó la erupción del día 21 de noviembre, el emplazamiento del domo y la salida súbita de material hidrotérmico hacia superficie que formó el lahar presentado.



4. AGRADECIMIENTOS

Los Autores quieren expresar sus más sinceros agradecimientos al personal técnico y operativo que labora en los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Popayán, Pasto y Manizales pertenecientes al área de amenazas y entorno ambiental del INGEOMINAS, y al personal técnico del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) y del VDAP (Volcanic Disaster Assistance Program del USAID), quienes de una u otra forma participaron en el manejo de las crisis volcánicas presentadas en el volcán

Nevado del Huila durante los años de 2007 y 2008. Sus aportes y discusiones fueron de gran ayuda para el entendimiento de la dinámica volcánica del VNH y para la realización del presente artículo.

5. REFERENCIAS

- Chouet, B. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature* 380, 309–316 (1996).
- Harrington, R.M., and Brodsky, E.E., 2006, The Mount St. Helens hybrid earthquakes: Stick-slip or resonating pipes [abs]: *Eos (American Geophysical Union Transactions)*, v. 87, Fall Meeting Supplement, V52A-02.
- Horton, S., Norris, R., and Moran, S.C., 2007, Broadband characteristics of earthquakes recorded during a dome-building eruption at Mount St. Helens, Washington, between October 2004 and May 2005, chap. 5 in Sherrod, D.R., Scott, W.E., and Stauffer, P.H., eds., *A volcano rekindled: A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, Washington the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006: U.S. Geological Survey Professional Paper*.
- Ingeominas 2008. Estudio de las cenizas emitidas por el volcán Nevado del Huila entre Octubre y Noviembre de 2008. INGEOMINAS, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán. reporte interno.
- Iverson, R.M., Dzurisin, D., Gardner, C.A., Gerlach, T.M., LaHusen, R.G., Lisowski, M., Major, J.J., Malone, S.D., Messerich, J.A., Moran, S.C., Pallister, J.S., Qamar, A., Schilling, S.P., and Vallance, J.W., 2006, Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at Mount St. Helens in 2004–2005: *Nature*, v. 444, p. 439–443.
- Mastin, L.G., Roeloffs, E., Beeler, N.M., and Quick, J.E., 2007, Constraints on the size, overpressure, and volatile content of the Mount St. Helens magma system from geodetic and dome-growth measurements during the 2004–2006 eruption, chap. 22 in Sherrod, D.R., Scott, W.E., and Stauffer, P.H., eds., *A volcano rekindled: the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006: U.S. Geological Survey Professional Paper*.
- Moran, S.C.; Malone, S.D.; Qamar A. I.; Theleb, W.A; Wright, A.K.; and Caplan-Auerbach, J. 2008. Seismicity Associated with Renewed Dome-Building at Mount St. Helens, 2004–2005. chap. 2. in Sherrod, D.R., Scott, W.E., and Stauffer, P.H., eds., *A volcano rekindled: A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, Washington the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006: U.S. Geological Survey Professional Paper*.
- Rowe, C.A., Thurber, C.H., and White, R.A., 2004, Dome growth behavior at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, revealed by relocation of volcanic event swarms, 1995–1996: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 134, p. 199–221.
- Santacoloma C., Cardona C.E, White R., McCausland W., Trujillo N., Bolaños R., Manzo O., Narváez A., 2009. Aspectos sísmicos de las erupciones freáticas y freatomagmática del volcán Nevado del Huila – Colombia. XII Congreso Colombiano de geología.

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 Advisories Washington VAAC

