



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

INSTITUTO GEOFÍSICO - ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INFORME ANUAL: VOLCÁN TUNGURAHUA ACTIVIDAD DESGASIFICACIÓN EN 2012

1. Introducción

Tungurahua (1.45°S, 78.43°W, 5032m) es un estrato-volcán andesítico, ubicado en la Cordillera Real de Ecuador, a 120 kilómetros al sur de Quito que se destaca por su forma cónica, laderas empinadas y alto relieve (3200m) (Hall *et al.*, 1999). El Tungurahua es uno de los centros volcánicos más activos de los Andes Ecuatorianos. Erupciones significativas, con VEI ≥ 3 , se registraron en los años 1640, 1773, 1886 y 1918, y fueron acompañadas generalmente por fuertes explosiones, flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y caída de tefra (Hall *et al.*, 1999; Le Pennec *et al.*, 2008). En el pasado, estos productos volcánicos afectaron pequeños poblados alrededor de la base del volcán, así como la ciudad de Baños, que se encuentra a sólo 8 km de la cumbre.

Después de 80 años de inactividad, en octubre-diciembre de 1999 se inició una nueva fase de actividad con columnas de gas y ceniza de al menos 7 kilómetros de altura, lo que provocó la evacuación de 26.000 personas de Baños y otros pueblos que rodean las laderas del volcán (Tobin y Whiteford, 2002; Lane et al, 2003). Desde 1999, el Tungurahua ha experimentado una serie de ciclos eruptivos, con períodos de intensa actividad en julio-agosto de 2006, julio de 2007-febrero de 2008, enero-marzo de 2010, mayo-julio de 2010, noviembre-diciembre de 2010, abril-mayo de 2011 y noviembre-diciembre de 2011. Actividad cíclica en el volcán continuó cuando se registraron tres nuevos episodios durante el año 2012. Entre julio de 2006 y enero de 2013, 15 episodios de erupciones se han identificado en total (EE1 - EE15).

2. Instrumentación

Con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y dirigido por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) de Quito, se estableció en 2006 un proyecto de cooperación conjunta para mejorar la vigilancia sismo-acústica de la actividad del Tungurahua, a través de la instalación de una red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido (Kumagai *et al.*, 2007). La instalación se inició en Julio-Agosto de 2006, justo antes del inicio de la fase paroxísmal (Kumagai *et al.*, 2007). Para el año 2008, la red de vigilancia se había incrementado a cinco estaciones (BMAS, BPAT, BRUN, BBIL y BULB), cada una a distancias de entre 5-7 km del cráter (Fig. 1).

Cada estación consta de un sismómetro de banda ancha (Güralp CMG-40T), colocado en una base de hormigón y enterrado en la arena a una profundidad de 1-2 metros por debajo de la superficie del suelo (Kumagai *et al.*, 2010). Los sismógrafos tienen un rango de respuesta en la banda de 0.02 s a 60 s y una sensibilidad de ~ 800 V/m/s. Para la detección de ondas acústicas, se usan sensores de infrasonidos (ACO 7144/4144) con un filtro pasa bajo y una respuesta de 0,01 s a 10 s y están conectados a una torre de 1,5 m sobre el suelo (Kumagai *et al.*, 2011). Los datos sismo-acústicos son digitalizados mediante un registrador de digital de 24 bits (Geotech Smart24D), antes de transmitirlos a través de una serie de estaciones repetidoras a las oficinas del IG-EPN en Quito. Esto se logra mediante un sistema de telemetría digital con 2,4 y 5 GHz Wireless LAN, proporcionando un flujo continuo de datos en tiempo real. En la estación base de Quito, los paquetes de datos se convierten en archivos de un minuto de duración de SAC (Seismic Analysis Code) para su procesamiento y manipulación de datos.

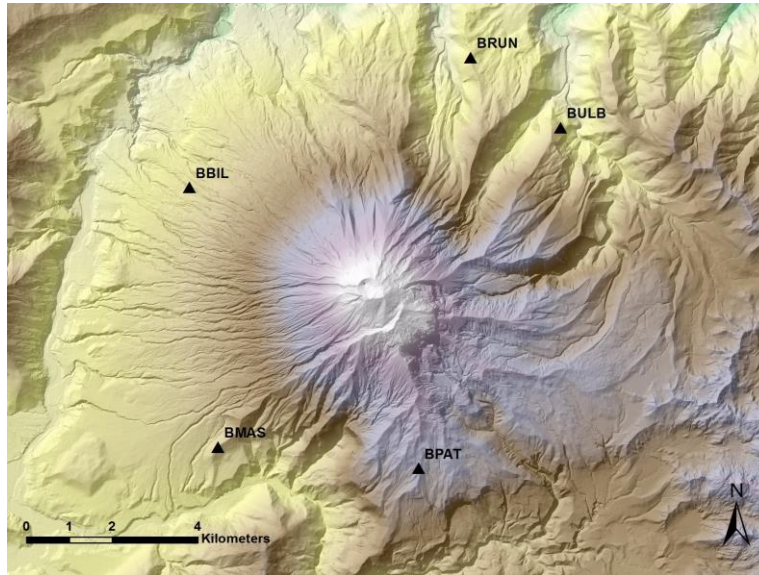


Figura 1. La red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido en el volcán Tungurahua.

3. Eventos de Desgasificación Volcánica en el Tungurahua

Desde que se instaló la red de monitoreo de JICA-Instituto Geofísico, se han reconocido diferentes señales sísmicas/infrasonido asociadas con explosiones volcánicas, tembor de emisiones, bramidos y eventos tipo chugging. Estas señales constituyen la mayoría de las señales sísmicas registradas en el Tungurahua.

Explosiones * - Las señales de infrasonido de las explosiones se caracterizan por tener un inicio muy impulsivo y una corta duración con una atenuación casi exponencial, en cambio la señal sísmica tiene generalmente un inicio emergente y una composición de bajas frecuencias similar a un evento de largo periodo. En muchos casos las señales sísmicas tienen la señal de la onda acústica inducida en el suelo (Ruiz *et al.*, 2006).

Tremor de Emisión - Tanto las ondas sísmicas como las de infrasonido tienen inicios emergentes y una larga duración. El tremor tiene generalmente una forma caótica con un amplio rango de frecuencias. Estas señales pueden durar desde algunos minutos hasta algunas horas con una evolución de la amplitud antes de regresar a sus niveles base. Las señales de tremor de emisión en el Tungurahua generalmente poseen un ruido sostenido parecido al de un motor de avión (Matoza *et al.*, 2009).

Bramidos - Estas señales tienen componentes sísmicas y de infrasonido. Se caracterizan por inicios emergentes, una duración mayor a las explosiones pero menor a las de un tremor de emisión y por amplitudes relativamente menores a las explosiones.

Eventos Tipo Chugging - Este tremor se caracteriza por la presencia de una secuencia de pulsos en los registros de infrasonido que ocurren a intervalos más o menos constantes de tiempo. Se observan generalmente una pequeña variación en estos intervalos al inicio o al final de la secuencia, aparentando un cambio en la frecuencia de la señal, lo que se conoce como "gliding". En los registros sísmicos esta señal se observa como un tremor armónico.

** Nota: Este informe sólo se centrará en los eventos de temtores de emisión, bramidos y eventos tipo chugging en el 2012. Para más información sobre las explosiones en el año 2012, por favor consulte - "INFORME ANUAL VOLCÁN TUNGURAHUA 2012 - ACTIVIDAD EXPLOSIVA".*

4. Actividad de Desgasificación Volcánica en el 2012 – Tremores de Emisión y Bramidos

Usando la actividad explosiva en Tungurahua como discriminador, 15 episodios de erupción (EE) han sido identificados entre el 14 de julio de 2006 y 21 de enero 2013 (EE1-EE15; Tabla 1). Durante estos episodios, también se han registrado otras señales de desgasificación (tremores de emisión, bramidos y eventos de tipo chugging). De éstos, los tremores de emisión se ha observado más comúnmente en el volcán junto con secuencias de explosiones. Como los bramidos son sólo una señal de duración más corta de un evento de tremores de emisión, clasificaremos los dos juntos de ahora en adelante y serán referidos solamente como tremores de emisión.

<i>Episodio de Erupción</i>	<i>Período de Erupción</i>	<i>Fuerte y/o Frecuente* Presencia de Explosiones</i>	<i>Fuerte y/o Frecuente Presencia de Tremores de Emisión y Bramidos</i>	<i>Fuerte y/o Frecuente Presencia de Eventos Tipo Chugging</i>
EE1	14 Julio 2006 – 15 Agosto 2006	✓	✓	✓
EE2	25 Febrero 2007 – 18 Abril 2007	✓	x	✓
EE3	13 Julio 2007 – 10 Febrero 2008	✓	✓	x
EE4	26 Marzo 2008 – 02 Junio 2008	✓	✓	x
EE5	29 Junio 2008 – 04 Agosto 2008	✓	✓	x
EE6	18 Diciembre 2008 – 01 Marzo 2009	✓	✓	✓
EE7	18 Abril 2009 – 27 Junio 2009	✓	✓	x
EE8	05 Enero 2010 – 19 Marzo 2010	✓	✓	✓
EE9	26 Mayo 2010 – 28 Julio 2010	✓	✓	✓
EE10	22 Noviembre 2010 – 25 Diciembre 2010	✓	✓	x
EE11	22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011	✓	✓	✓
EE12	27 Noviembre 2011 – 08 Diciembre 2011	✓	✓	x
EE13	22 Diciembre 2011 – 25 Mayo 2012	✓	✓	x
EE14	10 Junio 2012 – 04 Septiembre 2012	✓	✓	x
EE15	14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013	✓	✓	✓

Tabla 1. Episodios de erupción en el volcán Tungurahua (14 de julio 2006 – 21 de enero 2013; EE1-EE15) basados en actividad explosiva. La presencia de otras señales de desgasificación (tremores de emisión, bramidos y eventos tipo chugging) también se muestran. * Frecuente se entiende aquí como sucediendo más de 10 veces en un episodio de erupción.

Tremores de emisión se observaron en todo el año 2012 en los tres episodios de erupción (EE13-EE15). Los períodos de temor fueron muy variables en cuanto a la duración y la liberación de energía. Señales registradas mostraron eventos que van desde unos pocos minutos hasta varias horas de duración, mientras que los valores de energía sismo-acústicas fluctuaron en varios órdenes de magnitud entre los eventos. Señales con inicios emergentes y estructura en forma de onda caótica son características comunes (Fig. 2), así como un decaimiento lento de la amplitud a los niveles de fondo. La mayoría de la energía se concentró por debajo de 5 Hz, en general, aunque variaciones de frecuencia fueron comunes a través de una secuencia de tembor.

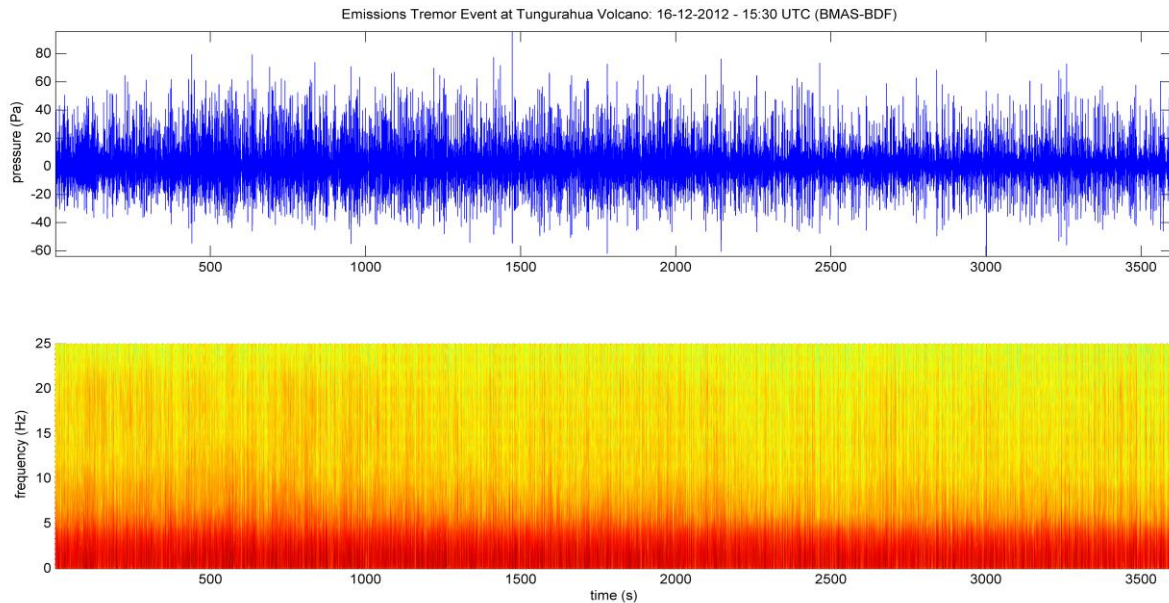


Figura 2. Evento de tremor de emisión en el volcán Tungurahua (16 de diciembre 2012, 15:30 - 16:30 UTC; EE15). Superior: Forma de onda acústica; Inferior: Espectrograma de forma de onda acústica. Estación BMAS.

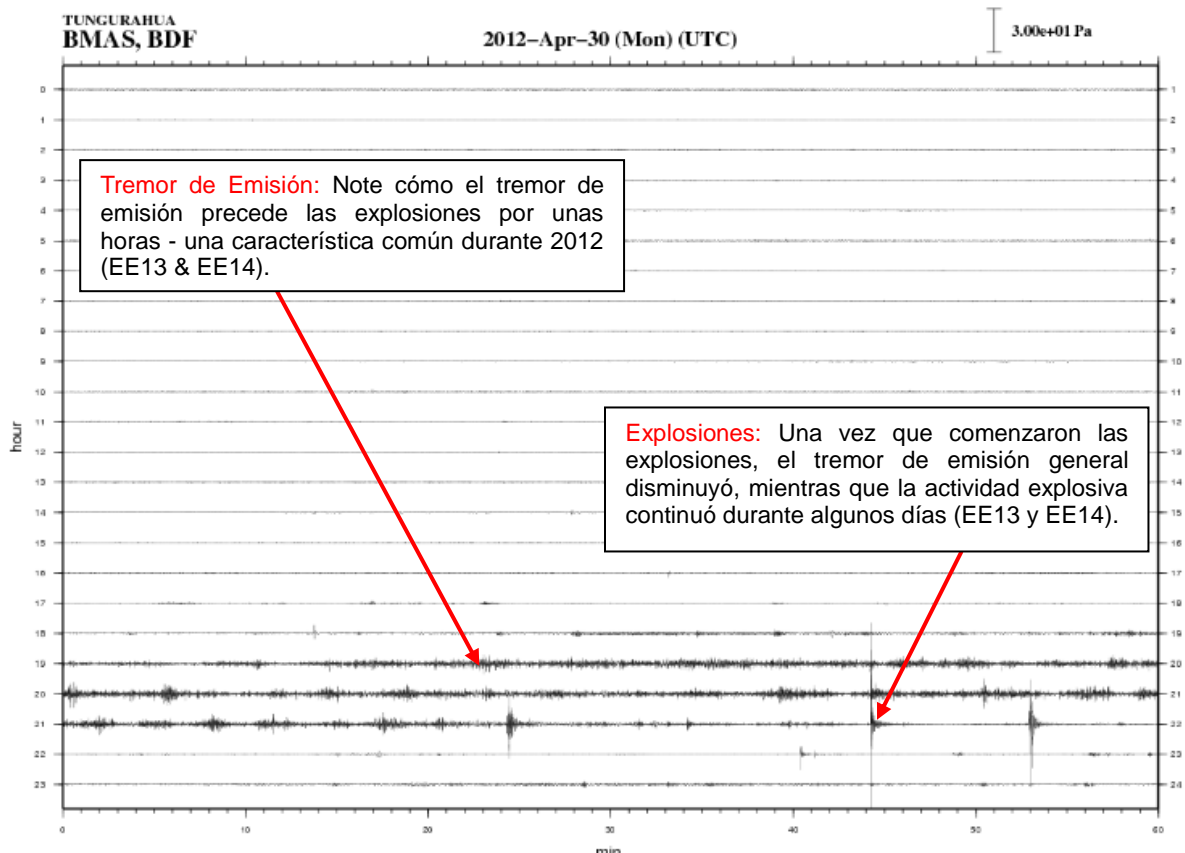


Figura 3. Drumplot diario de actividad acústica en el volcán Tungurahua, 30 de abril 2012 (EE13). Note cómo el tremores de emisión precede las explosiones por unas horas - una característica común durante EE13 y EE14. Estación BMAS-BDF.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Durante la mayoría de 2012 (EE13 y EE14), los períodos de tremores de emisión aparecieron generalmente, un día, hasta unas pocas horas antes del inicio de la actividad explosiva (Fig. 3) y/o durante los primeros pocos días de actividad explosiva. Esto fue particularmente evidente en EE13, entre el 22 de diciembre 2011 y el 25 de mayo 2012, con señales de tremores de emisión que aparecen esporádicamente en el tiempo. Estos tremores siguieron la distribución temporal de las explosiones, que también aparecieron irregularmente durante el EE13, una tendencia anómala de actividad explosiva en Tungurahua. En algunas ocasiones aisladas períodos de tremores de emisión estaban presentes sin la siguiente aparición de explosiones y viceversa.

EE15 (14 de diciembre 2012 – 21 de enero 2013) mostraron una alteración en la actividad eruptiva y en la distribución de las tremores de emisión. Se encontró que la actividad en EE15 fue estadísticamente similar a EE9 (mayo – julio, 2010), en el que se observó la siguiente secuencia de eventos:

- **Etapas 1** - Actividad comenzó después de más de 3 meses de reposo.
- **Etapas 2** - La inflación y el aumento de VTs conducen al inicio de una explosión de alta energía.
- **Etapas 3** - Después de aproximadamente 48 horas de reposo explosiones de alta energía fueron seguidas por tremores de emisión fuertes (Fig. 4), generación de una columna eruptiva y flujos piroclásticos, con una duración de varias horas.
- **Etapas 4** – Se registró una alta tasa de eventos explosivos ($> 40/\text{día}$), con una duración de aproximadamente 5 a 7 días. Las explosiones fueron acompañadas por señales de chugging y períodos esporádicos de tremores de emisión, pero de energía más bajo.
- **Etapas 5** – El fin de las señales chugging coincide con un rápido descenso en el número de explosiones y en la energía sismo-acústica radiada. Los tremores de emisión declina igualmente antes de parar por completo, casi un mes antes de la terminación de explosiones.

Durante el EE15, los tremores de emisión no precedieron actividad explosiva. Después de la presencia de una explosión de alta energía en el 14 de diciembre de 2012 (Etapas 2), seguido de 48 horas de reposo, más explosiones y tremores de emisión fuerte se observó el 16 de diciembre de 2012 (Etapas 3). Amplitudes altas de tremores de emisión en radiación acústica y sísmica ocurrieron entre 12:30 - 20:30 UTC, con una duración de aproximadamente ~ 8 horas en total. Fue durante este tiempo que las más altas energías sismo-acústicas se registraron de tremores de emisión en el volcán Tungurahua durante el año 2012. Después de 16 diciembre, los tremores de emisión aparecieron esporádicamente en los siguientes días, aunque los valores de energía son considerablemente más bajos que el temblor generado el 16 de diciembre. Los tremores de emisión terminaron por completo el 28 de diciembre, casi un mes antes del final de las señales de explosión.

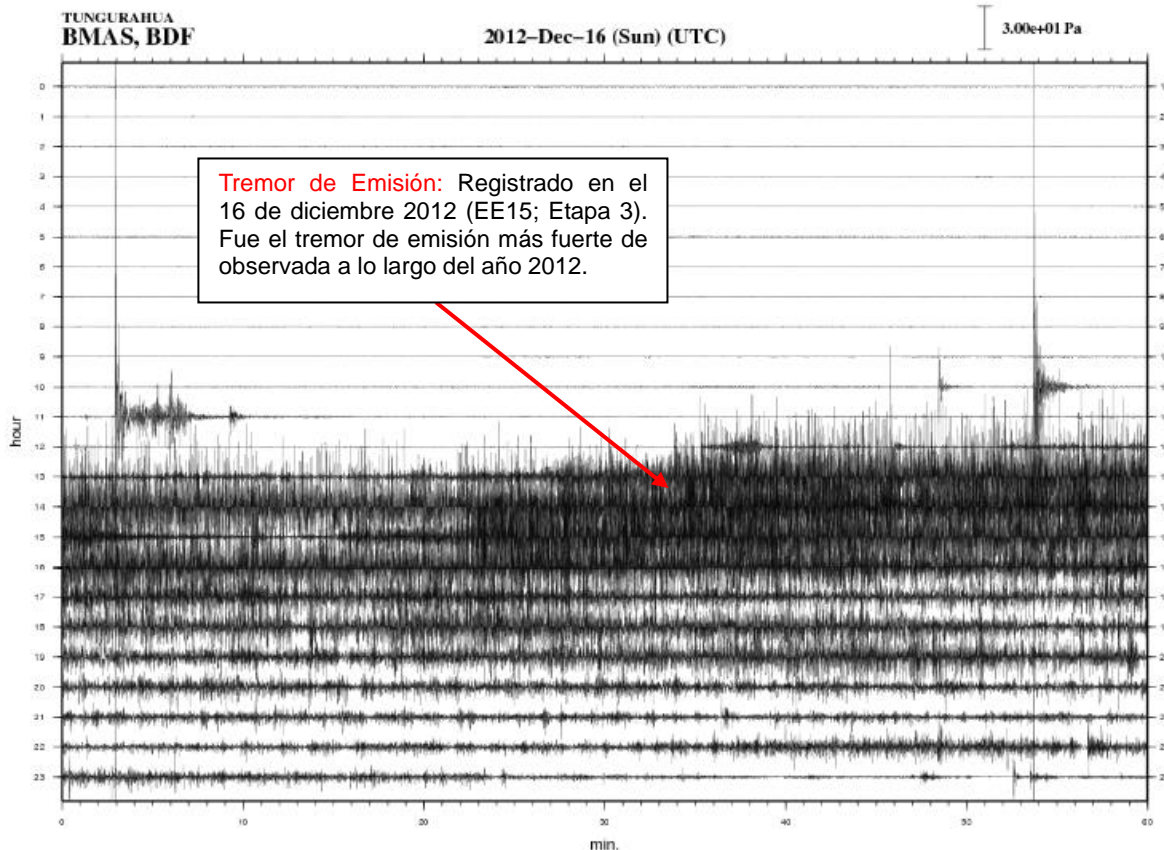


Figura 4. Drumplot diario de actividad acústica en el volcán Tungurahua, 16 de diciembre 2012 (EE15). Note el tremor de emisión fuerte tras dos explosiones de alta energía (Etapa 3). Estación BMAS-BDF.

Por cada día que el tremor de emisión estuvo presente a través de 2012 (EE13 - EE15), una ventana de tiempo de 10 minutos se identificó basado en el pico diario de amplitudes sismo-acústica de eventos de tremores y fue analizada. Energías elásticas sísmicas y acústicas para estas amplitudes máximas (de 10 minutos) fueron calculados en cuatro estaciones alrededor del volcán - BMAS, BPAT, BRUN y BBIL. Para eliminar parcialmente el efecto de sitio en los cálculos de energía, un valor de energía sísmica y acústica promedio se obtiene entre las estaciones. La figura 5 muestra el pico amplitudes sísmicas y acústicas (10 minutos) diaria para eventos de tremor de emisiones en 2012 (EE13-EE15). La amplitud promedio o media (entre estaciones) se usa en el gráfico. Como se estaba utilizando una ventana de 10 minutos, bramidos más cortos en duración no se utilizan aquí.

En general, la energía acústica era aproximadamente 1-2 órdenes de magnitud mayor que la energía sísmica para eventos de tremores de emisión correspondientes. Esto se observa de manera similar en relaciones de energía sismo-acústicos de explosiones en Tungurahua también, que típicamente muestran que la energía acústica es de 1-3 órdenes de magnitud mayor que la parte de energía sísmica. La radiación de energía entre los componentes sísmicos y acústicos mostró una coherencia en la distribución temporal entre los eventos tremores secuenciales, de tal manera que, el aumento de la energía acústica corresponde con el aumento de la energía sísmica y por el contrario, la disminución de la energía acústica se registró junto con la disminución de la energía sísmica para eventos correspondientes.

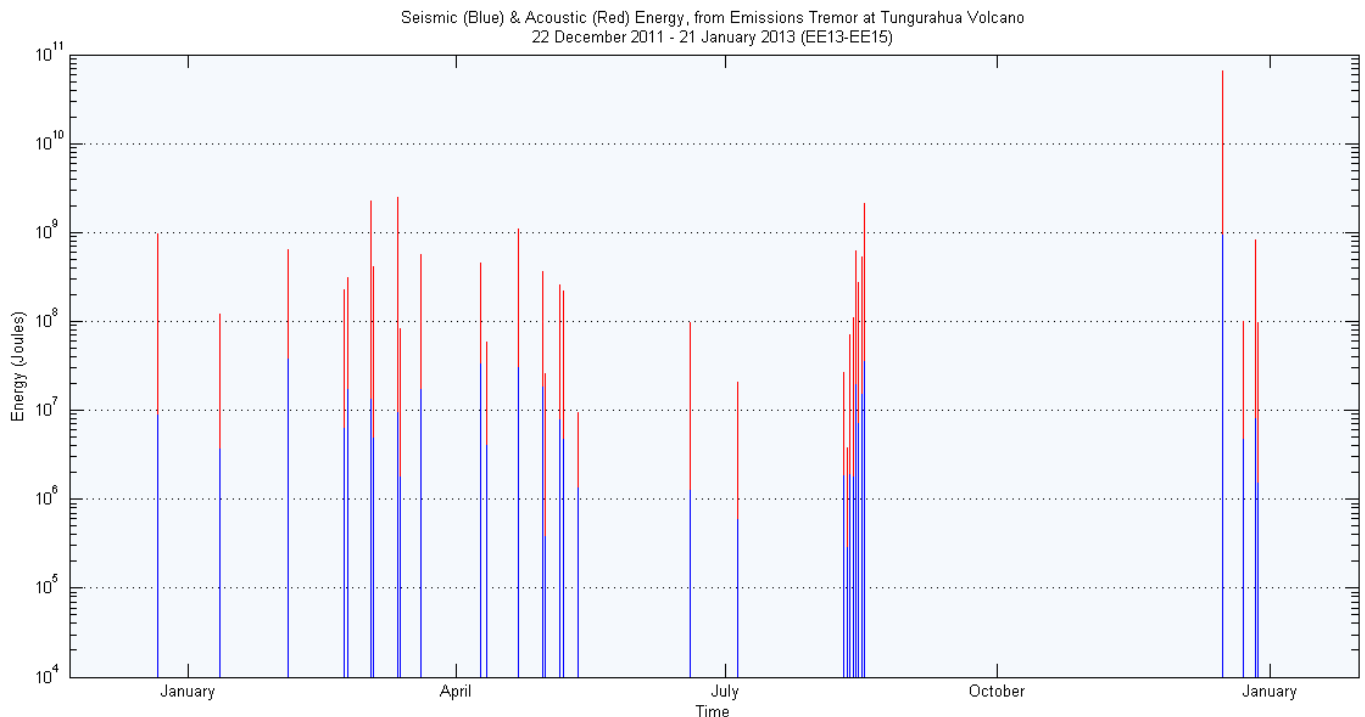


Figura 5. Energía diaria sísmica (azul) y acústica (roja) de eventos de temblores de emisión en el volcán Tungurahua (energía pico, 10-minutos), 22 de diciembre 2011- 21 de enero 2013 (EE13 - EE15). Promedio de estaciones.

En general, la energía acústica de las señales de temblores de emisión (10 minutos del máximo de intensidad) fluctuó en todo el año entre $1 \times 10^1 - 1 \times 10^3$ MJ ($1 \times 10^7 - 1 \times 10^9$ J). Se observa un incremento notablemente superior en energía acústica el 16 de Diciembre de 2012 (EE15). Después de una explosión de alta energía seguido de 48 horas de reposo, un gran temblor de emisión comenzó el 16 de diciembre de 2012 y la energía acústica alcanzó un pico que fue más de un orden de magnitud mayor que cualquier otro temblor de emisiones registrado durante el año 2012 ($\approx 6,6 \times 10^{10}$ J). Las amplitudes (y la energía) de las explosiones fueron inusualmente altos también durante este tiempo con una explosión, también el 16 de diciembre de 2012, alcanzando ~ 3976 Pa. Después de este período de actividad altamente energética, temblores de emisiones aparecieron esporádicamente en las próximas semanas y con los niveles de energía acústica disminuidos ($< 1 \times 10^9$ J), valores que se observaron con mayor frecuencia en todo el año 2012. La energía sísmica varía típicamente entre 1×10^6 a 1×10^8 J, con el pico máximo de la energía sísmica también el 16 de diciembre de 2012, con un valor de $\sim 9,3 \times 10^8$ J.

En términos de actividad de desgasificación, EE9 y EE15 parecen ser muy similares. El 28 de julio de 2010, un fuerte temblor de emisiones apareció después de seguir una secuencia de una explosión grande y ~ 48 horas de reposo. En el temblor de emisión del 28 de Julio de 2010 se produjo una energía acústica de $\sim 1,4 \times 10^{11}$ J y una liberación de energía sísmica de $\sim 3,7 \times 10^9$ J (ventana de pico de 10 minutos); la energía de temblor más alta registrada en el episodio eruptivo correspondiente. Esto refleja la secuencia de la desgasificación de EE15 de manera casi idéntica.

5. Actividad de Desgasificación Volcánica en el 2012 – Chugging

Eventos tipo chugging durante el año 2012 se limitaron principalmente a EE15 (14 diciembre 2012 hasta 21 enero 2013). Se observó una potencial señal chugging más temprano del año, el 12 de abril de 2012. El chugging duró unos 45 minutos, después de una explosión significativa (160 Pa, Estación BMAS) a las 20:42 (UTC). Explosiones más pequeñas (<15 Pa) aparecen entre los períodos de chugging durante los 45 minutos que duró entre 20:44 - 21:30 (UTC).

De todos los episodios de erupción registrada en el Tungurahua desde julio de 2006, EE9 (mayo - julio 2010) ha demostrado la gran mayoría de las señales de tipo chugging. Sin embargo, durante EE15 (14 diciembre 2012 hasta 21 enero 2013), de nuevo apareció fuerte chugging. Curiosamente, el episodio mostró una secuencia de las explosiones (y chugging) que refleja la actividad de EE9 (ver sección 4), probablemente debido a un mecanismo de erupción similar.

Después de una serie de explosiones de alta energía, tremores de emisión fuerte y la generación de flujos piroclásticos, la actividad continuó en el 17 de diciembre con el inicio de ~ 34 explosiones importantes. La mayoría de estas fueron seguidas por secuencias de chugging de amplitudes y duraciones diferentes (Fig. 6). Esta alta tasa diaria de eventos de las secuencias explosión-chugging continuó hasta el 20 de diciembre 2012. En una manera similar a EE9, el número de explosiones diario comenzó a declinar rápidamente después de algunos días, de una manera casi exponencial, y habían desaparecido casi por completo alrededor de un mes después de que comenzó el ciclo de erupción.

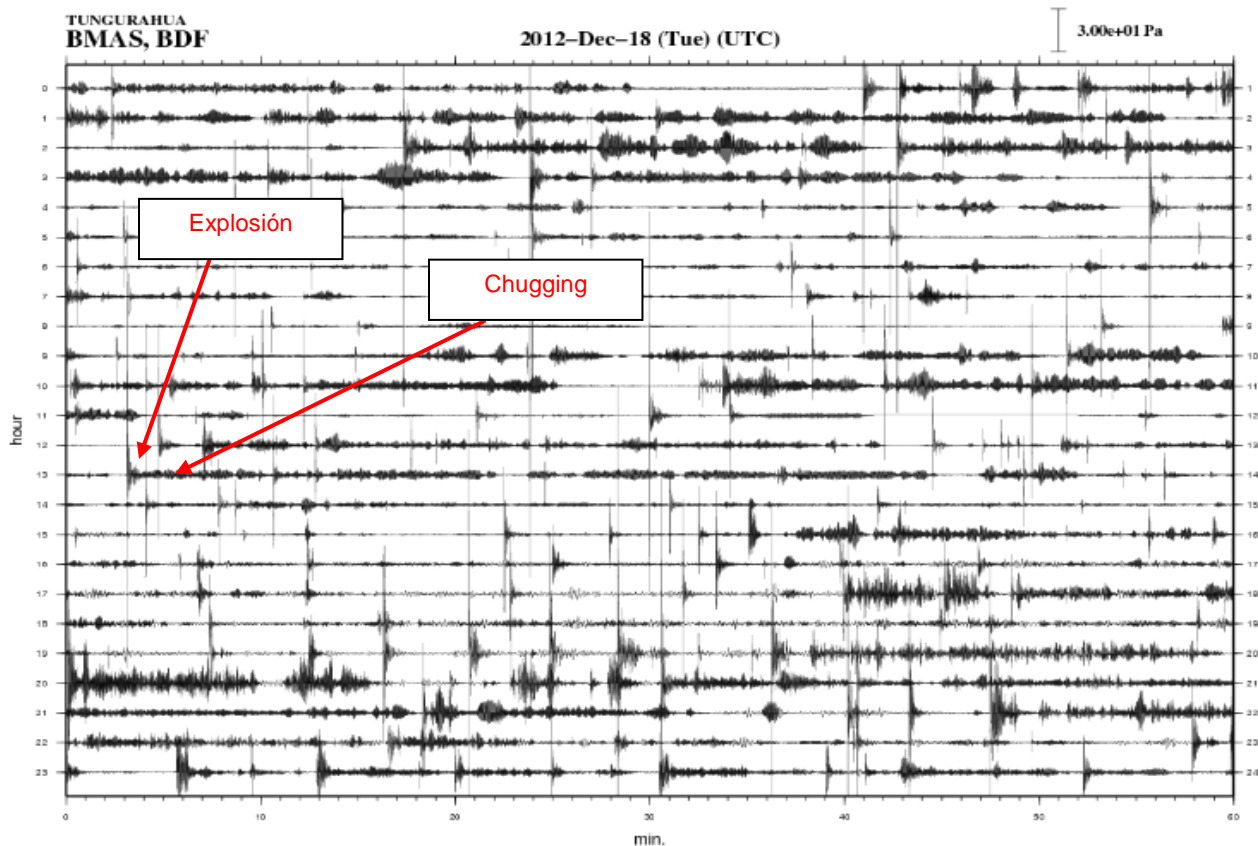


Figura 6. Drumplot diario de actividad acústica en el volcán Tungurahua, 17 de diciembre 2012 (EE15). Note la tasa de eventos de las explosiones y la secuencia común de explosión-chugging. Estación BMAS-BDF.

Durante EE15 (y en 2012 como un todo) los eventos de chugging estuvieron confinados principalmente a un período de 5 días, entre el 17 y la 21 de diciembre del 2012. Durante ese tiempo > 80 secuencias chugging fueron identificadas con señales que duraron desde unos minutos hasta una hora de duración. Típicamente, un pulso es representativo de un “chug”, pero en realidad la regularidad de un conjunto de estos latidos forma una serie o secuencia de chugging - como se observa en señales de chugging registradas en diciembre de 2012 (Fig. 7). Las amplitudes sísmicas y acústicas de secuencias chugging fueron generalmente pequeñas, con mayor cantidad de energía concentrada en la banda de 1-5 Hz (Fig. 7B).

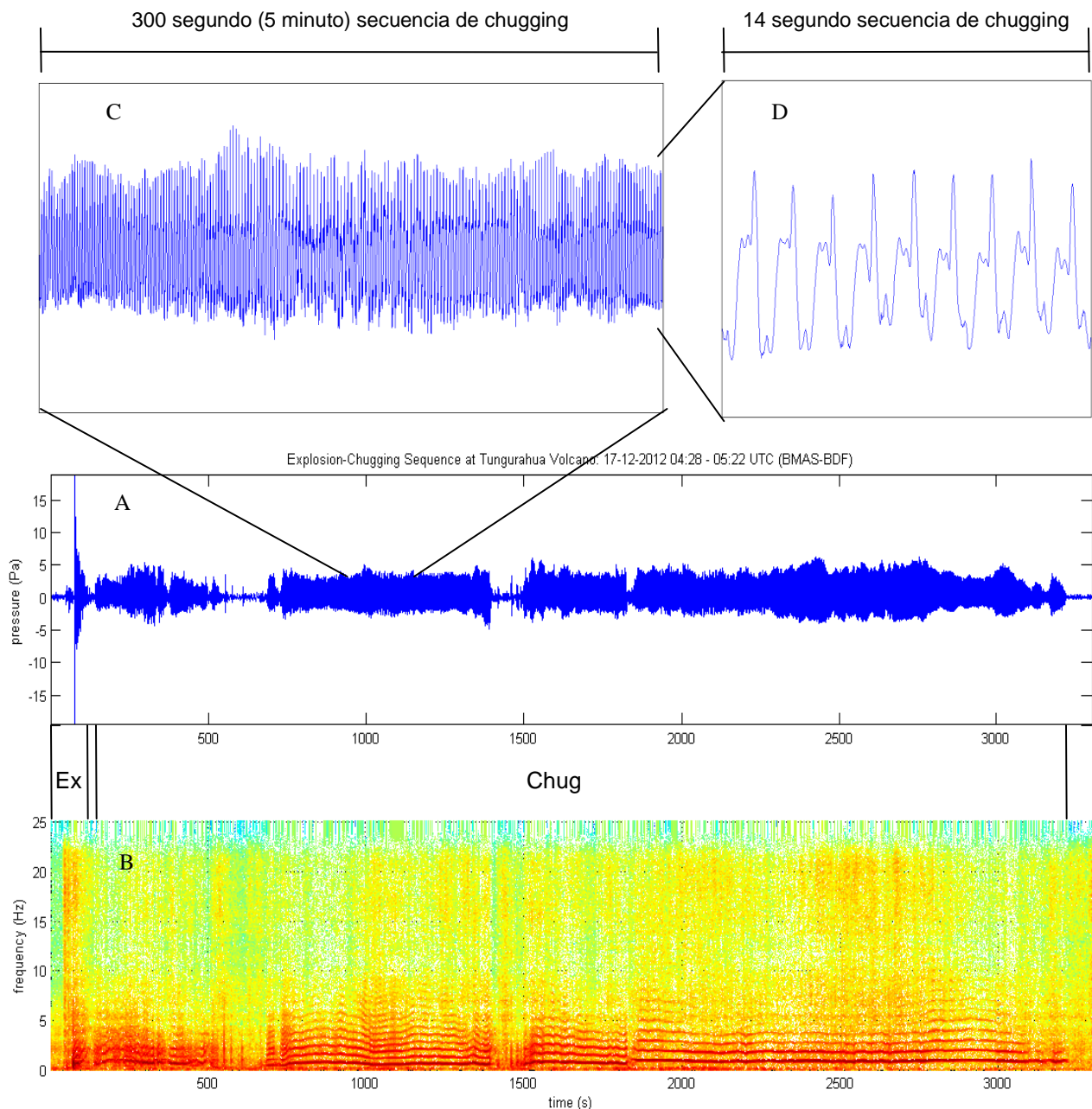


Figura 7. Forma de onda acústica (A) y espectrograma (B) de una secuencia explosión-chugging en el volcán Tungurahua, 17 de diciembre 2012 (04h28 – 05h22, UTC), mostrando tremor armónico. Un zoom en la sección de la secuencia chugging (C) mostrando un poco más de 200 chugs individuales dentro una ventana de tiempo de 300 segundos (5 minutos). Una amplificación mayor en la sección de la secuencia de chugging (D) muestra una serie de impulsos de chugging en la forma de dientes de sierra.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Los eventos de chugging aparecieron como una señal de tremor armónico en espectrogramas de frecuencia (Fig. 7A y B). En la componente de infrasonido aparecieron en forma de pulsos acústicos habituales que a menudo eran audibles a los residentes locales y los científicos de IG - que suenan como el traqueteo (chugging) de un tren locomotora. De las formas de onda chugging analizadas (en acústica), la compresión (individual) de pulsos “chug” estuvieron espaciados con un intervalo de tiempo generalmente entre 1 y 2 segundos. Por ejemplo, en la figura 7C, la cual muestra una secuencia de chugging de 300 segundos, se identificaron un poco más de 200 chugs individuales, y en la figura 7D, 9 pulsos de chugging se registraron en una ventana de tiempo de 14 segundos. Picos individuales mostraron estructura en forma de dientes de sierra (Fig. 7D), una característica común de chugging en Tungurahua y en otros volcanes de todo el mundo (Ruiz *et al.*, 2006). Esta estructura de diente de sierra no se identificó en los registros sísmicos, que mostraron señales de inicio más emergentes y pulsos menos distinguibles. No hubo señal acústica acoplada a la tierra lo cual es claro en los registros sísmicos.

Las secuencias de chugging también aparecieron intermitentemente en ocasiones, con tiempos de reposo que duran de uno a varios minutos antes de que la secuencia de chugging reinicie. Johnson & Lees (2000) sugieren que ese fenómeno es debido probablemente a que la geometría y/o la geoquímica del proceso es variable en escalas de tiempo cortas. La mayoría de los eventos chugging siguen el inicio de una señal de explosión.

Tanto en EE9 y en EE15 prevemos que la explosión muy grande de la Etapa 2 no fue capaz de destruir totalmente el viejo tapón viscoso de magma bloqueando del conducto. Por consiguiente, el chugging que se produjo durante la Etapa 4 se relaciona con un fenómeno resonante en las secciones superiores del conducto debido a la liberación de gas a través de este bloqueo parcial, que actúa como una válvula después de cada explosión inicial de desgasificación. El gas que se escapa a través de este sistema de conducto parcialmente bloqueado constituye por lo tanto, el tremor armónico (chugging) observado. Después de algunos días, continuó desgasificación volcánica que en última instancia, destruyó el tapón viscoso completamente, y que se destaca por un fin a las secuencias de chugging más no de la desgasificación (en forma de explosiones).

6. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) de subvención ~ PIN-08-EPN-6E0F-00001. Damos las gracias a Hiroyuki Kumagai y todos de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), que junto con el Instituto Geofísico (IG-EPN) han ayudado a implementar y mantener la red sismo-acústica - JICA-IGEPN. Gracias también a Hugo Ortiz, Pablo Palacios, Jeffery Johnson, Branden Christensen y Anna Marie Stewart.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

7. Referencias

- Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P. & Monzier, M., 1999. Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **91**, 1-21.
- Johnson, J. B. & Lees, J. M., 2000. Plugs and chugs – seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **101**, 67-82.
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P., Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I. & Yamashima, T., 2010. Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches. *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08303, doi:10.1029/2010JB006889.
- Kumagai, H., Palacios, P., Ruiz, M., Yepes, H. & Kozono, T., 2011. Ascending seismic source during an explosive eruption at Tungurahua volcano, Ecuador. *Geophysical Research Letters*, **38**, L01306, doi:10.1029/2010GL045944.
- Kumagai, H., Yepes, H., Vaca, M., Caceres, V., Nagai, T., Yokoe, K., Imai, T., Miyakawa, K., Yamashina, T., Arrais, S., Vasconez, F., Pinajota, E., Garcia-Aristizabal, A., Molina, I., Ramon, P., Segovia, M., Palacios, P., Troncoso, L., Alvarado, A., Aguilar, J., Pozo, J., Enriquez, W., Mothes, P., Hall, M., Inoue, I., Nakano, M. & Inoue, H., 2007. Enhancing volcano-monitoring capabilities in Ecuador. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **88**(23), 245-252.
- Lane, L. R., Tobin, G. A. & Whiteford, L.M., 2003. Volcanic hazard or economic destitution: hard choices in Baños, Ecuador. *Environmental Hazards*, **5**, 23-34.
- Le Pennec, J. L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramon., Moreno Yanez, S., Egred, J. & Van Der Plicht, J., 2008. The AD 1300-1700 eruptive periods at Tungurahua Volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **176**, 70-81.
- Ruiz, M. C., Lees, J. M. & Johnson, J. B., 2006. Source constraints of Tungurahua Volcano explosion events. *Bulletin of Volcanology*, **68**, 480-490.
- Tobin, G. A. & Whiteford, L. M., 2002. Community resilience and volcano hazard: The eruption of Tungurahua and evacuation of the Faldas in Ecuador. *Disasters*, **26**(1), 28-48.

AS/MR/JA
INSTITUTO GEOFISICO
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL