

C. Indira Molina P.
Mario C. Ruiz

ESTUDIO TEMPORAL DE LAS FRECUENCIAS DEL TREMOR VOLCÁNICO DEL TUNGURAHUA

1 Instituto Geofísico/
Departamento de Geofísica.
Escuela Politécnica
Nacional, Quito.

Resumen

La sismicidad del Volcán Tungurahua es caracterizada por un fuerte tremor cuyos cambios temporales en amplitud y frecuencia han permitido la identificación de diferentes etapas de actividad en el volcán. Variaciones en tremor energía parecen asociadas con procesos hidrotermales, sin embargo en mayo de 1999 esta correspondencia no es tan evidente y cambios en la frecuencia (alrededor de 0.5 y 5 Hz) atestiguan la inminente preparación del estado eruptivo que presentaría el volcán en septiembre de 1999.

Abstract

The seismicity of Tungurahua volcano is characterized by strong tremor signals whose temporary changes in amplitude and frequency have permitted the identification of different stages in the volcano's activity. Variations in tremor energy appear to be associated with hydrothermal processes. However, in May of 1999 this correspondence is not so evident and changes in the frequency (0.5 and 5 Hz) give testimony to the preparation of the eruptive state that the volcano would experience starting in September, 1999

imolina@igepon.edu.ec

INTRODUCCIÓN

El Volcán Tungurahua, localizado 33 km al sureste de Ambato, en el centro de la Cordillera Real del Ecuador, se encuentra dentro del contexto de una zona de subducción, formando parte del arco volcánico cuaternario.

Entre 1989 y 1992 no se registraron señales de tremor volcánico, sin embargo entre enero de 1993 y abril de 1994 se registraron 35 episodios tremóricos con una duración promedio de 2 días. Desde fines de abril de 1994 el incremento en la amplitud de esta señal fue notable y en mayo del mismo año esta señal llegó a su máxima amplitud, volviéndose continua las 24 horas del día. De esta manera desde dicho momento la actividad sísmica de este volcán, se ha caracterizado principalmente por la ocurrencia de episodios tremóricos de larga duración y una baja actividad sísmica, sin embargo, pocos meses antes de registrarse las primeras erupciones se detectó un claro incremento en la actividad sísmica. El principal propósito de este trabajo, es estudiar las relaciones entre el contenido espectral diario del tremor y los fenómenos volcánicos observados (visuales, el valor de b y la precipitación pluvial) entre enero de 1994 y septiembre de 1999.

Básicamente, en el Volcán Tungurahua han sido reconocidos tres tipos de tremor volcánico: hidrotermal (figs. 1-a y b), armónico (figs. 1-c y d) y disarmónico (figs. 1-e y f). Estos tremores comparten una banda espectral muy similar, con picos dominantes entre 1 y 2 Hz, pero con un número de picos y un espaciamiento entre ellos que difieren de un tremor a otro. Por ejemplo el tremor hidrotermal presenta 18 picos, el tremor armónico 3 o 4 picos y el disarmónico 22 picos espectrales comunes.

El tremor denominado hidrotermal fue una señal frecuentemente detectada en el Volcán Tungurahua, cuya correlación temporal entre su energía liberada y la tasa de precipitación sugerían su carácter hidrotermal. Es característico de este tremor una modulación de sus amplitud y una frecuencia dominante aproximadamente constante en intervalos de segundos, días y meses. Por otra parte, a partir del 14 de septiembre los tremores armónico y disarmónico fueron relacionados con emisiones de gas y ceniza saliendo del cráter segundos antes de producirse la emisión como tal. Algunas ve-

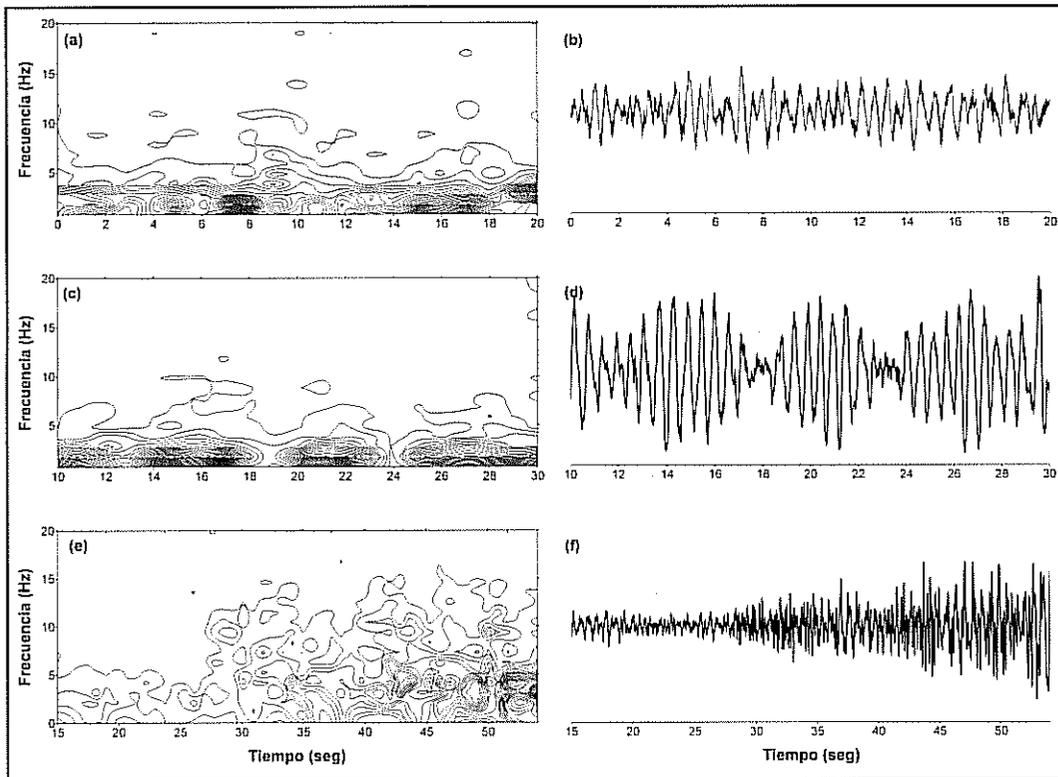


Figura 1. Tipos de tremor volcánico (observados en la estación MSON): (a) y (b) espectrograma y sismograma del tremor hidrotermal, (c) y (d) espectrograma y sismograma del tremor armónico, (e) y (f) espectrograma y sismograma del tremor diarmónico.

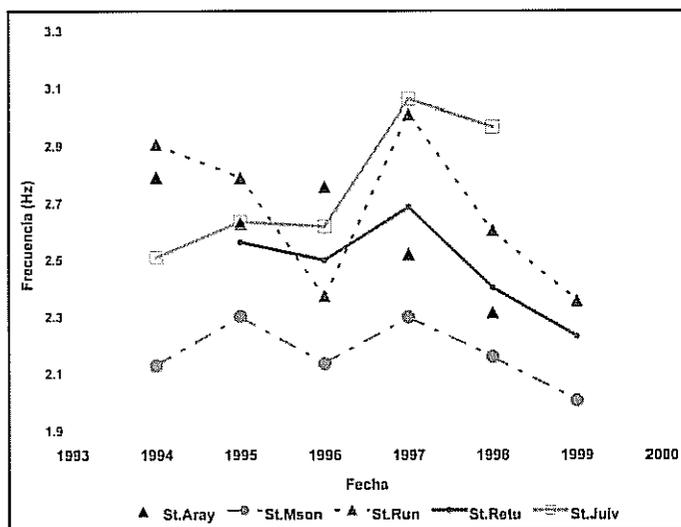


Figura 2. Frecuencia principal de Stacked Spectra de los primeros 5.12 s de la señal, con overlaps de 2.56 s a lo largo de una ventana de 120 s y/o 30 s promediadas anualmente para las diferentes estaciones de registro. Nótese que para la estación Arzu se han dejado los puntos sin unirlos con una línea de tendencia.

ces, fue posible observar de manera aislada la ocurrencia esporádica de tremor armónico intercalado con tremor disarmónico de tal manera que ambos tipos de tremor fueron asociados con degasificación. La diferencia fundamental entre estos dos tipos de tremores radica en sus espectros y formas de onda: mientras el tremor disarmónico exhibe una amplitud muy variable y picos espaciados irregularmente, el tremor armónico muestra modulaciones en su amplitud y picos armónicos. Igualmente la frecuencia dominante del tremor disarmónico no es tan estable en el tiempo como la es la del tremor armónico.

En cualquier caso, desde el punto de vista instrumental, la característica típica del tremor es la forma “picu-

da” de su espectro. Las frecuencias de los picos espectrales dominantes son estables tanto en cortos intervalos de tiempo [al igual que en el Volcán Kilauea (Aki K., Fehler S., Das S., 1977), como durante largos períodos de tiempo (al igual que en el Volcán Etna (Gresta S., Montalto A., Patanè G., 1991)].

EVOLUCIÓN ESPECTRAL DEL TREMOR VOLCÁNICO

En el Volcán Tungurahua, la evolución espectral de la actividad tremórica registrada entre 1994 y 1999 ha marcado las pautas de las diferentes etapas de predominio magmático e hidrotermal. De igual manera su frecuencia principal ha arrojado cambios notables anualmente, congruentes para todas las estaciones de registro sísmico (figura 2).

En la figura 2 se puede notar que de 1995 a 1996 y de 1997 a 1999, se ocurre un descenso de la frecuencia principal del tremor congruente en todas las estaciones, lo cual podría indicar cambios en la fuente del tremor hidrotermal (?) o posiblemente el apareamiento de otro tremor como dominante. Por otra parte, es posible ob-

Tabla 1. Litología de los sitios donde se encuentran instaladas las diferentes estaciones sísmicas (com. pers. Hall, M.)

ESTACIÓN	LITOLOGÍA
MSON	Flujo de lava
RETU	Lava escoriácea
JUIVE (1994-1996) / JUIVE (1997-1999)	Lava masiva / Roca + suelo
RUN (1994-May/1999) / RUN May/1999)	Suelo + tefra / Roca dura
ARAY (Oct/1994) / ARAY (Oct/94-1999)	Lava + tefra / Metamórfica

alrededor de 2 Hz es la más común durante el período de estudio, mientras que los otros dos grupos de frecuencias se presentaron ocasionalmente.

La aparición notable de las frecuencias del grupo (a) y (c) no es simultánea. En julio de 1997 el grupo (a) se vuelve importante, presentando un crecimiento en su amplitud (entre 10 y 35 cuentas) en

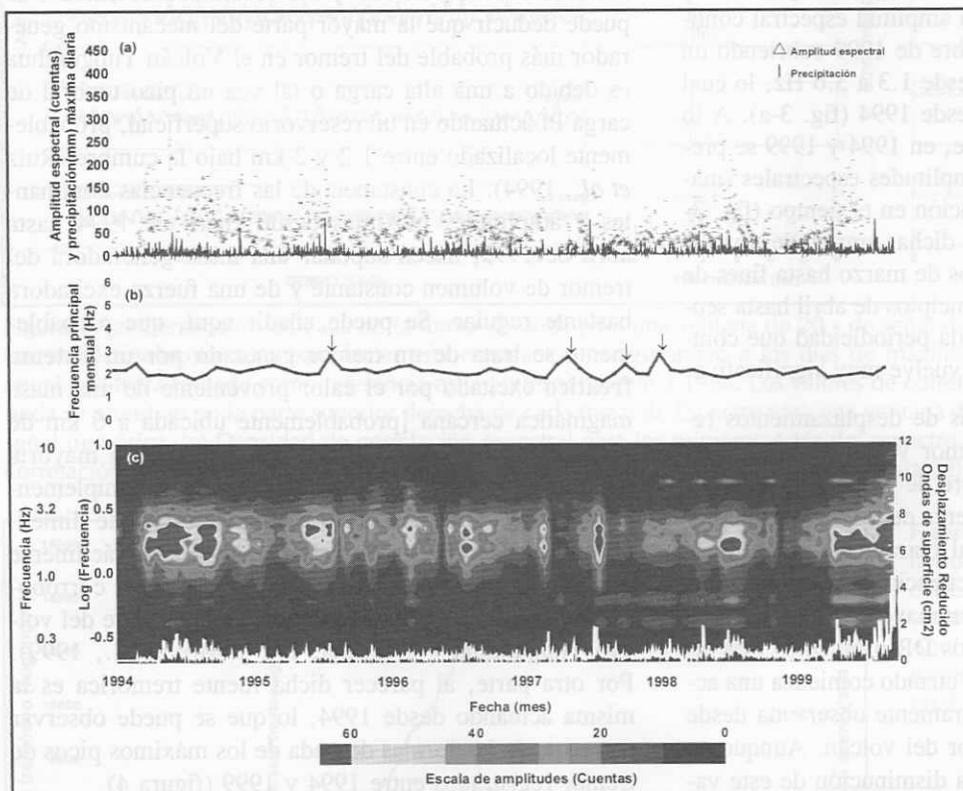


Figura 3. Evolución temporal del tremor volcánico: (a) Relación entre la amplitud tremórica y la tasa de precipitación pluvial, (b) principales cambios de frecuencias, (c) espectrograma del tremor volcánico y desplazamientos reducidos registrados desde 1994 hasta 1999 (línea blanca).

servar que los cambios en la frecuencia principal obedecen a un efecto de origen del tremor, debido a que dicha frecuencia es muy estable para todas las estaciones y en un rango muy pequeño (entre 1 y 3 Hz). Las diferencias en la frecuencia principal entre estaciones para un mismo evento tremórico parecen obedecer a un efecto del sitio geológico en el que fueron instalados los sensores sísmicos (tabla 1), pudiendo reconocer que las estaciones ubicadas sobre basamentos muy consolidados presentan valores menores de sus frecuencias principales.

En la figura 3, se puede observar un mayor detalle de la evolución espectral del tremor volcánico registrado en el Tungurahua (sin discriminar el tipo de tremor). Ello fue analizado en una estación sísmica de período corto (Mson) ubicada 3.2 km al SW del volcán. En la figura 3-c se puede notar, tres grupos predominantes de frecuencias: (a) alrededor de 0.5 Hz, (b) alrededor de 2 Hz y (c) alrededor de 5 Hz.

En la figura 3-c se puede observar que la frecuencia

los períodos de abril a agosto de 1998 y abril a septiembre de 1999. Las frecuencias del grupo (c) aparecen en diciembre de 1997 y continúan presentándose de manera intermitente hasta fines de octubre de 1998 cuando sus amplitudes decrecen (menor a 5 cuentas). Es importante notar aquí que a pesar de que hay un apareamiento de frecuencias (de los grupos (a) y (c)) este no presentó ninguna correlación con actividad fumarólica anómala en el volcán, únicamente hasta mayo de 1999.

En cuanto a las frecuencias del grupo (b) se puede indicar que estas cobijan las frecuencias dominantes del tremor volcánico, las cuales aparecen dentro del rango de 1.4 a 2.5 Hz durante la mayor parte del tiempo (fig. 3-b), presentando cuatro cambios principales (mayores de 0.5 Hz) entre julio y septiembre de 1995, marzo y mayo de 1997, agosto y octubre de 1997, diciembre de 1997 y enero de 1998. Por otra parte, obsérvese que en la figura 3-a, la mayoría de veces los valores máximos de amplitud espectral diaria están rodeando los picos de

precipitación pluvial (Pf), indicando una buena correlación entre estos dos fenómenos (Ruiz M. *et al.*, 1999). Un coeficiente de correlación lineal entre energía tremórica y tasa de precipitación varió entre 0.3 y 0.9, siendo la mayor parte del tiempo alrededor de 0.8 y en casos excepcionales menores que 0.6 en los períodos de octubre de 1993 a mayo de 1994, octubre de 1995 a octubre de 1996 y noviembre de 1997 a junio de 1998 (Ruiz M. *et al.*, 2002). Es notable el incremento de la amplitud espectral desde diciembre de 1998, lo cual es correlacionable con un aumento en Pf, sin embargo, aunque en mayo de 1999 la Pf disminuye, la amplitud espectral continúa aumentando hasta septiembre de 1999 cubriendo un rango de frecuencias que va desde 1.3 a 3.6 Hz, lo cual se presenta por primera vez desde 1994 (fig. 3-a). A lo anterior vale la pena añadir que, en 1994 y 1999 se presentaron incrementos de las amplitudes espectrales (mayor a 60 cuentas) de gran duración en el tiempo (fig. 3-c), es decir, la permanencia de dichas amplitudes durante 1994 ocurrió desde principios de marzo hasta fines de septiembre y en 1999 desde principios de abril hasta septiembre, mostrando una marcada periodicidad que comparada con el resto de años se vuelve muy significativa.

Adicionalmente, del análisis de desplazamientos reducidos calculados para el tremor volcánico (fig. 3-c), entre enero de 1994 y diciembre de 1997, se puede notar que el mayor pico de DR (cerca de los 2 cm²), se presenta en julio de 1997, el cual claramente antecede la marcada acentuación de las frecuencias correspondientes al grupo (a). Otro pico ocurre en mayo de 1999, y a partir de esta época se presentan los DR promedios más altos (sobre 0.5 cm²) que es justo cuando comienza una actividad fumarólica anómala claramente observada desde diferentes poblaciones alrededor del volcán. Aunque en julio de 1999, hay una pequeña disminución de este valor, este cambia drásticamente desde agosto aumentando hasta septiembre cuando alcanza un valor de 9.5 cm². Es justo en julio cuando se detecta una fuerte actividad fumarólica y un importante olor a azufre. Debido a la buena correlación de la amplitud tremórica con Pf, se puede considerar que el tremor volcánico del Tungurahua es de tipo hidrotermal en la mayor parte del tiempo desde 1994 hasta 1999 (excepto para los períodos mencionados anteriormente), ello a su vez es sustentado por los valores de DR que suelen presentarse principalmente entre 0.05 y 1 cm² (McNutt S.R., 1992). Sin embargo, los valores de DR presentados a fines de Septiembre de 1999 se acercan más a una actividad de tipo estromboliano, ya que entre el 24 y 30 de septiembre los valores de DR llegan a superar los 5 cm², alcanzando un pico máximo de 9.5 cm² el 26 de septiembre del mismo año (McNutt S.R., 1992).

MECANISMO DE GENERACIÓN DEL TREMOR

Banks *et al.* (1990) afirman que existe un suficiente número de correlaciones entre precipitación, erupción, deformación y períodos de actividad sísmica que sugieren que la Pf debería ser considerada como un elemento disparador de la actividad de los volcanes, por lo que estados de alta actividad deberían ser influenciados por una alta tasa de carga o un pico umbral de carga de Pf. De acuerdo con ello y los resultados obtenidos, se puede deducir que la mayor parte del mecanismo generador más probable del tremor en el Volcán Tungurahua es debido a una alta carga o tal vez un pico umbral de carga Pf actuando en un reservorio superficial, probablemente localizado entre 1.2 y 2 km bajo la cumbre (Ruiz *et al.*, 1994). La constancia de las frecuencias dominantes y amplitudes máximas desde enero de 1994 hasta abril de 1999, hacen suponer una masa generadora del tremor de volumen constante y de una fuerza excitadora bastante regular. Se puede añadir aquí, que probablemente se trata de un tremor generado por un sistema freático excitado por el calor proveniente de una masa magmática cercana [probablemente ubicada a 6 km de profundidad (Molina I., Ruiz M., 2002a)]. La mayoría de gases provenientes del magma pueden ser simplemente disueltos en un acuífero (sistema freático) de dimensiones considerables y el resto puede escapar fácilmente a través de conductos abiertos como es posible corroborarlo mediante observación directa en la cumbre del volcán Tungurahua (Viracucha, D., y Molina, I., 1999). Por otra parte, al parecer dicha fuente tremórica es la misma actuando desde 1994, lo que se puede observar comparando las formas de onda de los máximos picos de tremor registrados entre 1994 y 1999 (figura 4).

Debido a que en mayo de 1999, la disminución de la Pf no corresponde con la variación de la amplitud espectral, es por ello que desde esta época es posible la influencia directa de un componente magmático como se puede observar con el estudio del valor de *b* (Molina I., Ruiz M., 2002c). De esta manera, los tremores claramente notables desde el 14 de septiembre de 1999 podrían de alguna manera estar relacionados en mayor proporción a un componente principalmente magmático, lo cual es soportado por el flujo de SO₂ emitido por el volcán en dicha época (alrededor de 6 000 ton/día) y por un bandeamiento irregular del tremor a partir del 16 de septiembre de 1999. Las bandas de tremor que se registraron desde el 16 de septiembre hasta fines de octubre de 1999 presentaban períodos de duración muy irregulares, es decir algunos de ellos duraban desde 840 segundos (14 minutos) como mínimo hasta 14 171 segundos (10 días) como máximo (figura 5), con una separación entre cada episodio tremórico de 20 minutos como mínimo y 10 horas como máximo. La duración de cada episodio

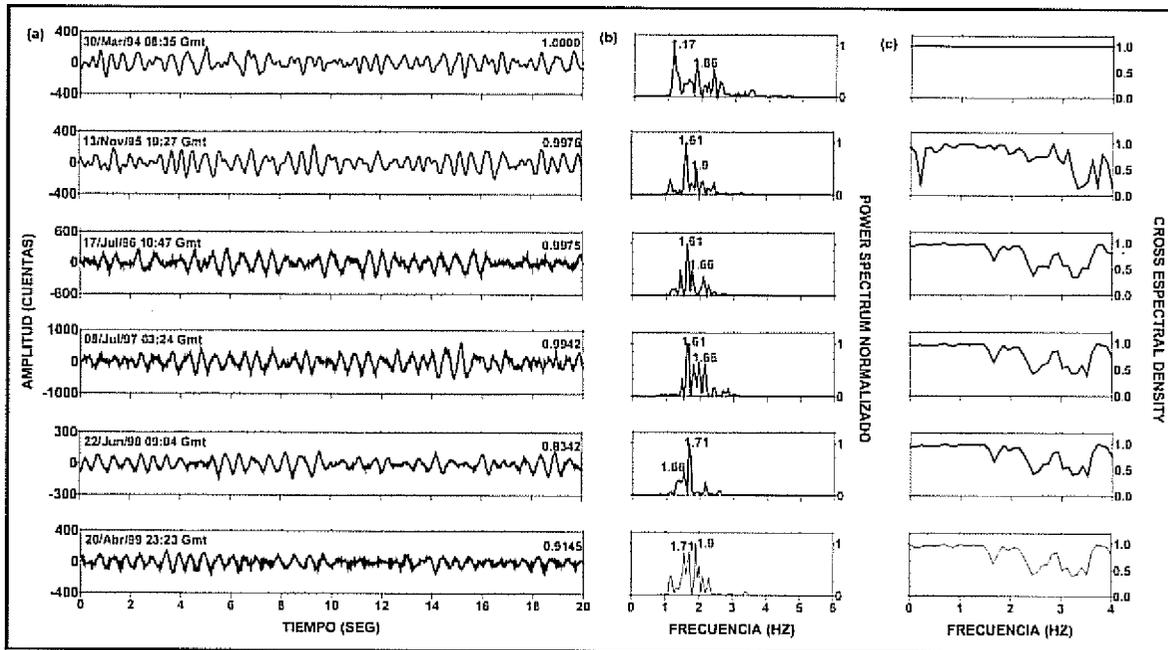


Figura 4. (a) Correlación cruzada de la forma de onda para una ventana de 20 s de señal de tremor hidrotermal. Las señales seleccionadas para hacer esta correlación corresponden a los días de máxima amplitud tremórica anual y la traza tomada como referencia es la correspondiente a 1994. Los valores de correlación de la forma de onda se muestran en la parte superior derecha de cada traza, (b) Espectro para una ventana de 10.24 segundos de señal tremórica, (c) Densidad de correlación espectral para los primeros 4 Hz del espectro. Obsérvese la buena correlación de los primeros 2 Hz que contiene las frecuencia principal (f1) y secundaria (f2) del espectro.

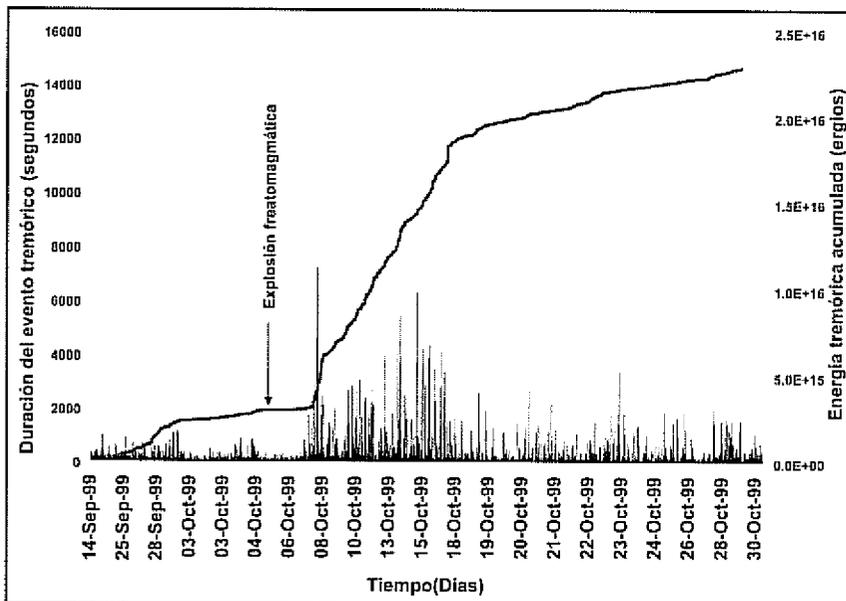


Figura 5. Representación temporal de la duración total del ciclo del tremor correlacionado con emisiones de gas y ceniza en septiembre de 1999. Aquí también se señala la primera explosión freatomagmática ocurrida al final del ciclo.

magmática por el hecho de que ésta expulsó fragmentos líticos de gran tamaño, ceniza y gran cantidad de vapor en las cercanías del cráter.

Después de ocurrida la explosión del 5 de octubre, la amplitud y duración del tremor aumentan notablemente y las frecuencias alrededor de 0.5 Hz disminuyen principalmente después del 19 de octubre. Aquí es

tremórico no fue regular posiblemente por razones de estabilización en las condiciones iniciales de generación del tremor relacionado directamente con emisiones de vapor y ceniza. Por las anteriores razones, esta etapa puede ser considerada como una transición entre la etapa freática y magmática (**condición meta-estable**) que posteriormente cambia buscando un nuevo equilibrio (**condición estable**) sobretodo después del 5 de octubre de 1999 cuando ocurre la primera explosión considerada freato-magmática. Dicha explosión se considera freato-

posible establecer dos consideraciones: en primer lugar, al producirse la primera explosión freato-magmática el sistema de conducción se destapó, hecho que se corrobora por la salida más prolongada e intermitente de fragmentos líticos (cenizas, pumita y bloques) a través de una intensa actividad tremórica y explosiones magmáticas intermitentes; de esto se presume que la presión litostática sobre la masa magmática disminuye, induciendo a esta masa a ascender buscando el equilibrio. Además la explosión debió producir una excitación sísmica

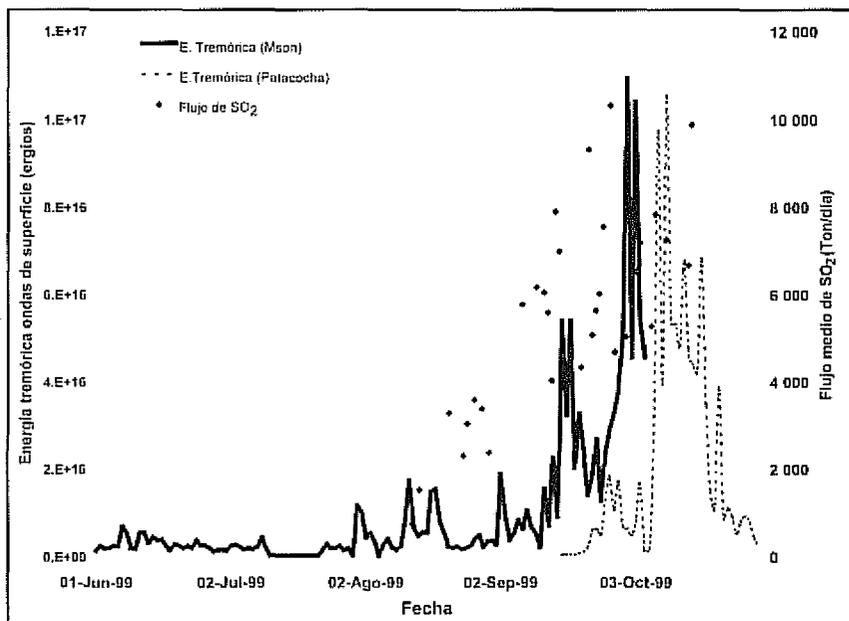


Figura 6. Variación temporal del Flujo de SO₂ (ton/día) y energía tremórica liberada. El flujo de SO₂ es medido usando la metodología del espectrómetro de correlación (COSPEC). La incertidumbre depende en la mayor parte de las velocidades de los vientos registradas. El error en el Tungurahua es asumido ser un 30% y en general en el peor de los casos un 50%. La línea continua muestra la energía tremórica liberada por el tremor de 2 Hz, mientras que la línea punteada es la energía tremórica liberada por los tremores relacionados a pulsos energéticos de gas y/o ceniza (la energía tremórica liberada por este tremor fue multiplicada por un factor de 40).

de energía nada despreciable que también pudo inducir un ascenso magmático directamente evidenciado a partir del 8 de octubre, cuando se observaron por primera vez rocas incandescentes expulsadas directamente desde el cráter.

CORRELACIONES CON OTROS FACTORES: VISUALES Y EL VALOR DE *b*

El apareamiento de las frecuencias de los grupos (a) y (c) parece indicar cambios drásticos en el sistema freático del volcán, lo que a su vez fue corroborado con un estudio del valor de *b*, ya que tales frecuencias se acentúan justo un poco antes del primer pico de *b* entre enero y febrero de 1999 (Molina I., Ruiz M., 2002c). Este hecho, más los altos desplazamientos reducidos del tremor y el incremento en el valor de *b* registrado en aquellas épocas podrían estar indicando un mayor flujo de calor, el cual fue evidenciado directamente entre tres y cinco meses más tarde con la presencia de alta actividad fumarólica tanto en mayo como en julio de 1999. A fines de julio de 1999 la actividad fumarólica continúa en niveles altos y los andinistas reportaron un fuerte olor a azufre en las cercanías del cráter. El nivel de SO₂ aumentó, de prácticamente 0 ton/día a un pico de 714 ton/día a mediados de agosto de 1999, indicando la proximidad del magma a las capas superficiales. Por otra parte, el flujo de SO₂ emitido por el volcán se encontraba cercanamente correlacionado con la actividad tremórica de esta época, es decir los valores de flujo de SO₂ medidos se encontraban rodeando los picos de energía tremórica liberada (figura 6).

Ya hacia el 14 de septiembre de 1999, el tremor vol-

cánico aumentó considerablemente su energía liberada, lo cual fue asociado a una fuente de calor cada vez más cercana. En este mismo día ocurrieron una serie de emisiones de vapor y ceniza relacionadas a la señal tremórica registrada. A partir de esa misma fecha la amplitud del tremor alcanza niveles extraordinariamente altos, provocando que el 5 de octubre las estaciones más cercanas del cráter (< 3 km de distancia) saturan su nivel de respuesta. En este mismo día después de haber ocurrido la primera explosión freatomagmática, al parecer se generó una nueva etapa de equilibrio en el volcán caracterizada por la presencia de una columna de vapor y ceniza casi constante, que se depositó en los alrededores. El día 8 de octubre se reportaron los primeros indicios de incandescencia. Con relación a las medidas de SO₂, estos valores fueron aumentando paulatinamente desde el 4 de septiembre hasta alcanzar las 10 280 ton/día el día 9 de octubre de 1999.

A partir del 13 de octubre de 1999 la energía tremórica liberada disminuye considerablemente. El nivel de SO₂ continuó en niveles altos, con una tendencia a decrecer a mediados de noviembre de 1999. Lo más característico en esta época es la actividad explosiva, de tal forma que ello fue una muestra de que el magma estaba en superficie, es decir se considera una etapa eruptiva de tipo estromboliano y vulcaniano.

CONCLUSIONES

En algunos volcanes como el Etna, la energía tremórica y la amplitud de algunos picos frecuenciales usualmente cambiaron de acuerdo con la actividad volcánica (Gresta S., Montalto A., Patané G., 1991). Asimismo en el Volcán Tungurahua aparecen nuevos picos de frecuen-

cia antes y durante el inicio de la actividad eruptiva. Según Wolfgang, B. (1991) quien observó características similares en el Ema, el apareamiento de nuevas frecuencias sería el reflejo de cambios en la velocidad del fluido y el alto grado de turbulencia durante la erupción sería reflejo del "alto desorden" que se esperaría en comparación con lo que ocurriría en etapas pre-eruptivas.

Al igual que lo ocurrido con el tremor volcánico del Merapi (Sri Brotospito, K., 1991), en el Tungurahua a pesar de que se comienzan a producir cambios importantes 2 años antes de la etapa eruptiva del volcán no fue sino entre 3 y 5 meses antes cuando se produjo un cambio significativo en la actividad visual del volcán.

La observación del tremor volcánico y señales relacionadas en volcanes como el Etna, Stromboli, St. Helens, Redoubt, Izu-Oshima, Nevado del Ruiz y Merapi han demostrado ser una herramienta importante y única que provee información sobre la dinámica interna y el mecanismo de un volcán. De esta manera el tremor constituye una señal importante que podría indicarnos cambios oportunos en los estados de actividad del Volcán Tungurahua, estados de "mayor" o "menor desorden".

REFERENCIAS

- Aki K., Fehler S, Das S , 1977. Source mechanism of volcanic tremor: fluid driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption. *J Volcanol Geotherm Res* 2, pp. 259-287.
- Banks, N., Carvajal, C., Mora, H., y Triggvason, E., 1990. Deformation monitoring at Nevado Ruiz, Colombia October 1985-March 1988. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 41, pp.269-296.
- Gresta S., Montalto A , Patané G., 1991. Volcanic tremor at Mount Etna (January 1984-March 1985): its relationship to the eruptive activity and modelling of the summit feeding system. En: *Selected Papers in Volcano Seimology at Mount Etna, 10-year edition*, Geophysical Research Group, University of Catania-Italy, pp. 279-290.
- McNutt S.R., 1992. Volcanic tremor. En: *Encyclopedia of earth system science*. vol. 4. Academic Press San Diego, pp 417-425.
- Molina I., Ruiz M., 2002a. Precursores de la actividad sísmica en el Volcán Tungurahua. En: este mismo volumen
- Molina I., Ruiz M., 2002c. Cambios temporales del valor de b: posibles correlaciones con el tremor volcánico y los cambios geoquímicos de las fuentes termales del Tungurahua. En: este mismo volumen.
- Ruiz, M., Viracucha, D., Yepes, H., Aguilar, J., Hall, M., Mothes, P., y Chatelain, J.L., 1994. Seismic activity of Tungurahua Volcano: Analysis of a long sustained tremor. En: *Asamblea Regional de Sismología en América del Sur*. Agosto 22-26, en Brasilia (Brasil), p. 114.
- Ruiz M., Hall M., Samaniego P., Ruiz G., y Villagómez D., 1999. Seismic activity in Tungurahua Volcano: correlation between tremor and precipitation rates. En: *Geodinámica Andina, Resúmenes expandidos*, En: 4th International Symposium on Andean Geodynamics 4-6. October. 1999. Göttingen, pp. 636-639.
- Viracucha, D , y Molina, I., 1999. Observaciones realizadas en la visita a la cumbre del Volcán Tungurahua en junio de 1999. Informe Interno-Instituto Geofísico y Club de Andinismo del Colegio San Gabriel, 10 p.
- Wolfgang, B., 1991. Signal characteristics of volcanic tremor during change from low to high activity. En: *Volcanic Tremor and Magma Flow*; edited by R. Schick and R. Mugiono, 1991.
- Sri Brotospito, K., 1991. Volcanic tremor observed during various stages of magma dome building activity on Merapi (Central Java, Indonesia) En: *Volcanic Tremor and Magma Flow*, edited by: R. Schick and R. Mugiono, 1991.