



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

INSTITUTO GEOFÍSICO - ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INFORME ANUAL: VOLCÁN TUNGURAHUA ACTIVIDAD EXPLOSIVA EN 2011

1. Introducción

El 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. 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 con erupciones importantes ($VEI \geq 3$) en los años 1640, 1773, 1886 y 1918, las cuales fueron generalmente produjeron explosiones, fuentes de lava, caídas de ceniza, lahares y ocasionalmente por flujos piroclásticos (Hall *et al.*, 1999; Le Pennec *et al.*, 2008). Después de 80 años de inactividad, en Octubre de 1999 se inició una nueva fase de actividad con explosiones que generaron 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, Febrero de 2008, Enero-Marzo de 2010, Mayo-Julio de 2010, Noviembre-Diciembre de 2010, Abril-Mayo de 2011 y Noviembre-Diciembre de 2011.

2. Instrumentación

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional conjuntamente con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) llevaron a cabo un proyecto de cooperación para mejorar la vigilancia sismo-acústica de la actividad volcánica del Tungurahua, a través de despliegue 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 paroxística (Kumagai *et al.*, 2007). Desde el 2008, la red de vigilancia cuenta con cinco estaciones (BMAS, BPAT, BRUN, BBIL y BULB), con 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 a una profundidad de 1-2 metros (Kumagai *et al.*, 2010). Los sismógrafos tienen un rango de respuesta en la banda de 60 s-50 Hz y una sensibilidad de $\sim 800 \text{ V / m / s}$. Para la detección de ondas acústicas, se usan sensores de infrasonidos (ACO 7144/4144) con una respuesta de 0,1 s a 100 Hz 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 digital de 24 bits (Geotech Smart24D), antes de transmitirlos a través de una serie de estaciones repetidoras al IG-EPN en Quito.

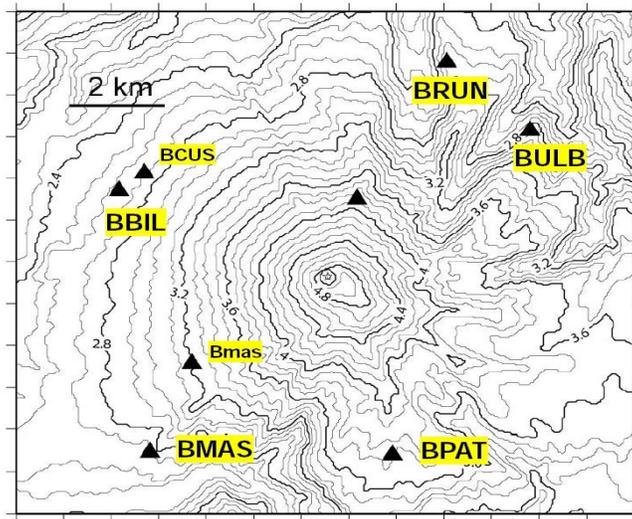


Fig. 1 La red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido en el Volcán Tungurahua.

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 e infrasonido) asociadas con explosiones volcánicas, eventos tipo chugging, tremor de emisiones y bramidos. Estas señales constituyen la mayoría de las señales sismo-acústicas registradas en el Tungurahua.

Explosiones * - Las explosiones se caracterizan por una partición de su energía en la fuente, con una parte propagándose por la tierra como ondas sísmicas y otra propagándose por la atmósfera como pulsos acústicos (McNutt, 1999). 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 una componente inducida en el suelo debido a la señal de la onda acústica (Ruiz *et al.*, 2006).

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 observa 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.

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 algunas horas con una evolución de la amplitud antes de regresar a sus niveles de base. Las señales de tremor de emisión en el Tungurahua generalmente poseen un ruido sostenido parecido al motor de un avión (Matoza *et al.*, 2009).

Bramidos - Estas señales tienen componentes sísmicos y de infrasonido. Se caracterizan por inicios emergentes, una duración mayor a las explosiones y por amplitudes relativamente menores a las explosiones.

De estos, las explosiones tienen la mayor frecuencia de ocurrencia, especialmente durante períodos de actividad.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

4. Actividad Explosiva – 2011

Durante el año de 2011, se registraron dos fases de la actividad explosiva en el Volcán Tungurahua: Abril-Mayo y Noviembre-Diciembre (Fig. 2). En cada uno de dos períodos de actividad, se calculó una distribución de frecuencia-magnitud (FMD) para poner de relieve la relación entre el número de eventos explosivos con sus magnitudes proxy (los valores de presión acústica). Esta tendencia de tipo ley de potencia se expresa a partir de la ecuación presentada por Gutenberg y Richter:

$$\text{Log } N = a - bM$$

donde N es el número de eventos con magnitud igual o mayor de M , y a y b son constantes. Mientras que por lo general, los valores de b se considera que fluctúan alrededor de ~ 1 para las distribuciones de los sismos, en zonas con actividad volcánica se observan a menudo valores de b más altos (Wiemer y McNutt, 1997). Esta característica es asociada a la alta heterogeneidad de las rocas y a fuertes gradientes térmicos presentes en zonas volcánicas, lo que causa un mayor grado de fracturamiento a pequeña escala. Las tendencias de esta distribución en cada fase de la actividad resultó ser relativamente consistentes, cada una mostrando una tendencia a la ley de potencia con un valor aproximado de la pendiente de b que fluctuó alrededor de ~ 2 . Estos valores son comparables con los registrados en otros periodos de actividad entre el 2006 y el 2011, donde los valores aproximados están en el rango de 1.5 a 3.5. Pequeñas desviaciones en el valor de b entre las fases de los periodos de actividad están asociadas con pequeños cambios en las condiciones volcánicas.

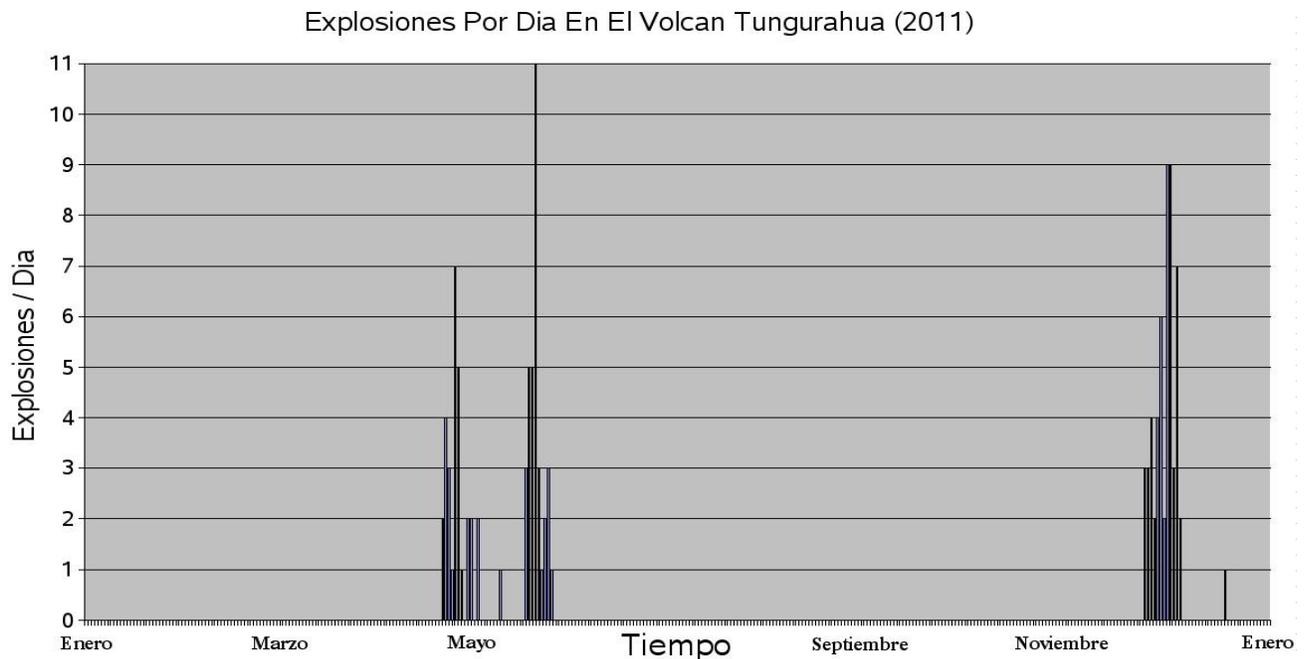


Fig. 2 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (2011).



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Se utilizó el coeficiente de variación (C_v), para determinar el grado de agrupamiento entre los eventos. El C_v está dado por la ecuación:

$$C_v = \sigma / \mu$$

donde σ es la desviación estándar y μ es el tiempo medio entre las explosiones. Si el $C_v = 1$, entonces el proceso es de tipo Poisson y los eventos pueden ser tratados como distribuidos al azar a través del tiempo, mientras que si el C_v es > 1 , entonces el proceso es generalmente controlado por grupos. Cada período de actividad en 2011 produjo valores de $C_v > 2$ (Fig. 3), lo que indica que hubo una agrupación de explosiones con el tiempo. Entre los años de 2006 y 2011, cada período de actividad produjo valores de C_v generalmente entre 2 y 5. El período de actividad entre Mayo y Julio de 2010 sin embargo, mostró un coeficiente de variación anormalmente grande en comparación con otros períodos de inestabilidad (entre 2006 y 2011), lo que sugiere un cambio en el mecanismo de erupción durante este periodo.

El índice de la relación acústica-sísmica (VASR) permite reconocer la relación entre la energía que se propaga a través de la Tierra (sísmica) y la energía que se propaga a través de la atmósfera (energía acústica). Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre 1-1000 (Fig. 4), con un alto grado de dispersión de VASR, lo cual a menudo es registrado en estratovolcanes andesíticos (Varley *et al.*, 2006). En el Tungurahua en general se han encontrado altos valores de VASR que indican que una mayor proporción de energía se propaga en forma acústica y sugieren que las explosiones se iniciaron por lo general a poca profundidad en el conducto y probablemente a través de conducto abierto. En el 2011, algunas explosiones mostraron valores pequeños en las fases iniciales de cada periodo de actividad, lo que indicó que el viento tenía un taponamiento más eficiente así como sugirió que las explosiones fueron disparadas desde niveles más profundos dentro del conducto. Una actividad continua de desgasificación eventualmente limpió el tapón, elevando los valores del VASR en las etapas subsiguientes de cada ciclo de actividad al mismo tiempo que las explosiones se registraban a profundidades más someras dentro del conducto. Esta secuencia de valores bajos a altos del VASR a lo largo de un periodo de actividad es observada a menudo en el volcán Tungurahua.

Episodio de erupción	Número de episodio de erupción	Número de explosiones	Tiempo promedio entre explosiones (minutos)	Coeficiente de variación
14 Julio 2006 – 16 Agosto 2006	EE1	118	380	4.29
25 Febrero 2007 – 18 Abril 2007	EE2	366	198	2.57
13 Julio 2007 – 10 Febrero 2008	EE3	1165	244	2.93
26 Marzo 2008 – 27 Junio 2009	EE4	822	620	4.62
05 Enero 2010 – 19 Marzo 2010	EE5	502	154	3.36
26 Mayo 2010 – 28 Julio 2010	EE6	1331	62	13.71
22 Noviembre 2010 – 25 Diciembre 2010	EE7	110	376	1.72
22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011	EE8	64	712	2.37
27 Noviembre 2011 – 22 Diciembre 2011	EE9	55	629	4.27

Fig. 3 Tabla de datos explosiones en el Volcán Tungurahua, para cada uno de los períodos de actividad entre 2006 y 2011. Esto incluye los valores del coeficiente de variación (C_v). Los períodos de actividad del 2011 se muestran en color rojo.

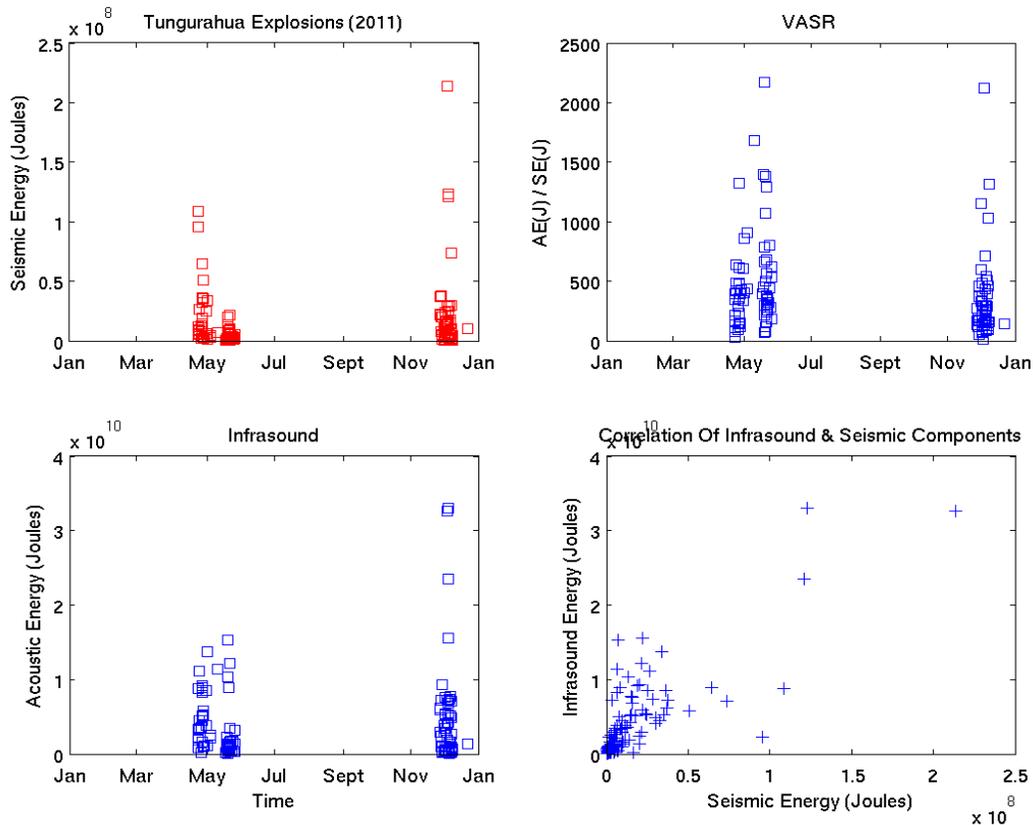


Fig. 4 Distribución temporal de las energía liberada a través del subsuelo (ondas sísmicas: panel superior izquierdo) y a través de la atmósfera (ondas infrasonido: panel inferior izquierdo). En el panel superior derecho se muestra la evolución temporal de la relación entre las energías acústicas y sísmicas (VASR: Índice Volcánico Acústico Sísmico). El panel inferior derecho muestra la distribución de la energía acústica con respecto a la cantidad de energía sísmica liberada.

4.1. 22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011

Después de algunos meses de reposo, la actividad volcánica se reinició en 22 de Abril del 2011 (Fig. 5). La primera explosión discreta de este periodo (> 45 Pa en la traza acústica BMAS) se registró a 20:12 (UTC). Desde el 22 de Abril, el número diario de explosiones continuó creciendo hasta 26 de Abril, con siete eventos. En los días siguientes, el número de explosiones comenzó a disminuir, hasta el 3 de Mayo. Una explosión se registró el 10 de Mayo, poco antes de que la actividad aparezca nuevamente el 18 de Mayo con tres eventos. La tasa de eventos diarios alcanzó su punto máximo en el 21 de Mayo con 11 eventos. Después de esta fecha, el número de explosiones comenzó a disminuir de manera constante otra vez hasta que la actividad prácticamente terminó el 26 de Mayo del 2011. En todo el episodio de un mes de duración, se registraron 64 explosiones con un promedio diario de solo 2 explosiones. Se observó una distribución en la tasa de explosión eventos de tipo Gaussiano, pero dividida en dos partes separadas a lo largo del episodio. Ambas partes muestran una curva de distribución típica en forma de campana.

Explosiones Por Dia En El Volcan Tungurahua (22 Abril 2011 - 26 Mayo 2011)

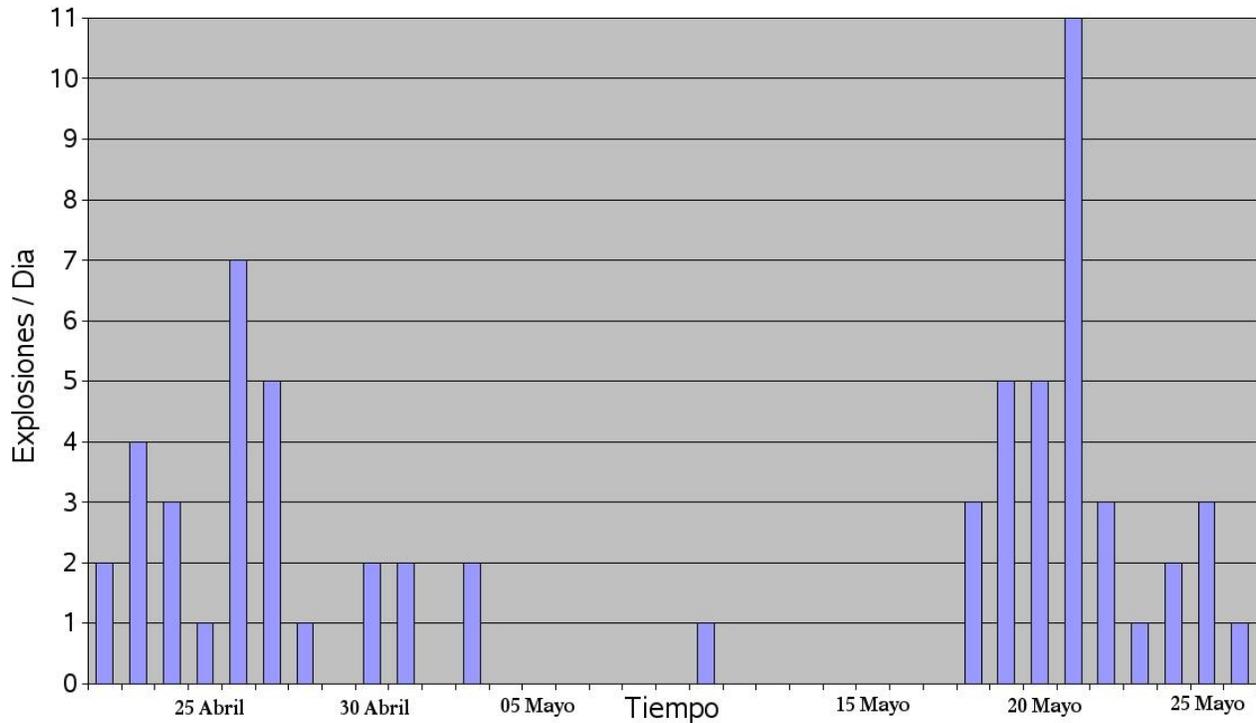


Fig. 5 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011).

Junto con un incremento en la tasa diaria de eventos, durante el episodio de explosiones, se notó un incremento en las amplitudes diarias tanto sísmicas como acústicas. Durante la primera semana, la energía sísmica y acústica alcanzó un pico el 26 de Abril, produciendo un valor de presión acumulativa (estación BRUN) de ~ 547 Pa (Energía $\sim 159 \times 10^{10}$ Joules). Los valores de energía diaria acumulativa decrecieron posteriormente, siguiendo a una disminución en la tasa diaria de eventos. Los valores nuevamente alcanzaron un pico el 21 de Mayo con una amplitud acumulativa diaria de ~ 623 Pa (Energía $\sim 137 \times 10^{10}$ Joules) y un valor diario de desplazamiento reducido de ~ 682 cm². Los valores declinaron nuevamente al final del ciclo eruptivo. Los valores promedio diarios de los parámetros sísmicos y acústicos fueron generalmente consistentes a lo largo del periodo, aunque se presentaron esporádicamente algunos valores más altos.

Los valores del índice VASR a lo largo de todo el periodo generalmente se ubicó entre 1 y 1000 (Fig. 6), lo cual es típico en el volcán Tungurahua. Estos altos valores de VASR están asociados con una alta componente acústica en la composición de la energía, posiblemente debido a que las explosiones se originan a profundidades someras dentro del conducto volcánico.

También se calculó una distribución de la frecuencia de las magnitudes, a través de todo el período produciendo una tendencia de ley de potencia con un proxy *b*-pendiente valor de $\sim 2,04$ (Fig. 7), y el coeficiente de variación (Cv) de los eventos tipo explosión durante el ciclo activo fue de $\sim 2,37$, mostrando una fuerte agrupación de eventos con el tiempo.

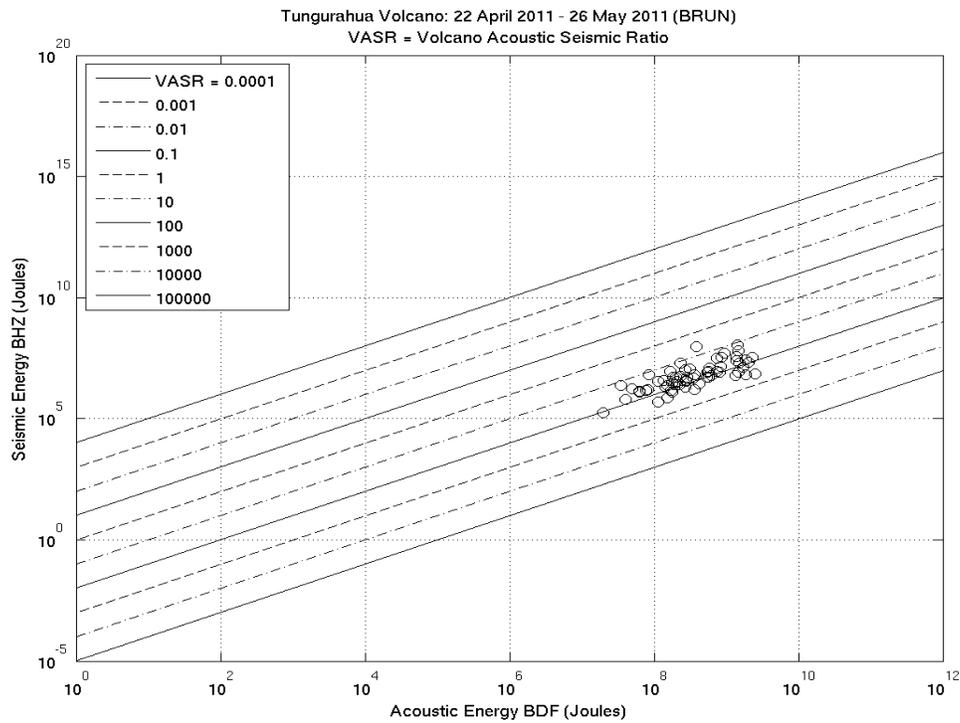


Fig. 6 Gráfico del índice de la relación acústica-sísmica (VASR) en el Volcán Tungurahua (22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011). Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre 1-1000.

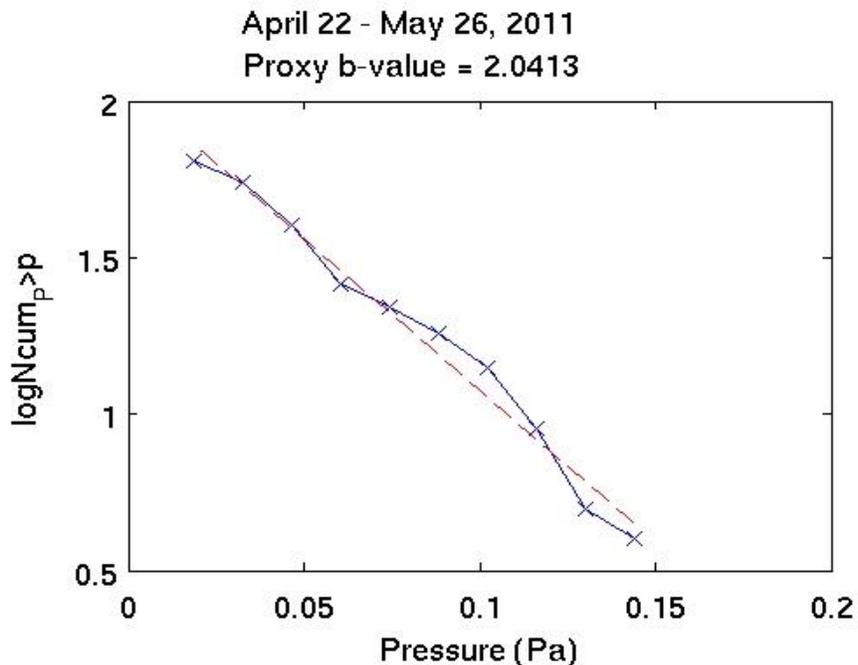


Fig. 7 Distribución de frecuencia-magnitud (FMD) para poner de relieve la relación entre el número de eventos explosivos con sus magnitudes proxy. Periodo de actividad entre 22 Abril, 2011 y 26 Mayo, 2011. Un proxy del valor de la pendiente b (pendiente) para este periodo produjo un valor de $\sim 2,04$.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

4.2. 27 Noviembre 2011 – 22 Diciembre 2011

El 27 de Noviembre, el volcán Tungurahua reanudó su actividad con tres explosiones. La actividad se incrementó con una elevación de la tasa de diaria de eventos (Fig. 8). En el 4 y 5 de Diciembre, el número diario de eventos alcanzó un máximo con 9 eventos en los dos días. Posteriormente, el número de eventos disminuyó rápidamente antes de que la actividad cese completamente el 8 de Diciembre. Con una fase explosiva de solo 12 días de duración, se registraron 55 explosiones, con un promedio de 5 explosiones por día.

Las energías acumulativas diarias tanto sísmica como acústica generalmente mostraron una distribución similar a la tasa de sismos, con un máximo alcanzado el 4 de Diciembre. Los valores diarios de presión acústica acumulada (estación BRUN) (Fig. 9) alcanzaron ~ 1169 Pa (Energía ~ 501×10^{10} Joules), y los valores diarios de la energía sísmica acumulada también fueron anormalmente grandes para este episodio. Los promedios diarios de energía sísmica y acústica también fueron particularmente grandes el 4 de Diciembre, sugiriendo que la energía acumulativa total en esta fecha no fue el resultado de una alta tasa de eventos.

Se encontró un valor de C_v de ~ 4.27, el cual es consistente en forma general con los otros periodos de actividad en el Tungurahua. Un proxy de b encontrado de la distribución de la ocurrencia de magnitudes tiene un valor de 1.83. Este valor del proxy de b es levemente más pequeño en los dos periodos de actividad del 2011 que en los otros periodos de actividad de los últimos 5 años, posiblemente debido a que el conducto estaba bloqueado o cerrado durante las recientes fases de actividad.

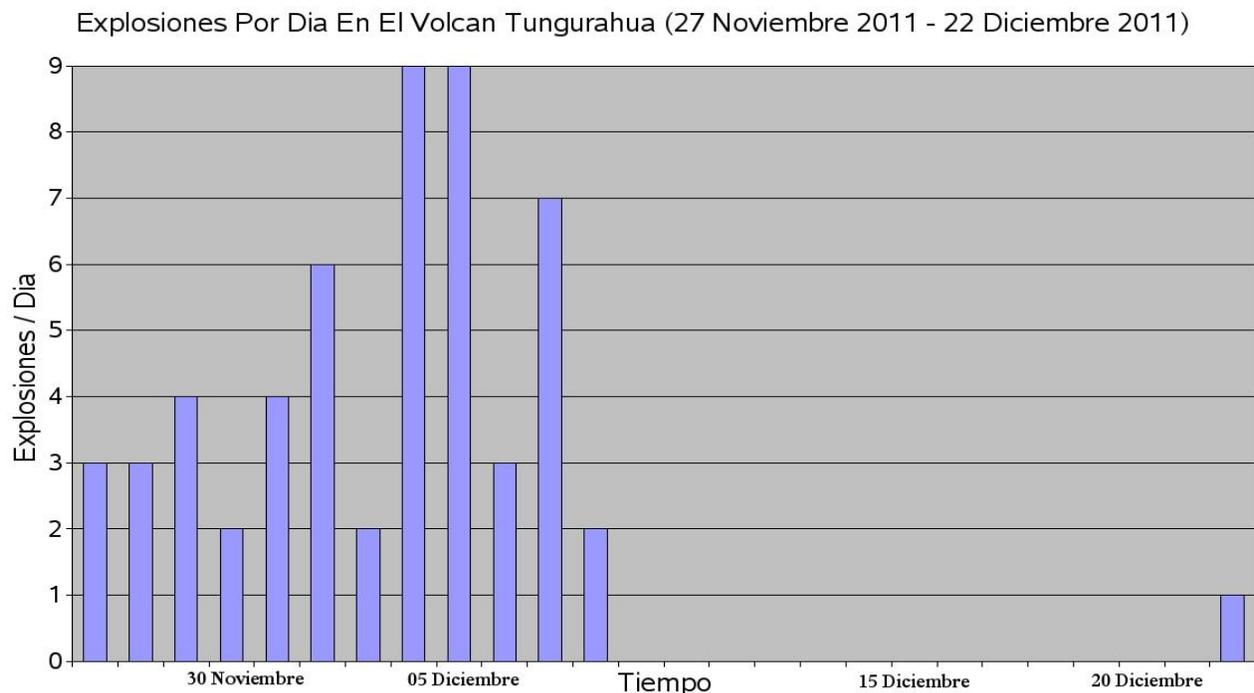


Fig. 8 Número diario de explosiones en el Volcán Tungurahua (27 Noviembre 2011 – 22 Diciembre 2011).

Total Acoustic Amplitude (Pascals) Per Day At Tungurahua Volcano
27 November - 22 December, 2011

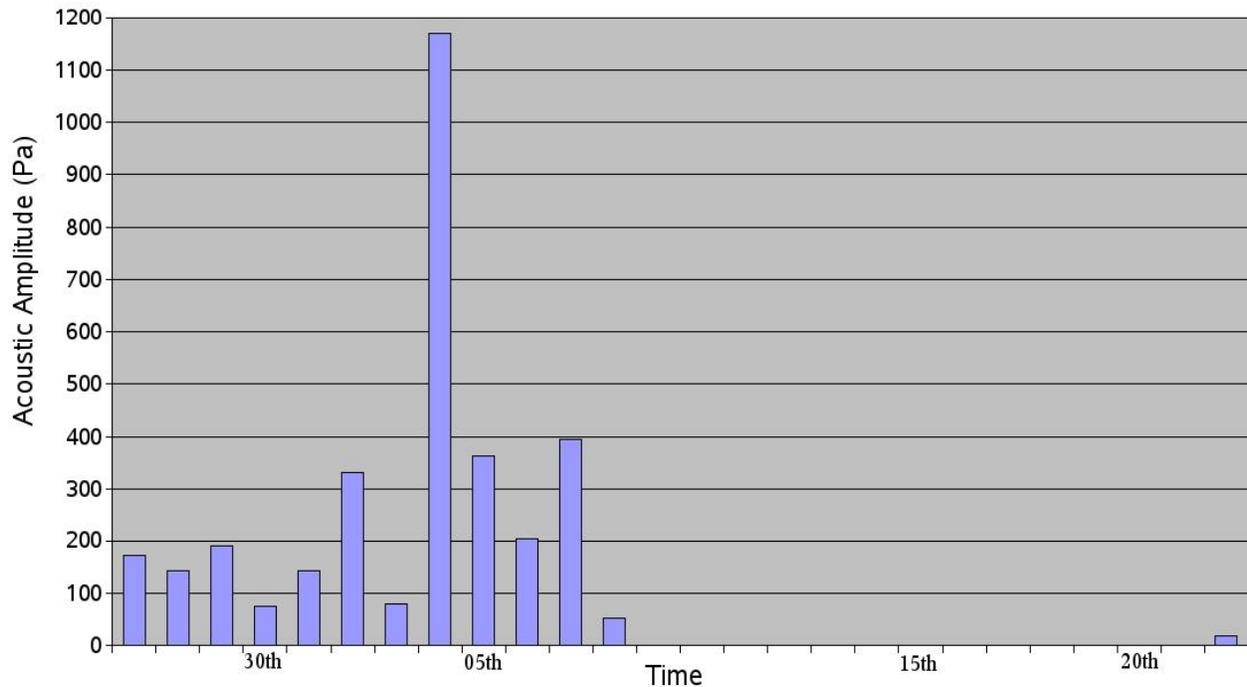


Fig. 9 La presión acústica (Pa) acumulada diario en el Volcán Tungurahua (27 Noviembre 2011 – 22 Diciembre 2011).

Durante el periodo de actividad de Noviembre-Diciembre, los valores del índice VASR de las explosiones mostraron una fuerte variación, desde los valores bajos a altos conforme avanzaba la actividad. Esto también fue observado en Abril-Mayo (2011) y durante otros periodos de actividad de este volcán, pero en este último periodo de reactivación, los resultados mostraron fuertemente esta tendencia (Fig. 10). Es posible que un conducto inicialmente taponado fuerce a tener explosiones generadas a niveles más profundos dentro del conducto y bajo un sistema volcánico más cerrado. Esto produce una serie de explosiones con valores del VASR como los señalados por la flecha negra de la Fig. 10. Estas explosiones se registraron en los estados iniciales de los episodios eruptivos. Al continuar la desgasificación, el viento se vuelve más abierto, permitiendo que las burbujas de gas asciendan sin perturbaciones hacia la superficie y subsecuentemente originando explosiones a niveles muy superficiales, o posiblemente en la superficie misma. Estas explosiones con una componente acústica más alta provocaron un incremento en los valores del VASR (línea de tendencia marcada por la flecha roja en la Fig. 10).

Conforme continuó el proceso eruptivo, los valores de VASR siguieron ascendiendo y culminaron el 4 de Diciembre con explosiones grandes que tenían altos componentes de energía acústica. Durante este día, los observadores de la zona describieron a la actividad como altamente superficial, con grandes cantidades de gases y ceniza. Los valores del índice VASR de las explosiones están de acuerdo con estas observaciones.

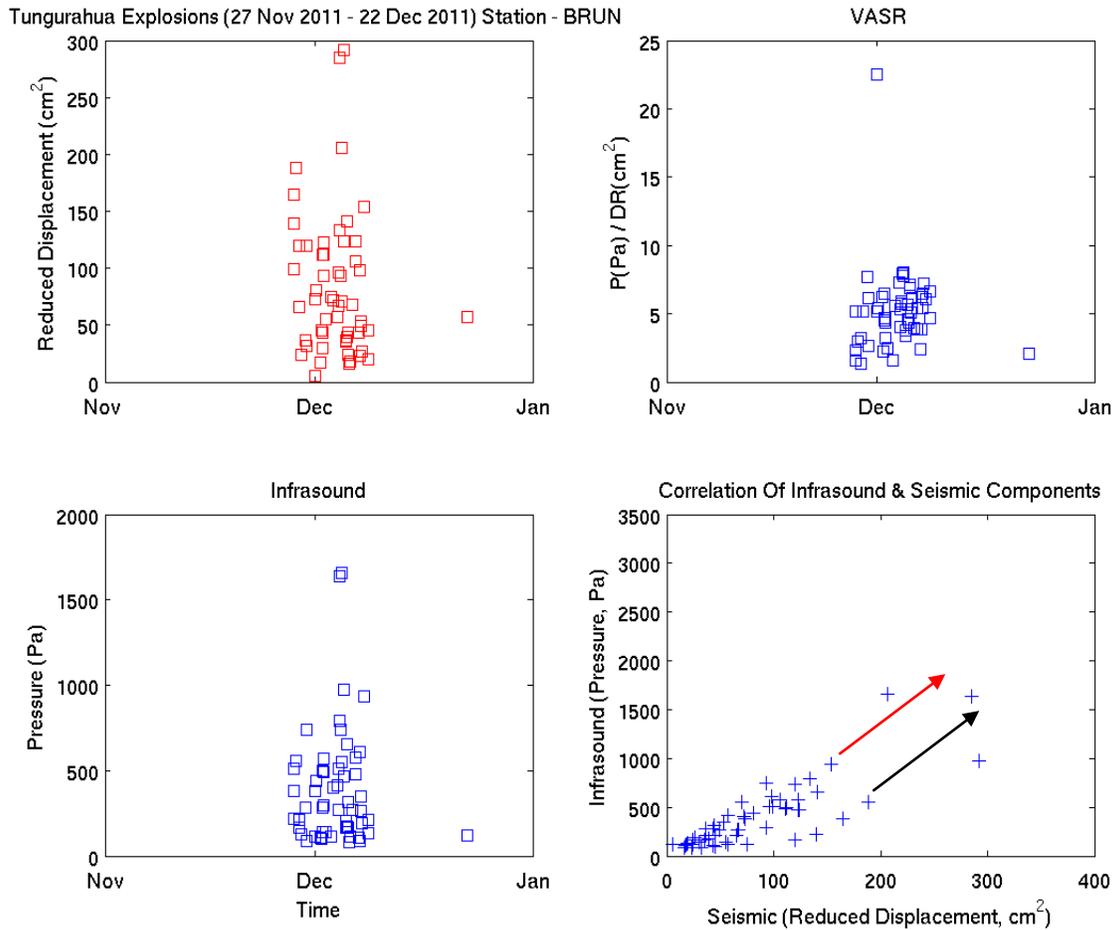


Fig. 10 Distribución temporal de los desplazamiento reducido sísmica a través del subsuelo (ondas sísmicas: panel superior izquierdo) y presión acústica reducida a través de la atmosfera (ondas infrasonido: panel inferior izquierdo). En el panel superior derecho se muestra la evolución temporal de la relación entre el desplazamiento reducido sísmica y la presión acústica reducida. En el panel inferior derecho muestra la distribución de la presión acústica reducida con respecto a la cantidad de desplazamiento reducido sísmica liberada.



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

5. 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.

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.

McNutt, S. R., 1999. Volcanic Seismicity. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J. (eds), 1999. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1015-1033.

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.

Varley, N., Johnson, J., Ruiz, M., Reyes, G. & Martin, K., 2006. Applying Statistical Analysis to Understanding the Dynamics of Volcanic Explosions. In: Mader, H. M., Coles, S. G., Connor, C. B. & Connor, L. J. (eds), 2006. *Statistics in Volcanology*. Special Publications of IAVCEI, **1**. Geological Society, London, 57-76.

AS/MR
INSTITUTO GEOFISICO
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL