



INSTITUTO GEOFISICO ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

INSTITUTO GEOFÍSICO - ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INFORME ANUAL: VOLCÁN TUNGURAHUA ACTIVIDAD EXPLOSIVA 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 población 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 episodios eruptivos (EE), 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.

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 paroxística (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 a 1,5 m sobre el suelo (Kumagai *et al.*, 2011). Los datos sismo-acústicos son digitalizados mediante un digitalizador 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.

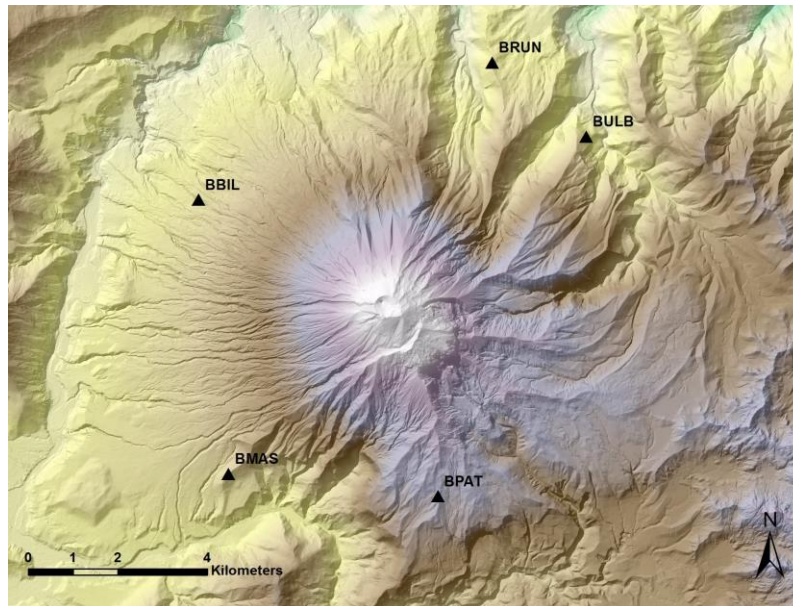


Figura 1. La red de sensores sísmicos de banda ancha e infrasonido en el volcán Tungurahua.

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 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 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.

** Nota: Este informe sólo se centrará en la actividad explosiva en 2012. Para más información sobre eventos de tipo chugging, tremor de emisión y bramidos en el año 2012, por favor consulte - "INFORME ANUAL VOLCÁN TUNGURAHUA 2012 - ACTIVIDAD DESGASIFICACIÓN".*

4. Actividad Explosiva Volcánica – 2012

Durante el año de 2012, se registraron tres fases de la actividad explosiva en el volcán Tungurahua: 22 de Diciembre del 2011 – 25 de Mayo del 2012 (EE13), 10 de Junio del 2012 – 04 de Septiembre del 2012 (EE14) y 14 de Diciembre del 2012 – 21 de Enero del 2013 (EE15; Fig. 2). En cada uno de tres períodos de actividad, se calculó una distribución de frecuencia-amplitud (FAD) 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. Pequeñas desviaciones en el valor de b entre las fases de los periodos de actividad están asociadas con pequeños cambios en las condiciones volcánicas.

Las tendencias de esta distribución en cada fase de la actividad resultaron ser relativamente consistentes, cada una mostrando una tendencia a la ley de potencia con un valor aproximado de la pendiente de b que fluctuó entre ~ 1.68 y 2.09 . Estos valores son comparables con los registrados en otros episodios de actividad en el Tungurahua, con un rango generalmente entre ~ 1 a 4 .

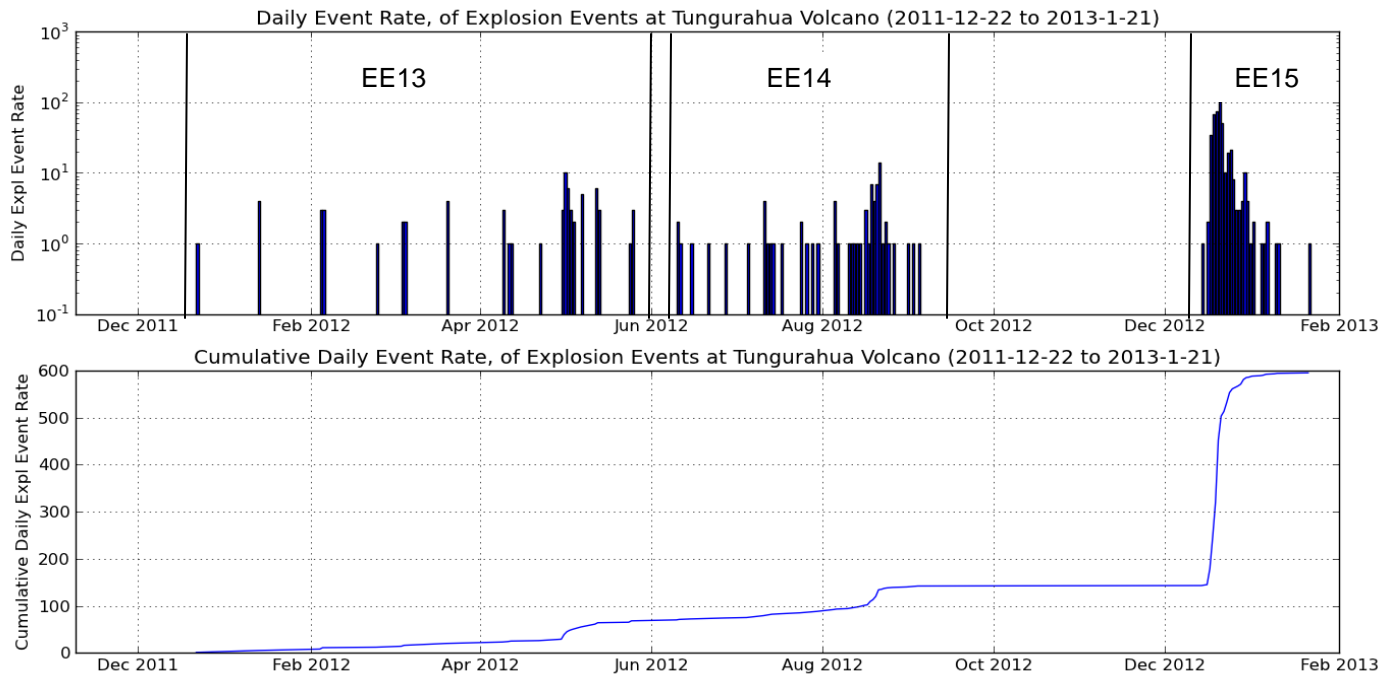


Figura 2. Número diario de explosiones (panel superior) y número diario acumulado de explosiones (panel inferior) en el volcán Tungurahua, 2012 (EE13 – EE15).



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 μ es el tiempo medio entre las explosiones y σ es la desviación estándar de estos tiempos.

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 se da por grupos. Cada período de actividad en 2012 produjo valores de $C_v > 1.5$ (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 1 y 6. El período de actividad entre Mayo y Julio de 2010 (EE9) sin embargo, mostró un coeficiente de variación anormalmente grande ($C_v = 13.15$) en comparación con otros períodos de inestabilidad (entre 2006 y 2011), lo que sugiere un cambio en el mecanismo de erupción durante este periodo. En 2012, EE13 y EE14 produjeron valores de C_v entre 1 y 6, como es común en Tungurahua. Sin embargo, la actividad en Diciembre de 2012 (EE15) produjo un $C_v = \sim 6,89$. Este es el segundo más grande coeficiente después de la actividad en Mayo-Julio de 2010. La tendencia temporal en explosiones durante EE9 y EE15 también se encontró muy similar y por lo tanto es probable que el mecanismo de erupción durante estas dos fases de actividad haya sido probablemente similar.

El índice de la relación acústica-sísmica (VASR) permite reconocer la relación entre la energía que se propaga a través de la tierra (energía sísmica) y la energía que se propaga a través de la atmosfera (energía acústica). Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre ~ 1 y 100 (BRUN), con un alto grado de dispersión de VASR, lo cual a menudo es registrado en estratovolcanes andesíticos. 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 del conducto abierto.

Episodio de erupción	Número de episodio de erupción	Número de explosiones	Tiempo promedio entre explosiones (minutos)	Coefficiente de variación
14 Julio 2006 – 16 Agosto 2006	EE1	121	374	4.35
25 Febrero 2007 – 18 Abril 2007	EE2	367	208	2.55
13 Julio 2007 – 10 Febrero 2008	EE3	1160	263	2.76
26 Marzo 2008 – 02 Junio 2008	EE4	131	759	1.72
29 Junio 2008 – 04 Agosto 2008	EE5	104	507	2.27
18 Diciembre 2008 – 01 Marzo 2009	EE6	377	281	2.96
18 Abril 2009 – 27 Junio 2009	EE7	212	475	1.38
05 Enero 2010 – 19 Marzo 2010	EE8	521	203	5.74
26 Mayo 2010 – 28 Julio 2010	EE9	1352	67	13.15
22 Noviembre 2010 – 25 Diciembre 2010	EE10	111	431	1.84
22 Abril 2011 – 26 Mayo 2011	EE11	64	761	2.40
27 Noviembre 2011 – 08 Diciembre 2011	EE12	52	302	1.16
22 Diciembre 2011 – 25 Mayo 2012	EE13	68	3331	2.35
10 Junio 2012 – 04 Septiembre 2012	EE14	74	1703	1.59
14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013	EE15	453	119	6.89

Figura 3. Tabla de datos explosiones en el volcán Tungurahua, para cada uno de los períodos de actividad entre 2006 y 2012. Esto incluye los valores del coeficiente de variación (C_v).

A menudo, durante períodos de actividad explosiva en el Tungurahua, el VASR cambia de bajo a alto VASR y lo relacionamos con un conducto obstruido que finalmente se despejó como producto de la desgasificación explosiva continua. Esta tendencia se observa con mayor fuerza durante EE9, entre Mayo y Julio de 2010. Los valores en la VASR durante 2012 generalmente oscilaron entre ~ 1 y 100 (Fig. 4), como es común en el volcán Tungurahua. Sin embargo, durante la primera parte del EE15, los valores de la VASR eran a menudo <1 antes de que se detecte un cambio hacia valores de VASR más altos (1-100) mientras la actividad continuaba. Esta fuerte tendencia de menor a mayor VASR visto en EE15 nuevamente destaca similitudes significativas entre este período de actividad y la actividad de EE9.

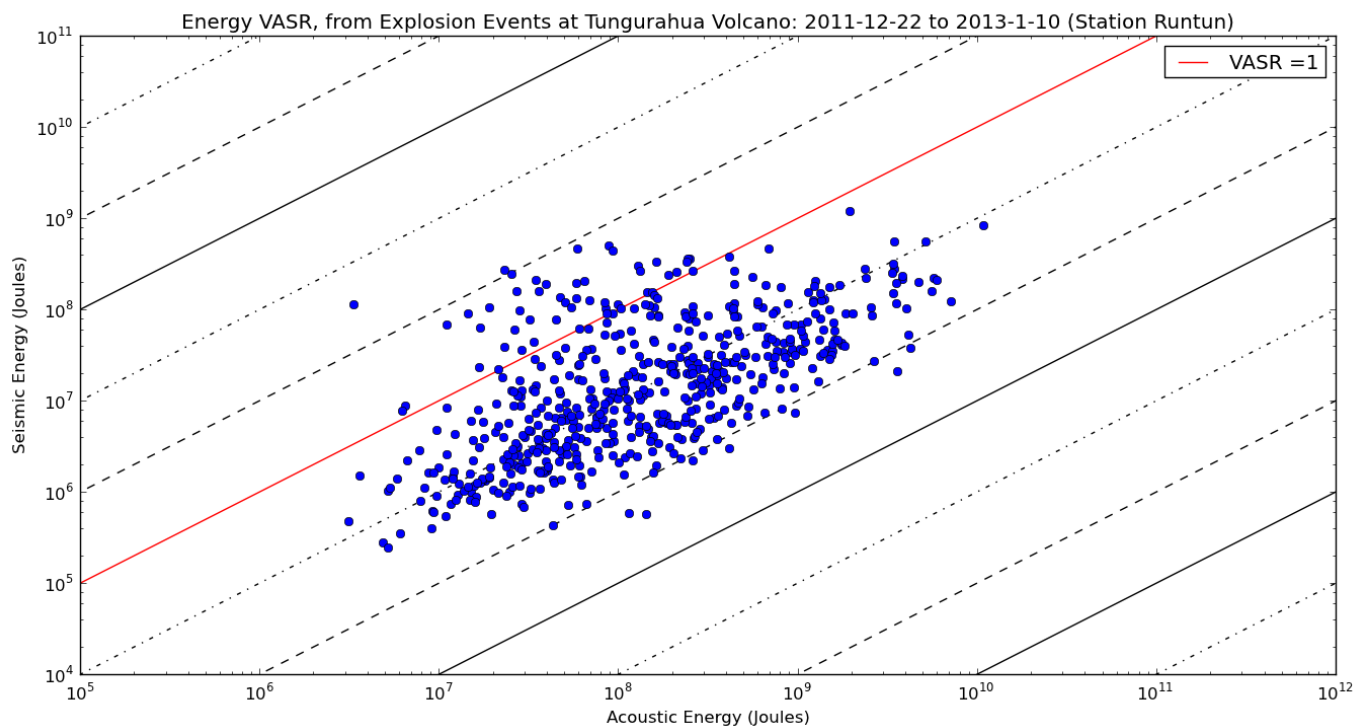


Figura 4. Grafico del índice de la relación acústica-sísmica (VASR) en el volcán Tungurahua en 2012 (EE13 – EE15). Los valores de VASR en el Tungurahua muestran valores en general, entre ~ 1 -100 (Estación BRUN).

4.1. Actividad Explosiva Volcánica: 22 Diciembre 2011 – 25 Mayo 2012 (EE13)

Después de un periodo de reposo de sólo 14 días, la actividad se reanuda en el volcán Tungurahua el 22 de Diciembre de 2011 con una explosión de alta energía. Esto marcaría un período de actividad que duraría cerca de 5 meses en total y representan una alteración en la actividad explosiva en el volcán, deducido de un cambio en la dispersión temporal de las explosiones que no habían sido observadas en Tungurahua durante los 5 años anteriores. Entre Julio de 2006 y Diciembre de 2011, 12 episodios de actividad explosiva han sido reconocidos en el Tungurahua, cada uno representado por las explosiones diarias continuas que duraron y estuvieron separadas entre uno y varios meses. Por el contrario, la actividad durante el primer semestre de 2012 estuvo marcada por un ciclo continuo, donde la actividad duraría sólo 1 - 2 días con períodos de reposo de 1 - 3 semanas (Fig. 5). Esta tendencia se observó durante 4 meses, entre finales de Diciembre y finales de Abril (2012). La actividad para el período alcanzó el 01 de Mayo de 2012 con una tasa de eventos diaria de ~ 10 explosiones.

Después de siete días de fuerte inestabilidad explosiva durante la primera semana de Mayo, la actividad comenzó a disminuir hacia el final del mes y se había detenido por completo el 25 de Mayo. Por lo general, se observa una distribución de Gaussian o normal en la tasa de eventos a través de episodios explosivos en Tungurahua, aunque este no fue el caso de la actividad durante el primer semestre de 2012 (EE13; Fig. 5).

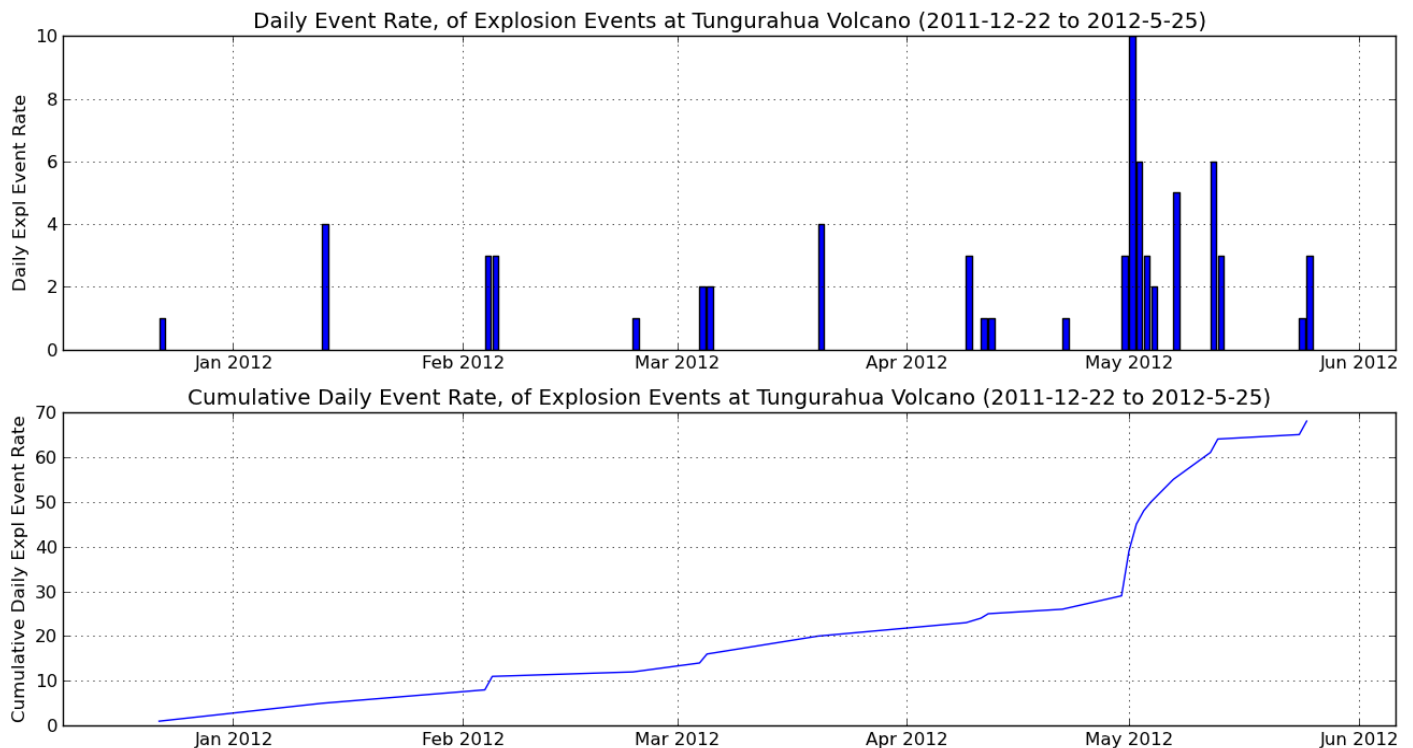


Figura 5. Número diario de explosiones (panel superior) y número diario acumulado de explosiones (panel inferior) en el volcán Tungurahua, 22 Diciembre 2011 – 25 Mayo 2012 (EE13).

Los valores de las amplitudes sismo-acústica (y la energía) de las explosiones no mostraron un aumento en particular o tendencia de disminución respecto a las explosiones discretas en todo el período. Aparte de algunas explosiones con energía más alta registradas durante principios de Febrero y los principios de Mayo, las energías explosión fueron relativamente consistentes a través del período. El desplazamiento reducido sísmico para eventos individuales varió entre ~ 10 y 80 cm^2 (1×10^5 a 5×10^7 Joules, en la estación de Mason), mientras las amplitudes acústicas se registraron entre ~ 40 y 450 Pa (5×10^8 - 3×10^{10} Joules, en la estación de Mason). Las energías acústicas fueron aproximadamente de 1 - 3 órdenes de magnitud mayores que las energías sísmicas para explosiones correspondientes, una tendencia se observa comúnmente en el volcán Tungurahua.

Los valores de la VASR para el período se encontraron en general entre ~ 10 y 100 en la estación de Runtun (Fig. 6), que se ajusta bien en el rango general de los valores VASR en Tungurahua para la estación de BRUN en otros periodos. Debido a valores típicos observados en el VASR y dispersión menor, se considera que el inicio de las explosiones se dio en un sistema con un viento moderadamente abierto durante todo el período.

Las distribuciones de frecuencia-amplitud calculados mostraron un proxy b -valor de $\sim 1,94$ para el episodio, mientras que el coeficiente de variación (C_v) durante el ciclo activo fue $\sim 2,35$. Esto indica que las explosiones parecen agruparse en el tiempo y no está representado por un proceso de Poisson. Sin contar la tendencia en la distribución de eventos (destacada por anormalmente grandes tiempos medios de reposo entre explosiones anormales) (Fig. 3), todas las técnicas estadísticas aplicadas muestran valores para este período de actividad que son consistentes con otros recientes episodios de actividad en el Tungurahua.

Seismo-Acoustic Energies, from Explosion Events at Tungurahua Volcano: 2011-12-22 to 2012-5-25 (Station Runtun)

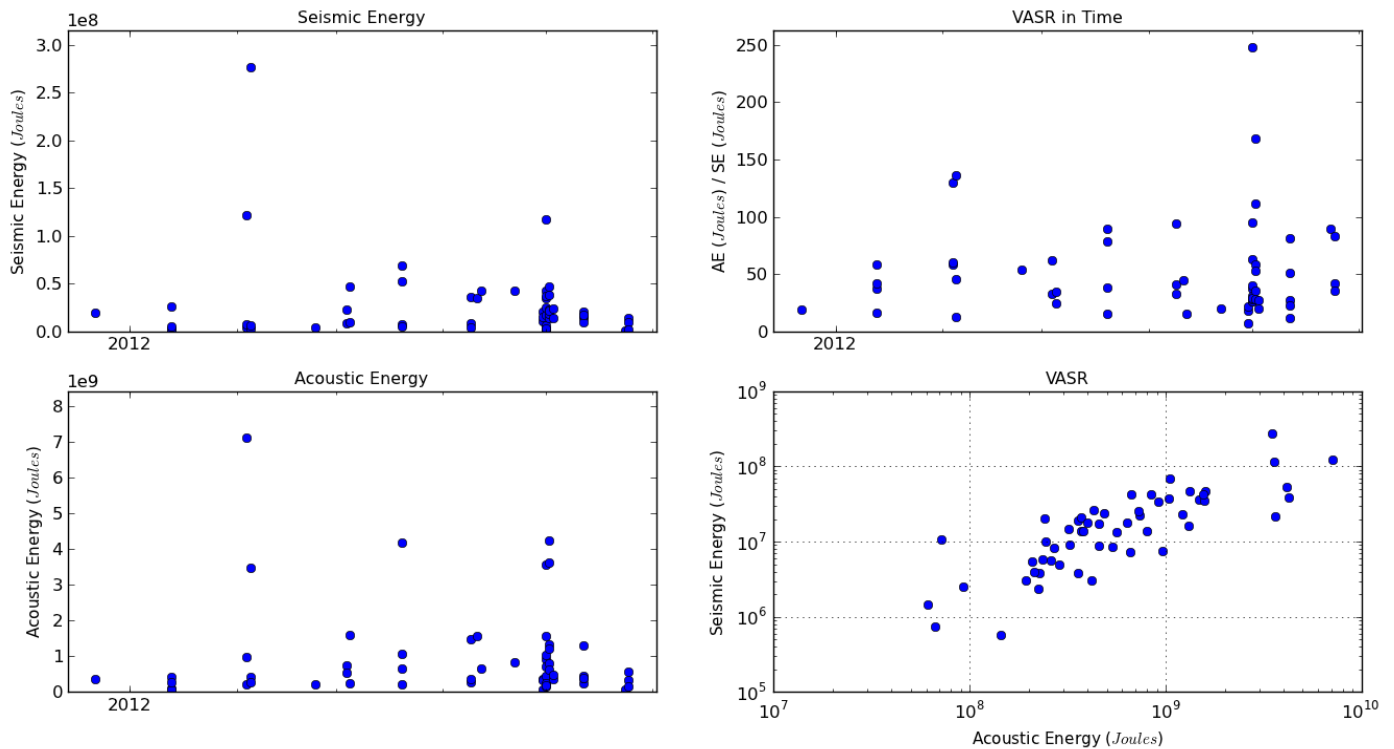


Figura 6. Distribución temporal de la energía liberada a través del subsuelo (ondas sísmicas: panel superior, izquierdo) y a través de la atmósfera (ondas infrasonido: panel inferior, izquierdo). En el panel superior, derecho se muestra la evolución temporal de la relación entre las energías acústicas 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 (VASR: Índice Volcánico Acústico Sísmico).

4.2. Actividad Explosiva Volcánica: 10 Junio 2012 – 04 Septiembre 2012 (EE14)

La actividad explosiva se reanudó el 10 de Junio del 2012, cuando se registraron dos explosiones de alta energía. En cuanto a la dispersión temporal de las explosiones, la actividad parece similar a la observada a principios de año (EE13), mostrando otra vez más tiempos de reposo por encima de la media (Fig. 3). Secuencias de explosión se mantuvo relativamente constante durante dos meses, entre el 10 de Junio 2012 y el 17 de Agosto 2012, con una actividad diaria que muestra en general una tasa de eventos de sólo una o dos explosiones de alta energía en un tiempo de descanso de 1 - 8 días (Fig. 7). Al igual que durante EE13, la tasa de eventos comenzó a aumentar hacia la fase final del episodio de erupción y alcanzó su punto máximo en el 21 de Agosto 2012, cuando se registraron ~ 14 grandes explosiones. Después de este día, la actividad comenzó a declinar rápidamente y terminó por completo el 04 Septiembre de 2012.

Entre el 10 de Junio y el 16 de Agosto 2012, los valores de desplazamiento reducido sísmico (de las explosiones discretas) variaron $\sim 10 - 50 \text{ cm}^2$ (1×10^5 a 1×10^7 Joules en la estación de Mason), mientras que se encontraron valores de presión acústica entre ~ 45 y 350 Pa (1×10^8 a 1×10^{10} Joules en la estación de Mason). Estos valores son consistentes con la actividad a principios de año (EE13) y representan explosiones de pequeño a medio tamaño para el volcán Tungurahua. Sin embargo, mientras el mes de Agosto avanzaba, los valores de energía explosión sismo-acústica comenzaron a aumentar junto con la tasa de eventos. Explosiones discretas valores de desplazamiento reducido sísmicas producidas $\sim >115 \text{ cm}^2$ y los valores de presión acústica $>550 \text{ Pa}$ (en la estación de Mason). La actividad alcanzó su punto máximo, junto con la tasa de eventos, el 21 de Agosto de 2012. Una explosión en este día, a las 15:52 (UTC) produjo un valor de presión acústica de $\sim 1198 \text{ Pa}$ ($2,03 \times 10^{11}$ Joules en la estación de Mason), la mayor liberación de energía acústica grabada de cualquier explosión discreta en el Tungurahua entre Julio de 2006 y Agosto de 2012. Una fuerte evidencia también sugiere que los instrumentos acústicos a Mason y Bilbao se saturaron durante el evento debido a las ondas de presión intensa. Por lo tanto, es probable que se estén subestimando en realidad los valores de la presión acústica dada. Se dio un aumento de la energía sismo-acústica de explosiones así como un aumento en la tasa de eventos explosión, tal que la liberación de energía sísmica y acústica diaria total alcanzó un máximo el 21 de Agosto (Fig. 8), antes de que se observara una marcada disminución hacia el inicio de Septiembre.

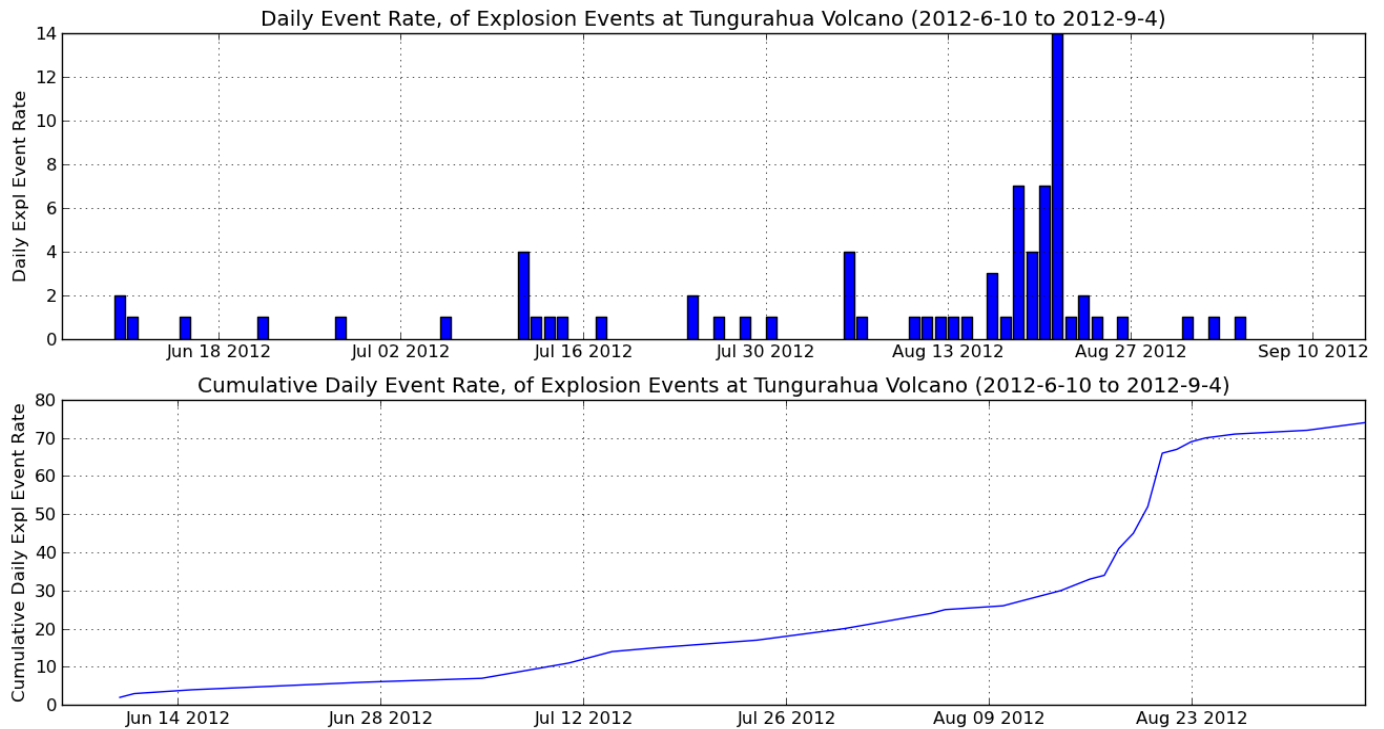


Figura 7. Número diario de explosiones (panel superior) y número diario acumulado de explosiones (panel inferior) en el volcán Tungurahua, 10 Junio 2012 – 04 Septiembre 2012 (EE14).

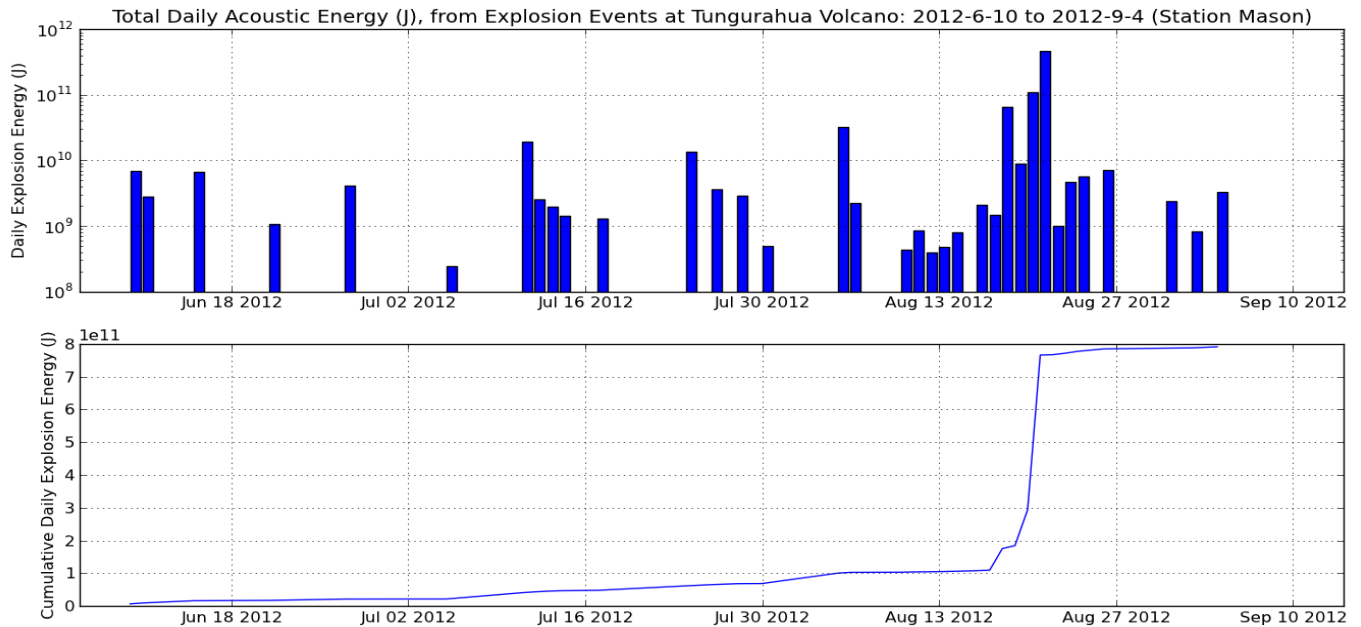


Figura 8. La energía acústica (Joules) diario total (panel superior) y la energía acústica (Joules) diario total acumulada en el volcán Tungurahua, 10 Junio 2012 – 04 Septiembre 2012 (EE14) Estación BMAS.

Los valores de la VASR para el período se encuentran generalmente en un rango ~ 1 y 100 en la estación de Runtun. Mientras que se observaron valores considerablemente grandes de energía acústica explosión hacia el final del mes de Agosto, estos fueron compensados por los altos valores en la energía sísmica para explosiones correspondientes, por lo que los valores en VASR no eran anormalmente altos. De hecho, algunas explosiones durante el período entre el 17 y el 21 de Agosto, a menudo producen valores ligeramente más bajos de VASR que la observada en EE13, debido a la radiación sísmica eficiente. En general, sin embargo, ambos períodos de actividad tienen valores de VASR que son consistentes con la tendencia general observada en Tungurahua. Las distribuciones de frecuencia de amplitud calculados mostraron un valor- b proxy de $\sim 1,68$ para el período, mientras que el coeficiente de variación de explosiones durante todo el ciclo activo fue de ~ 1.59 .

4.3. Actividad Explosiva Volcánica: 14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013 (EE15)

La actividad explosiva durante EE15 (14 Diciembre 2012 a 21 Enero 2013) se observó a ser temporal muy similar a la actividad observada entre Mayo y Julio de 2010 (EE9). La distribución de explosiones (en el tiempo) fue casi idéntica entre los dos períodos, con una secuencia que tuvo las siguientes características:

- **Etapa 1** - Actividad comienza después de más de 3 meses de reposo.
- **Etapa 2** - La inflación y el aumento de VT's conducen a la generación de una explosión de alta energía.
- **Etapa 3** - Después de aproximadamente 48 horas de reposo algunas unas explosiones de alta energía son seguidas por un fuerte tremor emisiones, generación de columnas y flujos piroclásticos, que duran varias horas.
- **Etapa 4** – Se registró una alta tasa de eventos explosión se registró (> 40 / día), por una duración de aproximadamente 5 a 7 días. Las explosiones se acompañaron por señales tipo chugging (Fig. 9).
- **Etapa 5** - El fin repentino del chugging coincide con un rápido descenso en el número de explosiones y energía sismo-acústica emitida.

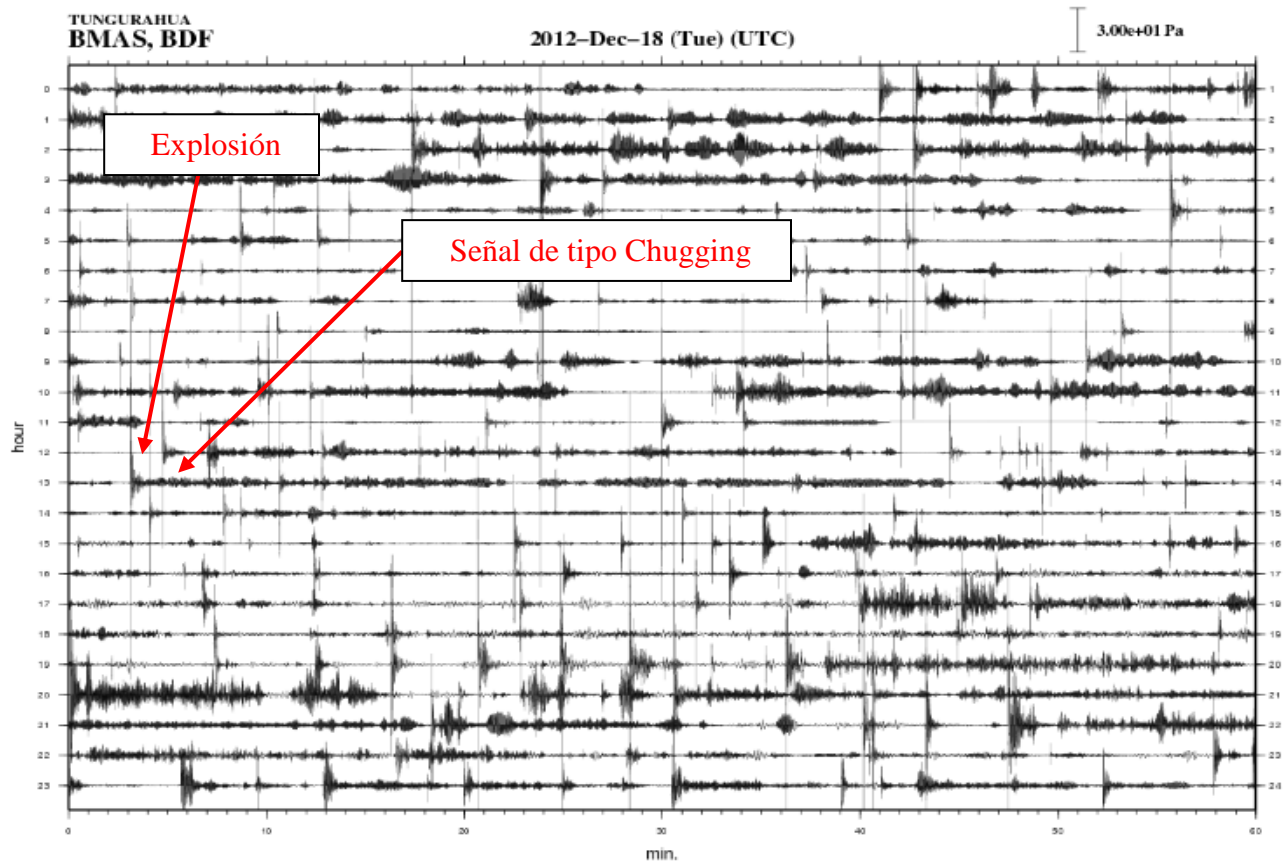


Figura 9. Drumplot diario de la actividad de infrasonidos en el volcán Tungurahua, 18 Diciembre 2012 (EE15). Note la alta tasa de casos de las explosiones y la secuencia de explosión-chugging común observado. Estación BMAS.

Durante EE15, la primera explosión de alta energía se registró el 14 de Diciembre de 2012 (Etapa 2). Tuvo un valor de presión acústica de ~ 707 Pa (en la estación de Mason). Después de aproximadamente 48 horas de reposo dos explosiones de alta energía se registraron el 16 de Diciembre de 2012. Una de estas explosiones (a las 10:53 UTC) fue la segunda más grande explosión registrada en el Tungurahua (entre Julio de 2006 y Diciembre de 2012). En términos de valor de presión acústica la explosión alcanzó ~ 1095 Pa (en la estación de Mason), sólo un poco más pequeña que la explosión el 21 de Agosto de 2012.

Aproximadamente una hora y media después de las dos explosiones, un episodio de tremores emisiones comenzaron en el volcán que fue superficial acompañada de actividad de flujo piroclástico (Etapa 3). La principal fase de tremor emisiones duró alrededor de 7 horas antes de remitir. Durante los siguientes días, entre el 17 y el 20 de Diciembre de 2012, la tasa de eventos explosión aumentó de manera constante, alcanzando una tasa de eventos diaria de ~ 132 explosiones en el 20 de Diciembre (Fig. 10). La tasa de eventos diarios durante este tiempo (Etapa 4) fue un orden de magnitud mayor que los números diarios de explosión durante EE13 y EE14. Desde 2006, el único otro período de actividad en el Tungurahua que mostró explosiones de alta energía con una tasa de eventos > 100 fue durante EE9, entre Mayo y Julio de 2010. Después del 20 de Diciembre de 2012, el número de explosiones declinó rápidamente a unos pocos eventos por día a finales de mes (Etapa 5). La última explosión de EE15 se registró el 21 de Enero de 2013.

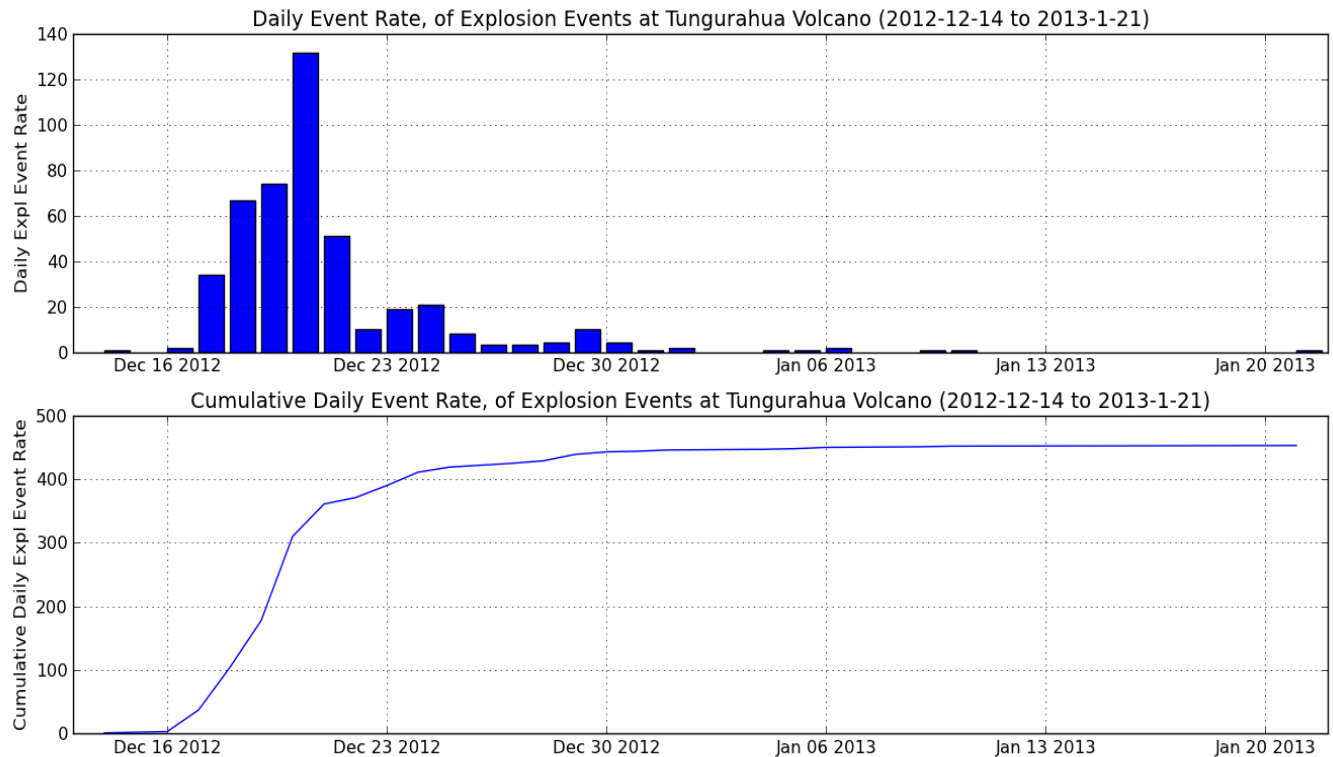


Figura 10. Número diario de explosiones (panel superior) y número diario acumulado de explosiones (panel inferior) en el volcán Tungurahua, 14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013 (EE15).

En general, la energía acústica diaria total a través del período fue consistente con la tasa de eventos, por lo que un aumento en el número de explosiones diarias se empató con una mayor energía acústica diaria total emitida. Aparte de la explosión en el 14 y los dos eventos grabados en el 16 de Diciembre 2012, que mostraron muy alta energía acústica explosión discreta, explosiones individuales durante el período tenían amplitudes de presión acústica (y energías) consistentes con la variación observada normalmente en otros periodos. La radiación sísmica de las explosiones discretas varió de forma más sustancial para los eventos individuales en todo el período. Las explosiones tuvieron altas amplitudes sísmicas (y energías sísmicas) durante la primera parte del episodio de erupción, entre el 14 y el 19 de Diciembre de 2012. Con la tasa de eventos también es alto durante la primera parte de la episodio, la energía de explosión sísmica diaria total era por lo tanto comprensible grande durante esta primera parte del EE15.

Los valores de la VASR para el período se encuentran generalmente en un rango ~ 1 y 100 en la estación de Runtun para la mayoría de los eventos. Sin embargo, durante la fase inicial del período, los valores más bajos de VASR (0.1 - 1) se registraron (Fig. 11), lo que indica mayor radiación de energía sísmica. Estos períodos de baja VASR están relacionados con explosiones acompañadas por eventos de tipo chugging en Etapa 4. Sugerimos que las primeras explosiones de alta energía durante las Etapas 2 y 3 no pudieron destruir por completo el viejo magma viscoso tapando la abertura del viento. Explosiones a través de un conducto bloqueado o restringido son propensas a presentar bajos VASR debido al fuerte acoplamiento sísmico con el tapón y las paredes del conducto (Etapa 4). Después de actividad explosiva continua, prevemos que la tapa esté finalmente abierta mientras eventos de tipo chugging desaparecen rápidamente. Un aumento en VASR explosión durante la Etapa 5 es sugerente de un período de radiación acústica más eficientes durante la desgasificación explosivo, como se observa comúnmente en el Tungurahua.

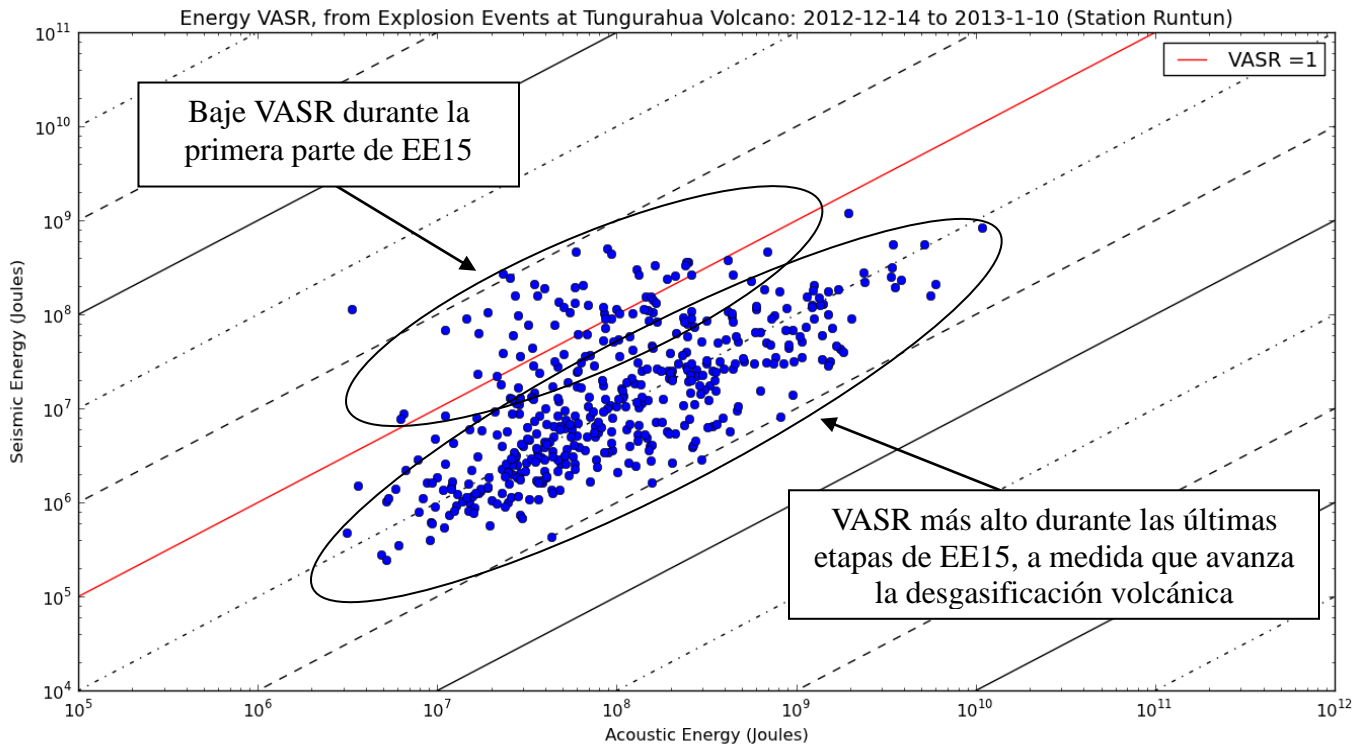


Figura 11. Grafico del índice de la relación acústica-sísmica (VASR) en el Volcán Tungurahua (Estación BRUN), 14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013 (EE15). Note los valores más bajos de la VASR se registraron durante la parte más temprana de la secuencia eruptiva (primera semana) antes de un aumento constante en VASR como desgasificación volcánica continuó.

Distribuciones de frecuencia-amplitud (FAD) calculados mostraron un valor de b de $\sim 2,09$ para el período (Fig. 12). Deducimos que valores de proxy b más pequeño sugieren fracturación menor escala y un conducto más cerrado, mientras que valores de proxy b más altos son representativos de un sistema del viento más abierta. El valor b de EE15 es más alta que los períodos anteriores de actividad en 2012 (EE13 y EE14), lo que sugiere un régimen del viento más abierta en Tungurahua durante este tiempo. Sin embargo, cuando el FAD se calcula para la primera parte del EE15 (los primeros 5 días) solamente, el valor de proxy b cae a $\sim 1,60$.

Esto parece consistente con otros resultados estadísticos que sugieren que durante la fase temprana de EE15 Tungurahua exhibió un sistema de conductos más sellado o taponado y como la desgasificación volcánica continuó, en última instancia, el sistema se hizo más abierto. Esto se refleja en un cambio de valores bajos a altos tanto en el VASR y en el b -valor de la FAD a través del período.

El coeficiente de variación para las explosiones durante EE15 se calculó a $\sim 6,89$ (Fig. 3). En todo momento, hemos encontrado similitudes estadísticas entre EE15 y EE9. El C_v también confirma esta tendencia, con los dos períodos de actividad que muestra los valores más altos en el coeficiente de variación, en comparación con todos los otros episodios de actividad en Tungurahua desde Julio de 2006.

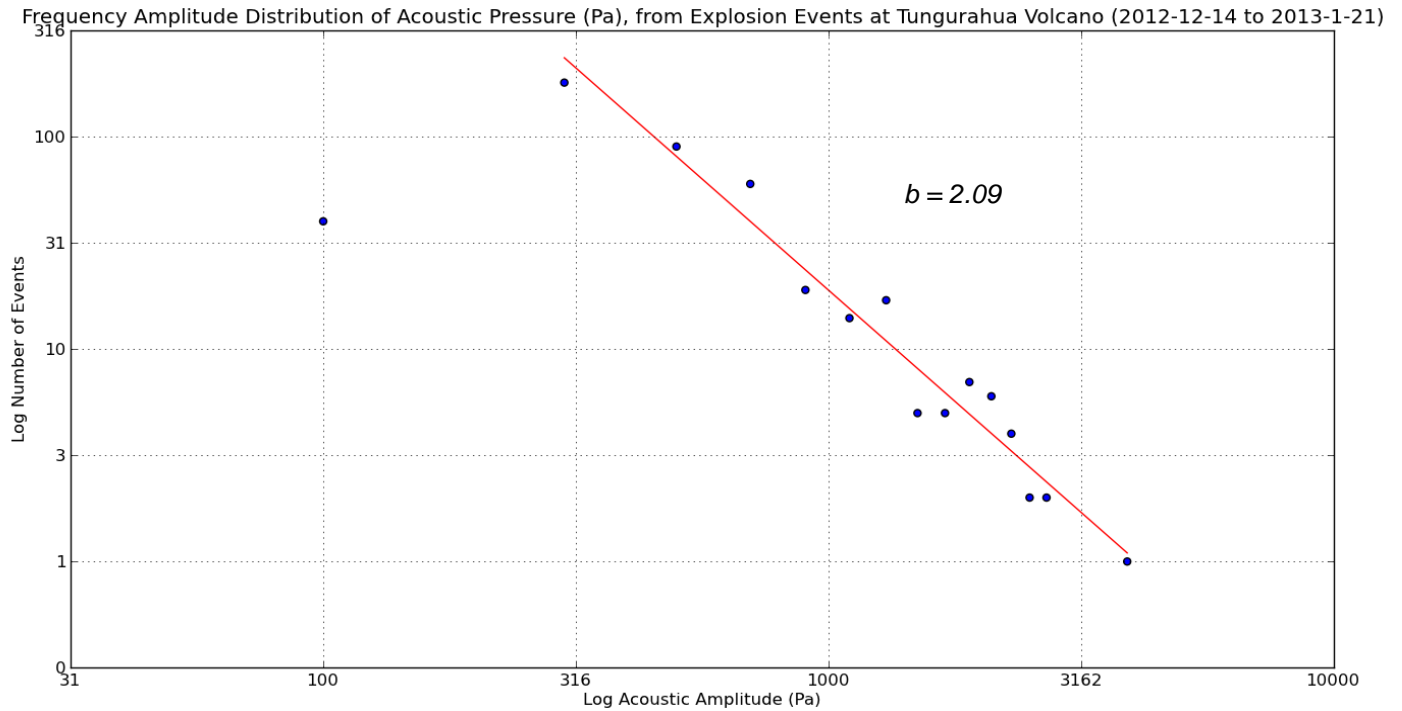


Figura 12. Distribución de frecuencia-amplitud (FAD) en el volcán Tungurahua (14 Diciembre 2012 – 21 Enero 2013; EE15), para poner de relieve la relación entre el número de eventos explosivos con sus magnitudes proxy. Un proxy del valor de la pendiente b para este periodo produjo un valor de $b \sim 2.09$.

En resumen, EE13 y EE14 muestran las características de explosión que fueron estadísticamente muy similares entre sí. Además de una dispersión temporal de las explosiones discretas anómala (resaltado por los tiempos de reposo medias de las explosiones que eran aproximadamente un orden de magnitud más grande que otros episodios eruptivos durante los últimos 7 años), la actividad durante estas dos fases fue comparable con los últimos episodios de actividad en el Tungurahua. En contraste, se encontró que EE15 muestra similitudes estadísticas sólo con EE9 (Mayo - Julio 2010). Esto fue confirmado por la evolución de la C_v , VASR y FAD. Tenemos la visión de que estas similitudes son representativas de un mecanismo de erupción explosiva similar, indicativos de un conducto tapado parcialmente al inicio, y que en última instancia, se aclaró y se abrió conforme la desgasificación volcánica continuó.

5. 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

6. 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/JA
INSTITUTO GEOFISICO
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL