



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP



# Investigación y Monitoreo Volcanes Activos en el Sur del Perú

Reporte Técnico Especial  
2015



Edición de contenidos:  
Jorge Andrés Concha Calle

Diseño y diagramación:  
Jorge Andrés Concha Calle

Foto portada:  
Inspección del cráter del volcán Misti.

Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)  
Instituto Geofísico del Perú (IGP)  
Urb. La Marina B-19, Cayma-Arequipa  
Teléfono: +51 54 251373  
<http://ovs.igp.gob.pe>  
[ovs@igp.gob.pe](mailto:ovs@igp.gob.pe)

Impreso por:  
Imprenta Editora Gráfica Real SAC  
Jr. Independencia 953 – Trujillo –  
La Libertad  
Teléfono: +5144253324

Hecho en el depósito legal en la  
Biblioteca Nacional del Perú  
N° 2015-19108  
Tiraje: 500 ejemplares

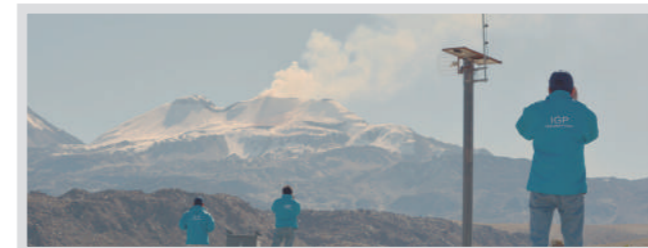


# ÍNDICE



06 Características de la actividad sísmica en el proceso eruptivo 2013-2015 del volcán Ubinas

11 Observaciones asociadas a los lahares ocurridos el 06 de febrero y 11-13 de abril de 2015 en el valle de Ubinas



15 Actividad sismo-volcánica registrada en el volcán Sabancaya, periodo 2013-2015

19 Método STA/LTA para la detección automática de eventos sísmicos e identificación de familias sísmicas: caso del volcán sabancaya, periodo 2013



Actividad sísmica observada en la zona del volcán Ticsani (Moquegua) entre mayo-septiembre de 2014 23



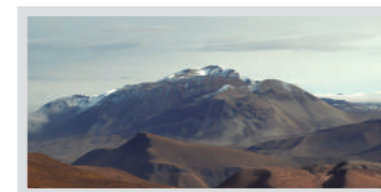
Resumen de la actividad del volcán Ubinas en 2015 28



Resumen de la actividad del volcán Sabancaya en 2015 42



Resumen de la actividad del volcán Misti en 2015 56



Resumen de la actividad del volcán Ticsani en 2015 62

## Introducción

Los volcanes son la muestra de que nuestro planeta está vivo, respira, se encuentra en constante movimiento.

En el sur del Perú, observamos una serie de macizos activos y potencialmente activos que, a lo largo de miles de años, han presentado numerosas erupciones, moldeando la geografía de toda esta región.

Hoy en día muchas poblaciones se han asentado en las cercanías de estos gigantes geológicos, lo cual expone con diferente grado de riesgo y peligro su seguridad y modo de vida. Ciudades como Arequipa, con más de un millón de habitantes, distritos como Ubinas y Calacoa en Moquegua, están expuestos ante posibles escenarios relacionados a una erupción.

Es por esta razón que el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), vigila y monitorea desde 1990 la actividad de estos volcanes, con la finalidad de registrar las primeras señales de un reactivamiento, y prevenir a las autoridades y poblaciones aledañas con el objetivo de salvar vidas y evitar perjuicios mayores.

En virtud de ello, el OVS participa del Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 0068, denominado: "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres", específicamente de la actividad, "Vigilancia geofísica de volcanes". Nuestro Observatorio vigila en tiempo real la actividad de cuatro volcanes: Misti, Ubinas, Sabancaya y Ticsani, mediante estaciones sísmicas telemétricas que envían en todo momento información a nuestras oficinas, la cual es analizada inmediatamente por nuestro equipo de vulcanólogos.

Este es el compromiso del OVS, el cual viene siendo realizado en estos más de 25 años de exhaustivo trabajo profesional. La elaboración de este Reporte Técnico Especial es resultado del monitoreo diario, semanal, mensual y anual que realiza el Observatorio, en el cual también encontrarán importantes artículos de investigación sobre nuestros volcanes, muchos de los cuales han sido publicados en prestigiosas revistas internacionales.

# INVESTIGACIÓN

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), tiene como una de sus principales misiones realizar investigaciones acerca de la actividad de los volcanes activos del sur de nuestro país, las cuales son continuamente publicadas en prestigiosas revistas internacionales.

## CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL PROCESO ERUPTIVO 2013 -2015 DEL VOLCÁN UBINAS

José Del Carpio <sup>(1)</sup>, Orlando Macedo <sup>(1)</sup>, Nino Puma <sup>(1)</sup>, Riky Centeno <sup>(1)</sup>, Jose Torres <sup>(1)</sup> y Jhon Cruz <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

### RESUMEN

En septiembre de 2013, el volcán Ubinas inició un nuevo proceso eruptivo, registrándose hasta nueve explosiones y Tremor de alta energía en el transcurso de una semana. Esta repentina actividad eruptiva disminuyó casi inmediatamente y se observó una relativa calma entre octubre y noviembre de 2013, la cual terminaría cuando un incremento brusco en la actividad sísmica de tipo Tremor generó energéticas exhalaciones de ceniza, y pocos días después, la primera explosión magmática (14 de febrero de 2014). Días antes se empezó registrar sismos Híbridos asociados al ascenso de magma. Este tipo de sismicidad se incrementó notablemente durante marzo. La energía acumulada de Híbridos fue el parámetro que mejor representaba la actividad en ascenso del proceso eruptivo actual. En abril de 2014 se registró las explosiones más violentas y el mayor porcentaje de estas ocurrieron en este mes. Según las observaciones, el 14 de abril se inicia el declive en este episodio volcánico, basado en la disminución de la energía de Híbridos, en la energía de las explosiones, en la disminución de los valores de las anomalías térmicas (MIROVA - Middle InfraRed Observation of Volcanic Activity), disminución en los valores de densidad de  $SO_2$  (OMI-NASA - Ozone Monitoring Instrument) y en la ausencia de Tremor Armónico en el registro sísmico. Desde esta fecha y hasta diciembre de 2014, la tendencia siempre fue a disminuir. En abril de 2015 nuevamente se generó una explosión en el volcán Ubinas. Según las observaciones sísmicas, el comportamiento volcánico antes de este evento explosivo fue muy similar al registrado en 2014.



El volcán Ubinas es el macizo de mayor actividad en el Perú. Ha registrado alrededor de 25 erupciones en los últimos 500 años.

### INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas es conocido por ser un volcán muy activo, con 25 episodios eruptivos de baja a moderada magnitud [VEI (Índice de Explosividad Volcánica) de 1-3] desde 1550, siendo la frecuencia de erupciones de 6 a 7 por siglo. La más reciente erupción tuvo lugar entre marzo de 2006 – junio de 2009, y alcanzó un VEI igual a 2, siendo una crisis inicialmente dominada por actividad freática y que a partir del 19 de abril de 2006, devino en una actividad vulcaniana con emisión de materiales andesíticos básicos. La actividad explosiva, que se caracterizó por su intermitencia en las emisiones de material eruptivo, concluyó el 14 de junio de 2009 en que ocurrió la última explosión (Macedo et al., 2009; Anca, 2013).

En septiembre de 2013, el volcán Ubinas entró nuevamente en erupción. Entre el 02 y 07 de septiembre se observaron explosiones de tipo freático. Los meses siguientes fueron de relativa calma, pero en febrero de 2014 el nivel de actividad fue nuevamente ascendiendo, observándose registros de Tremor sísmico importante, emisiones persistentes de gases y ceniza, etc., que finalmente culminó con la primera explosión magmática el día 14 de febrero. A partir de entonces y hasta la fecha de este reporte, la actividad eruptiva del volcán Ubinas ha continuado de manera intermitente.

Este trabajo muestra los resultados de las observaciones y monitoreo instrumental efectuados con relación al periodo comprendido entre septiembre de 2013 y abril de 2015, resumiendo la actividad sísmica, información satelital de tipo térmico y de emisión de gas  $SO_2$ , así como las misiones *in situ* efectuadas a la zona del volcán Ubinas.

### CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS E INFORMACIÓN SATELITAL DE TIPO TÉRMICO Y DE EMISIÓN DE GAS $SO_2$

Después de 4 años de tranquilidad transcurridos desde el último proceso eruptivo (2006-2009), entre el 02 y 07 de septiembre de 2013 ocurrieron 09 explosiones freáticas que iniciaron una nueva erupción en el volcán Ubinas. Sismos VT y sismos Tornillo, asociados a presurización del sistema, se registraron tres meses antes de la primera explosión en septiembre de 2013 (Macedo et al., 2014). Este patrón sísmico (VTs y Tornillos) se repetiría tres meses más adelante, precisamente entre enero-febrero de 2014 y entre diciembre de 2014 – abril de 2015. Es principalmente durante el primer semestre de 2014 en el cual se ha producido la mayor actividad sísmica y eruptiva

del volcán. En las siguientes líneas nos vamos a referir a los principales acontecimientos o "hitos" que han marcado este periodo y que aparecen señalados en la figura 05 (ver página 09).

Entre el 01 y 09 de enero de 2014 se reportó un notorio incremento de la sismicidad en general en el volcán Ubinas. En efecto, en esos días fueron registrados enjambres de LP y Tremor, aunque con poca energía. Entre el 07 y 23 de enero ocurrieron hasta 04 exhalaciones, una de las cuales alcanzó 7.6 MJ de energía. En la tercera semana de enero nuevamente se registraron enjambres de LPs y un incremento de la tasa de sismos de fractura (sismos VT), pasando de 3 VT/día a 20 VT/día; estos VT fueron localizados a 1 km al oeste del cráter, con profundidades entre 1 km a 3 km (Figura 01). Sismos Tornillo fueron también registrados en enero de 2014 (Figura 05, hito a), acumulando 23 eventos en este periodo. Igualmente, gases magmáticos fueron reportados entre el 23 y 25 de enero.

Luego de 5 días de calma (del 26 al 31 de enero de 2014), se registró Tremor de alta energía. Esto generó una alerta en el monitoreo de este volcán. Este tipo de sismicidad fue atribuido a una "ebullición" al nivel del sistema hidrotermal (Figura 05, hito b), durando 14 horas aproximadamente (Figura 02). Seguidamente se registraron cinco nuevas exhalaciones con emisión de ceniza, intercaladas por Tremor Espasmódico. Entre el 02 y 07 de febrero se observaron señales típicas de movimiento de fluidos (gases, magma y roca pulverizada), las cuales se mostraron incrementadas.

A partir del 09 de febrero, tanto el número como la energía diaria de los sismos Híbridos (eventos que integran frecuencias bajas y altas y que están asociados a ascenso de magma cerca del cráter) se incrementó. El día 10 de febrero, el sistema MIROVA ([www.mirovaweb.it](http://www.mirovaweb.it), desarrollado por Diego Coppola) detecta por primera vez una anomalía

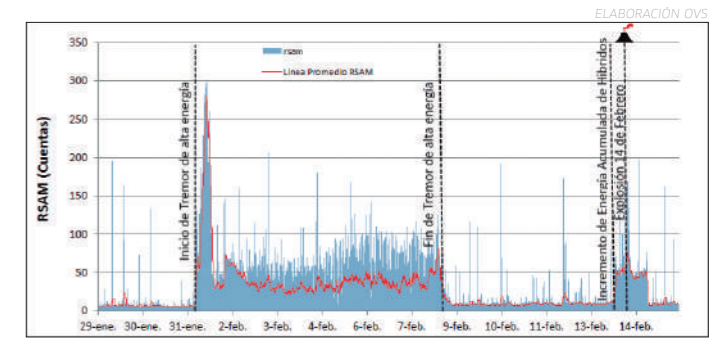


Figura 02.- Evolución del RSAM (Real-Time Seismic-Amplitude Measurement System) entre el 29 de enero al 14 de febrero 2014. La curva RSAM (asociada a la energía total emitida) muestra un incremento notable el 31 de enero, principalmente generado por la aparición de un intenso y continuo Tremor sísmico. El 14 de febrero, luego de una notable disminución del Tremor y 4 días de relativa calma, ocurre la primera explosión magmática de 239 MJ.

térmica de 3 Mw (Megavatio). El 14 de febrero, la energía acumulada de eventos Híbridos se incrementa rápidamente (figura 05) y este mismo día a las 19:45 UTC (*Coordinated Universal Time*), ocurre una explosión de tipo magmática con 239 MJ de energía. Probablemente esta explosión favoreció la limpieza de los conductos y el magma comenzó a ascender más fácilmente (Figura 05, hito c). Luego ocurre una etapa de calma que se prolongaría por 15 días. Durante este periodo, el número de Híbridos persiste, pero su energía se mantiene baja. Mientras tanto el sistema MIROVA continúa detectando anomalías térmicas (Figura 03 (ver pág. 08)). Tremor Armónico de corta duración es registrado. Entre enero y febrero de 2014 el 96% de los sismos registrados hasta ese momento fueron generados por movimiento de fluidos.

Continúa en la pág. 8 →

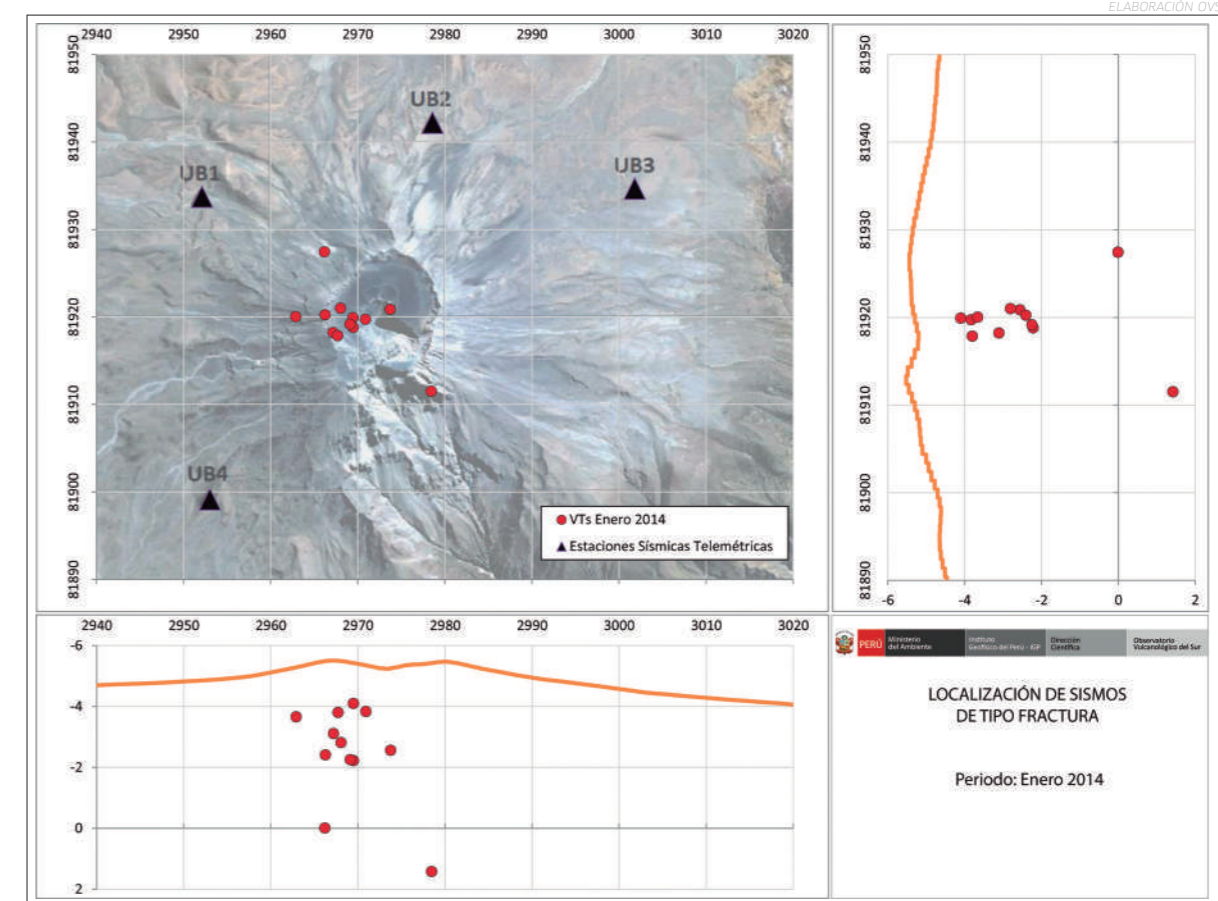


Figura 01.- Localización de sismos VT, periodo enero 2014.

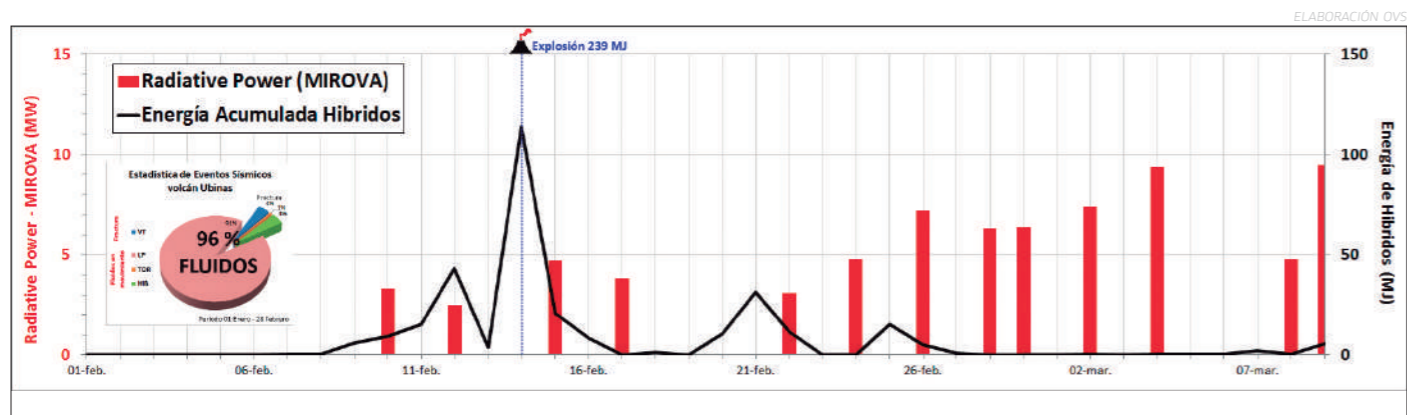


Figura 03.-Luego de la explosión del 14 de febrero, la etapa siguiente mostró niveles bajos de energía de Híbridos, pero valores térmicos en ascenso. El magma llegará a la superficie días después.

El 01 de marzo, en una inspección a la zona del cráter, se advierte la presencia de un cuerpo de lava en la base de este, presentando aproximadamente 40 m de diámetro (Figura 04a).

Durante el mes de marzo la sismicidad registra un incremento sostenido. Se resalta un incremento de eventos de Largo Periodo que pasó en febrero de 100 LP/día a 700 LP/día a finales de marzo. Los sismos Híbridos registran el mismo comportamiento en este periodo (Figura 05, hito d). Los Híbridos, al estar relacionados al ascenso de magma, indicarían nuevos lapsos de subida de este material. En una nueva misión de reconocimiento (19 de marzo de 2014) se observó que el cuerpo de lava

incrementó su extensión en la base del cráter, alcanzando 150 metros de diámetro (Figura 04b).

A partir del 26 de marzo, la energía acumulada de Híbridos presentó un fuerte incremento alcanzando un valor máximo de 582 MJ el 31 de marzo. Casi simultáneamente, desde el 27 de marzo, se observaron constantes exhalaciones de ceniza, cuyos energéticos registros sísmicos elevaron los valores de energía diaria acumulada. También, en esas mismas fechas, se registró Tremor Armónico con amplitudes mayores a 1000 cuentas. Es en este escenario que se inicia el ciclo de mayores explosiones registradas en este nuevo proceso eruptivo 2013-2015 (Figura 05, hito e).

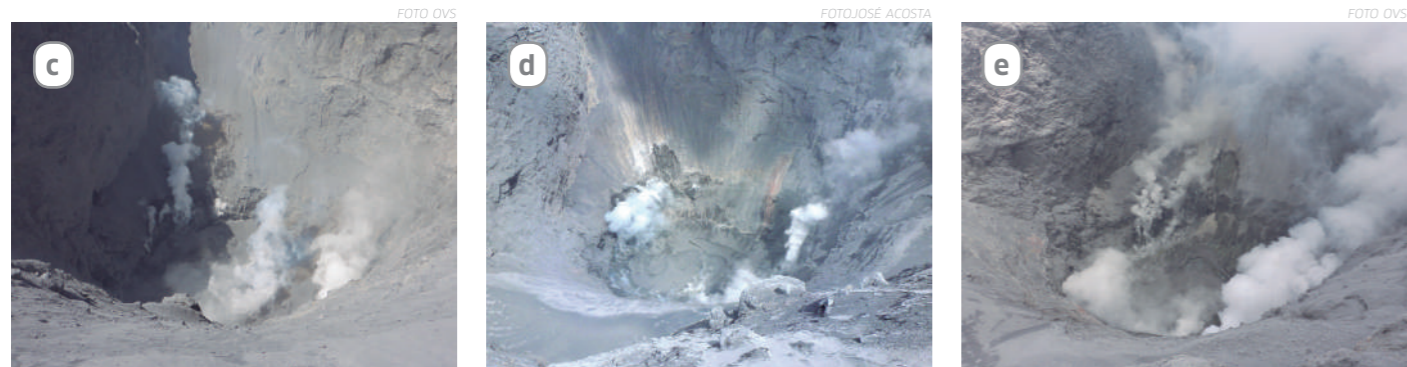
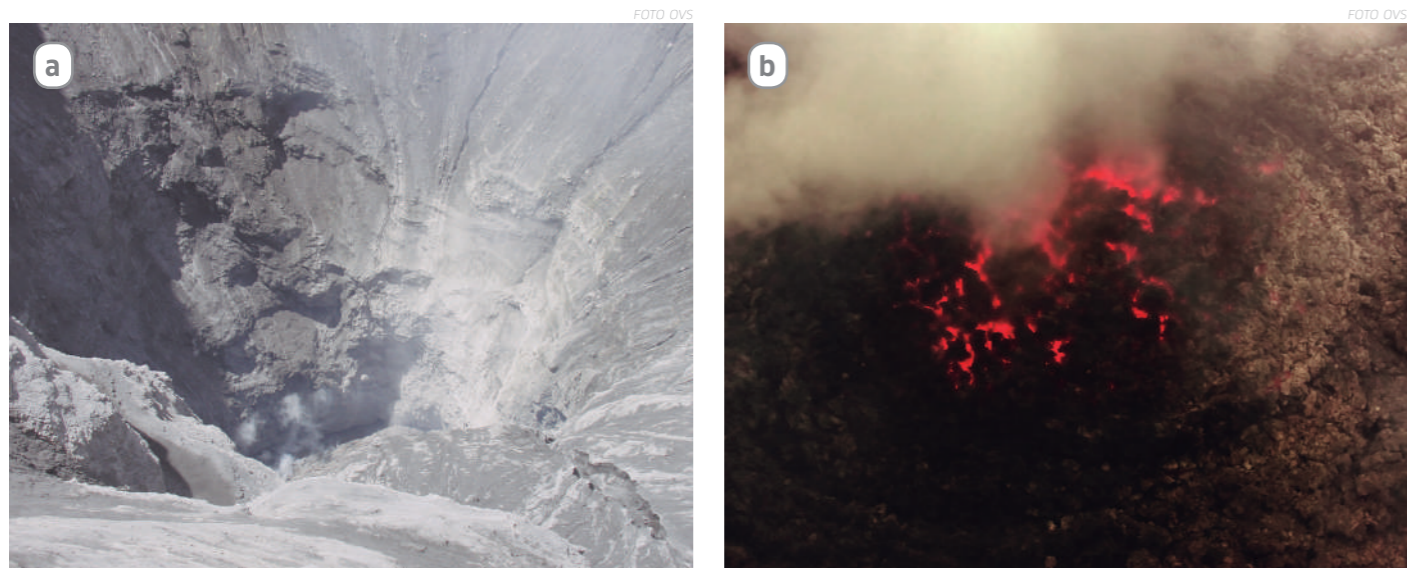


Figura 04.- Secuencia de imágenes que muestran la evolución en el tiempo de arribo y posterior desaparición de lava en el cráter del volcán Ubinas en 2014. a) 01 marzo: se constata la llegada de lava, b) 19 marzo: cuerpo de lava incandescente cubriendo toda la base del cráter, c) 31 julio: el área ocupada por la lava ha disminuido. En las imágenes d) del 27 septiembre y e) del 15 diciembre se observa disminución del área de exposición del cuerpo de lava.

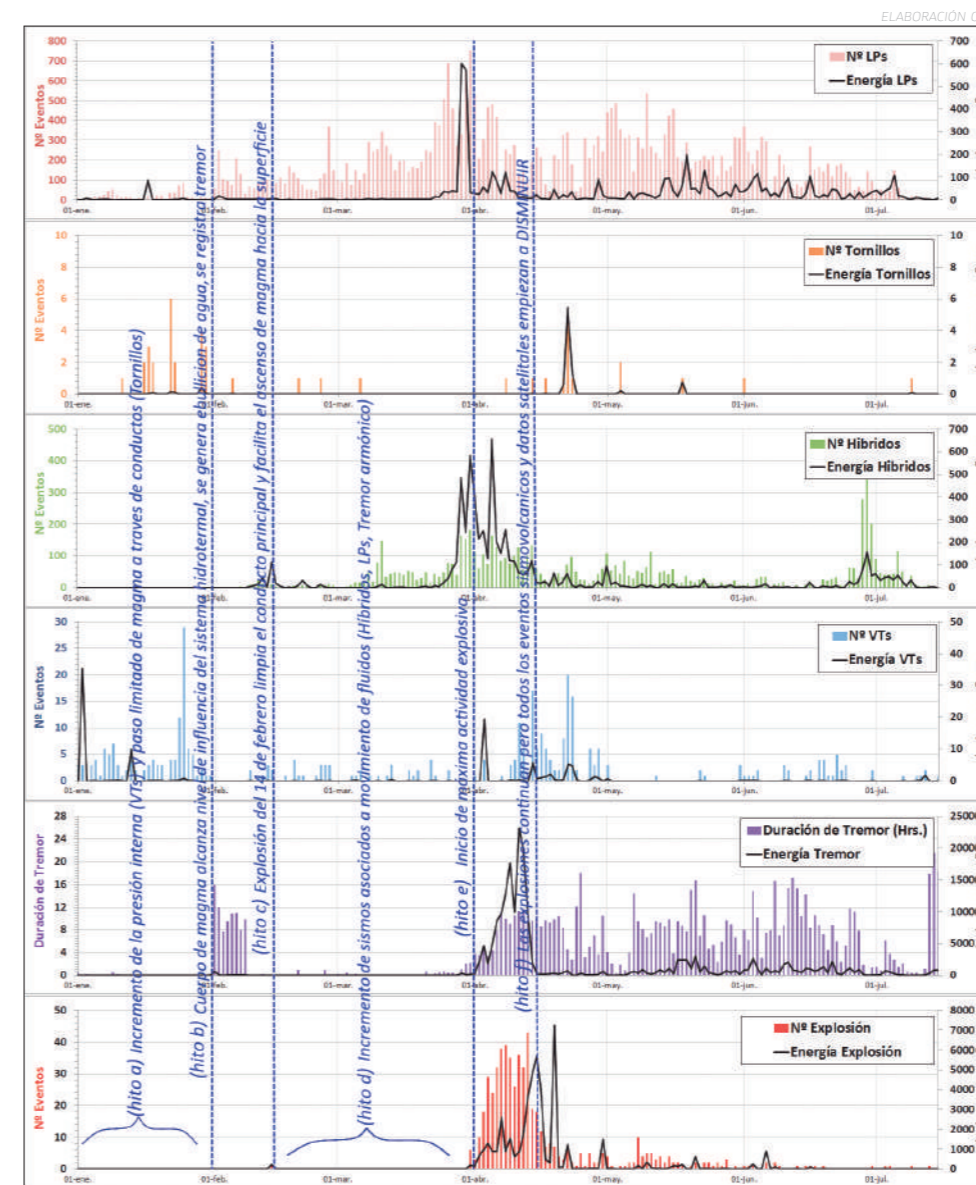


Figura 05.- A finales de 2013, la sismicidad era considerada baja. (hito a) En enero de 2014 el registro de VTs y Tornillos indicaba un incremento de presión al interior del volcán y posiblemente paso limitado de fluidos magmáticos. (hito b) Con un cuerpo magmático en ascenso, el sistema hidrotermal se vio influenciado con el calor que generaba el magma, ebullición y recirculación de fluidos se manifestaron en Tremor sísmico. (hito c) La explosión del 14 febrero limpia el conducto principal. (hito d) La presión disminuye y el ascenso de magma es continuo. Se registran Híbridos, LPs y Tremor Armónico. (hito e) Luego de un incremento brusco y sostenido en la energía acumulada de Híbridos, se reinicia el 31 de marzo la mayor actividad explosiva. (hito f) El declive en esta actividad se manifiesta a partir del 14 de abril con una disminución general de todos los parámetros observados (sismicidad y datos satelitales). Las explosiones continúan.

gases magmáticos ( $SO_2$ ) (datos satelitales OMI-NASA). Todos estos datos constituyen indicios del inicio del debilitamiento del aporte de magma; sin embargo, la disminución de la actividad explosiva solo llegó luego de la explosión más energética de este proceso (5752 MJ de energía) ocurrida el 19 de abril. Esta explosión eyectó proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas) de gran tamaño a distancias relativamente lejanas; por ejemplo, una de ellas cayó a 660 metros del cráter y medía 5x4x2 metros, mientras que otra mucho más pequeña (0,4 m de diámetro) cayó a 2.5 km al NW del cráter. En otras diversas ocasiones se observó también la caída de proyectiles incandescentes en los flancos superiores del volcán.

En abril de 2014 se registraron 472 explosiones (78% del total registrado en 2014. A diferencia de lo observado en la erupción de 2006-2009 (Macedo et al, 2009), las explosiones no presentaron sismos precusores, salvo en contadas oportunidades.

A partir del 14 de abril, la energía acumulada de sismos Híbridos mostró una disminución en sus valores (solo 100 MJ para ese día). El sistema MIROVA, igualmente, detectó una disminución en sus valores térmicos (solo 29 Mw el día 15) luego de una serie consecutiva de registros térmicos elevados. Asimismo, desde el 17 de abril se observa una disminución en los valores de densidad de

Posteriormente, desde el 24 de abril ya se observó una franca disminución en el número y la energía de las explosiones/exhalaciones. La figura 06 muestra la energía acumulada de Híbridos (asociada a ascenso de magma) y de Tremor (asociada a emisión de cenizas), observándose que los picos de Híbridos preceden a los picos de Tremor. En los meses siguientes, entre mayo-noviembre, la actividad permaneció baja aunque con algunas explosiones/exhalaciones menores y esporádicas. La última explosión de 2014 ocurrió el 23 de noviembre.

Continúa en la pág. 10 →

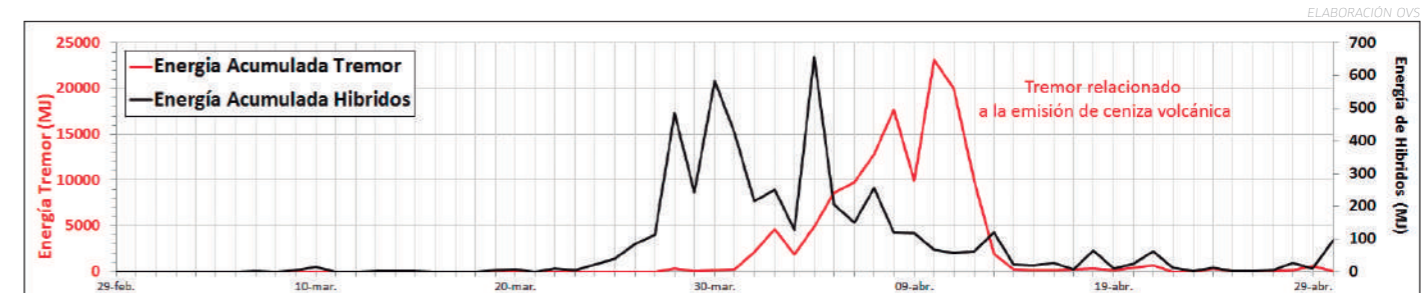


Figura 06.- La intersección de las curvas de energía de Híbridos y Tremor probablemente marca el inicio de una etapa de desgasificación con menor aporte de magma.

Figura 07.- A fines de 2014 se registra un incremento de sismicidad tipo VT y Tornillo. (hito a) En enero de 2015 el registro de VTs y Tornillos continuaba e indicaba un incremento de presión al interior del volcán y posiblemente paso limitado de fluidos magmáticos. (hito b) Un cuerpo magmático en ascenso perturbó el sistema hidrotermal por aproximadamente 31 días. (hito c) La presión interna continuó incrementándose, basado en el registro de nuevos sismos VTs y la circulación limitada de material magmático (Tornillos). (hito d) A un nivel más superficial se genera un incremento de la sismicidad asociada a movimiento de fluidos (magma, gases), específicamente sismos Híbridos y Lps. (hito e) Se inicia el 8 de abril la actividad explosiva. La presión interna disminuye (disminución del registro de VTs) y no hay evidencia de nuevo ascenso de material magmático (disminución de Híbridos). La actividad continúa y las explosiones son esporádicas.



Entre diciembre de 2014 e inicios de enero de 2015 no se registró explosión alguna, pero se observó un incremento en el número de sismos de tipo fractura y Tornillos (Figura 07, hito a), que estuvieron asociados a un incremento de la presión interna. En este escenario, el día 06 de enero la señal sísmica de fondo (*background*) inició un incremento sostenido, el cual se mantuvo por 31 días consecutivos (Figura 07-señal sísmica de fondo). Este comportamiento posiblemente estuvo relacionado a una perturbación del sistema hidrotermal generado por el ascenso de material magmático (Figura 07, hito b).

Posteriormente, a partir del 04 de febrero de 2015, se comenzó a registrar sismos de tipo fractura en tasas que alcanzaron varias decenas por día y en algunos de ellos muy energéticos (por ejemplo, sismo de 609 MJ del día 17 de febrero). Días después, desde el 19 de febrero y durante más de 6 semanas, ocurrieron también altas tasas diarias de sismos Tornillo, indicando también condiciones de presurización del sistema (Figura 07, Hito c). En este momento, se interpretó que la presencia de VTs y de Tornillos mostraba que la presión interna en el edificio volcánico iba incrementándose. Cabe señalar también que el arribo de sismos Tornillo previos a la llegada de magma hasta la superficie y explosiones, fue también observado en enero de 2014.

Luego, casi tres semanas antes de la explosión del 8 de abril 2015, se comenzó a registrar un incremento de sismos Híbridos (Figura 07, hito d), llegándose a tasas de varias decenas de Híbridos por día a inicios de abril. Este hecho fue

interpretado como la inminencia de la actividad eruptiva (249 sismos Híbridos fueron registrados hasta el 7 de abril 2015).

Finalmente, el 08 abril ocurrió una pequeña explosión que generó 1 MJ de energía (Figura 07, hito e), que fue suficiente para abrir completamente el conducto y liberar la presión acumulada. Fue la primera explosión que ocurría en el volcán luego de poco más de cuatro meses (última explosión: 23 de noviembre de 2014).

La figura 07 resume los acontecimientos o hitos de la actividad sísmica en 2015. Los productos emitidos estaban compuestos por ceniza y gases principalmente.

## CONCLUSIONES

- Las observaciones realizadas en el actual proceso eruptivo 2013-2015, han mostrado la misma secuencia sísmica en las fases eruptivas de tipo freático (septiembre de 2013) y magmática (2014 y abril de 2015), incluso en observaciones realizadas cuatro meses antes del inicio del proceso eruptivo 2006-2009. Esta secuencia corresponde: (a) Sismos Tornillo y VTs (interpretados como producto del ascenso de magma hacia la cámara magmática más cercana a la superficie, y conductos/cavidades de las proximidades), (b) sismos Híbridos (interpretados como generados en momentos de la llegada de magma a la superficie), (c) Explosiones/Exhalaciones y Tremor Espasmódico continuo (salida de ceniza, desgasificación del sistema).
- Este proceso se inició en septiembre de 2013 y se reinició en febrero de 2014. Su periodo de mayor explosividad ocurrió en abril de 2014 (explosión del 19 abril generó 5752 MJ). La actividad eruptiva disminuyó 14 días después y entró en una etapa de desgasificación. Desde

diciembre de 2014 a marzo de 2015. Aportes de menor volumen en comparación con el periodo 2014 fueron registrados, es por esta razón que las explosiones de abril 2015 no han sido superiores a los 24.5 MJ.

- La mecánica de la actividad pre-eruptiva, eruptiva y post-eruptiva son similares para los periodos 2013, 2014 y 2015; es decir: (a) acumulación de presión y paso limitado de fluidos magmáticos, (b) perturbación del sistema hidrotermal, (c) ascenso de material magmático, (d) inicio de etapa explosiva y desgasificación del sistema volcánico.
- Nuevas herramientas fueron implementadas para apoyar la vigilancia sísmica del volcán Ubinas, nos referimos al sistema MIROVA para la detección de anomalías térmicas y al sistema OMI-NASA para el registro de densidad de gases de SO<sub>2</sub>.
- Las misiones de reconocimiento hacia el cráter del volcán corroboran la información brindada por los datos de monitoreo sísmico y satelitales. Las fotografías del cráter y de proyectiles balísticos son prueba de ello.

# OBSERVACIONES ASOCIADAS A LOS LAHARES OCURRIDOS EL 06 DE FEBRERO Y 11 - 13 DE ABRIL DE 2015 EN EL VALLE DE UBINAS

José Del Carpio <sup>(1)</sup>, Orlando Macedo <sup>(1)</sup>, Rolando Chijcheapaza <sup>(1)</sup>, Nino Puma <sup>(1)</sup> y José Torres <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup>Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

## RESUMEN

En el proceso eruptivo del volcán Ubinas, ocurrido entre septiembre de 2013 – abril de 2015, se ha observado constantes e intensas emisiones de piroclastos, ceniza y gases, especialmente durante el año 2014, que han sido registradas por el OVS-IGP. De esta manera, en los abruptos flancos del edificio entero, se depositaron grandes volúmenes de varios de estos productos. Por otro lado, entre febrero y abril de 2015 ocurrieron periodos de intensas precipitaciones en el volcán y alrededores, generándose la acumulación de importantes masas de nieve y hielo. La mezcla de todos estos materiales depositados (nieve, hielo, bloques, cenizas del actual proceso eruptivo 2013-2015, así como, ceniza de anteriores procesos eruptivos) sobre la abrupta topografía de los flancos del volcán, generó la formación y descenso de lahares, especialmente en el flanco sur, los días 6 de febrero y 11-13 de abril de 2015, causando daños en su recorrido hacia la confluencia con el río Tambo.

## INTRODUCCIÓN

Lahar es un término indonesio que describe la mezcla de agua, cenizas volcánicas y fragmentos rocosos que descienden por las pendientes próximas a los volcanes, por lo general siguiendo el lecho de las quebradas y ríos, a velocidades que varían constantemente según las características del terreno, la cantidad de agua involucrada y volumen de material disponible a ser erosionado. Es muy común que en un volcán en erupción se genere lahares, pues basta que ocurra una fuerte lluvia o que se deshiele rápidamente sus cumbres nevadas para que las cenizas situadas en terrenos de fuerte topografía cedan y se precipiten pendiente abajo.

En una primera ocasión, el 6 de febrero de 2015 se produjeron dos voluminosos lahares en el flanco sur del volcán Ubinas: el primero ocurrió aproximadamente a las 16:20 hrs, y el segundo a las 18:05 hrs. En esos momentos se observaba poca nieve sobre el volcán, pero ocurrieron intensas lluvias las últimas horas del día 05 así como durante el 06 de febrero. Estas precipitaciones (1.2 mm, Fuente: Estación Salinas - SENAMHI) se mezclaron con los productos depositados, generando los lahares.

En una nueva ocasión, entre el 11 y 13 de abril de 2015, varios lahares fluyeron desde el flanco sur del volcán. En esta oportunidad, en los días previos, el cielo estaba cubierto y se había producido precipitaciones de nieve que permanecieron acumuladas en las cumbres; a partir del día 11, las condiciones meteorológicas cambiaron, tal es así que hubo mayor insolación, dándose así las condiciones para la formación de lahares. Voluminosos lahares descendieron por la quebrada Volcanmayo y prosiguieron su camino por más de 16 km, siguiendo el curso del río Ubinas y llegando incluso hasta el poblado de Huatagua.

## OBSERVACIONES DE CAMPO

a) Lahar del 6 de febrero de 2015.- Luego de intensas precipitaciones sobre las partes elevadas del volcán, ocurridas entre el 05 y 06 de febrero, se generaron voluminosos lahares, los cuales mostraron flujos de color gris (similar a una mezcla de cemento) arrastrando bloques de hasta 3 metros de diámetro que recorrieron el cauce de la quebrada Volcanmayo. La altura que alcanzó el lahar en el cruce de la quebrada con el acceso norte a Ubinas fue de 2.5 metros, evidenciado por marcas dejadas en sus paredes. Se estima que en esta zona el flujo alcanzó los 2 m/s, valor calculado al observar, *in-situ*, el movimiento de escombros dentro del lahar al pasar entre dos puntos referenciales.

Se reportaron dos lahares ese mismo día, a las 16:20 hrs y las 18:05 hrs. El personal del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) realizó una visita de inspección entre el 02 y 04 de marzo, recuperando datos asociados a los materiales observados y evidencias de los daños ocasionados por el impacto de tales lahares en varios puntos del recorrido (figura 01).

Las cuatro zonas mostradas en la figura 01 serán descritas en los siguientes párrafos, unos con información más detallada que otras, debido a las condiciones de acceso, clima y tiempo de la misión.



Figura 01.- Muestra la trayectoria del lahar del 06 de febrero (línea celeste) en el cauce de la quebrada Volcanmayo y los puntos inspeccionados por el OVS.

## Zona 1

Situada en la parte más cercana al cráter, flanco sur, y de mayor elevación entre los puntos del recorrido inspeccionado. Gran parte de los depósitos que aquí se observan son de poca compacidad y alto índice de erosión, favoreciendo la formación de una topografía que se caracteriza por pendientes pronunciadas y quebradas profundas. Cotidianamente se observan desprendimientos y existen zonas de deslizamiento que pueden observarse a simple vista en la zona superior de la quebrada Volcanmayo (Figura 02). En general, la zona del flanco sur es un área muy inestable.

Inspeccionando la zona de la margen superior derecha

Continúa en la pág. 12 →

de la quebrada Volcanmayo (coordenadas 298 620E – 8 188 630N UTM) se ha podido observar hundimientos y agrietamientos de algunos metros de largo en estos terrenos (Figura 03). Se calcula en un metro el desplazamiento del terreno en horizontal, mientras que en otras zonas es notorio un hundimiento de 2 metros en promedio.



Figura 02.- Zona superior de la quebrada Volcanmayo. Se observa la erosión de las paredes y desprendimiento de material.



Figura 03.- Hundimiento del terreno y grietas a lo largo de la superficie, observados a 700 metros al norte de Querapi y 470 metros al oeste del cauce de la quebrada Volcanmayo (coordenadas UTM: 298620E; 8188 630N).

Al observar la deformación de suelos y la inestabilidad de los depósitos, es posible considerar que los continuos derrumbes hayan obstaculizado parte del cauce de quebradas. Estos depósitos inestables que se acumulan en este sector pueden también haber contribuido con su material en el desarrollo de los lahares del 6 de febrero de 2015.

### Zona 2

En la carretera a Ubinas (Norte del poblado de Ubinas), a la altura de su intersección con la quebrada Volcanmayo se observó grandes bloques de roca (2 m de ancho por 3 m de alto), que invadieron la vía arrastrados por la fuerza del lahar. Los cortes de carretera sufridos en varios puntos de esta zona tuvieron profundidades de hasta 1 metro. El material depositado en esta zona alcanzaba los 50 cm de espesor. En la figura 04 se observa el momento de irrupción del lahar, en el punto de intersección con la carretera.



Figura 04.- Fotografía que muestra el preciso momento del paso del lahar sobre la vía que conduce hacia el pueblo de Ubinas. (Quebrada Volcanmayo).

### Zona 3

Continuando el descenso por la quebrada Volcanmayo, la zona a la altura del poblado de Tonohaya ha sido el punto más afectado por los lahares al erosionar la vía de acceso a este poblado. Las dimensiones del corte en la carretera son 30 metros de largo por 5 metros de alto (Figura 05).

Estando esta vía cortada, el tránsito vehicular Ubinas-Matalaque tuvo que ser desviado por una ruta alterna que pasa por Querapi y Sacohaya, llega por el sur de Tonohaya y continúa por el camino habitual hacia Matalaque.



Figura 05.- El lahar arrasó con este tramo de camino, en las coordenadas 241E – 8 186 432N.

En la misma zona también se puede apreciar que las bases del puente peatonal situado a 200 metros al norte de Tonohaya fueron erosionadas por el tránsito de la mezcla de lodo y agua (Figura 06). Las autoridades han prohibido su uso, siendo clausurado este paso por considerarlo peligroso.



Figura 06.- Puente peatonal cercano al poblado de Tonohaya clausurado debido al debilitamiento de sus bases.

### Zona 4

Otra parte afectada fue la zona sur del poblado de Huatagua (12 km al sur del volcán). En la zona situada a 1.2 km al sur de Huatagua, los terrenos de cultivo aledaños al cauce del río Ubinas fueron dañados (Figura 07). Los campesinos informaron de la pérdida de 6 cabezas de ganado que fueron arrastradas por el lahar; se observan cortes en el canal de regadío que pasa por la zona.

Esta zona se ubica a 16 km al sur de la parte alta de la quebrada Volcanmayo (flanco sur del volcán Ubinas), las coordenadas son 306 046E – 8 181 833N. Las huellas dejadas por los flujos de lodo y agua (Figura 08) son evidencia de la magnitud del fenómeno.



Figura 07.- Pérdidas de pequeñas parcelas de terreno (sombreado rojo).



Figura 08.- Rastro de una capa de lahar (Izquierda) y destrucción de zonas de cultivo (Derecha).

**b) Lahares del 11-13 de abril de 2015.-** El personal del OVS acudió a la zona el día 13 de abril y recabó información directa sobre los lahares que estaban ocurriendo desde el 11 de abril. Se presenció y documentó el tránsito del lahar del 13 de abril, que pasó por el cruce de la quebrada Volcanmayo y el acceso norte a Ubinas a las 10:30 hrs.

El lahar descendió del flanco sur del volcán Ubinas y recorrió río abajo por la quebrada Volcanmayo. En esta ocasión los factores en la formación de este fenómeno fueron: (a) ceniza en todos los flancos del volcán, principalmente en el lado sur, cuyo mayor volumen provino de la muy reciente actividad eruptiva ocurrida en los últimos tres días (OVS-IGP), (b) caída constante de nieve en días anteriores, y acumulada en las partes altas del volcán favorecida por los cielos cubiertos de nubosidad y por consiguiente bajas temperaturas y (c) ocurrencia de cielo despejado y de brillo solar intenso desde el 11 de abril, lo cual permitió el derretimiento de la cobertura de nieve acumulada.

Los principales lahares fueron observados el 12 y 13 de abril entre las 10:00 hrs y 14:00 hrs, estos flujos se caracterizaron por tener gran consistencia (alta densidad) y coloración grisácea (debido a la ceniza volcánica). El torrente tuvo energía suficiente para mover rocas con dimensiones aproximadas de 2 metros de diámetro. Las zonas 2 y 3 fueron las áreas más perjudicadas por estos episodios, principalmente

la zona 3 volvió a registrar corte en el acceso al poblado de Tonohaya, de manera similar a la vez anterior (lahar del 6 de febrero). La velocidad de desplazamiento del lahar ha sido de 2 m/s en promedio. Este cálculo aproximado ha sido obtenido según estimaciones de la hora de llegada de la primera oleada vista en el acceso cercano al poblado de Tonohaya. La Figura 09 da cuenta de la magnitud y daños ocasionados por los lahares de abril.



Figura 09.- Imágenes representativas del lahar ocurrido el 13 de abril. Imágenes superiores fueron captadas en el cruce del acceso a Ubinas y la quebrada Volcanmayo (Zona 2). La imagen inferior muestra nuevamente un corte en la carretera cercano al poblado de Tonohaya (Zona 3).

Es importante señalar que desde el 8 de abril de 2015, luego de 4 meses y medio sin mayores emisiones de productos volcánicos, se registraron dos explosiones seguidas de intensas emisiones de ceniza por 3 días consecutivos. El OVS, gracias a información de campo adquirida entre el 8 y 10 de abril, generó un mapa de isopacas de depósitos de ceniza del volcán Ubinas (Figura 10). Los resultados indican que en ese periodo se acumuló un volumen total mínimo de ceniza de 650 000 m<sup>3</sup> (cálculo del volumen basado en el área de las isopacas).

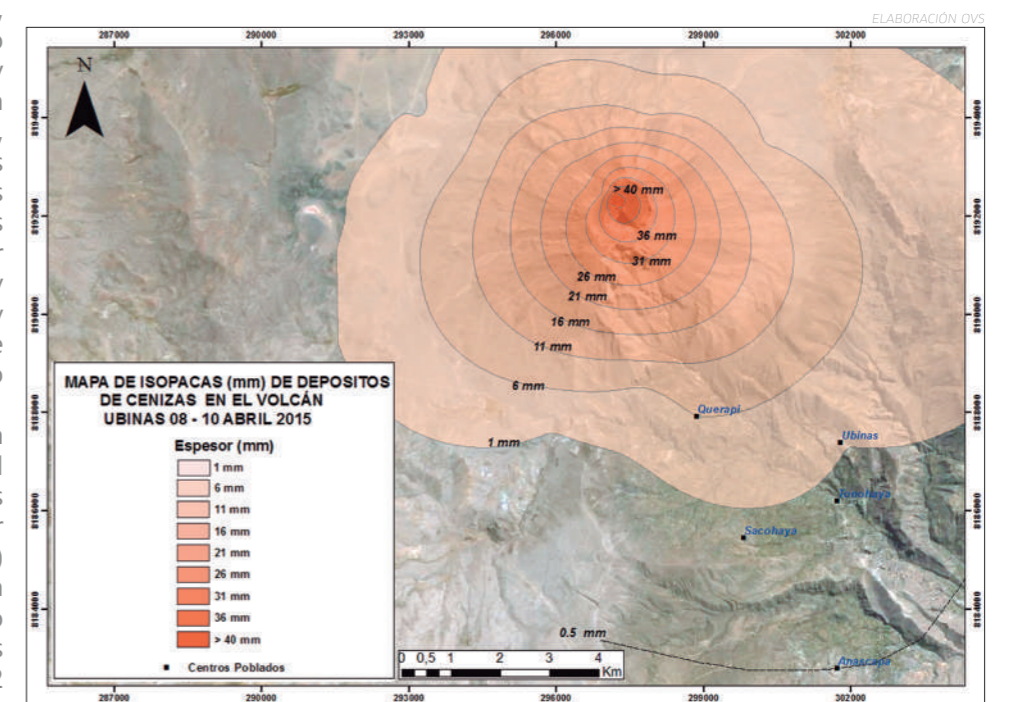


Figura 10.- Mapa de espesor de caída de ceniza con información recabada entre el 08 y 10 de abril. El total de volumen mínimo de ceniza calculado asciende a 650,000 m<sup>3</sup>.

## CONCLUSIONES

- En marzo y abril de 2015, personal del OVS realizó inspecciones de campo y obtuvo datos, fotografías y videos, así como testimonios de pobladores y autoridades del valle de Ubinas con relación a la ocurrencia de los lahares del 06 de febrero y los ocurridos entre el 11-13 de abril.
- El día 06 de febrero a las 16:20 hora local, un primer lahar descendió por la quebrada de Volcanmayo. A las 18:05 hora local, se reporta un segundo lahar descendiendo por el mismo camino que el anterior. Estos lahares ocurrieron luego de intensas precipitaciones pluviales ocurridas en la zona.
- Entre el 8 y 10 de abril, se efectuó mediciones en campo que permitieron obtener un mapa de isópacas de depósitos de caídas de ceniza sobre el volcán Ubinas. Se calculó un volumen mínimo de 650,000 m<sup>3</sup> de ceniza.
- Los días 11, 12 y 13 de abril ocurrieron nuevos lahares, esta vez ocasionados por la acumulación de nieve en días de cielo cubierto, y su derretimiento al presentarse días de cielo despejado e insolación.
- Los daños debidos a estos lahares en su recorrido, involucran cortes y bloqueos por escombros en los caminos de acceso a las diferentes localidades del

valle de Ubinas. Un corte de 30 metros de longitud y 9 metros de profundidad se observó cerca al poblado de Tonohaya, durante el lahar del 6 de febrero así como en los lahares de abril, quedando el paso temporalmente inhabilitado.

- Cercano al flanco sur del volcán, se observó un hundimiento del terreno con presencia de varias grietas con longitudes variables entre 1 y 9 metros, así también desplazamiento del suelo de 2 metros en promedio.
- Al sur del valle (Huatagua, San Miguel) se reportó el ingreso del lahar a tierras de cultivo, la pérdida de cabezas de ganado y daños en el canal de riego.
- La estación sísmica UB1 del volcán Ubinas, registró un Tremor continuo, asociado al lahar del 6 de febrero. Este Tremor tuvo un pico máximo de energía entre las 5:30 y 22:30 hora local del 6 de febrero, día en el que se reportó una energía acumulada de 41.9 MJ.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Observaciones asociadas al lahar ocurrido el 17 de enero 2007 en el valle de Ubinas (Informe Interno OVS-IGP) - Orlando Macedo, Edu Taipe, Domingo Ramos. Enero 2007, 14 págs.



Figura 11.- En la formación de lahares interactúan diversos elementos como agua, rocas y ceniza acumulada en los diferentes flancos del edificio volcánico.

# ACTIVIDAD SIMO-VOLCÁNICA REGISTRADA EN EL VOLCÁN SABANCAYA PERIODO 2013-2015

Nino Puma <sup>(1)</sup>, José Luis Torres <sup>(1)</sup>, Jennifer Jay <sup>(2)</sup>, Francisco Delgado <sup>(2)</sup>, Matthew Pritchard <sup>(2)</sup>, Orlando Macedo <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), <sup>(2)</sup> Cornell University, Ithaca, NY (USA)

## INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya está ubicado a 80 km en dirección NNO de la ciudad de Arequipa (15°47' S; 71°72' W; 5967 msnm) en el sur del Perú (Figura 01). Es un estratovolcán de composición andesítica de edad Holocénica reciente y forma parte del complejo volcánico Ampato, Sabancaya y Hualca-Hualca. El Sabancaya registró 2 erupciones históricas entre 1750 y 1784 -1785. Recientemente, entre 1990-1998, presentó una última erupción que alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 3 (Siebert et al, 2010). Luego de 15 años de tranquilidad, a partir del 22 de febrero de 2013, este volcán exhibió nuevos signos de actividad, con alta sismicidad y emisiones fumarólicas de coloraciones blanquecinas y azulinas a nivel del cráter, muchas veces intensas y densas, que alcanzaron alturas de hasta 3 km.

Durante el periodo de estudio (febrero de 2013 - marzo de 2015) el OVS-IGP, al día siguiente de la crisis de febrero, instaló en un primer momento 6 estaciones portátiles: 5 de ellas de banda ancha (Guralp-6TD) y 1 de periodo corto (1 sensor Lennartz 3DLite y registrador CMG-DM24). Además, a partir del 24 de marzo de 2013 se cuenta con la Red Telemétrica del Sabancaya (RESSAB) que consta de 3 estaciones: SABA, CAJA y PATA, equipadas con sensores de banda ancha GURALP 40T y digitalizador Reftek130. En 2014, con el objetivo de mejorar la localización de eventos propios del volcán, se instaló una antena sísmica (ANT) con 3 estaciones sísmicas de periodo corto (3 sensores Lennartz 3DLite, 2 digitalizadores Data-Cube3 y 1 digitalizador Guralp DM-24). Además, se instaló una estación temporal denominada HUAL (sensor Mark Products y digitalizador Titan3-XT), ubicada en la zona N a 4 km del cráter del volcán (figura 01).

## MECANISMOS FOCALES Y DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE

La mayor parte de eventos registrados durante el periodo (febrero de 2013 - marzo de 2015), son de tipo Volcano-Tectónico (VT) (61.1%), asociados a fractura de rocas. Se realizaron mecanismos focales con eventos de mayor magnitud (>1.8 ML) y mejor registrados, en los periodos donde ocurrieron los enjambres sísmicos y deformación importante. Los resultados muestran mecanismos de falla normal (extensional) e inversa (compresión) ligeramente transcurrentes.

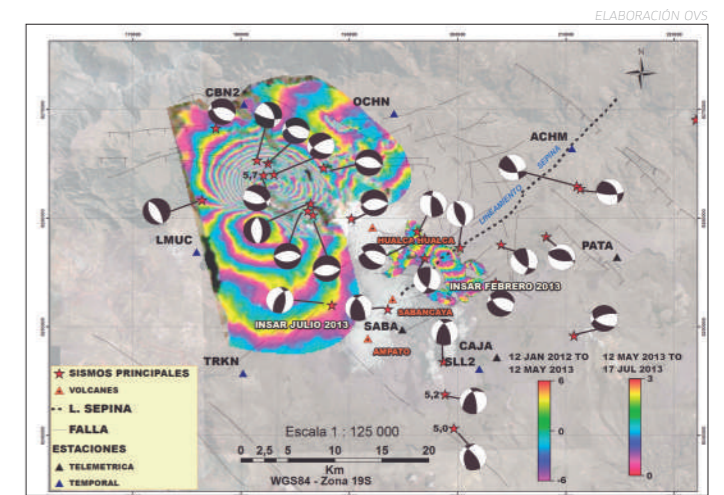


Figura 02.- Mapa tectónico sobre el cual se ha dibujado los mecanismos focales de los principales sismos observados en los 2 enjambres registrados el 22-23 de febrero 2013 y 16-17 julio de 2013. Adicionalmente se superpone la deformación del terreno evidenciada por InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar).

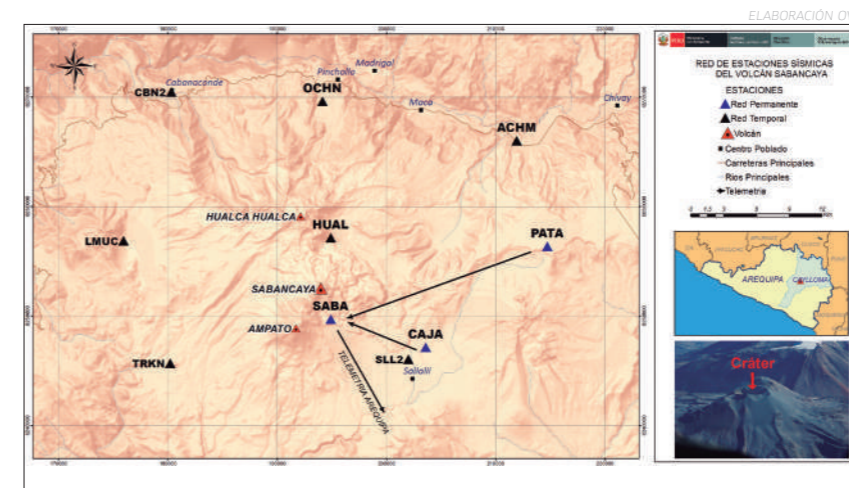


Figura 01.- Ubicación del complejo volcánico Ampato, Sabancaya y Hualca-Hualca. En la figura se muestra la distribución estratégica de las estaciones sísmicas con las que cuenta el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para realizar una óptima localización de los eventos sísmovolcánicos; además, se observa la configuración de la red sísmica telemétrica (RESSAB).

Estudios realizados por Jay J. et al (2015) con imágenes InSAR, han mostrado una constante deformación en áreas circundantes al volcán Sabancaya, que datan desde los periodos de diciembre de 2002 - septiembre de 2003, enero de 2012 - mayo de 2013, julio - noviembre de 2013 y, finalmente, noviembre - mayo de 2014. En la figura 02, se observa un interferograma (InSAR) de los periodos enero de 2012 - mayo de 2013 y mayo - julio de 2013, los cuales cubren las fechas donde se registraron 2 enjambres sísmicos importantes: el primer enjambre se registró el 22-23 de febrero de 2013 (4 sismos de 4.6 ML, 5.2 ML, 5.0 ML y 4.5 ML) y el segundo enjambre el 16-17 de julio de 2013 (3 sismos de 4.9 ML, 4.2 ML y 5.7 ML). El método InSAR muestra que ha ocurrido una subsidencia de un máximo de 6 cm en la zona que corresponde al enjambre sísmico del 22-23 de febrero, a 6 km hacia el NE del cráter. Del mismo modo, el método InSAR muestra, para julio de 2013,

Continúa en la pág. 16 →

una zona amplia de subsidencia de 16 cm hacia el NE y de inflación de 6 cm hacia el SO de una zona de falla situada a 15 km del cráter; esta zona se correlaciona con el enjambre sísmico observado en julio.

### EVOLUCIÓN DE LA SISMICIDAD VOLCÁNICA DEL SABANCAYA EN EL PERIODO 2013-2015

Entre febrero de 2013 a marzo de 2015 se han registrado y clasificado un total de 59278 sismos. De ellos 37134 (61.1%) son eventos Volcano-Tectónicos (VT), 18351 (32.7%) son eventos Largo Periodo (LP), 2783 (4.5%) son eventos Híbridos (HIB); además, se registraron 1008 (1.7%) eventos Tremor (TRE) y Tornillos (TOR). Finalmente se registraron 2 explosiones y una explosión de menor energía (figura 03). La evolución de la sismicidad durante este periodo ha venido acompañada del incremento en la altura y la emisión de fumarolas (06 de agosto de 2014, altura de 3000 metros sobre el cráter) y densidad de SO<sub>2</sub> (proyecto "Global Sulfur Dioxide Monitoring"-NASA). En la figura 05 D, se observa el incremento progresivo y sostenido de la medida de densidad de SO<sub>2</sub> durante todo el periodo, similar a la tendencia experimentada por los eventos sismo-volcánicos registrados.

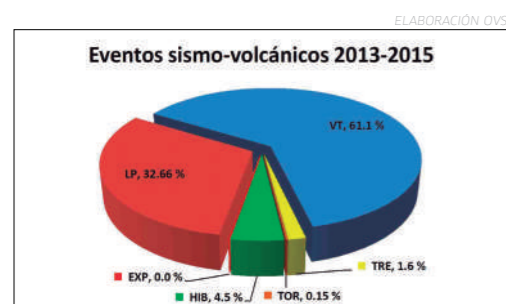


Figura 03.- Eventos y densidad de SO<sub>2</sub> registrados entre el periodo febrero de 2014 - marzo de 2015. Se observa el predominio de los VTs (61%), seguido de los LPs (32.7%).

Una característica notable es que los eventos ocurridos al inicio de la intranquilidad (22-23 febrero de 2013) han sido del tipo "Swarm" (enjambre) y no del tipo "mainshock-aftershock". En efecto, el 22 y 23 febrero de 2013 han ocurrido en enjambre 4 sismos de 4.6 ML, 5.2 ML, 5.0 ML y 4.5 ML, en el lapso de 24 horas. Un comportamiento similar se observó también el 16-17 de julio con la ocurrencia de 3 sismos de 4.9 ML, 4.2 ML y 5.7 ML en el lapso de 17 horas. White R. (2011) ha mostrado que la ocurrencia de sismicidad en "swarm" en ambientes volcánicos es un importante signo de la inminencia de actividad eruptiva. Asimismo, este mismo autor ha mostrado que frecuentemente al inicio de la intranquilidad volcánica ocurre sismicidad de fractura (VT) que se sitúa lejos del cráter, pudiendo llegar hasta los 30 km, esto como consecuencia de la presión de fluidos ocasionados por el ascenso del material magmático. Seguidamente, la sismicidad VT debería migrar hacia el cráter, aparecer eventos de baja frecuencia (LP) e Híbridos, además de explosiones freáticas.

Los eventos sismo-volcánicos durante el transcurso de este periodo y las emisiones fumarólicas al nivel del cráter, han evolucionado siguiendo patrones propuestos por White (2013) y White & McCausland (2013) y se caracterizan por las siguientes etapas:

a) Registro de los eventos Volcano-Tectónicos Distales (VTd) y Proximales (VTp): Los VTs durante este periodo se han localizado en la zona NO y SE y se han dividido en 4 zonas por su persistencia en el tiempo: La Zona 1 (VTd), localizada a 22 km al NO del cráter del volcán y muy cerca al pueblo de Cabanaconde: la sismicidad se presentó en julio de 2014 (enjambre del 16-17 de julio de 2013) con deformación importante. La sismicidad en esta zona volvió a aparecer nuevamente el 28 de febrero de 2015, registrándose un VT de 4.4 ML sobre el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde y con profundidad de 5 km. Esta sismicidad finalmente

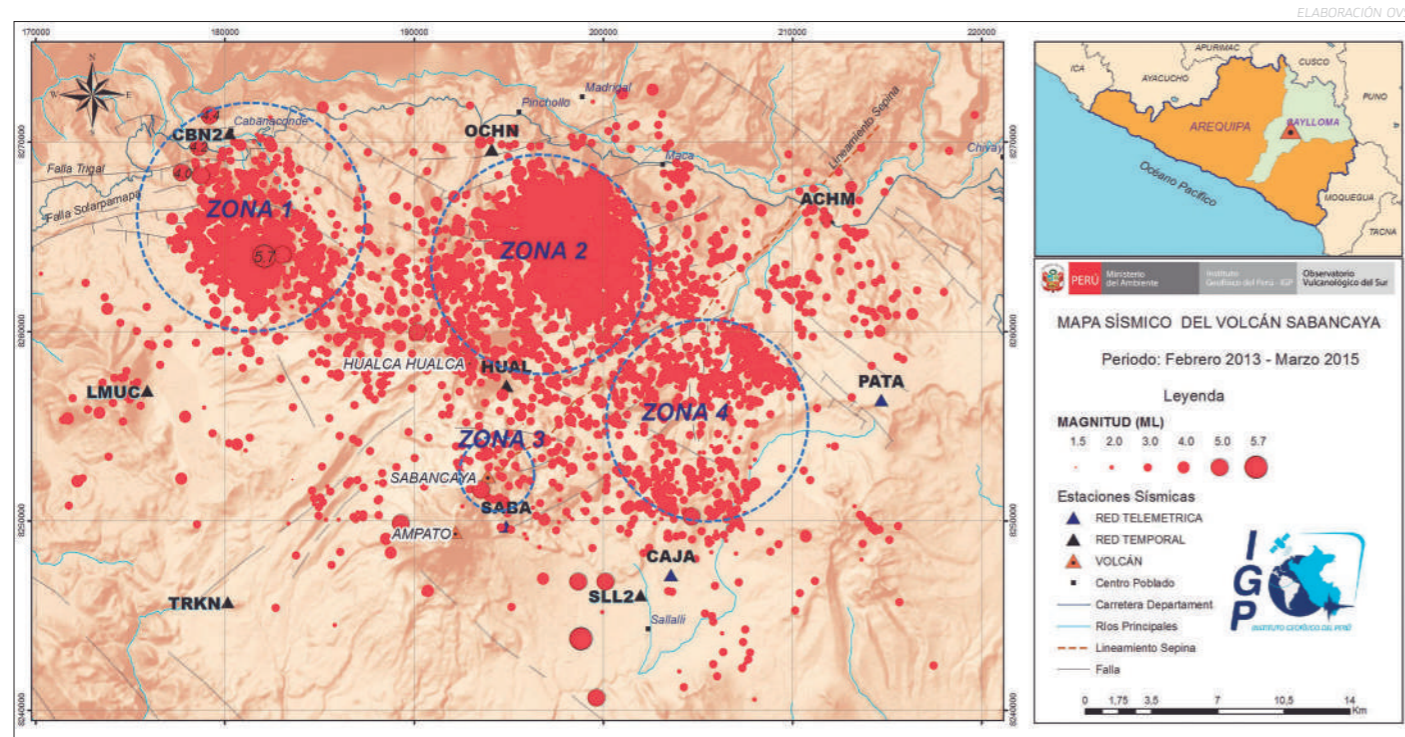


Figura 04.- Registro de los eventos VT (febrero de 2014-marzo de 2015). Se observa la localización de los VTs y las zonas que forman: Zona 1 (VTd), al NO a 22 km del cráter. Zona 2 (VTd), al NNE a 14 km del cráter. Zona 3 (VTp), en inmediaciones del volcán un mes antes de la explosión. Zona 4 (VTd), al E a 10 km del cráter.

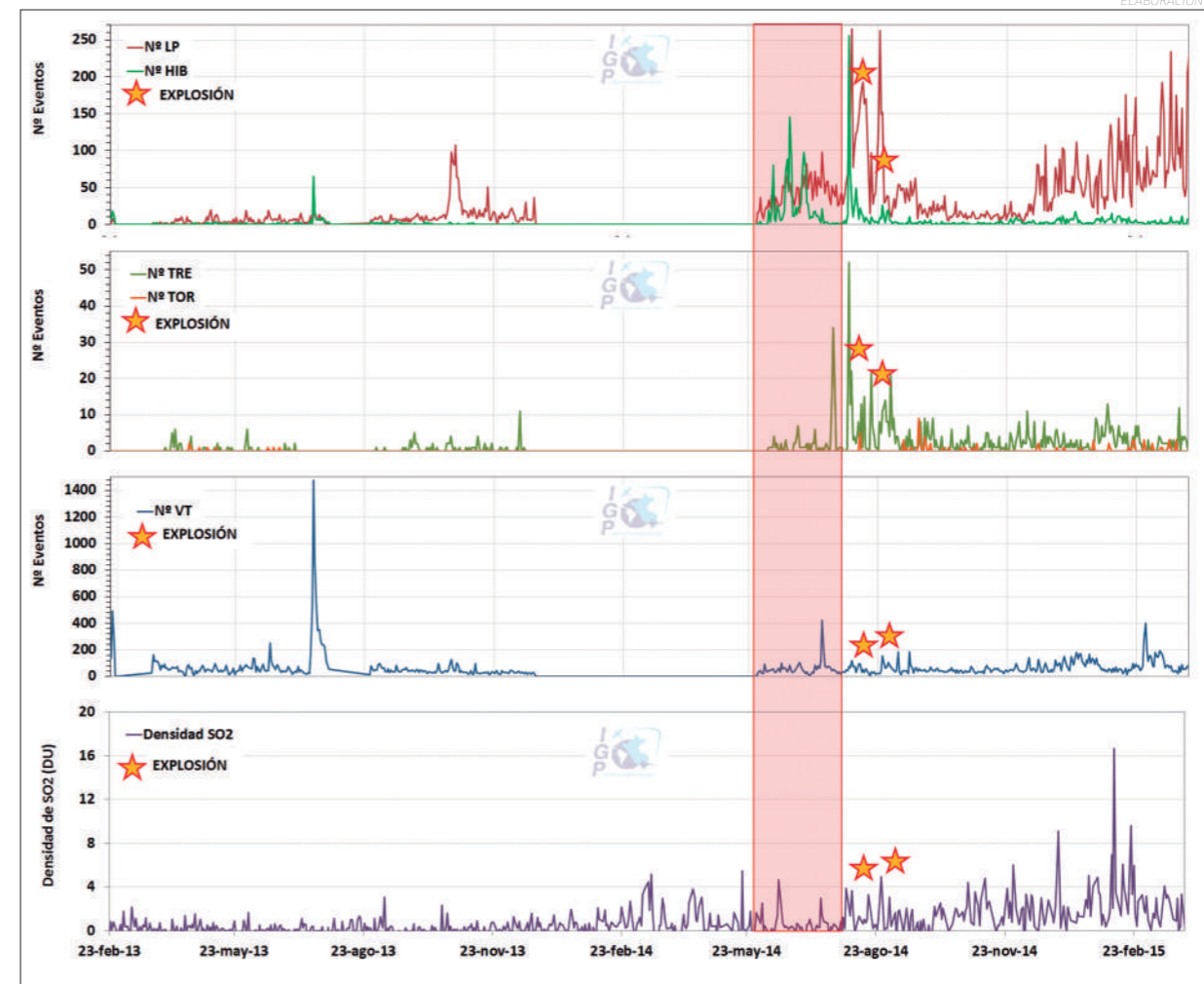


Figura 05.- Estadística de los eventos registrados por la red RESSAB, durante el periodo comprendido entre febrero de 2013 hasta marzo de 2015. La sismicidad (LP, HIB y TRE) se incrementó notoriamente un mes y medio antes de las explosiones. La medida de densidad de SO<sub>2</sub> durante todo el periodo detalla un incremento progresivo y sostenido acorde con el registro sismo-volcánico.

desapareció por la quincena de marzo. La Zona 2 (VTd), localizada a 14 km al NNE del cráter, al sur de los pueblos de Maca y Pinchollo: la sismicidad se presentó en julio de 2014, posteriormente desaparece para volver a presentarse a inicios de 2015 y perdura hasta el momento. En esta zona se registraron 2 eventos de 3.8 ML los días 19 de enero de 2015 y 04 de marzo de 2015, con profundidades entre 7 y 8 km. La Zona 3 (VTp): los sismos se registraron principalmente en el 2014 en el mes de julio. Un grupo de sismos se localizaron a 7 km al N del cráter y posteriormente migran en el mes de agosto de 2014 hacia inmediaciones del cráter del volcán, registrándose eventos cercanos a 3.0 ML días antes de la primera explosión. El sismo de mayor magnitud (4.5 ML) se registró el 23 de febrero de 2013. La Zona 4 (VTd): estos sismos se registraron a lo largo de todo el periodo, localizado a 10 km al E del cráter del volcán; sin embargo, se registraron con mayor número en el mes de junio y noviembre de 2014; el sismo de mayor magnitud en esta zona se registró el 30/06/2013 con 4.0 ML (figura 04).

b) Incrementos de los eventos LPs: Desde el inicio de la actividad, los LPs, asociados al paso de fluidos, han ido incrementándose sostenidamente, de tal forma que en 2013 se ha registrado una tasa de 9.5 LP/día, mientras que en 2014 se registró 68.3 LPs/día; además, es notorio el incremento un mes y medio antes de la primera explosión, registrándose un pico máximo de 265 LPs el 04 de agosto de 2014. Después de las 2 explosiones, los eventos LPs han disminuido hasta el mes de diciembre e inicios de 2015 donde se registró un incremento importante y sostenido

hasta marzo de 2015, lográndose registrar un promedio de 70.7 LPs/día (figura 05 A).

c) Aparición de los eventos HIB, TRE y TOR: El registro de los eventos Híbridos, asociados al ascenso de fluidos, exhibió un notable incremento en el 2014, mostrando un importante enjambre entre los días 06 de junio y 14 de julio, alcanzando un pico de 145 HIB el 21 de junio. Además, mostró otro incremento importante entre los días 02 y 08 de agosto de 2014, destacando un pico de 255 Híbridos el 02 de agosto. Del mismo modo, los TRE se incrementaron notablemente 3 semanas antes de las explosiones y continuó durante las mismas, registrando 2 picos de 34 y 52 TRE los días 22 de julio y 02 de agosto. Posteriormente estos eventos disminuyeron desde septiembre hasta la elaboración de este artículo (mayo de 2015).

Los eventos TOR, asociados a presurización de las cavidades bajo el volcán, comenzaron a ser registrados a partir del día 10 de agosto, después de la primera explosión. Se registró 9 TOR el día 21 de septiembre de 2014. Finalmente estos fueron decayendo en número hasta fines de marzo (figura 05 A y B).

d) Registro de las explosiones freáticas: Después del incremento de los eventos LPs, TRE y aparición de los TOR, además de la migración de los VTs hacia el cráter del volcán, se registraron 2 explosiones de tipo freático: la primera registrada el día 09 de agosto a las 09:29 hora UTC, con energía de 9083 Megajoules (MJ) y una duración de 50 segundos, y la segunda explosión se registró dos

Continúa en la pág. 18 →

semanas más tarde, el 26 de agosto a la 01:39 hora UTC, liberando una energía de 1151 MJ y con una duración de 82 segundos; además, se registró una explosión freática de menor energía el 11 de noviembre de 2014 (431 MJ; 170 s de duración) (figura 06).

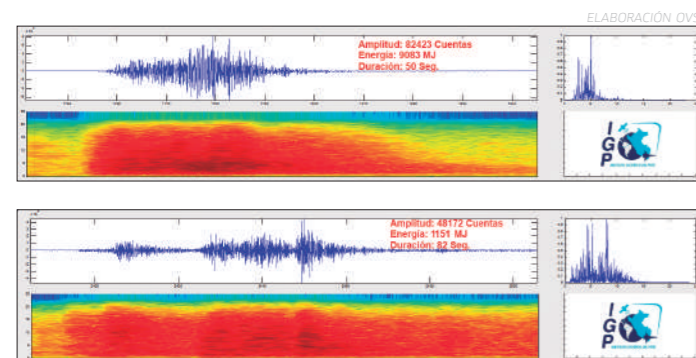


Figura 06.- Explosiones freáticas registradas por la estación SABA, localizada a 3 km al S del cráter. La primera explosión fue registrada el 09 de agosto de 2014; la segunda, el 26 de agosto.

## CONCLUSIONES

- Se identificaron 59278 eventos sismo-volcánicos, de los cuales un 61 % se clasificaron como VT, 33 % son eventos LP, 4.5 son eventos HIB y 1.7 % son eventos TRE y TOR. Finalmente se registró 2 explosiones y una explosión confinada.
- Se realizaron mecanismos focales de los sismos y los datos InSAR del área de estudio. Ellos muestran que los sismos corresponden esencialmente a fallamientos normales (sector NO), acorde con la tectónica observada sobre los Andes (Sébrier M. and Soler P, 1991). Existe, sin embargo, una zona situada al E y NE donde se observa fallamiento inverso (zona de Sepina).
- Los VTs localizados se distribuyeron formando zonas bien definidas: Zona 1 (VTd), localizada a 22 km al NO del cráter del volcán, se presentó en julio de 2014 (con deformación importante) y volvió aparecer el 28 de febrero – 15 de marzo de 2015, sobre el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde. Zona 2 (VTd), localizada a 14 km al NNE del cráter del volcán, al sur de los pueblos de Maca y Pinchollo, se presentó en julio de 2014 y nuevamente vuelve a presentarse a inicios de 2015 y perdura hasta el momento. Zona 3 (VTp), en sus inicios



Figura 07.- Vista del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca desde la estación Patapampa, una de las tres estaciones del OVS en la zona.

se presenta a 7 km al norte del cráter en el mes de julio de 2014, posteriormente en el mes de agosto de 2014 se aproxima a inmediaciones del cráter, donde se registró eventos cercanos a 3.0 ML días antes de la primera explosión. Zona 4 (VTd), se registraron a lo largo de todo el periodo, localizado al E a 10 km del cráter del volcán.

- Se registraron 2 explosiones freáticas: la primera el día 09 de agosto de 2014 a las 09:29 hora UTC, con energía de 9083 MJ y una duración de 50 segundos; la segunda explosión se registró dos semanas más tarde, el 26 de agosto a 01:39 hora UTC, con energía de 1151 MJ y una duración de 82 segundos; además se registró una explosión confinada el 11 de noviembre de 2014 (431 MJ; 170 s de duración)
- La sismicidad registrada en el volcán Sabancaya ha venido siguiendo los patrones indicado por White (2011) y se ha logrado determinar las etapas de este proceso: Registro de los eventos Volcano-Tectónico Distantes y Proximales, incrementos de los eventos LPs, aparición de los eventos HIB, TRE y TOR y finalmente el registro de las explosiones.
- La intranquilidad del volcán Sabancaya continúa evolucionando, aparentemente a un nuevo proceso eruptivo. El número de LPs y densidad de SO<sub>2</sub> vienen mostrando un importante incremento sostenido y progresivo desde inicios de diciembre de 2014 hasta el momento. Además, se continúa presentando sismos VTd en la zona de Maca y Pinchollo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jay J. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya Volcano, southern Peru, from 2002-2015. Geophysical Research Letters, Accepted on March 2015, DOI: 10.1002/2015GL063589, p. 5-10.
- Sebrier, M. & Soler, P. 1991. Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late orogenic Oligocene time to present. In: R. S. Harmon and C. W. Rapela, editor, Andean magmatism and its tectonic setting. Geol. Soc. Amer. Spec. paper, v.265, p. 265, 259-278.
- White, R. & Mccausland, W. 2013. Pronóstico de erupciones explosivas basado en patrones sísmicos USGS. Curso de sismología - Arequipa, p. 1-86.
- White, R. 2011. Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. Volcano observatory best practices workshop: eruptions forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.

# MÉTODO STA/LTA PARA LA DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE EVENTOS SÍSMICOS E IDENTIFICACIÓN DE FAMILIAS SÍSMICAS: CASO DEL VOLCÁN SABANCAYA, PERIODO 2013

José Del Carpio <sup>(1)</sup>, Jean Battaglia <sup>(2)</sup>, Orlando Macedo <sup>(1)</sup> y Javier Vilca <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), <sup>(2)</sup> Laboratoire Magmas et Volcans



Estación Sabancaya, ubicada a 5200 msnm, es una de las tres estaciones sísmicas telemétricas que componen la Red Sísmica local que vigila al volcán.

## RESUMEN

En el presente trabajo se hace uso del algoritmo STA/LTA (*Short Time Average – Long Time Average*), aplicado a datos sísmicos continuos de la estación SABA, perteneciente a la red de estaciones sísmicas telemétricas del OVS. Los datos analizados fueron registrados entre el 24 de marzo al 21 de diciembre de 2013. Mediante este algoritmo se detectaron 175 027 eventos, se consideró un umbral STA/LTA de detección de 5.0. Con estas características se realizó la conversión y extracción de sismos y posterior agrupamiento en familias sísmicas. El número final de datos procesados fue de 35 057 eventos. El número de familias sísmicas agrupadas, para un umbral de correlación de 0.80, fue de 521, considerando como mínimo 5 miembros para formar una familia. En este primer análisis, se observó interrupción de varias familias sísmicas durante la ocurrencia del sismo de 5.7 ML, registrado el 17 de julio a 7 km al SE de Cabanaconde. Las interrupciones en la actividad sísmica de varias familias por efecto de ML=5.7 podría tener muchas explicaciones, entre ellas: (a) el efecto de un gran sismo sobre el volcán (Battaglia et al, 2012), (b) La estación SABA se ubica cerca del área epicentral, y el terremoto podría también inducir cambios en el medio cercano a la fuente y (c) solo cambió la actividad sísmica y diferentes fallas fueron activadas después del sismo de 5.7 ML, en comparación a la actividad registrada antes del evento.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya (193 999E; 8, 252 525N; 5967 msnm) pertenece a la ZVC y está ubicado a 80 km al NNW de la ciudad de Arequipa. Su última erupción remonta al periodo 1990 – 1998 (Siebert et al, 2010), con un VEI entre 2 y 3, emisión de ceniza de hasta 5 km de altura y dispersión preferentemente hacia el Este.

Luego de 14 años de baja actividad, en los últimos meses de 2012, el volcán Sabancaya presentó un aumento visible en su emisión de fumarolas. Esta actividad se incrementó desde el 22 febrero de 2013, en que ocurrieron tres fuertes sismos en el lapso de 95 minutos, con magnitudes de 4.6, 5.2 y 5.0 ML. Los sismos provocaron el colapso de 12 viviendas en la localidad de Maca, situado a 20 km al NE del cráter (Comisión de Ciencia y Tecnología, Comunicado N°1, mayo de 2013).

En este contexto, el 80-90 % de los aproximadamente 500 sismos diariamente registrados por las estaciones sísmicas del OVS instaladas en la zona, correspondía a sismos de tipo fractura. El trabajo de clasificar manualmente semejante cantidad de eventos es arduo y tedioso. Una alternativa para este proceso puede ser abordado por medio de la aplicación del algoritmo STA/LTA para la detección automática de eventos, utilizando una estación de referencia. Para el presente estudio se considera a SABA como la estación de referencia. Dicha estación está ubicada

Continúa en la pág. 20 →

a 3 km al sureste del cráter del volcán y ha mantenido un registro continuo desde la fecha de implementación de la red.

Los resultados que se detallan en este artículo son de carácter preliminar; sin embargo, el procesamiento de detección STA/LTA para el periodo 2013 está completo, las variables fueron LTA=60 seg., STA=1seg., radio STA/LTA=2.5.

## DATOS SÍSMICOS

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) opera la red telemétrica del volcán Sabancaya, conformada por tres estaciones sísmicas equipadas con sensores Guralp CMG-40T, banda ancha, denominadas CAJA (Cajamarca), PATA (Patapampa) y SABA (Sabancaya); asimismo, se dispone de otras dos estaciones sísmicas temporales (HUAL y OCHN).

La estación SABA está ubicada a solo 3 km al sureste del cráter (Figura 01). Para este trabajo se ha utilizado los datos de SABA, registrados entre el 24 de marzo al 21 de diciembre de 2013, aunque con una breve interrupción ocurrida entre el 29 de julio al 25 de agosto por problemas técnicos. Los datos tienen un formato estándar *miniseed*, el registro se divide en archivos de 24 horas y conservan una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo.

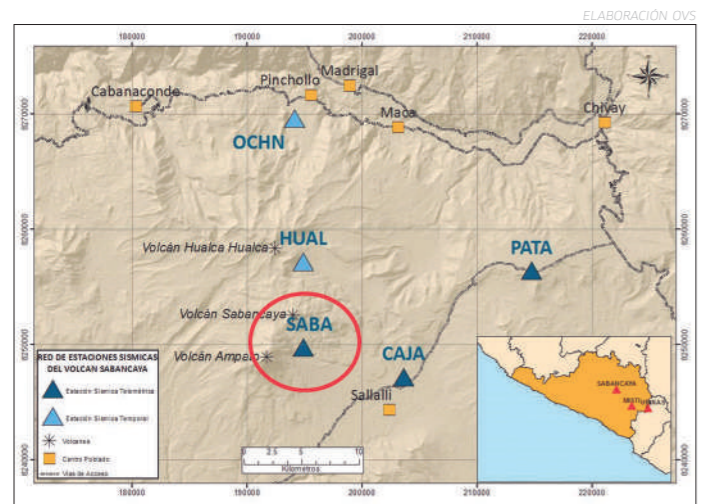


Figura 01.- Ubicación del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca la red de estaciones sísmicas telemétricas del OVS.

## ALGORITMO STA/LTA

Este algoritmo de detección calcula continuamente el promedio de los valores de amplitud absoluto de una señal sísmica, en dos ventanas que se mueven consecutivamente en el tiempo. La ventana de tiempo corto STA (*short time window*), es sensible al evento sísmico, mientras que la ventana de tiempo largo LTA (*long time window*), provee información acerca de la amplitud temporal del ruido sísmico en el lugar. Cuando la relación entre ambos (STA/LTA) excede un valor preestablecido, se decide declararlo como evento y el dato se registra en un archivo (Amadej Trnkoczy, 1999).

Otras variables como el PEM (tiempo de pre-evento) y PET (tiempo post-evento) pueden ser deducidos de la figura 02.

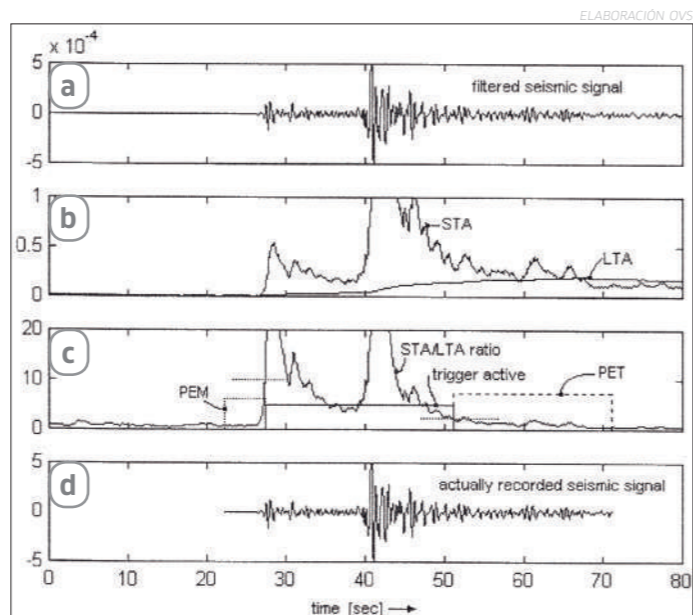


Figura 02.- (a) Señal sísmica filtrada, (b) señal promediada en ventanas LTA y STA, (c) radio STA/LTA y también PEM, PET, (d) Señal sísmica registrada.

## PARÁMETROS DE DETECCIÓN

El tipo de sismicidad predominante en la zona del volcán Sabancaya corresponde a sismos Volcano-Tectónicos, entre un 80% a 90%, con rangos de frecuencia entre 3 a 15 Hz. Y también, sismos relacionados a movimiento de fluidos, en un 10% a 20%, con rangos de frecuencia entre 0.5 y 5.0 Hz. Los valores ingresados en el algoritmo STA/LTA, fueron: LTA=60s, STA=1s y con radio umbral STA/LTA de 2.5, filtro *butterworth* de cuatro polos entre 4 Hz a 22 Hz.

Se consideró un umbral arbitrario STA/LTA para disminuir el número de eventos detectados, para efecto de no sobrepasar limitaciones de computación, tales como la duración, este umbral fue de 5.0. También se consideró un umbral de correlación para la clasificación de familias sísmicas, establecido en 0.80.

## CONFIABILIDAD DE DETECCIÓN

Se han realizado pruebas con valores umbrales STA/LTA arbitrariamente seleccionados. La tarea de este umbral es disminuir el número de datos detectados por el algoritmo STA/LTA, con el fin de no incrementar un valor límite establecido en 46 000 eventos. El motivo es no sobrepasar la capacidad de computación que realiza, entre otras tareas, la conversión de formatos y extracción de datos. Los umbrales STA/LTA utilizados fueron: 5.0, 10.0 y 15.0. Es decir, mientras más elevado sea el umbral, disminuye el número de eventos seleccionados, pero, a la vez, son seleccionados los de mayor amplitud (cuentas).

Estas pruebas se hacen con el fin de relacionar las tendencias en el número de eventos detectados a diferentes umbrales versus el tiempo.

La figura 03 muestra que existe un principio de similitud en las tendencias del número de eventos para umbrales STA/LTA de 5.0, 10.0 y 15.0 (barras de color). Además de relacionar las tendencias, fue planteado en la misma figura el número total de eventos clasificados manualmente durante el mismo periodo (catálogo sísmico volcán

Sabancaya, periodo 2013), la similitud de las tendencias vuelve a ser corroborada. Por los argumentos expuestos se indica que el grado de confiabilidad de detección es aceptable.

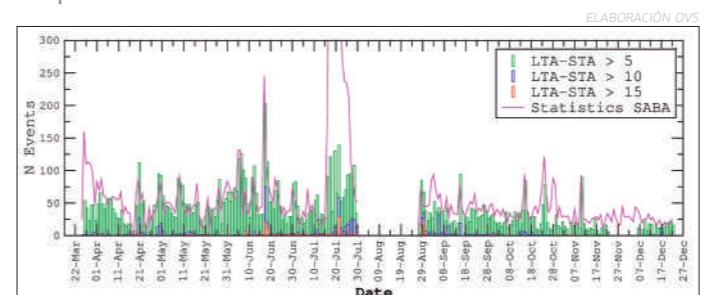


Figura 03.- (Barras) Número total de eventos detectados a diferentes STA/LTA, (línea magenta) Estadística del catálogo sísmico.

## FAMILIAS SÍSMICAS

La generación de familias sísmicas se realiza mediante el agrupamiento de eventos clasificados por correlación cruzada (*cross-correlation*), es decir, se forman grupos de eventos similares. El grado de similitud entre eventos está dado por un umbral de correlación. Para el caso de estudio se generaron familias con un umbral de 0.80, 0.85 y 0.90. Al aumentar el grado de similitud los miembros de cada familia agrupada tendrán un nivel de semejanza mayor.

En el proceso se considera como una familia sísmica a aquel grupo que contenga un número mayor de cinco miembros. Así, para un umbral de 0.80 se han formado 521 familias, para 0.85 tenemos 460 familias y para un umbral de 0.90 se formaron 362 familias sísmicas. En la tabla siguiente se muestra el número de miembros que contiene cada familia para diferentes umbrales. La tabla solo muestra las 20 primeras familias.

Umbral	Familia Sísmica									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.80	1670	836	807	525	433	414	410	349	211	205
0.85	773	699	362	324	319	242	196	183	158	146
0.90	251	167	154	153	130	117	108	104	95	86

Umbral	Familia Sísmica									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.80	191	165	146	138	126	112	105	98	98	91
0.85	133	100	99	94	87	86	85	80	77	72
0.90	74	68	62	60	55	50	48	41	38	38

Tabla 01.- Muestra el número de miembros (fondo blanco) que contiene cada familia sísmica, comparando con umbrales de correlación de 0.80, 0.85 y 0.90. La tabla solo muestra las 20 primeras familias.

## PERIODO DE ACTIVACIÓN DE FAMILIAS SÍSMICAS

El procesamiento previo, obtenemos información de la fecha exacta en el que fue registrado cada evento, además, conocemos la familia sísmica a la que pertenece. Con esta información es posible observar el periodo en el que cada familia se activó o se mantuvo activa y relacionarlo, por ejemplo, a la activación de fallas, segmento de una misma falla o algún evento importante (sismo de gran magnitud) que perturbo el sistema o ambiente volcánico.

El histograma a continuación (Figura 04), nos muestra gráficamente estos resultados.

Sobre el análisis de la figura 04, observamos el periodo

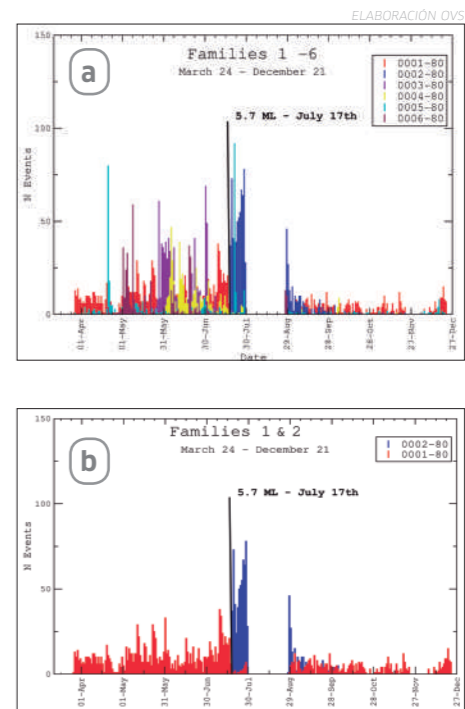


Figura 04.- (a) Período de activación de 6 principales familias, (b) La actividad de la familia 0001 y familia 0004 es perturbada por el sismo de Cabanaconde. Familia 0002 es relacionada a réplicas de este sismo de 5.7ML.

de activación de las 6 primeras familias sísmicas (Figura 04a). Así también, en las figuras se señala el sismo de 5.7 ML ocurrido el 17 de julio de 2013 y que fue localizado a 7 km al SE de Cabanaconde (17 km al NW del cráter del volcán Sabancaya). Este sismo aparentemente interrumpió la ocurrencia de algunas familias, reemplazándolas en algunos casos por otras. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 04b, la actividad de la familia 0001 (barra roja) fue permanente durante todo el periodo de estudio, esta familia fue interrumpida por la ocurrencia del sismo de Cabanaconde (al igual que otras), en la misma figura, el sismo de 5.7 ML y sus réplicas sísmicas (enjambre) están representados por la familia 0002 (barras azules). En general, la actividad de varias familias fue perturbada por el sismo de Cabanaconde.

En la figura siguiente, los *stacking* que corresponden a las familias 0001 y 0004 (Figura 05a y 05c), tienen la forma de onda típica de sismos Volcano-Tectónicos, diferencia S-P igual a 1 segundo. La figura 05b, está relacionada a réplicas sísmicas del sismo del 17 de julio, diferencia de S-P de 2.5 segundos, corresponde a familia 0002.

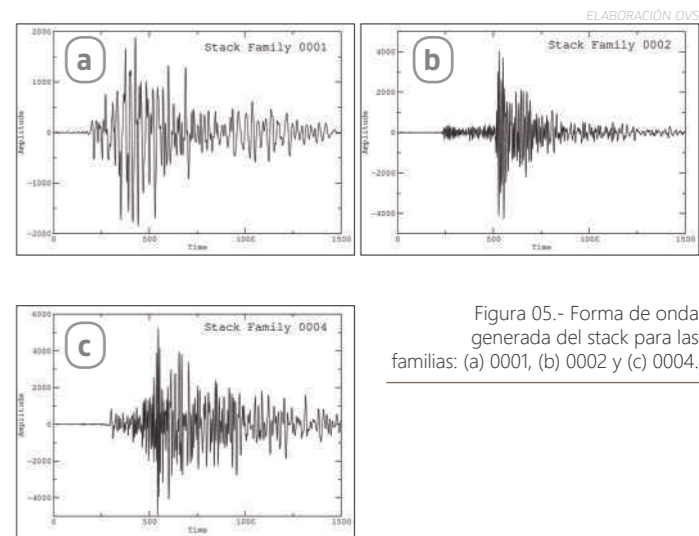


Figura 05.- Forma de onda generada del stack para las familias: (a) 0001, (b) 0002 y (c) 0004.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- Para el algoritmo de detección STA/LTA, fueron declaradas las siguientes variables: LTA=60s, STA=1s y con umbral STA/LTA de 2.5, filtro *butterworth* entre 4 Hz y 22 Hz. Así también, se consideró un umbral arbitrario STA/LTA de 5.0.
- En el periodo del 24 de marzo al 21 de diciembre, se detectaron 175 027 eventos. Al aplicar el umbral STA/LTA de 5.0, se disminuyó el número de eventos a 35 057 eventos. Con este número final de datos se continuó con el procesamiento para la clasificación de familias sísmicas.
- Los test para asegurar la confiabilidad de detección son aceptables, el número y/o tendencia de la curva que representa la cantidad de eventos detectados por día con umbrales STA/LTA de 5.0, 10.0 y 15.0, coincide con el número de eventos clasificados manualmente y que existen en el catálogo sísmico del volcán Sabancaya, periodo 2013.
- El proceso de detección para el periodo 2013 está completo con las variables declaradas descritas anteriormente. Sin embargo, el número de familias clasificadas es demasiado grande. Estamos en la etapa de identificar la forma de onda de la totalidad de familias.
- Un primer análisis realizado entre las familias 0001 y 0020, nos mostró una relación interesante con respecto al sismo ocurrido el 17 de julio 2013 y varias familias sísmicas. Por ejemplo, la familia 0001 registro una interrupción en la actividad sísmica que esta generaba, producto de este sismo de 5.7 ML y sus respectivas replicas. Esta relación podría tener muchas explicaciones posibles, tales como: (a) el efecto de un gran sismo sobre el volcán (Battaglia et al, 2012), la estación SABA está próxima al cráter y puede ser afectada por cambios en la estructura volcánica a causa de ML=5.7, (b) La estación SABA se ubica cerca del área epicentral, y el terremoto podría también inducir cambios en el medio cercano a la fuente y (c) solo cambió la actividad sísmica y diferentes fallas fueron activadas después del sismo de 5.7 ML, en comparación a la actividad registrada antes del evento.
- La figura 06, muestra ejemplos de un stack preliminar de las 20 principales familias, con un umbral de 0.80, noten

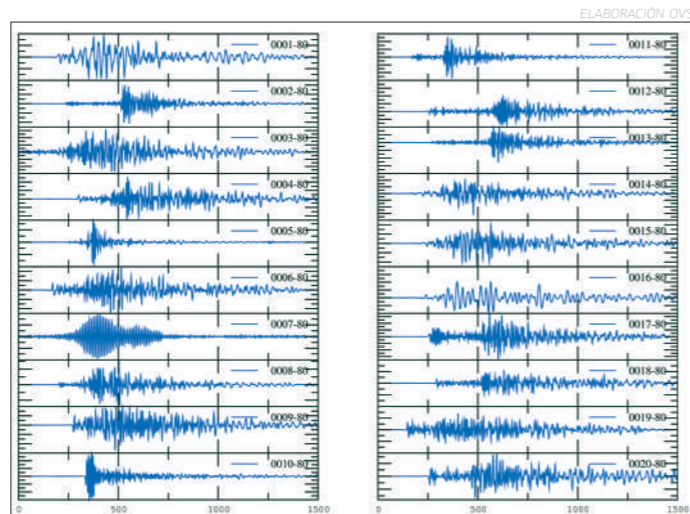


Figura 06.- Muestra un stack preliminar realizado para las 20 principales familias, con un umbral de correlación de 0.80.

que la familia 0007 este probablemente relacionada a ruido. Con esto, es importante y necesario chequear estos resultados por posibles errores.

- La evolución temporal de las familias nos indica el tiempo en que cada grupo se activó y estuvo activo. Así también, cada familia podría reflejar la actividad de diferentes fallas o diferentes secciones de una misma falla.

## REFERENCIAS

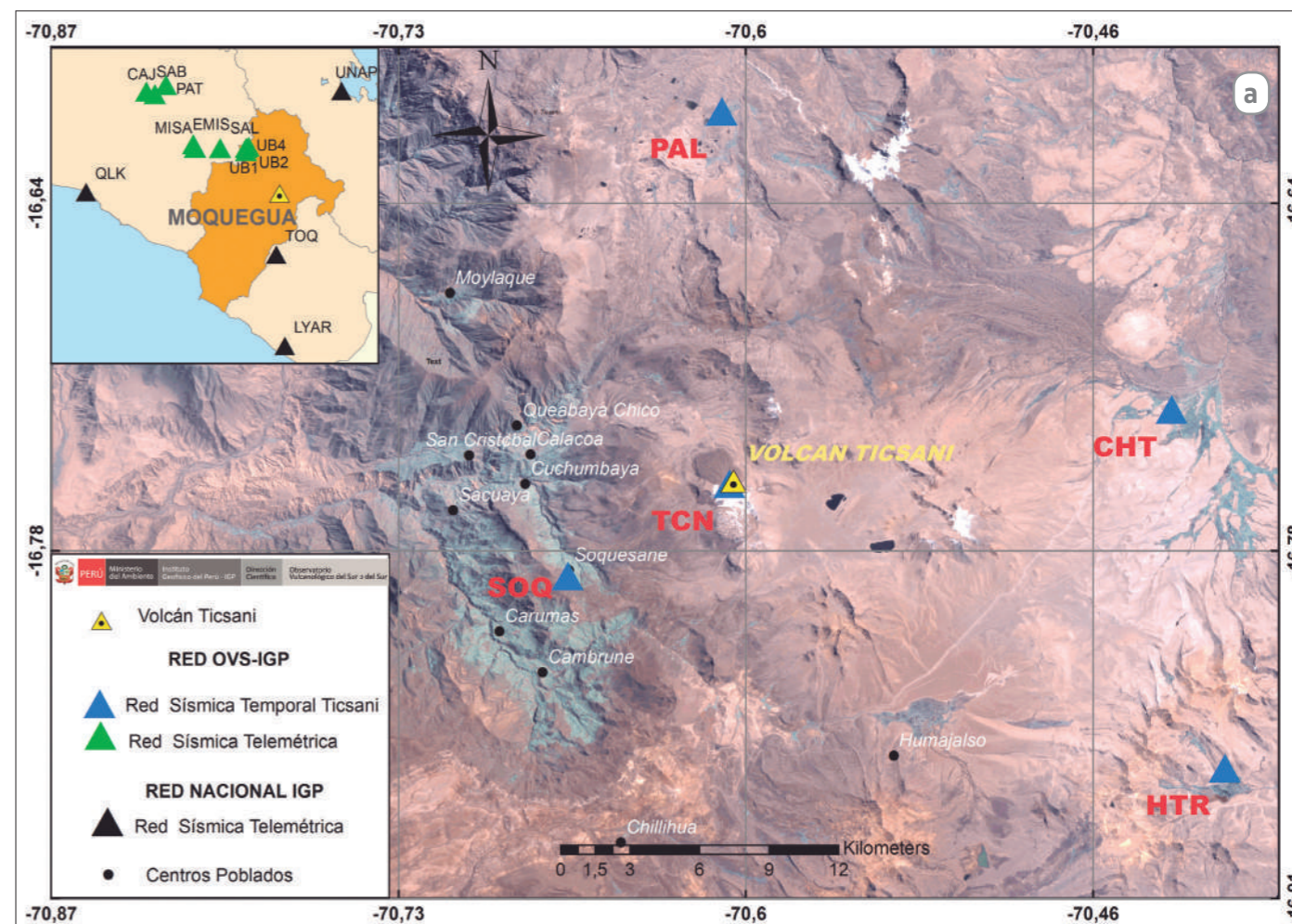
- Amadej Trnkoczy (1999) - Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm.
- Jean Battaglia (2014) - Sabancaya Seismicity, Search for Families of Similar Events.
- Jean Battaglia (2012) - Earthquake-volcano interaction imaged by coda wave interferometry.
- Jean Battaglia et al. (2004) - Precise relocation of earthquakes following the 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo.
- José Del Carpio (2014) - Análisis en Sísmica Volcánica, Reporte de Actividades.
- Siebert et al (2010) - Volcanoes of the World.



El volcán Sabancaya fue escogido para este estudio dada la mayor recurrencia de eventos Volcano-Tectónicos observados como parte de su actividad.

# ACTIVIDAD SÍSMICA OBSERVADA EN LA ZONA DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) ENTRE MAYO-SEPTIEMBRE DE 2014

John Cruz <sup>(1)</sup>, Orlando Macedo <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)



El volcán Ticsani (3297000 N, 8146400 E Zona 19K 5133 msnm) es un estrato volcán perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes, constituido por un complejo de domos de lavas andesíticas a dacíticas y una caldera de destrucción (Figura 01B), caracterizado por presentar extensos depósitos de avalancha. Se encuentra ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, pertenece al grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée, de Silva, Salas y Byrmnes, 2009). Según estudios estratigráficos, estructuras volcánicas y distribución de productos volcánicos, la más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un VEI entre 2 y 3 de tipo freatomagmática (Mariño y Thouret, 2003). Actualmente existen fumarolas de manera restringida. El volcán Ticsani presenta una actividad hidrotermal importante, representada por surgentes de agua y vapor, que se distribuyen al NO, E y SO del volcán en un radio de 9 km. La zona del volcán Ticsani ha presentado sísmicidad importante en los últimos años, que en general ha sido asociada a la tectónica local (Aguilar et al., 1999; Tavera, 2006). El año 2014, el OVS-IGP decidió efectuar un estudio de la actividad sísmica, así como iniciar el monitoreo

permanente del volcán Ticsani, para lo cual instaló una red de cinco estaciones sísmicas temporales (SOQ, PAL, CHT, HTR y TCN) en colaboración con la Universidad de Liverpool. Los instrumentos utilizados fueron sensores Lennartz LE-3D /1S LITE (1 Hz y 3C), 4 digitalizadores DATA CUBE3 y un digitalizador Guralp DM-24, dispuestos en un radio de 25 km del volcán (figura 01A). Los datos analizados en

Continúa en la pág. 24 →



Figura 01.- (A) Mapa de distribución de la red de estaciones sísmicas temporales en la región del volcán Ticsani. (B) Se observan los domos 1, 2 y 3, siendo este último (domo 3 o D3) el más reciente; se observa también la caldera de destrucción.

el presente trabajo corresponden al periodo comprendido entre el 01 de mayo y el 29 de septiembre de 2014.

### SISMOS CARACTERÍSTICOS Y MECANISMOS FOCALES

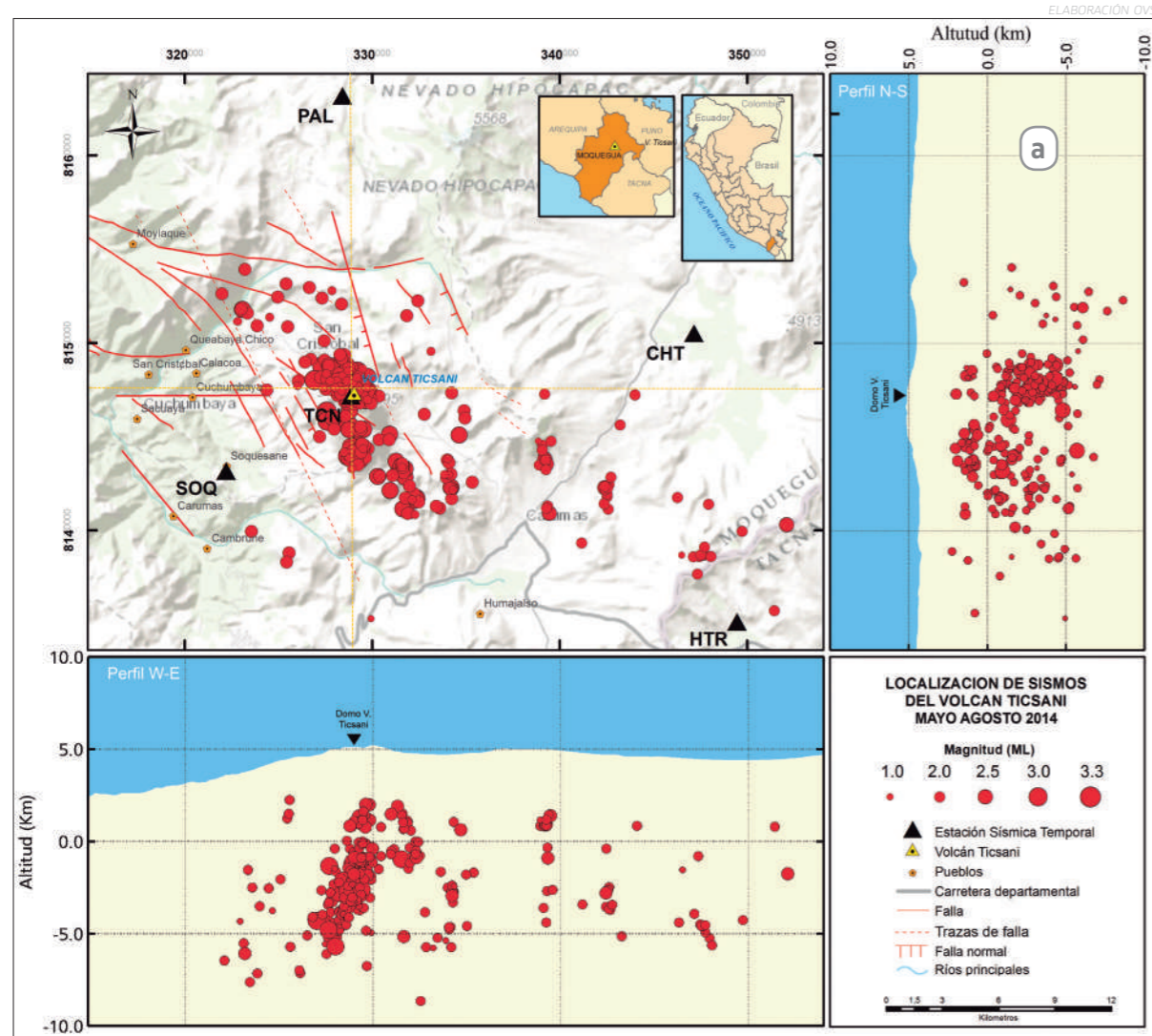


Figura 02.- a) Distribución de sismicidad en superficie y perfiles W-E y N-S, se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán.

En 153 días de adquisición de datos (mayo-septiembre de 2014), se identificaron un total 2230 eventos sísmicos. De ellos, 2112 sismos (es decir el 95%) fueron eventos relacionados a ruptura frágil que presentaron magnitudes entre 0.6 ML y 3.3 ML. El análisis frecuencial de tales eventos ha permitido identificar tres sub-tipos de fractura: sub-tipo I con frecuencias dominantes entre 3Hz y 4Hz; sub-tipo II con frecuencias dominantes entre 6Hz y 8Hz y sub-tipo III con picos en la banda espectral entre 11Hz y 12Hz. Se registraron también 118 sismos de baja frecuencia (5% del total) relacionados al paso de fluidos.

Entre los sismos de ruptura frágil, 334 eventos que presentaron fases P-S claras fueron localizados usando el programa Hypoellipse (Lahr, 1999), con un error estimado menor a 2.6 km. Las localizaciones son consideradas como calidad A y B, y se usaron tres y/o cuatro estaciones.

El mapa de la Figura 02A muestra la distribución de los sismos, que están concentrados sobre del volcán, principalmente sobre el domo reciente (D3), y sobre el domo 1; estas dos agrupaciones se encuentran sobre la traza de falla descrita por Lavallé et al. (2009), distribuidas próxima a la dirección N-S.

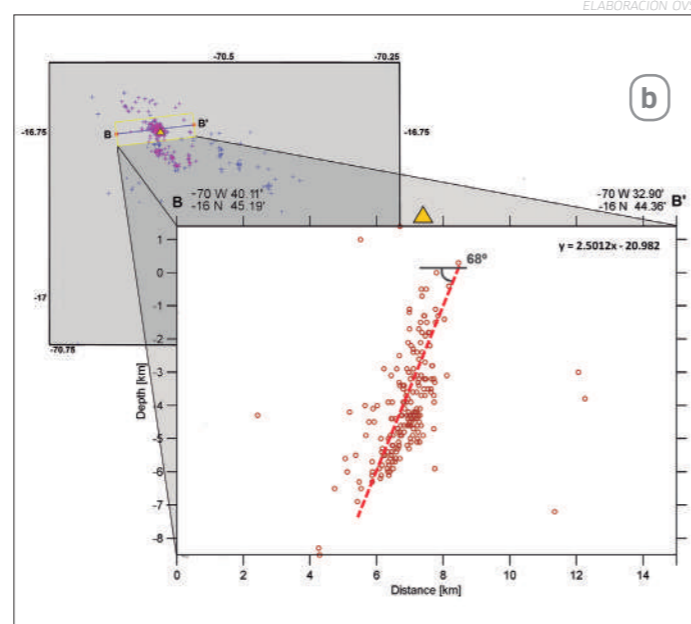


Figura 02.- b) Perfil sísmico B-B' que pasa por encima del domo reciente (D3). La sismicidad muestra un alineamiento con buzamiento próximo a los  $70^\circ$ .

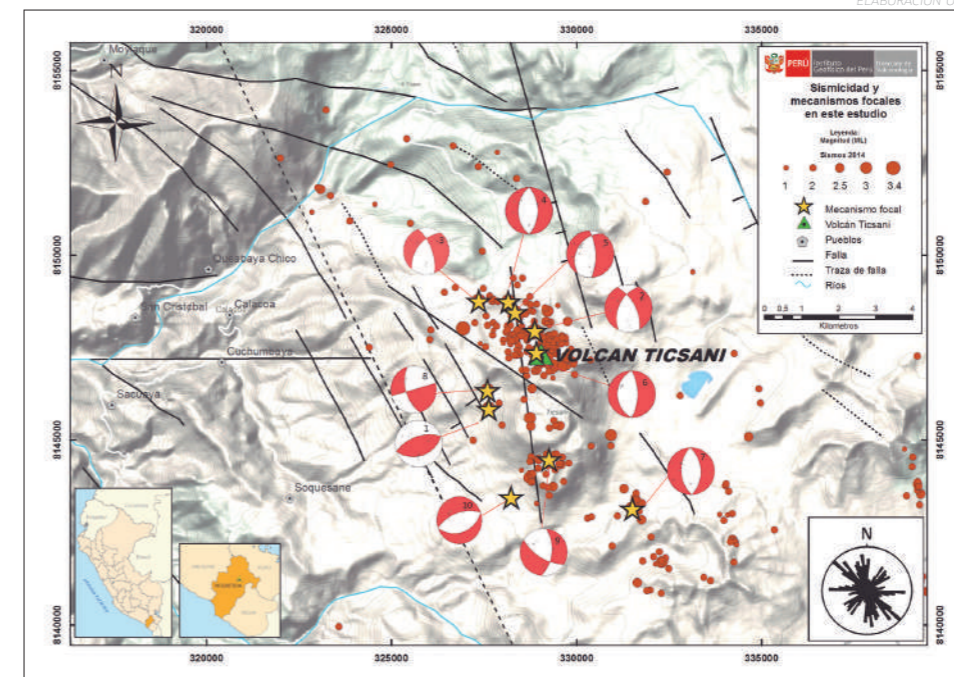


Figura 03.- Mecanismos focales (esferas) obtenidos para la zona de estudio y sistema de fallas predominantes en la región. Diagrama cumulativo de rosa representando la dirección de fallas y fracturas principales presentes en el área (esquina inferior derecha). Se observan mecanismos de tipo normal con orientación N-S sobre el domo 3 y la falla N-S descrita por Lavallé et al. (2009).

En los perfiles W-E y N-S (figura 02A), la distribución en profundidad de los eventos muestra una actividad que se extiende desde muy cerca de la superficie y hasta los 9 km de profundidad, aunque se observa una mayor concentración en los primeros 6 km. En ambos perfiles se nota que la agrupación de sismos está por debajo del domo reciente y sus cercanías. En la figura 02B se presenta el perfil B-B' cuya orientación es de  $N85^\circ$ , obtenido de manera que cruza perpendicular a la falla de orientación cercana N-S. En este perfil se observa la distribución de la sismicidad que sigue un plano con buzamiento de  $70^\circ$  al Oeste.

Los datos sísmicos recabados, tanto de la red temporal Ticsani 2014 (OVS-IGP), como de la red de estaciones del IGP, han permitido también determinar mecanismos focales. Los sismos tomados para el cálculo de los mecanismos focales fueron los más energéticos captados por las redes telemétricas Misti, Ubina, Sabancaya (OVS-IGP) y por la red nacional (IGP). Las soluciones obtenidas se presentan en la figura 03, donde podemos observar cinco sismos, ubicados a proximidad del domo D3, con mecanismos equivalentes a fallas de tipo normal con planos orientados en dirección Norte-Sur y mecanismos de carácter normal con componente transcurrente. Estos mecanismos guardan correspondencia con la falla N-S descrita por Lavallé et al. (2009).

### ENJAMBRES SÍSMICOS REGISTRADOS EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI

Durante el tiempo de estudio se ha observado la ocurrencia de dos secuencias de enjambres sísmicos. La primera, con un número de 128 eventos, se registró el 24 de junio entre las 03 y 17 horas; los eventos se localizaron sobre el domo 3 y tuvieron magnitudes de hasta 3.3 ML (figura 04,3). El segundo enjambre se registró el 26 de septiembre entre las 02 y 09 horas; los eventos

fueron localizados a 4.5 km al SSE del D3, en las cercanías del domo 1. En esta oportunidad, la estación TCN registró hasta 447 eventos (figura 04,4) con magnitudes de hasta 3.2ML.

En complemento de este estudio se realizó el análisis de los sismos registrados el año 2005. El análisis muestra un clúster con dos sismos de similar magnitud (5.9 ML) y la presencia de eventos antes de los dos sismos de mayor magnitud. Estas características están muy relacionadas con los enjambres sísmicos (Holtkamp, Pritchard y Lohman, 2011).

Los enjambres de 2005 y de 2014, registrados en la región del volcán Ticsani, no presentan la secuencia *mainshock-aftershock*, ni tampoco cumplen con la ley de Bath (Bath, 1965). En cuanto al sismo que precede al sismo de mayor magnitud (diferencia de 1.2 en magnitud), este no es comparable con la ley de Omori en cuanto a su decaimiento, por ser de corta duración y no presentar

una secuencia *after-shock*. Podemos decir entonces que son enjambres sísmicos que, al haber sido registrados en una zona volcánica activa, pueden responder a sismicidad asociada a la presencia de una componente magmática (Zobin, 2012).

Por el contrario, la sismicidad que se registró en 1999 (figura (04,1) y que fue localizada a 2 km al norte del volcán, tuvo características de *mainshock-aftershock*, es decir, que respondió a fuerzas eminentemente tectónicas.

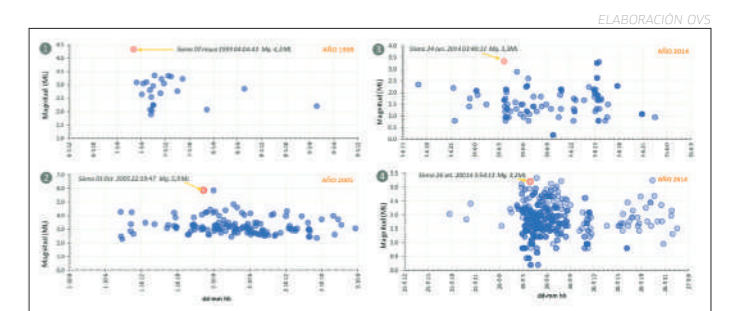


Figura 04.- Secuencia de sismos en la región del volcán Ticsani. Secuencia *mainshock-aftershock* del año 1999 (1). Enjambre sísmico del año 2005 (2). Enjambre sísmico de junio 2014 (3). Enjambre sísmico septiembre 2014 (4)

### MODELO PROPUESTO SEGÚN LA SISMICIDAD REGISTRADA

Se realizó un modelo esquemático para el volcán Ticsani con el propósito de tener una mejor comprensión de los procesos de ocurrencia por los cuales son generados los sismos. Entre los factores condicionantes más relevantes se tiene el tectonismo activo expresado en las deformaciones corticales característico de los Andes, donde la presencia de esfuerzos predominantes para la región del volcán Ticsani está caracterizada por fallas NW-SE, N-S. Otro aspecto importante a considerar es que

Continúa en la pág. 26 →

la zona donde se presenta este fallamiento, está emplazada sobre un grupo de volcanes Ubinas-Huaynaputina-Ticsani con una cámara principal alrededor de los 20-35 km de profundidad (Lavallé et al., 2009). Lavallé documenta una falla con orientación N-S sobre el volcán en base a escarpas visibles e imágenes satelitales; asimismo la sismicidad localizada muestra una falla de tipo extensional ubicada bajo el volcán que buza 70° al Oeste. Agregado a esto fue posible realizar los mecanismos focales de los eventos más energéticos, dando a conocer que esta falla es de carácter extensional.

Por tanto, este estudio sugiere que un aporte de fluidos volcánicos ocurrió en un corto periodo de tiempo donde los aportes de fluidos volcánicos generaron agrietamientos e ingresaron a fallas existentes (registro de sismos asociados a ruptura de rocas y sismos de baja frecuencia) dando por consecuencia un esfuerzo adicional al tectonismo de la región. Esto conlleva a la generación de numerosos sismos de fractura en forma de enjambre (Figura 05).

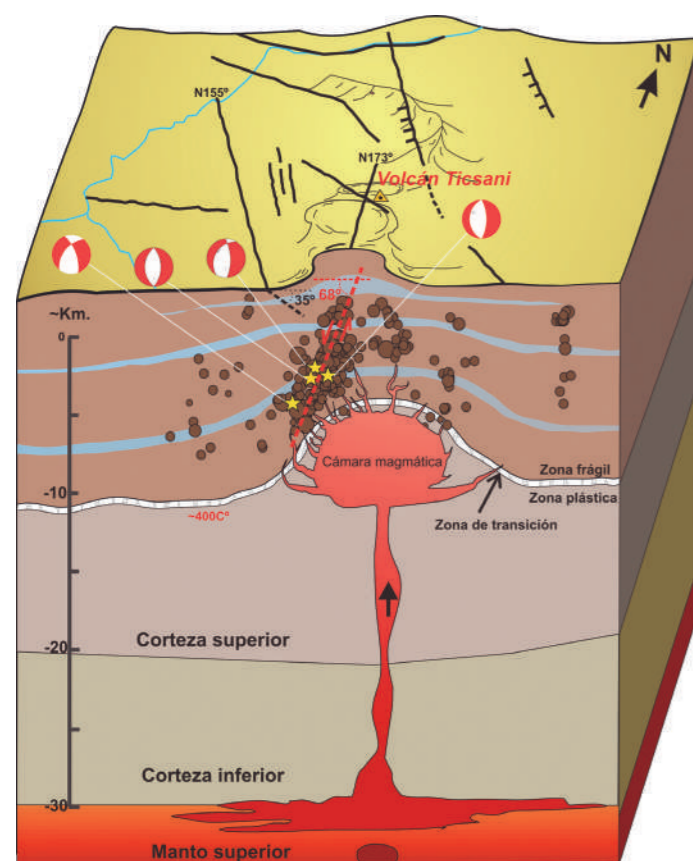


Figura 05.- Esquema a partir de Fournier (1999), el cual explica la generación de los sismos de fractura debido a la presión de fluidos volcánicos, y la interacción con una falla activa de tipo extensional, teniendo como resultado los enjambres sísmicos. Los mecanismos focales que se presentan están en vista de planta.

Los enjambres registrados, de corta duración, generaron sismos con magnitudes menores a 3.4ML, lo cual implicaría un pequeño aporte de estos fluidos volcánicos.

La diferencia principal entre un evento de procedencia tectónica y volcánica radica en la ocurrencia frecuente de enjambres sísmicos, los cuales no siguen la usual distribución *main-after-shock* (McNutt, 2000). Cabe señalar que la presencia de enjambres sísmicos es común en las regiones volcánicas independientemente del estado de actividad de la región (Zobin, 2012).

## CONCLUSIONES

- En el periodo de observación, comprendido entre el 01 de mayo y el 29 de septiembre, se registraron 2112 sismos de fractura, representando el 95% de un total de 2230 sismos clasificados, lo cual representa la sismicidad dominante en la región del Ticsani. Se registraron 118 eventos de baja frecuencia, representando un 5% del total.
- Fue posible localizar un total de 334 eventos relacionados a fractura de rocas, presentando magnitudes de 0.6 ML a 3.3 ML. La distribución en superficie se concentra principalmente sobre el domo 3 y cercanías. Asimismo, la distribución hipocentral muestra una mayor incidencia de eventos hasta los 6 km de profundidad por debajo del domo reciente, mostrando un plano con buzamiento de 70° al Oeste.
- Los mecanismos focales sobre el área de estudio corresponden a sismos ubicados sobre el domo reciente y sobre la falla N-S en su mayoría. Estos corresponden esencialmente a un fallamiento de tipo normal, acorde con las fallas descritas por Lavallé et al. (2009) y la tectónica observada sobre los Andes. Asimismo, en el flanco oeste del volcán Ticsani, se presentaron tres sismos con mecanismos de carácter transcurrente, inverso y normal.
- El enjambre de sismos registrados el día 24 de junio fue localizado sobre el domo 3 con 128 sismos de fractura. Un segundo enjambre se registró el día 26 de septiembre, ubicado a 4.5 km al SSE del domo reciente (cercanías del domo 1). Estos enjambres fueron de corta duración (menor a dos días) y de magnitudes menores a 3.3 ML.
- El modelo de generación de sismos de fractura sugiere que un aporte de presión de fluidos volcánicos se suma a los esfuerzos tectónicos de la región del Ticsani, generando numerosos sismos de fractura en forma de enjambre sobre una falla de extensión que buza al 70° al Oeste.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fournier, R., (1999).- Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. Bulletin Society of Economic Geologists, p. 1205-1208.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. Journal of Volcanology and Geothermal Research 186 (2009) 253-264.
- Holtkamp, S., Pritchard, M., & Lohman, R. (2011). Earthquake swarms in South America. Geophys. J. Int. 187,128-146.
- Zobin, V. (2012). General Properties of Volcano-Tectonic Earthquake Swarms. Introduction to Volcanic Seismology. Second edition, pp. 144-160. Elsevier, 482 p.
- McNutt, S. (2000). Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego, Pp. 1015-1034.
- Siebert et al (2010). "Volcanoes of the world". Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre de 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.



FOTO OVS

El volcán más activo del Perú, el volcán San Pedro de Ubinas, desarrolla actualmente su segunda crisis eruptiva en lo que va del siglo. Recordemos que entre 2006 y 2009 la actividad volcánica se desarrolló con el registro de gran cantidad de explosiones y la emisión de grandes volúmenes de productos volcánicos. El Índice de Explosividad Volcánica (VEI) para ese proceso fue calculado en 2 en una escala que va del 0 al 8.

La actividad explosiva de septiembre de 2013 marcó el inicio de un nuevo episodio eruptivo, el cual continúa hasta la actualidad. Solo en abril de 2014 se registró el 72% del total de explosiones y/o exhalaciones observadas en el presente proceso volcánico. Lamentablemente, el principal producto que exhala el Ubinas es la ceniza volcánica, la misma que genera los mayores problemas a las poblaciones asentadas en las cercanías de este increíble macizo.

El IGP, a través del Observatorio Vulcanológico del Sur, opera una red telemétrica de cuatro estaciones sísmicas ubicadas en los cuatro flancos del volcán. Toda la información recolectada por nuestros instrumentos nos ha permitido desarrollar material científico de invaluable importancia con el propósito final de informar a las autoridades y a la población sobre lo que sucede y lo que sucederá en su entorno volcánico.

Por Ing. José del Carpio Calienes  
Responsable del monitoreo sísmico del volcán Ubinas

“ El Ubinas es el más activo del país. Sus continuos procesos eruptivos nos permiten desarrollar exhaustivas investigaciones con el fin de determinar su patrón de actividad”



**Dr. Orlando Macedo**  
Director del OVS

# VOLCÁN UBINAS

El Ubinas es el volcán más activo del Perú. El actual proceso eruptivo, que se inició en septiembre de 2013 y que prosigue hasta la actualidad, ha alcanzado un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) igual a 2, en una escala que va del 0 al 8.

El día 08 de abril de 2015, luego de 4 meses y medio de calma, ocurrió una nueva explosión en el volcán Ubinas, que generó 1 MJ de energía. Desde entonces se registran exhalaciones y esporádicas explosiones que expulsan ceniza, la cual es dispersada por el viento hacia el valle de Ubinas y alrededores.

## RESUMEN MES A MES

### ENERO

El análisis de la actividad sismovolcánica del volcán Ubinas fue detallada en este mes a través de cuatro reportes técnicos (2015\_01 - 2015\_04).

La última explosión registrada en 2014 data del 23 de noviembre. En las primeras semanas de enero, tras el análisis de los diferentes parámetros, no se identificó señales asociadas a posibles explosiones. Llamó la atención, sin embargo, el registro de dos picos de eventos de tipo Tornillo, asociados a presión de fluidos en cavidades, los días 06 y 08 de enero, con 53 y 30 eventos y energías de 6.5 Megajoules (MJ) y 11 MJ, respectivamente.

Los eventos de tipo Largo Periodo (LP), vinculados al movimiento de fluidos, comenzaron a mostrar un incremento

sostenido a partir del 07 de enero, llegando a alcanzar un promedio de 106 LP/día entre el 20 y 26 de enero.

Los sismos Volcano-Tectónicos (VT), relacionados a fractura de rocas, se presentaron de forma escasa en todo el mes.

En enero tuvo inicio la temporada de lluvias, razón por la cual el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) advirtió la posibilidad del ingreso de flujos de barro que pondrían en riesgo las zonas aledañas a los cauces de los ríos y quebradas.

Tanto el sistema MIROVA, así como el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA, no registraron anomalías térmicas ni variación en la densidad de gases magmáticos a lo largo de todo el mes.

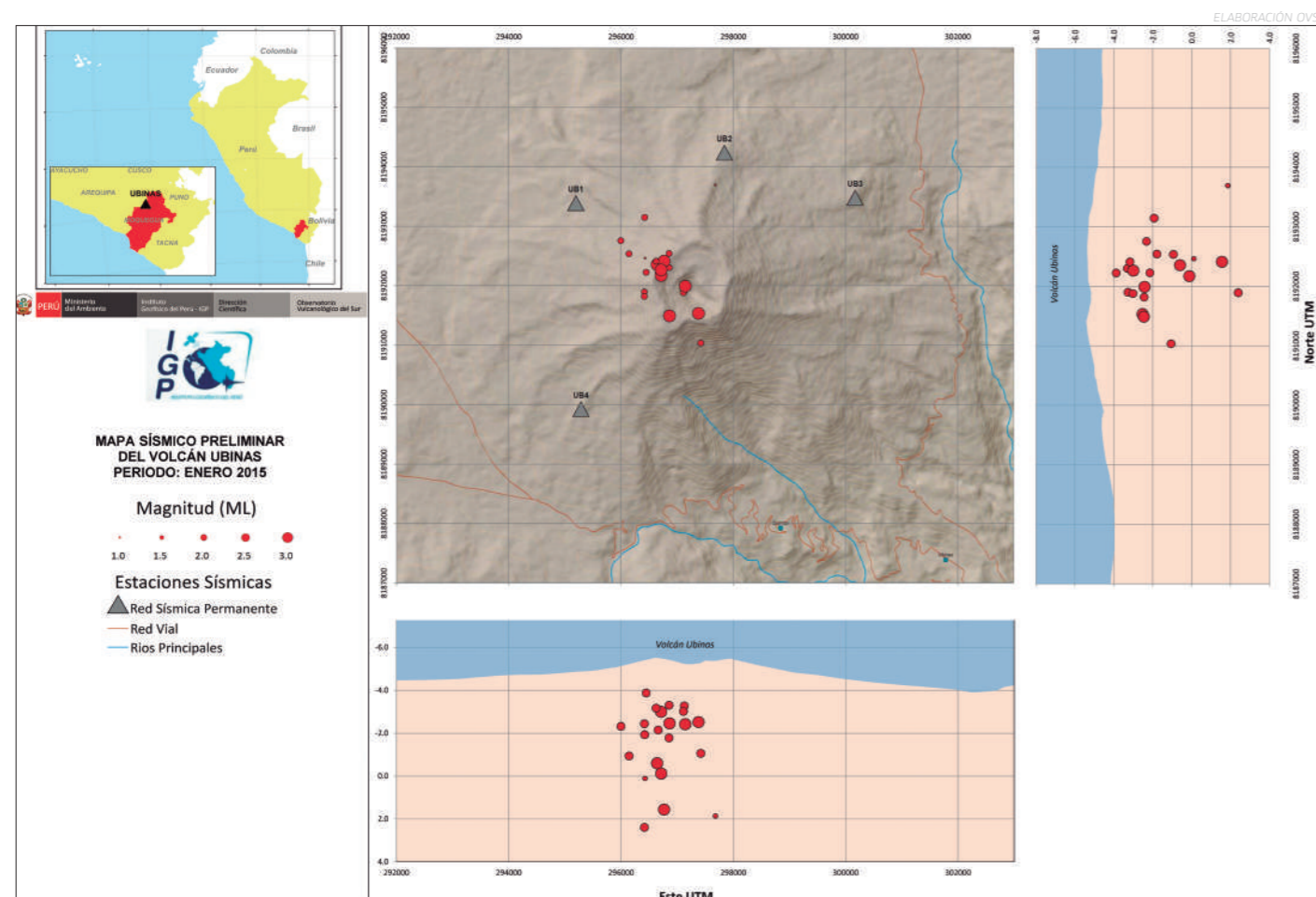


Figura 01.- Localización de sismos Volcano-Tectónicos registrados en enero de 2015 por las cuatro estaciones telemétricas instaladas en el volcán Ubinas.

### FEBRERO

El análisis de la actividad sismovolcánica del Ubinas en febrero fue expuesta en cuatro reportes (2015\_05 - 2015\_08).

La actividad de los sismos LP, que en enero mostró un incremento sostenido, comenzó a disminuir a partir del 10 de febrero, tanto en energía como en número, lo cual pudo guardar relación con el registro de actividad de tipo Tremor entre el 05 y 07 de febrero. Pese a que se observó un pequeño repunte entre el 10 y 16 de este mes, la actividad de los eventos LP cerraría febrero con tendencia a la baja.

Los sismos de tipo VT, muy disminuidos en enero, comenzaron a aumentar lentamente en número. En la primera semana de febrero, el promedio de VT fue de 3 VT/día, llegando a alcanzar los 11 VT/día para la tercera semana del mes. La energía de estos eventos no mostró mayor variación.

Toda la zona próxima al volcán Ubinas fue cubierta durante gran parte del mes por una intensa nubosidad, lo que impidió observar al detalle la emisión de gases y fumarolas.

Por otro lado, tal como

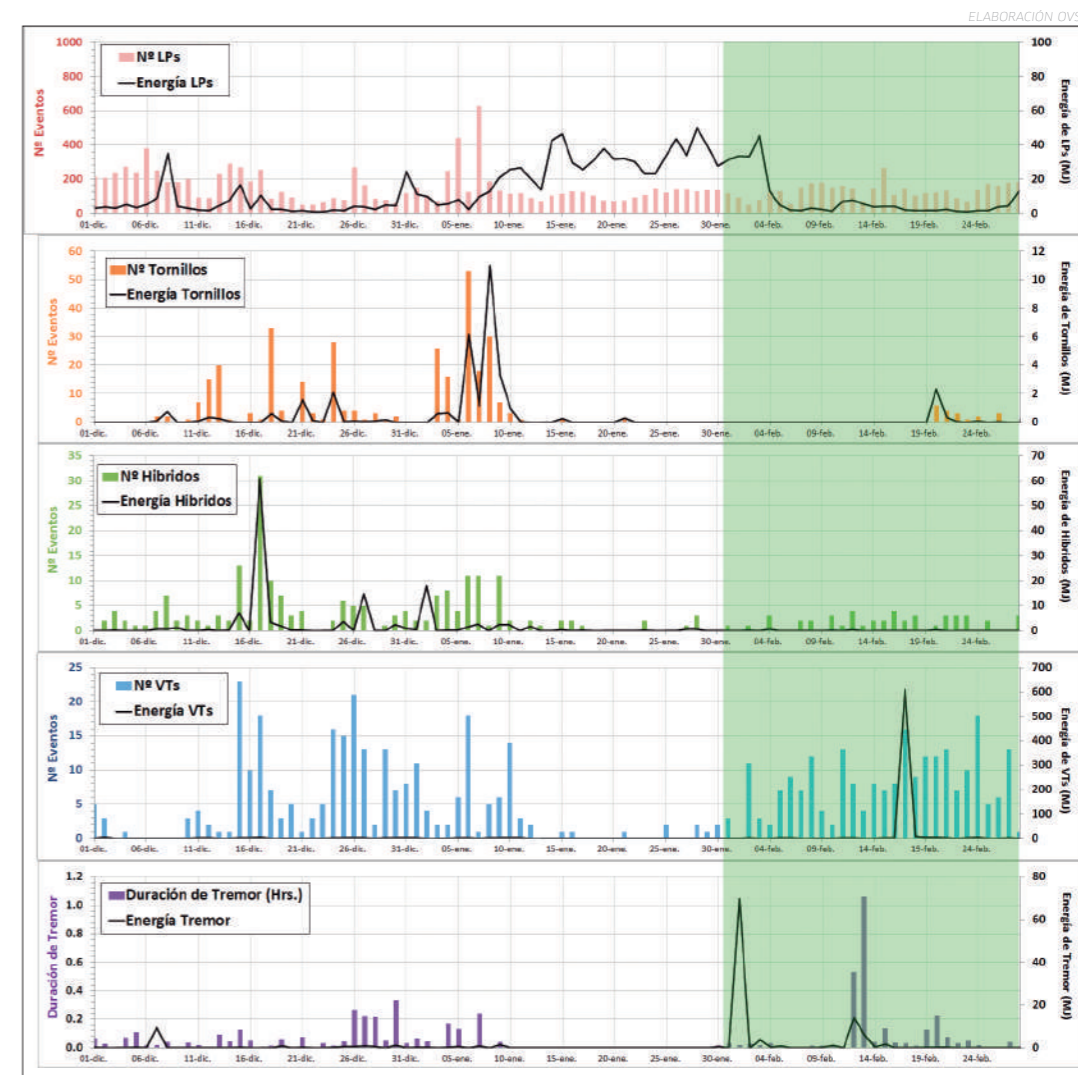


Figura 02.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El área sombreada de color verde representa el periodo entre el 01 y 28 de febrero

había sido advertido en el mes de enero, las lluvias produjeron el descenso de lahares en el sector bajo del volcán, por las quebradas situadas al SE, lo cual ocasionó daños en las cercanías del poblado de Tonohaya y en la carretera de acceso hacia este pueblo, ocasionando cortes de 5 m de profundidad y 30 m de longitud. Estos lahares, que fueron reportados el 06 de febrero por Melquiades Álvarez, nuestro colaborador en Ubinas, a las 16:20 y 18:05 horas, no serían los últimos que se registrarían en 2015.



Figura 03.- Los lahares ocurridos el 06 de febrero en el flanco sur del volcán perjudicaron las vías de acceso que conducen hacia diferentes pueblos del valle de Ubinas.

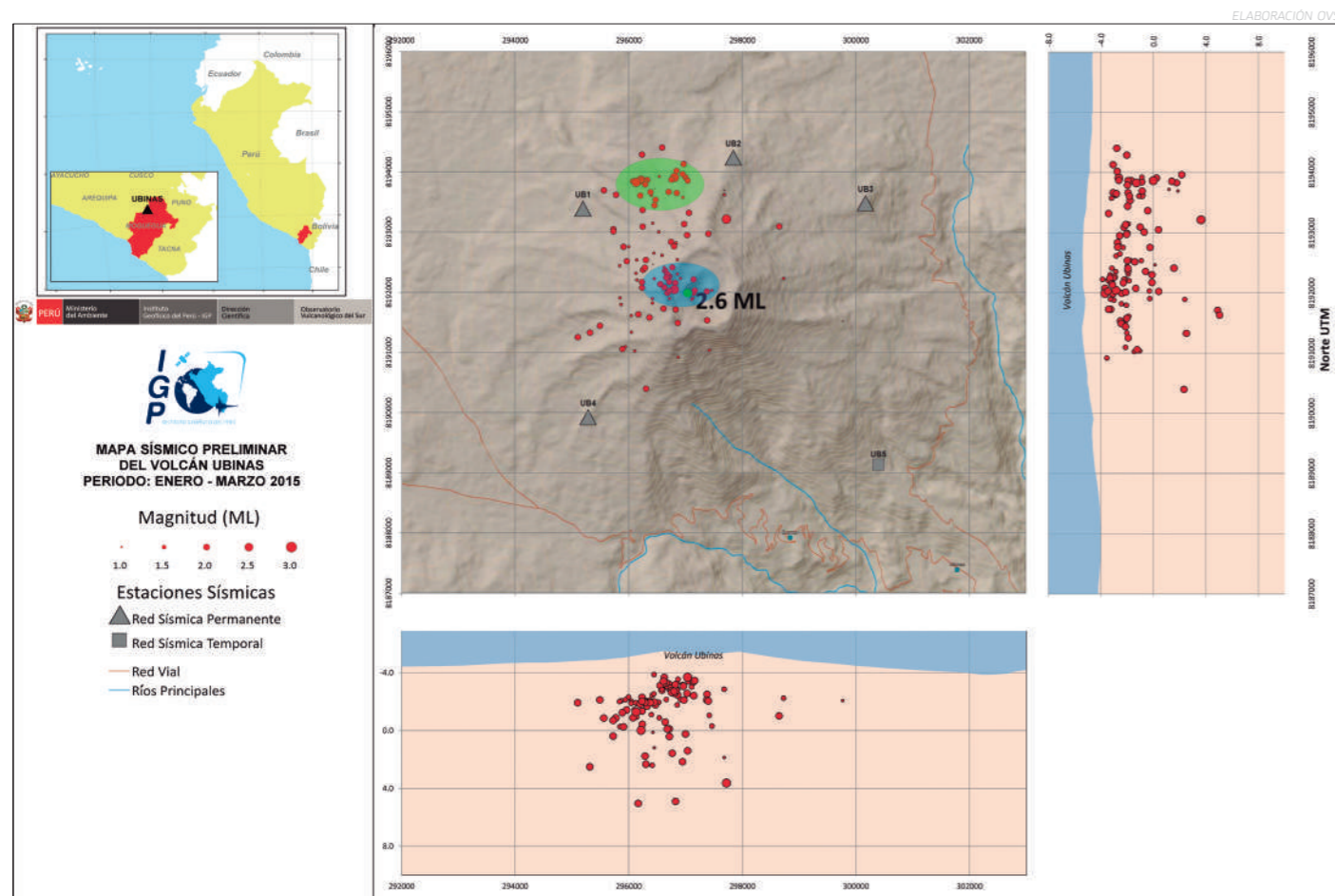


Figura 04.- Mapa sísmico del volcán Ubinas, periodo entre el 01 de enero y el 31 de marzo de 2015. Muestra la localización de sismos de tipo VT.

La actividad de este mes fue detallada por el OVS en cinco reportes técnicos (2015\_09 – 2015\_13).

Los eventos LP, venidos a la baja en febrero, mostraron un nuevo repunte en su promedio de actividad, pasando de 109 LP/día en la primera semana de marzo hasta llegar a un máximo de 173 LP/día para la última semana de este mes. Esta variación, sumada al registro de 93 eventos Híbridos entre el 24 y 31 de marzo, fueron claros indicios del ascenso de un nuevo cuerpo de magma en el volcán Ubinas.

Por su parte, los eventos VT continuaron aumentando en número con relación a lo observado en febrero, pasando de 12 VT/día en los primeros días de marzo a 24 VT/día para

ABRIL

El OVS publicó en este mes un total de seis reportes (2015\_14 – 2015\_19), dos de ellos con carácter de EXTRAORDINARIO (2015\_15, 2015\_16), como consecuencia del registro de una nueva explosión y la emisión constante de ceniza que, tras ser dispersada, cayó sobre algunos poblados del valle de Ubinas.

Marzo había mostrado un aumento importante en el número de eventos LP, así como de eventos Híbridos, los cuales indicaron el ascenso de magma. Este incremento continuó en abril, reflejándose en la primera explosión del Ubinas en 2015, registrada a las 03:32 hora local del día 08 de abril. Posterior a este evento, las estaciones del OVS registraron una intensa actividad tremórica que se prolongó

el día 10 del mismo mes. Finalmente, este tipo de evento cerraría el mes con un promedio de 18 VT/día, lo cual indicó una disminución en la presión del sistema.

La nubosidad presente semanas atrás se disipó paulatinamente, permitiendo observar la emisión de fumarolas. Tal como en enero y febrero, no se registraron exhalaciones ni explosiones, solamente la emisión de pulsos de vapor de agua que se elevaron entre los 300 metros y 1500 metros sobre la base del cráter.

No se registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de densidad de SO<sub>2</sub> según el análisis del sistema MIROVA y el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA.

por más de 14 horas; las cenizas se elevaron hasta una altura de 2500 metros sobre la base del cráter y fueron expulsadas en dirección sureste del volcán. El sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA registró un aumento en la densidad de SO<sub>2</sub> en el volcán Ubinas, con un pico de 5.9 DU (unidades Dobson).

Profesionales del OVS cubrieron en todo momento el desarrollo de este evento, comprobando la real dimensión de la situación. La ceniza expulsada cayó sobre los pueblos de Ubinas, Escacha y parte del valle de Ubinas. Los techos de las viviendas fueron cubiertos por una capa de ceniza de 1.5 mm de espesor, aproximadamente.

Por otro lado, y tal como fue observado en febrero,

las precipitaciones, las condiciones meteorológicas y los nuevos depósitos de ceniza expulsados tras las explosiones, propiciaron el descenso de nuevos lahares por el flanco sur del volcán los días 12 y 13 de abril entre las 10:00 y 14:00 horas, los cuales perjudicaron terrenos agrícolas, canales de regadío y vías de comunicación. El OVS advirtió inmediatamente a las autoridades del valle de Ubinas la ocurrencia de estos eventos.

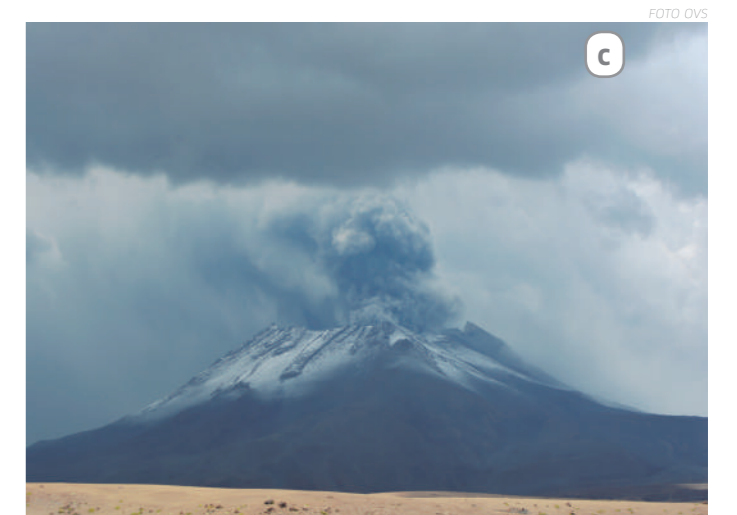
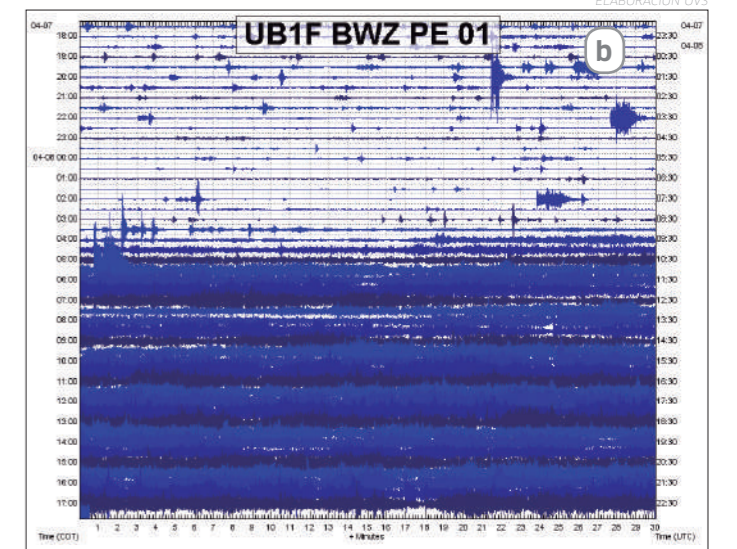
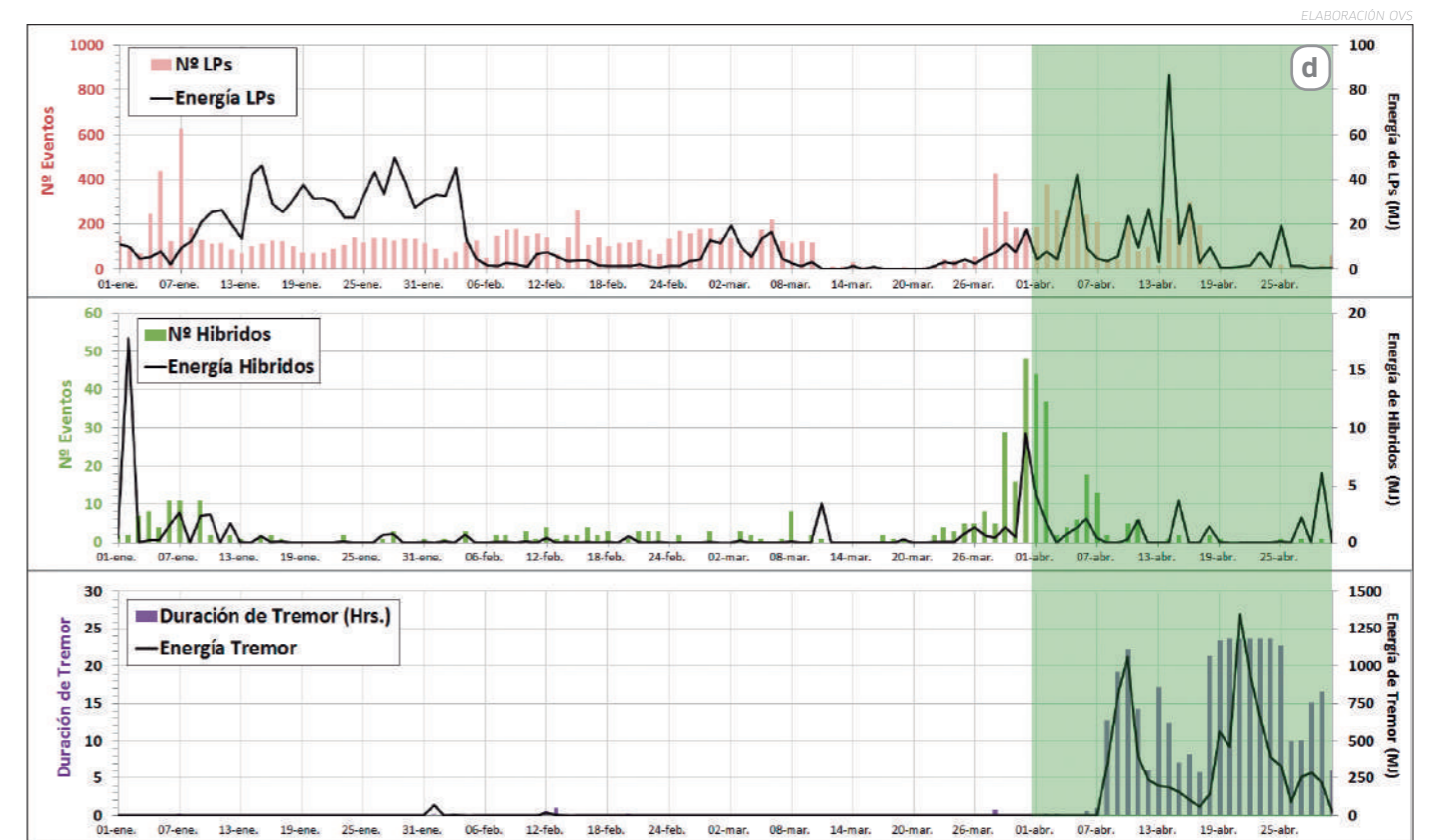


Figura 05.- a) Techos de calamina en el pueblo de Ubinas (situado a 6 km al SE del cráter), con depósito de ceniza de aproximadamente 1.5 mm de espesor. b) Sismograma del día 08 de abril de 2015, donde se muestra el registro de 14 horas de Tremor sísmico Espasmódico, desde las 03:32 hora de inicio del evento explosivo. c) En abril el Ubinas reinició su actividad explosiva, generando la expulsión de grandes cantidades de ceniza. En la imagen una de las varias explosiones registradas a lo largo de este mes. d) Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. Área sombreada en verde representa los eventos registrados entre el 01 y 30 de abril de 2015.



## MAYO

La actividad sismovolcánica del volcán Ubinas, durante el mes de mayo, fue reportada por el OVS en cuatro reportes técnicos (2015\_20 – 2015\_23).

Los registros sísmicos apreciados en abril, relacionados a actividad de tipo Tremor predominantemente, se mantuvieron presentes en este mes, alternando días de registro continuo y periodos de relativa calma. Con referencia a esta apartado, los días 19 y 23 de mayo se observaron incrementos importantes en la duración de este evento.

Los eventos de tipo LP, vinculados al movimiento de fluidos, continuaron con la tendencia a la baja mostrada en las dos últimas semanas de abril, alcanzando un promedio de 46 LP/día entre el 19 y 26 de mayo, tasa muy inferior a los 179 LP/día registrados a mediados de abril.

Así como los LP, los sismos Híbridos (ascenso de magma) y los Tornillo (presión en cavidades), mostraron niveles disminuidos. Los días 24 y 25 de mayo se registraron 5 y 4 eventos Híbridos, respectivamente. Los Tornillos, en tanto, siguieron estando ausentes desde la segunda semana de abril.

Caso contrario, los eventos VT (fractura de rocas) aumentaron en mayo progresivamente, logrando su mayor pico el 28 de mayo, con 65 VT y 203 MJ de energía. Cabe señalar que los VT muestran un aumento en sus valores días y horas previos al registro de Tremor volcánico.

En efecto, posterior al pico de eventos VT del día 28, el día 29 de mayo se registró una exhalación, la cual inició el proceso de liberación de la presión interna del sistema.

En mayo no se registraron explosiones en el volcán Ubinas, sino esporádicas exhalaciones de baja intensidad.

### VISITA DEL OVS A UBINAS

Entre el 20 y 22 de mayo, el equipo completo de profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), se trasladó hacia el valle de Ubinas con el objetivo



Figura 06.- Las mediciones de potencial espontáneo (PE) se efectuaron el 21 de mayo. Esta fue la segunda campaña realizada en 2015.

de presentar el taller educativo denominado: "Conociendo al volcán Ubinas: cómo estar preparados", a todas las autoridades de este distrito y sus anexos, así como a los representantes de las diferentes instituciones que laboran en estas localidades.

A este taller asistieron 112 personas, contándose además con la participación del vicegobernador de Moquegua, el Dr. Emilio Euribe Rojas, el alcalde de Ubinas, el Arq. Luis Concha Quispitupac y el director general de Indeci Moquegua, el Arq. Iván Zapata. Todos los participantes recibieron material informativo acerca del IGP y la labor que el OVS realiza en la vigilancia del volcán Ubinas.

En esta visita, además, los especialistas del OVS realizaron mediciones geofísicas de potencial espontáneo en el flanco oeste del Ubinas, con el objetivo de obtener información que permita conocer posibles variaciones en el sistema hidrotermal del volcán.



Figura 07.- La emisión de fumarolas de vapor de agua y gases entre el 20 y 22 de mayo fue constante.

## JUNIO



Figura 08.- Imágenes de la exhalación registrada el día 30 de junio a las 12:42 hora local, captadas por la cámara Campbell Scientific del IGP.

La actividad del Ubinas en junio fue detallada por el OVS en cinco reportes técnicos (2015\_24 – 2015\_28).

Los eventos de tipo LP alcanzaron un pico importante el 01 de junio: 748 LP en una sola jornada. El promedio de este tipo de evento en la primera semana de junio fue de 778 LP/día, con una energía de 577 MJ/día, y estuvo asociado a la emisión de pulsos de ceniza. Sin embargo, conforme al paso de las semanas su valor disminuiría en gran número, a solo 62 LP/día entre el 09 y 16 de junio. Los LPs cerraron junio con un promedio de 137 LP/día y con valores bajos de energía.

Los eventos Híbridos, en tanto, mostraron importantes valores de energía a partir de las 00:15 UTC del 14 de junio. Este ascenso de magma fue corroborado con el registro de una primera anomalía térmica por el sistema MIROVA (1 Mw), seis horas después del inicio de esta actividad.

Por su parte, los eventos VT siguieron experimentado un continuo incremento. Un valor importante de energía (323 MJ) fue registrado el 13 de junio, seis horas antes de la ocurrencia de Híbridos descrita en el párrafo anterior. La elevada sismicidad VT (tanto en número como energía), fue un probable indicativo del incremento de la presión en el sistema volcánico.

En consecuencia, el OVS advirtió la posible ocurrencia

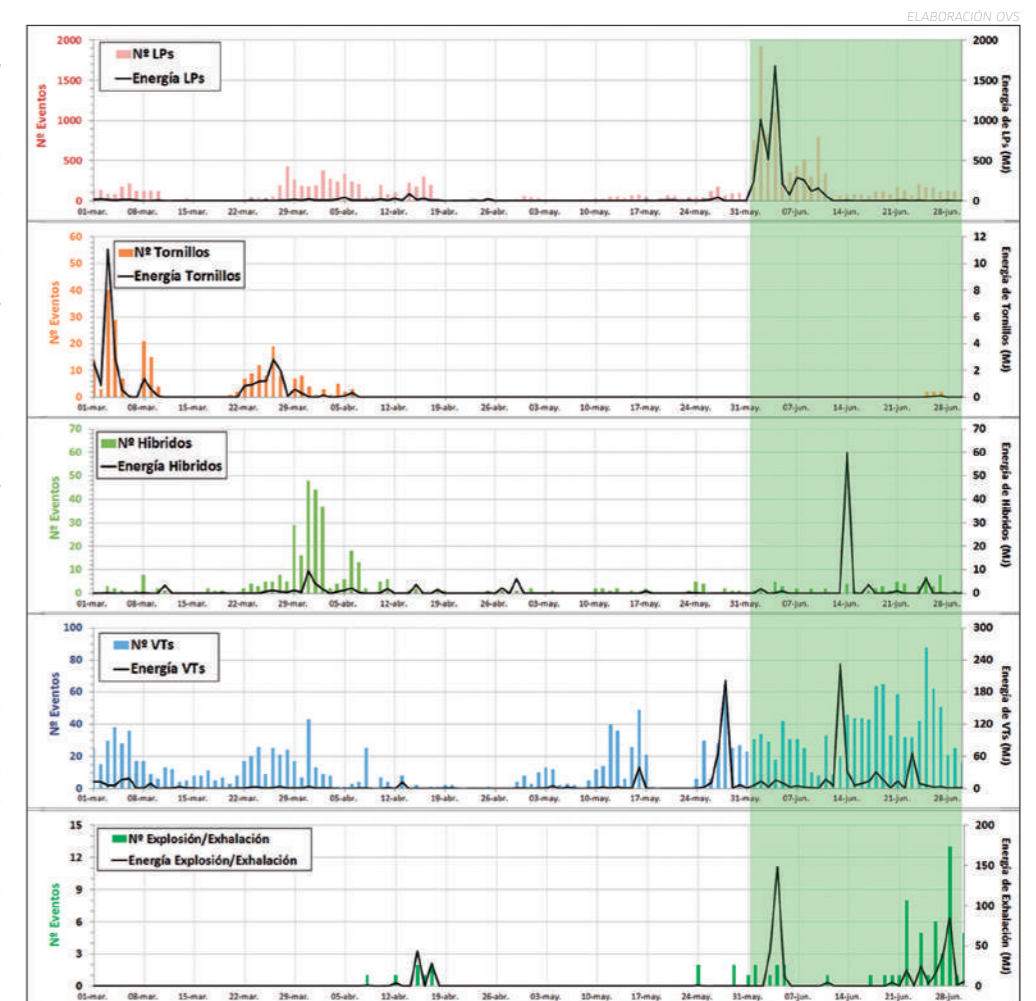


Figura 09.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El sombreado verde representa lo observado entre el 01 y 30 de junio de 2015.

de exhalaciones y/o explosiones, eventos que ocurrirían continuamente a partir del 20 de junio. Solo entre el 23 y 29 de junio, el OVS registró 24 exhalaciones, además de cuatro explosiones entre el 24 y 27 de junio. Las fumarolas de ceniza y demás gases magmáticos, alcanzarían alturas de hasta 3000 metros sobre la base del cráter, tales como las observadas en las explosiones del 24 de junio a las 16:36 h y el 26 de junio a las 14:58 h.

La presurización del sistema, pese a que disminuyó con los últimos eventos, continuó persistiendo, dejando latente la posibilidad de nuevos eventos explosivos.

## JULIO

El OVS reportó la actividad del volcán Ubinas en este mes en cuatro reportes técnicos (2015-29 – 2015-32).

Julio fue el mes en el cual se registró la explosión más importante en 2015 en el volcán Ubinas, evento que fue advertido por el OVS al identificar una drástica disminución de la energía sísmica del volcán horas previas a la ocurrencia de este evento.

La actividad de tipo LP mostró a lo largo del mes un comportamiento sin mayor variación. En la primera semana de julio, su tasa promedio de eventos fue de 137 LP/día; la segunda, 198 LP/día y, entre el 14 y 18 de julio, 154 LP/día. No obstante, los días 19 y 20 de julio se registraron picos de 840 LP y 360 LP, respectivamente.

Los eventos VT (fractura de rocas), con niveles bajos en las primeras dos semanas, experimentaron entre el 14 y 20 de julio un incremento notorio, pasando de 7 VT/día a 59 VT/día en este periodo. Este ascenso indicó el aumento de la presión interna en el edificio volcánico como consecuencia posible de dos factores: ascenso de material magmático y obstrucción del conducto (camino que recorre el magma).

Del mismo modo, el registro de eventos Híbridos (ascenso de magma) aumentó entre el 14 y 20 de julio, con una tasa de ocurrencia de 16 HIB/día y un valor máximo de energía de 7 MJ. Solo entre el 19 y 20 de julio se contabilizaron 91 Híbridos, lo cual indicó el ascenso de un cuerpo de magma que fue corroborado por el registro de una nueva anomalía térmica por el sistema MIROVA el día 20 de julio a las 21:03 hora local.

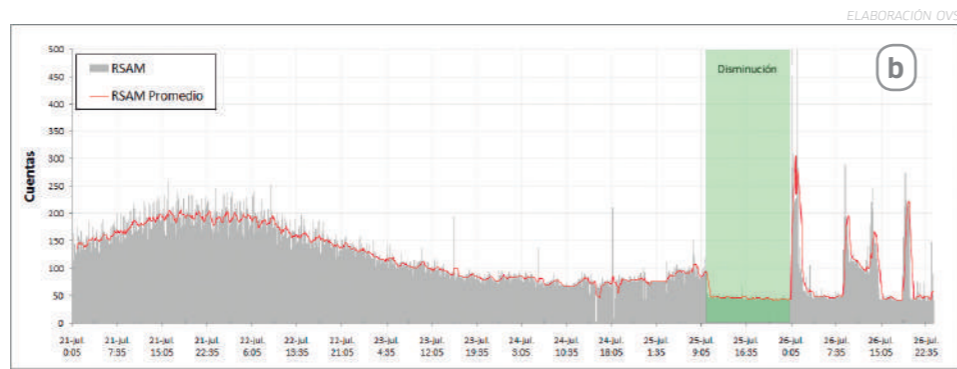


Figura 10.- a) Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El sombreado verde representa el periodo entre el 01 y 31 de julio; la flecha roja indica el comportamiento registrado entre el 25 y 26 de julio. b) RSAM calculado entre el 21 al 26 de julio. Notar la brusca disminución de la energía sísmica observada 14 horas antes de la explosión del 25 de julio que generó 507 MJ.



Figura 11.- Pequeños fragmentos de roca que cayeron en el pueblo de Ubinas como consecuencia de la explosión registrada el día 25 de julio a las 19:03 hora local.

En estas circunstancias, el OVS registró el descenso drástico de la energía sísmica en el volcán por un tiempo de 14 de horas, lo cual generó como resultado la ocurrencia de una potente explosión el día 25 de julio a las 19:03 hora local. Este evento liberó una energía de 507 MJ, ocasionando la caída de fragmentos de roca de 2 mm - 3 mm e incluso algunos de 1 cm - 2 cm en los pueblos de Ubinas y Escacha. Las siguientes 48 horas se caracterizaron por la emisión continua de gases de coloración azulina en moderadas cantidades.

## AGOSTO



El OVS publicó durante este mes cuatro reportes técnicos (2015\_33 - 2015\_36), informes que describen detalladamente la actividad del Ubinas.

El registro de eventos de tipo LP volvió a experimentar un nuevo incremento, presentando en los primeros días de agosto un promedio de 220 LP/día. El número de estos eventos disminuiría en las siguientes dos semanas, para luego volver a aumentar en la tercera semana y disminuir de forma importante entre el 25 y 31 de agosto, alcanzando un promedio de 115 LP/día.

Los eventos de tipo Híbrido, vinculados al ascenso de magma, presentaron niveles bajos en los primeros quince días de agosto; no obstante, la tasa de ocurrencia de estos sismos reflejó un incremento importante entre el 19 y 24 de agosto, pasando de 3 Híb/día a 75 Híb/día. Este progreso, concordante con el aumento en número y energía de sismos de tipo VT (fractura de rocas), indicó el incremento en la presión interna del volcán y el ascenso de magma nuevo (intrusión magmática). El arribo de este nuevo material a la superficie fue corroborado con el registro de dos anomalías térmicas por el sistema MIROVA el día 15 de agosto, a las 03:10 UTC y 06:15 UTC, de 2.5 Mw y 2.4 Mw, respectivamente.

Al igual que los eventos LP, los sismos tipo Híbrido disminuyeron para la tercera semana, manteniendo esa tendencia para fines de este mes.

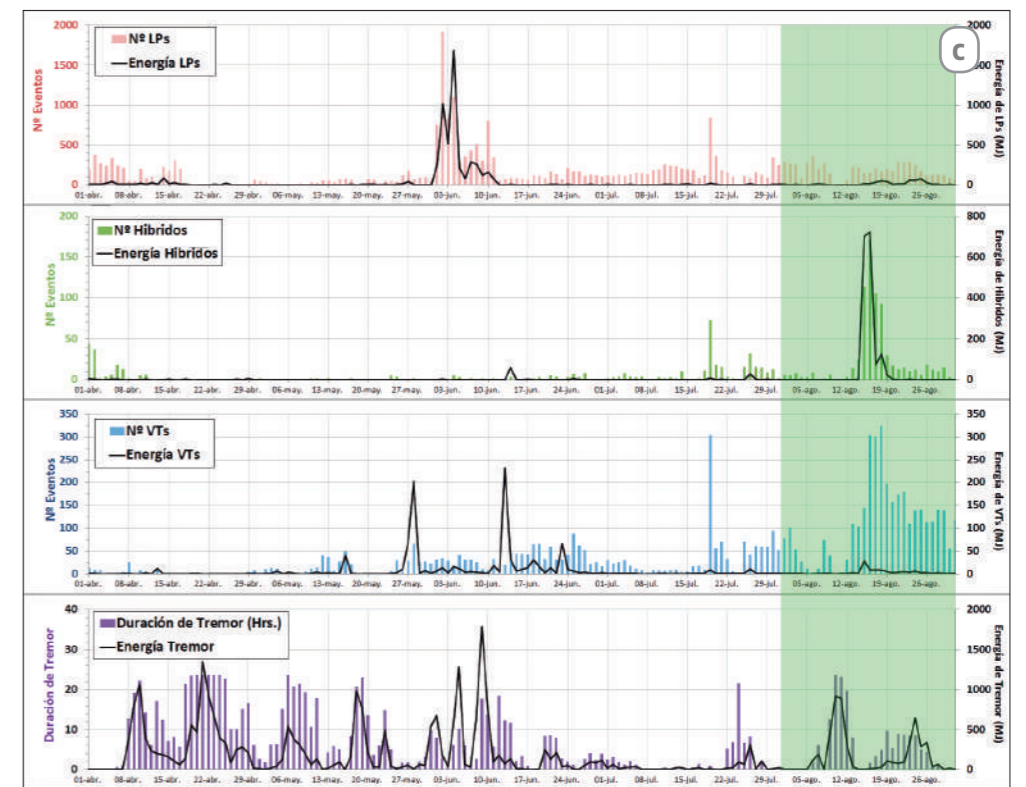


Figura 12.- a) Fragmentos de bombas volcánicas expulsadas en la explosión del 25 de julio de 2015, localizadas en el flanco oeste del volcán hasta una distancia de 1.4 km. b) Cráteres ocasionados tras el impacto de las bombas volcánicas contra la superficie. c) Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El sombreado verde representa lo observado durante el mes de agosto.

La actividad de tipo Tremor, vinculada a la emisión de gases y ceniza, inició agosto mostrando niveles bajos; no obstante, a partir del 06 de agosto, se registró un incremento creciente como consecuencia directa de una pequeña exhalación registrada ese mismo día. En las siguientes semanas disminuiría su registro, para posteriormente volver a aumentar entre el 19 y 24 de agosto, esta vez asociada al proceso de desgasificación y emisión de ceniza observado por aquellos días.

Por otro lado, con el propósito de verificar el impacto de la explosión del pasado 25 de julio, profesionales del OVS se trasladaron hacia las inmediaciones del volcán Ubinas entre el 05 y 07 de agosto. Inspeccionaron la caldera de este macizo, realizaron mediciones geofísicas de Potencial Espontáneo y verificaron la presencia de bombas volcánicas como consecuencia de este evento. Fragmentos de roca de hasta 2 metros de diámetro fueron localizados hasta una distancia de 1.4 km del cráter.



Figura 13.- Secuencia de la explosión registrada en el volcán Ubinas el 28 de septiembre a las 13:45 hora local. La columna alcanzó una altura de 4 km.

La actividad sismovolcánica del Ubinas fue detallada por el OVS en cinco reportes técnicos (2015\_37 – 2015\_41) publicados a lo largo del mes.

Los sismos de tipo VT, asociados a la fractura de rocas, se presentaron con altibajos. Si bien iniciaron con un promedio de 91 VT/día en los primeros días de septiembre, este disminuiría sustancialmente entre los días 08 y 21. Un cambio importante en su actividad fue registrado en la última semana, en la cual se incrementó en más de un 70%, lo cual estuvo asociado al incremento de la presión en el interior del volcán que devino finalmente en una fuerte explosión.

Con relación a los eventos de tipo LP, estos comenzaron en septiembre con una tasa promedio de 226 LP/día en la primera semana. Seguidamente, esta descendería hasta valores de 45 LP/día. Entre el 22 y 28 de septiembre, semana de la explosión más fuerte registrada en el mes, la tasa de LP aumentó hasta los 244 LP/día.

Los eventos de tipo Híbrido también experimentaron un ascenso previo al registro de eventos explosivos. El 21 de septiembre se produjo la emisión de ceniza a través de una columna de 1700 metros

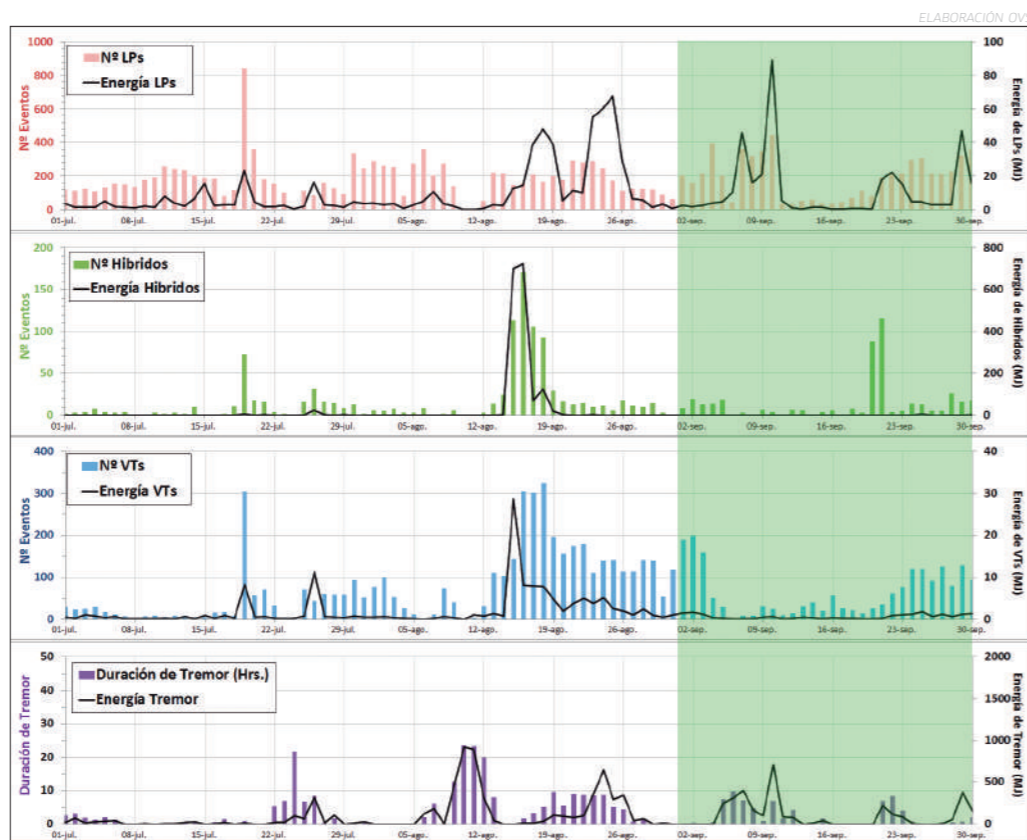


Figura 14.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El sombreado verde representa al período entre el 01 y 30 de septiembre.

sobre la base del cráter; 34 horas antes el OVS observó el incremento de eventos Híbridos, vinculado al avance de material magmático hacia el cráter.

Esta relación también pudo ser comprobada en la explosión del 28 de septiembre. Este evento, que originó una columna de 4000 metros de altura, tuvo lugar a las 13:45 pm, liberando a su vez una energía de 53 MJ. El ascenso de magma observado entre el 20 y 21 de septiembre, sumado al aumento de la presión interna del volcán días antes del evento, propiciaron la ocurrencia de esta explosión y otras exhalaciones entre los días 27 y 28.

Cabe precisar justamente que entre el 25 y 27 de septiembre, el sistema MIROVA registró cuatro anomalías térmicas en la zona del cráter, siendo la máxima de 1.6 Mw.

Finalmente, el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA no precisó anomalías ni variación en los niveles de SO<sub>2</sub>.

Durante este mes, el Observatorio Vulcanológico del Sur publicó cuatro reportes técnicos sobre la actividad del Ubinas (2015\_42 – 2015\_45).

En líneas generales, la actividad del volcán disminuyó con relación a lo observado en septiembre, de igual forma que las emisiones de ceniza.

Los sismos Volcano-Tectónicos (VT) presentaron una tendencia a la baja desde inicios de mes, comenzando en 67 VT/día y finalizando en 22 VT/día hacia fines de octubre.

Caso contrario fue el de los eventos de tipo LP, los cuales mantuvieron promedios elevados. En la primera semana de octubre estos registraron una tasa de 150 LP/día, progresivamente pasaron a 244 LP/día en la segunda, en la tercera 293 LP/día y, finalmente, 440 LP/día al culminar dicho mes. Es de resaltar igualmente el mayor pico de LP en una jornada, ocurrido el día 11 de octubre con 520 eventos.

Los sismos de tipo Híbrido, en tanto, no presentaron ningún sobresalto en octubre. Su promedio de ocurrencia diaria en este mes osciló entre 42 y 45 Híb/día.

Con relación a las emisiones de ceniza, estas disminuyeron en comparación con



Figura 15.- En la inspección del cráter del Ubinas efectuada el 18 de octubre, los especialistas del OVS constataron la emisión constante de gases magmáticos (gases de coloración azulina).

lo observado en septiembre. Así, se apreciaron columnas de vapor de agua en la segunda quincena del mes, y exhalaciones con expulsión de ceniza el día 15 y pulsos de ceniza asociados al registro de actividad tremórica el día 21.

Durante este mes, el sistema MIROVA detectó hasta seis anomalías térmicas, con valores entre 1.5 Mw y 3.4 Mw, lo cual indicó la presencia de un cuerpo de lava presente en la base del cráter en este mes. En estas circunstancias, profesionales del OVS inspeccionaron el cráter del volcán el 18 de octubre, no pudiendo distinguir el fondo del cráter debido a las intensas emisiones de gases magmáticos.

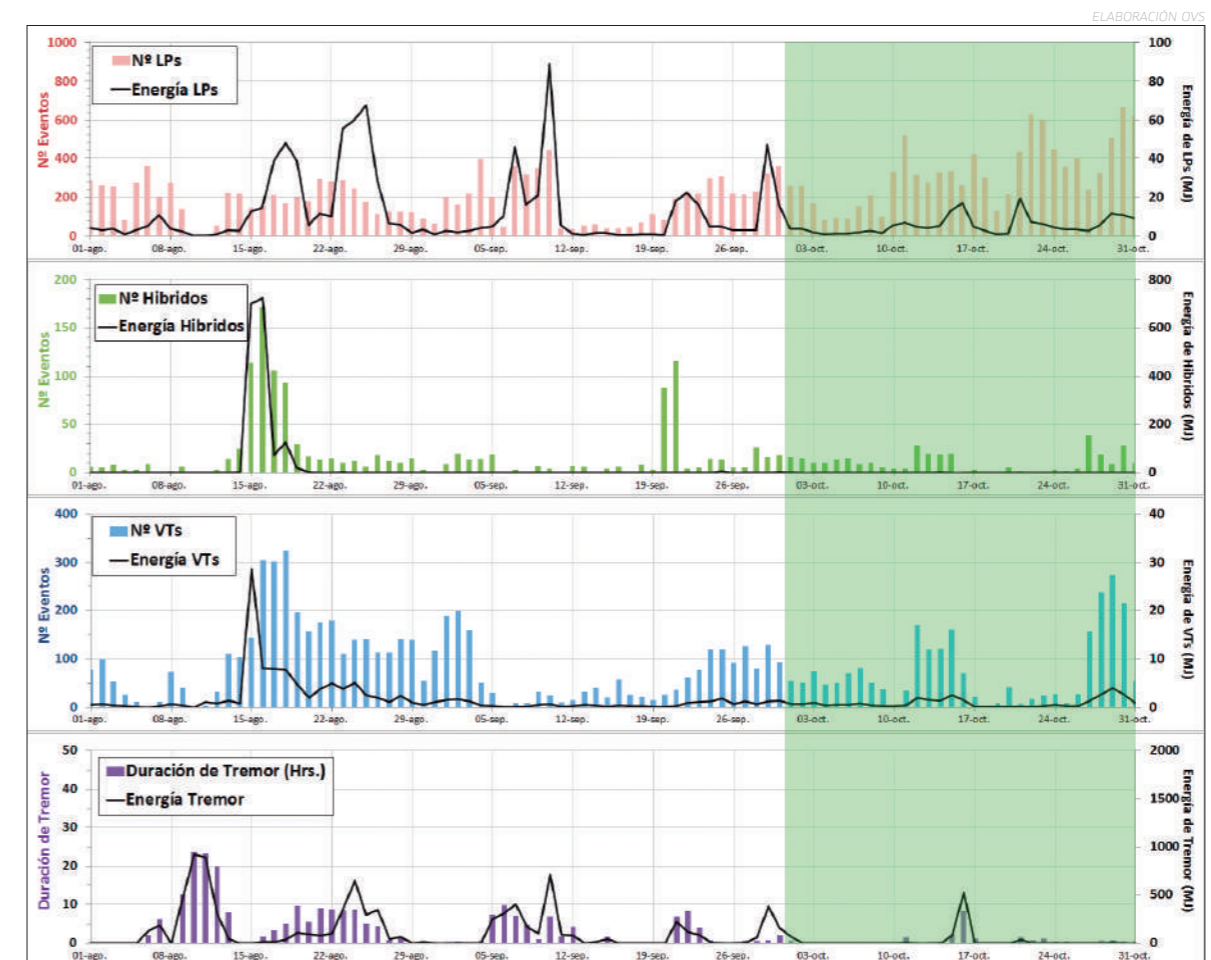


Figura 16.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1. El sombreado verde representa al período entre el 01 y 31 de octubre.

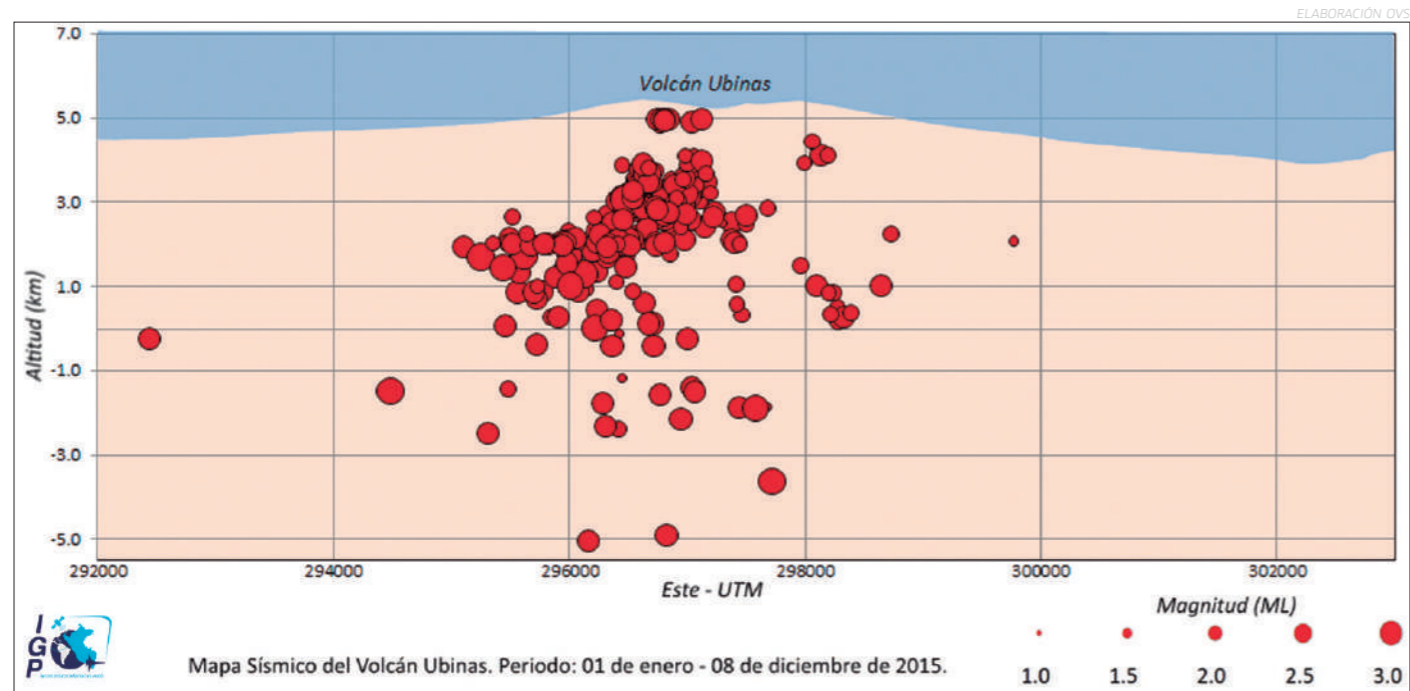


Figura 17.- Mapa sísmico del volcán Ubina (perfil W-E) que muestra los eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre enero y el 08 de diciembre de 2015

En este periodo (01 de noviembre - 08 de diciembre), el Observatorio Vulcanológico del Sur publicó seis reportes técnicos (2015\_46 – 2015\_51) que explicaron al detalle el comportamiento del Ubina.

Noviembre se caracterizó principalmente por el incremento de la presión interna en el volcán, representado claramente por el aumento en número de eventos de tipo Volcano-Tectónico. Este tipo de sismo presentó promedios de ocurrencia de 218 VT/día entre el 10 y 17 de noviembre y de 153 VT/día para la última semana del mes. La presión continuó presente hasta el 05 de diciembre, alcanzando 281 VT en dicha jornada, para luego caer a 6 VT/día entre los días 06 y 08, lo cual indicó la disminución de esta presión.

En el caso de los eventos de tipo Híbrido, asociados al ascenso de material magmático, estos mostraron valores superiores a lo observado en octubre, registrando picos de hasta 64 Híbridos/día el 04 de noviembre y un promedio de 25 Híbridos/día en la tercera semana del mes.

En esta misma línea, el sistema satelital MIROVA

identificó en este periodo hasta 20 anomalías térmicas, con registros entre 1 Mw y 10 Mw, siendo este último valor el más elevado de todo 2015, y registrado el día 05 de diciembre, coincidiendo con el pico de eventos VT. Esto indicó la presencia de un cuerpo de lava en el cráter o cercano a él por estas fechas.

Por otro lado, los eventos de tipo LP mostraron promedios elevados las dos primeras semanas de noviembre, llegando hasta un máximo de 472 LP/día entre el 03 y 09 de noviembre. La tasa de ocurrencia de estos eventos disminuiría hasta 125 LP/día para la última semana de noviembre.

La emisión de ceniza tuvo lugar el 05 de noviembre, a raíz de una explosión moderada registrada por las estaciones del OVS a las 12:16 hora local, y que generó una columna de 2200 metros sobre la base del cráter. Posteriormente, la ceniza continuó siendo expulsada en pulsos, asociados al registro de Tremor, siendo observada hasta el día 08. Los días 13 y 18 de noviembre se produjeron nuevas emisiones, con alturas inferiores a los 1000 metros sobre la base del cráter.

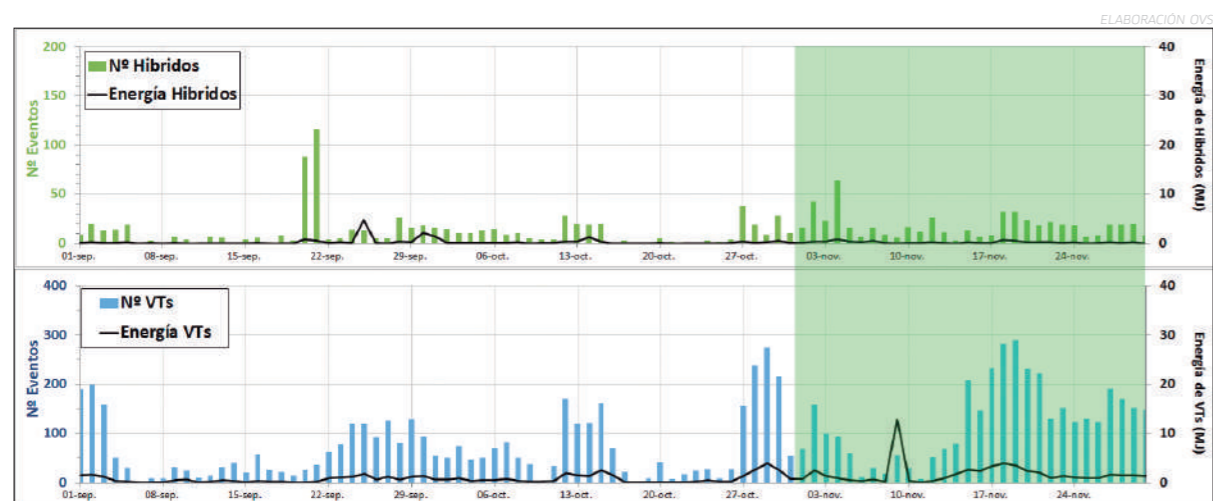


Figura 18.- Registro de eventos Híbridos y VT entre septiembre y noviembre. Sombreado verde resalta el incremento de eventos VT en este último mes.



## Conclusiones

- El volcán San Pedro de Ubina es el más activo de los volcanes del sur del Perú. El IGP, a través del OVS, ha monitoreado al detalle sus dos últimos procesos eruptivos: El primero de ellos, que tuvo lugar entre 2006 y 2009, tuvo un Índice de Explosividad Volcánica de 2. El actual episodio volcánico se inició en septiembre de 2013 y continúa hasta la actualidad.
- La etapa explosiva y de emisión de cenizas se reinició el 8 de abril de 2015, luego de cuatro meses desde la última explosión registrada en noviembre de 2014. Desde entonces, el volcán Ubina registra esporádicamente explosiones y exhalaciones de ceniza asociadas a Tremor sísmico.
- Gracias al análisis exhaustivo de las señales sísmicas, se ha podido identificar patrones sísmicos que son registrados días previos a eventos relacionados a desgasificación y despresurización, tales como explosiones y emisiones de ceniza.
- La red telemétrica de cuatro estaciones sísmicas permite al OVS localizar sismos relacionados a fractura de roca (VT). Este proceso es plasmado en mapas de localización sísmica. En 2015 se han ubicado 279 sismos, en un rango de profundidades entre 1 y 11 km bajo el cráter del volcán.

Vista del volcán Ubina desde el valle del mismo nombre. FOTO OVS

## Introducción

El volcán Sabancaya pertenece al complejo volcánico Ampato Sabancaya-Hualca Hualca. Este volcán presentó erupciones históricas en 1750 y 1784-1785; el último proceso eruptivo de tipo vulcaniano y freatomagmático ocurrió entre 1990-1998, alcanzando un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 3.

El 22 de febrero de 2013 inicia un periodo de intranquilidad y se produce un notable incremento de su actividad sísmica y fumarólica. En 2014 se ha registrado dos explosiones de tipo freática y una explosión de menor energía. En 2015 la actividad se mantuvo de manera constante sin variación importante; sin embargo, la actividad sísmica y fumarólica continúa siendo alto.

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) realiza el monitoreo a través de tres estaciones sísmicas en tiempo real, instaladas en los alrededores del volcán. La tarea de monitoreo diario se traduce en la elaboración de publicaciones científicas y reportes semanales, que son enviados a las autoridades y público en general.

Es importante mencionar que en la zona del Sabancaya se desarrolla una importante actividad turística y en su flanco Norte y Oeste se encuentra el proyecto Majes; además, existen caseríos en los alrededores del volcán que se verían afectados ante un eventual proceso eruptivo de este macizo.

Por MsC. Nino Puma e Ing. José Torres  
*Responsables del monitoreo sísmico del volcán Sabancaya*

# SABANCAYA

“ El Sabancaya es un volcán muy interesante y único en el mundo. Para nosotros es un reto conocer cuál es la interrelación entre la sismicidad local y el factor magmático”.



**Dr. Matthew Pritchard**  
University of Cornell  
USA

## VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya es un estrato volcán parte del complejo volcánico Ampato, Sabancaya y Hualca-Hualca. Ha presentando dos erupciones históricas importantes en 1750 y 1784-1785. Después de 200 años, presentó una tercera erupción entre 1990-1998, con un VEI de 3. Luego de 15 años de tranquilidad, a partir del 22 de febrero de 2013, el volcán mostró signos de actividad con un incremento notable de la sismicidad y emisiones fumarólicas. En 2014 se registraron dos explosiones moderadas de tipo freática. Su actividad en 2015 se ha caracterizado por una intensa actividad sísmica y constantes fumarolas de vapor de agua y gases magmáticos.

### RESUMEN MES A MES

#### ENERO

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) publicó en este mes cuatro reportes técnicos (2015\_01 – 2015\_04), informes que detallaron lo ocurrido con el volcán Sabancaya a lo largo de este periodo.

La actividad a fines de 2014 mostró un ligero aumento en el registro de eventos Volcano-Tectónicos (VT), sismos asociados a fractura de rocas. Esta tendencia continuó en todo enero, pasando de un promedio de 92 VT/día en la primera semana a 119 VT/día para el día 27 de dicho mes. La localización de estos eventos formó un foco que, conforme al paso de las semanas, presentó una mayor densidad de sismos. Localizado a 14 km al NNE del cráter del Sabancaya, este foco registró eventos de hasta 3.9 ML, como el ocurrido el 20 de enero a las 19:31 hora local, el cual sentido por los pobladores de Pinchollo, Maca y Achoma. Este evento en particular, el de mayor magnitud en el mes de enero, se localizó a 4 km al SO del centro poblado de Achoma. En los últimos tres días de enero, el promedio de eventos VT comenzó a disminuir.

Por su parte, los eventos LP (movimiento de



Figura 01.- Espesas fumarolas de vapor de agua y de gases azulinos fueron expulsadas a través del cráter del Sabancaya durante todo el mes de enero.

fluidos) no registraron mayor variación en este mes. Si bien es cierto el 01 de enero ocurrió un número importante de LP (103 LP), la ocurrencia de estos sismos disminuyó en los siguientes días, alcanzando entre el 20 y 26 de enero una tasa de 41 LP/día.

Los sismos de tipo Híbrido (ascenso de magma), en tanto, presentaron niveles bajos en todo enero. Su mayor promedio de ocurrencia se dio entre el 06 y 12 de enero (8 Híb/día). Los mayores picos de Híbridos se registraron los días 10, 11 y 29 de enero, con 17, 12 y 10 eventos, respectivamente.

Por otro lado, cabe precisar que la emisión de fumarolas de vapor de agua y demás gases magmáticos, continuó presentándose de forma constante, tal como venía siendo observado desde mediados de 2014. En enero, la altura máxima de las fumarolas fue de 1000 metros sobre la base del cráter.

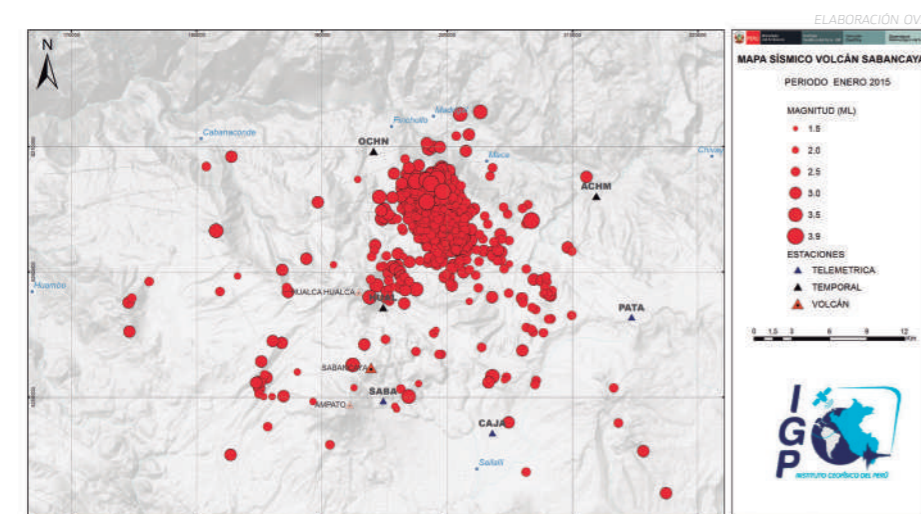


Figura 02.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el mes de enero de 2015 en el volcán Sabancaya. Se aprecia claramente un foco sísmico importante ubicado al NNE del macizo, en el cual se localizaron sismos de hasta 3.9 ML.

#### FEBRERO



Figura 03.- Vivienda de adobe en el pueblo de Cabanaconde dañada tras los sismos superficiales ocurridos en el mes de febrero.

La actividad sismovolcánica del Sabancaya fue analizada en febrero a través de cuatro reportes técnicos emitidos por el OVS (2015\_05 – 2015\_08).

El registro de eventos Volcano-Tectónicos, que se encontraba en enero formando un foco sísmico a 14 km al NNE del volcán, continuó concentrando la mayoría de eventos localizados en febrero. En forma paralela, y a partir del 24 de febrero, los sismos formaron un segundo foco sísmico, localizado a 22 km al NO del Sabancaya, y en el cual se presentaron cuatro eventos de magnitudes importantes; el más importante de estos ocurrió el 28 de febrero a las 15:10 hora local, alcanzando una magnitud de 4.4 ML y percibido en muchos poblados del valle del Colca, entre ellos Cabanaconde. Es preciso señalar que estos eventos fueron sismos superficiales. Asimismo, el promedio de VT en febrero, con valores inferiores hasta el día 24, aumentó a partir de ese día para alcanzar valores

importantes en los primeros días de marzo.

Los sismos LP experimentaron en febrero una variación similar, incrementando progresivamente su promedio de ocurrencia. Para el 15 de febrero se registraría en el volcán Sabancaya el mayor pico de LP en el mes, con 176 eventos y 79 MJ de energía. Del mismo modo, el promedio de LP entre el 10 y 16 de febrero sería el más importante del mes (103 LP/día), a la vez de posicionarse como el segundo promedio más alto registrado desde agosto de 2014.

Los eventos Híbridos se presentaron de forma escasa, llegando incluso a desaparecer para los primeros días de marzo.

Con respecto a las emisiones de vapor de agua y gases magmáticos, estas lograron una altura máxima de 1200 metros en febrero. La nubosidad fue una característica recurrente que impidió en muchas ocasiones distinguir con claridad las emisiones gaseosas del Sabancaya.

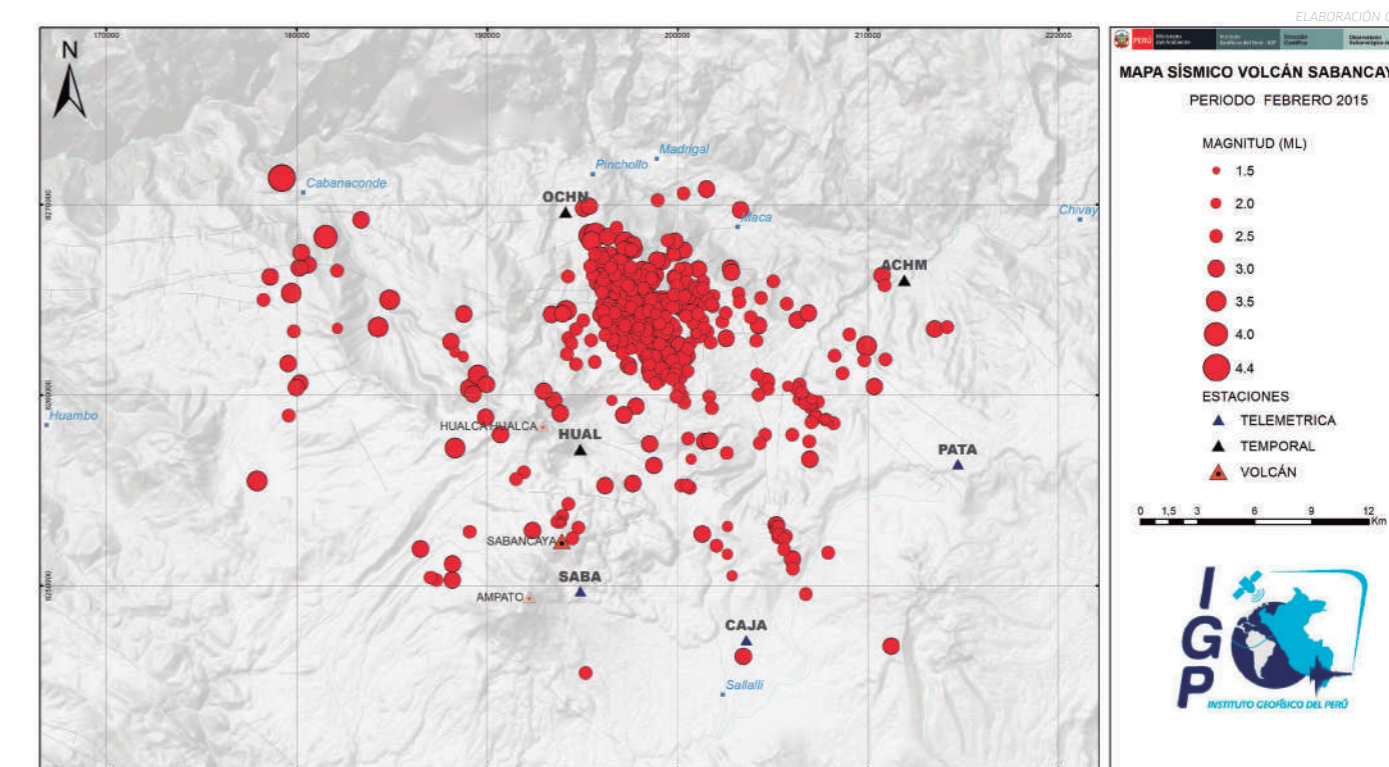


Figura 04.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el mes de febrero de 2015 en el volcán Sabancaya. Se distingue aún claramente el foco sísmico ubicado al NNE del macizo. A partir del 24 de febrero comenzó a formarse un nuevo agrupamiento al NO del volcán.

## MARZO

En este mes, el Observatorio Vulcanológico del Sur emitió cinco reportes técnicos (2015\_09 – 2015\_13) sobre la actividad del volcán Sabancaya.

Los sismos de tipo VT ocurrieron de forma importante en los últimos días de febrero; este comportamiento se extendió aproximadamente hasta la quincena de marzo, logrando un promedio de 136 VT/día. Posterior a esta fecha, el número de eventos VT disminuiría de forma notoria para cerrar marzo con valores de 51 VT/día.

Asimismo, el OVS registró eventos VT con magnitudes importantes los días 01 de marzo (4.2 ML), 02 de marzo (dos eventos de 4.0 ML), 04 de marzo (3.8 ML), 09 de marzo (3.7 ML) y 10 de marzo (4.0 ML). Todos estos sismos fueron superficiales y causaron algunos daños en el pueblo de Cabanaconde.

Con relación a los eventos de tipo LP, en la primera semana de marzo se registró un promedio de 68 LP/día, el cual se mantuvo hasta mediados de mes. Esta tasa se incrementaría en las siguientes semanas (119 LP/día, para finalmente culminar marzo con un promedio de 82 LP/día).

Los eventos de tipo Híbrido, por su parte, se mostraron ausentes en los primeros días del mes, apareciendo en promedios muy bajos a lo largo de marzo. Los picos más importantes de este tipo de evento se registraron los días 19 (10 Híbridos) y 27 (11 Híbridos).

La emisión de fumarolas de vapor de agua y gases magmáticos no se apreció claramente durante este mes. Una intensa nubosidad presente en toda la zona del volcán impidió distinguir el desenvolvimiento de este parámetro de análisis. En general, las columnas fumarólicas, principalmente de vapor de agua, oscilaron entre los 600 y 1200 metros sobre la base del cráter.

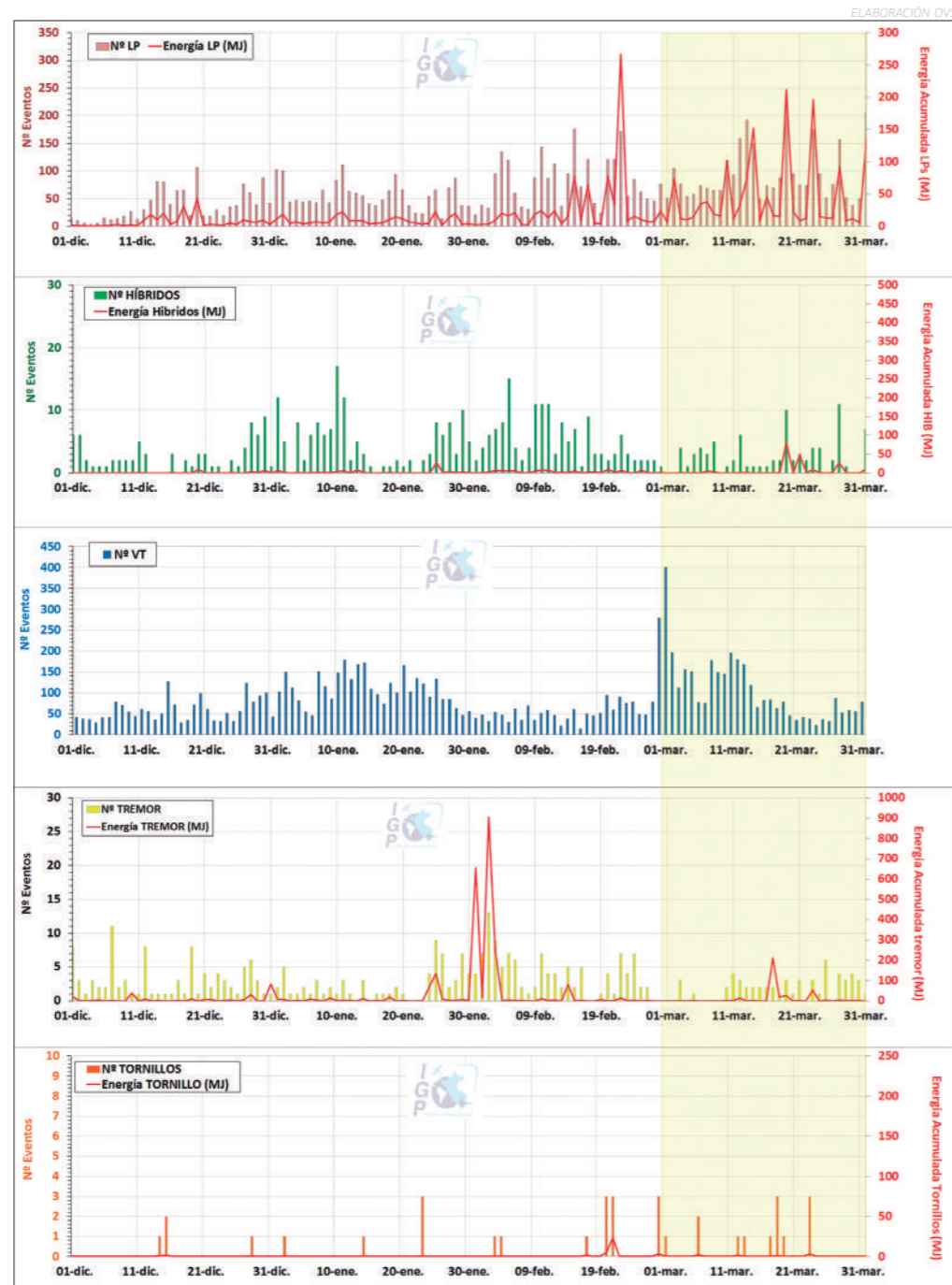


Figura 05.- Estadística de eventos sismovolcánicos registrados entre el 01 de diciembre de 2014 y el 31 de marzo de 2015. Se resalta de color amarillo lo registrado durante el tercer mes de 2015.



Figura 06.- Fumarolas de vapor de agua expulsadas a través del cráter del Sabancaya y que fueron observadas pese a la abundante nubosidad que cubrió al volcán durante gran parte del mes de marzo.

## ABRIL

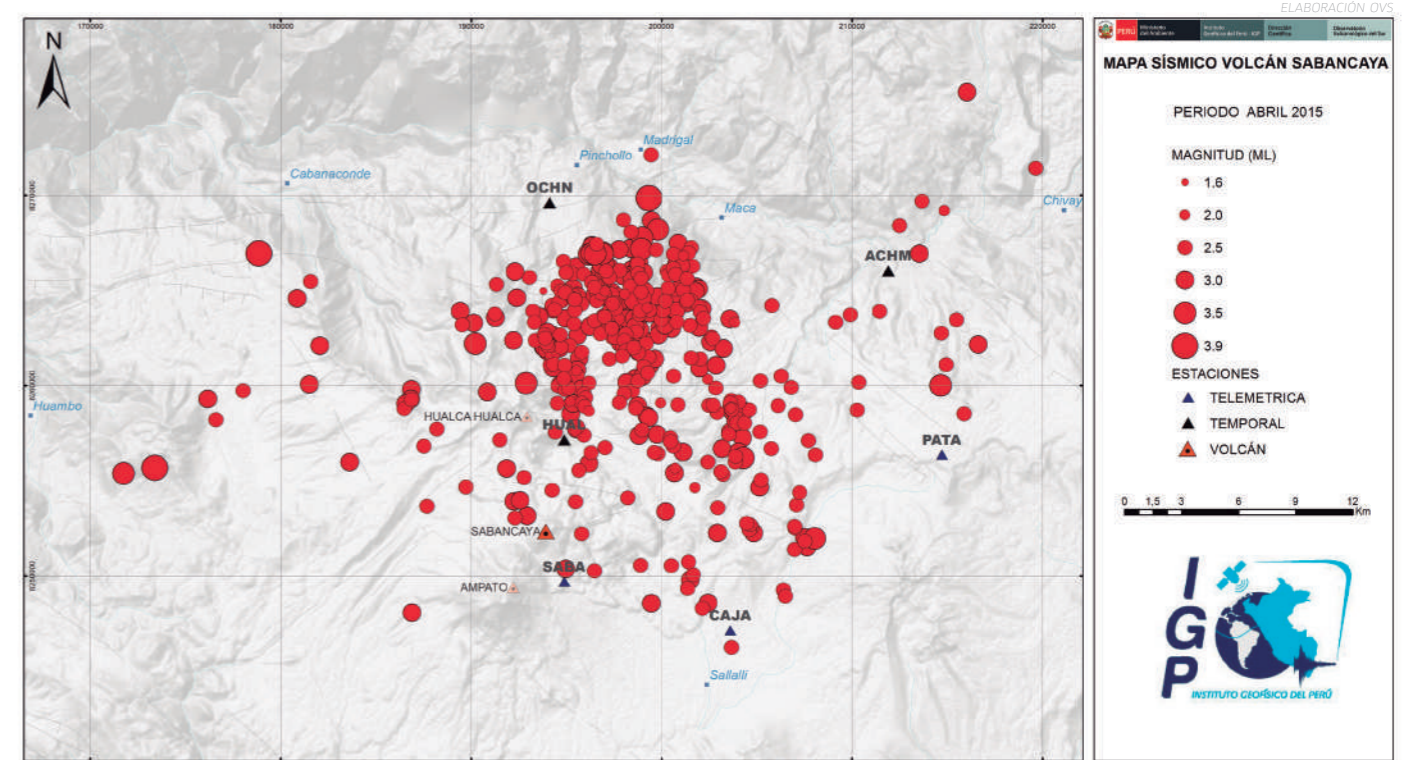


Figura 07.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el mes de abril de 2015 en el volcán Sabancaya. El mayor agrupamiento de sismos se ubicó al N y NE del volcán. El evento VT de mayor magnitud en este mes (3.9 ML) se localizó a 18 km al NE del macizo.

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) reportó a través de cinco reportes técnicos (2015\_14 – 2015\_18) la actividad del Sabancaya en el mes de abril.

Los eventos de tipo VT no registraron mayor variación. Su tasa de ocurrencia diaria fluctuó entre los 35 VT/día observados en la segunda y tercera semana y los 51 VT/día apreciados en los primeros días del mes. Estos eventos fueron localizados siempre en dirección N y NE del volcán, formando agrupamientos y focos con una baja concentración de sismos. Es importante señalar el evento Volcano-Tectónico de mayor magnitud (3.9 ML), registrado el día 30 de abril a las 02:11 hora local y a una distancia de 18 km al NE del Sabancaya.

Los sismos de Largo Periodo iniciaron abril con promedios de 113 LP/día y 127 LP/día en las dos primeras semanas, promedios que disminuirían en el transcurso del mes hasta cerrar abril con 63 LP/día. Asimismo, el 11 de abril se dio el mayor pico de eventos LP/día desde

agosto de 2014 (fecha de las dos explosiones freáticas del volcán): 246 LP/día y 268 MJ. Este valor de energía fue igualmente el más elevado apreciado desde 2014 hasta la fecha.

Con relación a los eventos de tipo Híbrido, asociados al ascenso de magma, en abril se observaron valores bajos a lo largo de todo el mes. El promedio de estos fue de 3 Híb/día en la primera semana y, posterior a esta, un promedio de 1 Híb/día. Un pico no muy pronunciado de 5 Híb fue registrado el 10 de abril.

Por otro lado, la emisión de fumarolas desde el cráter del Sabancaya continuó constante las 24 horas del día. La nubosidad presente en marzo se prolongó por todo abril, dificultando la observación clara del comportamiento, altura y tendencia de los gases.

Finalmente, tanto el sistema MIROVA como el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA, no registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de  $SO_2$  en el volcán.

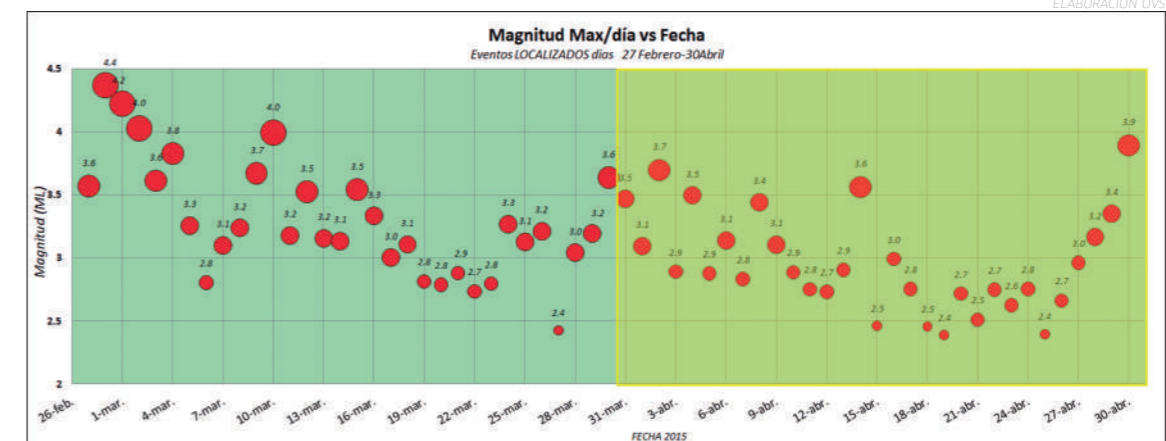


Figura 08.- Tabla en la que se observa los sismos de origen Volcano-Tectónico registrados en la zona del volcán Sabancaya. Área sombreada corresponde a los eventos del mes de abril de 2015.

**MAYO**

A lo largo del quinto mes del año, el OVS elaboró tres reportes técnicos acerca de la actividad del volcán Sabancaya. (2015\_19 – 2015\_21).

Con respecto al registro de los eventos Volcano-Téctonicos (VT), asociados a fractura de rocas en el interior del volcán, se observó una disminución constante con relación a lo observado en abril. En la primera semana presentaron un promedio de 30 VT/día, reduciéndose esta tasa en 27 VT/día entre el 12 y 25 de mayo. Finalmente, en los últimos días del mes, el promedio de VTs repuntaría hasta situarse en 47 VT/día. Asimismo, la magnitud de estos sismos fue menor o igual a 3.0 ML, formando, en la última semana del mes, un ligero agrupamiento a 17 km al NE del Sabancaya.

Los eventos de Largo Periodo, vinculados al movimiento de fluidos, no fueron tan numerosos como en el mes de abril. Su mayor tasa promedio fue de 70 LP/día en la última semana del mes, y su mayor pico fue de 77 LP el día 21. La ocurrencia de estos eventos en mayo se caracterizó por valores de energía bajos a lo largo de casi todo mayo, los cuales, en los últimos días, mostraron un ligero incremento.

Los sismos Híbridos, venidos a menos desde inicios de abril, continuaron con esa tendencia en todo este mes. Su tasa de promedio diario fue de 1 Híb/día y con valores de energía bajos.

Adicionalmente, las fumarolas de vapor de agua, a diferencia de los dos últimos meses, se pudieron observar claramente a consecuencia de la desaparición de la nubosidad imperante meses atrás. En general, estas emisiones, principalmente de vapor de agua y en menor medida de



Figura 09.- Estadística de eventos sismovolcánicos. Se resalta de color amarillo lo registrado en mayo.

diferentes gases magmáticos, se elevó entre los 800 y 1200 metros sobre la base del cráter.

No se registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de SO<sub>2</sub> según las observaciones del sistema MIROVA y el sistema "EOS-Aura" GSDM-NASA.



FOTO OVS

Figura 10.- La nubosidad presente en la zona meses atrás se disipó con el pasar de las semanas, lo cual permitió apreciar las emisiones fumarólicas en el Sabancaya.

**JUNIO**

La actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya fue reportada por el Observatorio Vulcanológico de Sur mediante cinco reportes técnicos (2015\_22 – 2015\_26).

Los sismos de tipo VT se presentaron en número mayor a lo observado en el mes anterior, llegando a registrar un promedio de 141 LP/día entre el 09 y 15 de junio. Este valor disminuiría para la última semana del mes, marcando 86 VT/día. Todos estos eventos formaron agrupaciones al N y NE del Sabancaya, entre los 9 km y 10 km. Asimismo, las estaciones sísmicas del OVS registraron eventos de importante magnitud los días 05 y 11 de junio, de 4.0 ML y 3.9 ML, respectivamente, y un pico máximo de este tipo de evento el día 12 de junio (286 VT). Cabe señalar que en junio los epicentros de los diferentes sismos continuaron acercándose al cráter del volcán.

En cuanto a los eventos LP, estos se mostraron cambiantes en el transcurso del mes, tanto en número como en energía. El mayor promedio diario se dio en la última semana, con 107 LP/día, así como el más alto pico en una sola jornada: el día 25 con 235 eventos y 1028 MJ de energía, valor este de energía considerado como el más importante entre 2014 y hasta esa fecha.

Los eventos Híbridos, relacionados al ascenso de magma, no registraron mayor



FOTO OVS

Figura 11.- Durante el mes de junio, se observó un incremento en la altura de las fumarolas expulsadas por el Sabancaya, las cuales llegaron a un máximo de 2400 metros.

variación. Es necesario resaltar, sin embargo, el incremento observado en su promedio de ocurrencia diaria entre el 02 y 08 de junio, logrando 9 Híb/día y dos picos de 15 Híb/día los días 4 y 7.

En tanto, las fumarolas expulsadas por el volcán incrementaron su altura hasta un máximo de 2400 metros, aproximadamente, esto a fines de junio. Igualmente, durante este mes, la emisión de gases de coloración azulina (gases magmáticos) se presentó constante y fue distinguida por profesionales del OVS.

Tal como sucedió en los meses anteriores, no se registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de SO<sub>2</sub> del volcán Sabancaya.

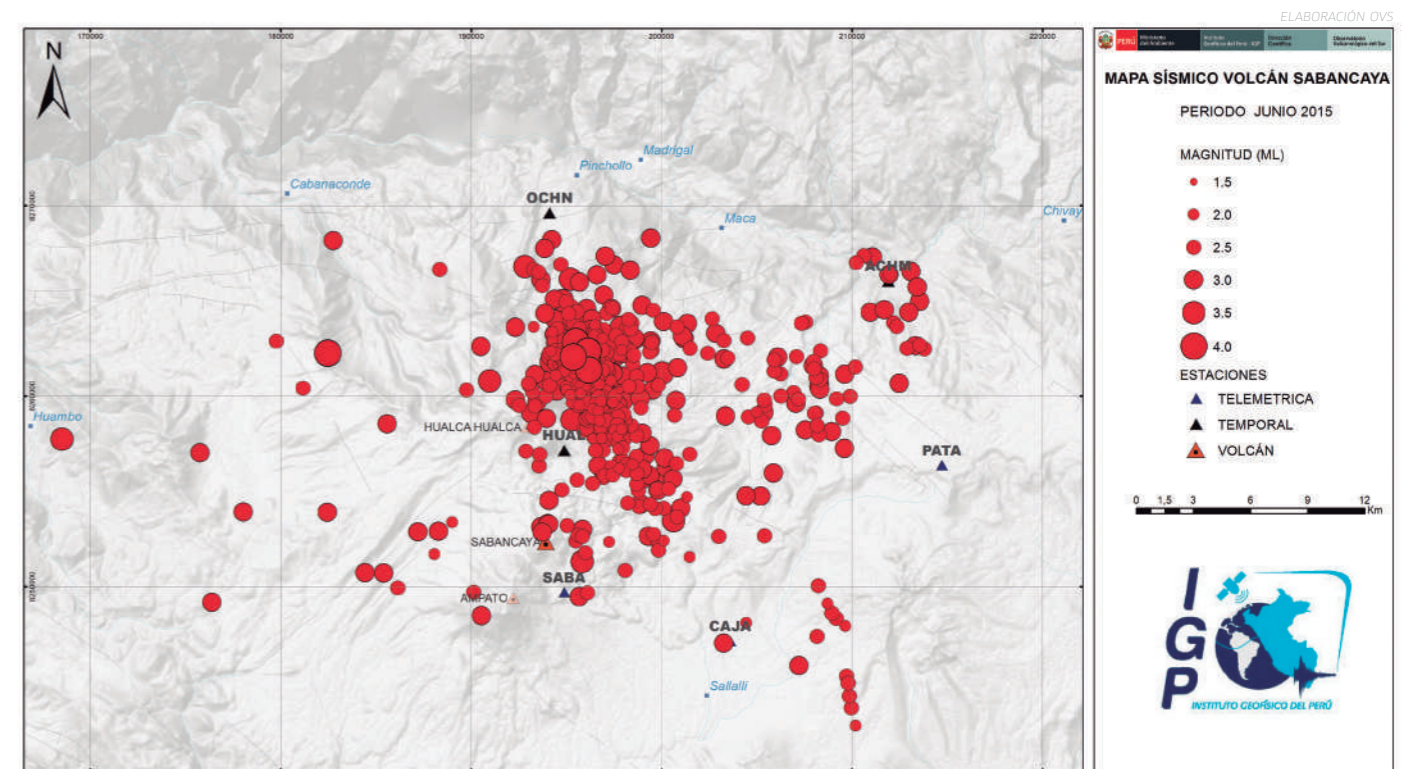


Figura 12.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el mes de junio de 2015 en el volcán Sabancaya. Se identificaron agrupamientos de sismos al N y NE del cráter del Sabancaya, a una distancia de 9 km y 10 km y con eventos de hasta 4.0 ML.

## JULIO

A través de cuatro reportes técnicos (2015\_27 – 2015\_30), el Observatorio Vulcanológico del Sur informó acerca de la actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya en este mes.

Con relación a los eventos VT, durante la primera semana estos alcanzaron un promedio de 72 VT/día, para disminuir a 61 VT/día en la segunda, aumentar nuevamente a 72 VT/día en la tercera y disminuir finalmente, y de forma importante, en la última semana, logrando un promedio de 38 VT/día. Algunos de estos sismos registrados en julio se localizaron en las cercanías del volcán, a distancias menores de 3 km y con magnitudes de 2.5 y 2.6 ML.

Los sismos de tipo LP, en comparación con lo apreciado en junio, disminuyeron su tasa de ocurrencia a lo largo del mes. Durante la primera semana esta se ubicó en 72 LP/día, mostró niveles bajos de 32 LP/día y 47 LP/día en la segunda y tercera semana, y repuntó nuevamente a 72 LP/día para fines de mes.

En tanto, los sismos de tipo Híbrido, vinculados al ascenso de magma, iniciaron julio con valores bajos, pero con uno de los más altos en los últimos cuatro meses (13 Híb/día en la primera semana). Posteriormente, su tasa continuaría disminuyendo progresivamente hasta situarse en 2 Híb/día en la última semana del mes.

Las fumarolas expulsadas por el Sabancaya continuaron observándose las 24 horas del día. La altura alcanzada por estas aumentó de forma constante: 950 m, 1800 m, 1600 m y 2000 m en cada una de las semanas de este mes.

## INSPECCIÓN DEL CRÁTER

Entre el 25 y 26 de julio, un equipo de profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur, liderados por su director, el Dr. Orlando Macedo, ascendieron al cráter del volcán Sabancaya con el objetivo de realizar mediciones de temperatura. Camino a la cumbre del volcán, identificaron la emisión de fumarolas de vapor de agua a través de fisuras de una longitud de 6 m y 8 m ubicadas a 500 metros al suroeste del volcán, precisamente en la zona base del antiguo domo. Las mediciones de temperatura en este punto arrojaron un valor máximo de 81° C.

Una vez en la cima del cráter, y utilizando el Sensor Raytek Raynger Serie 3i, distinguieron dos puntos máximos de temperatura en el fondo de esta parte del volcán de 391 °C y 280 °C.

Los profesionales del IGP verificaron también la emisión constante de gases magmáticos y vapor de agua.

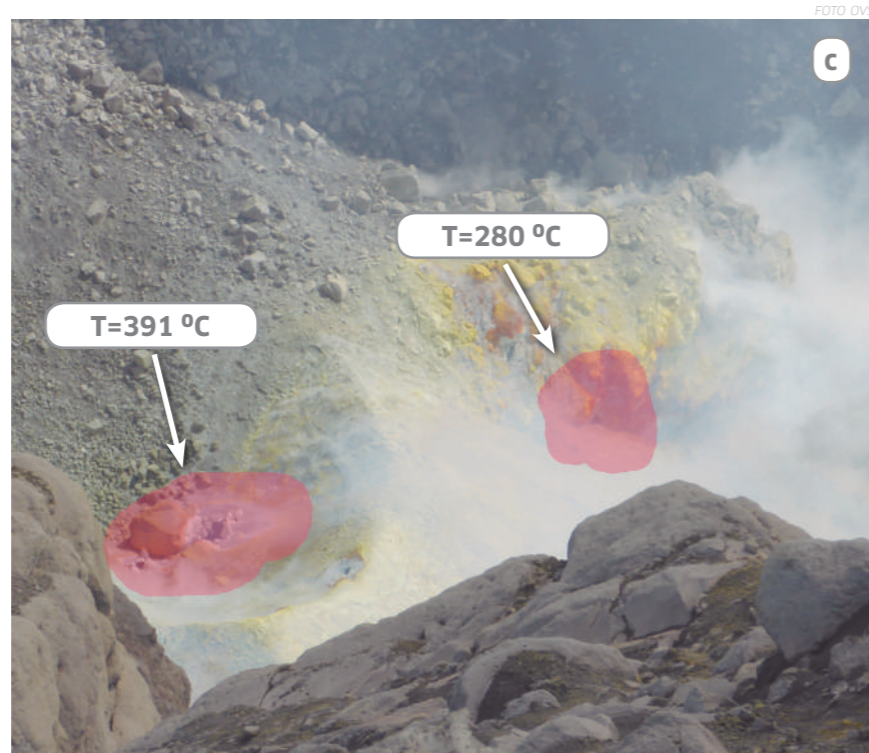
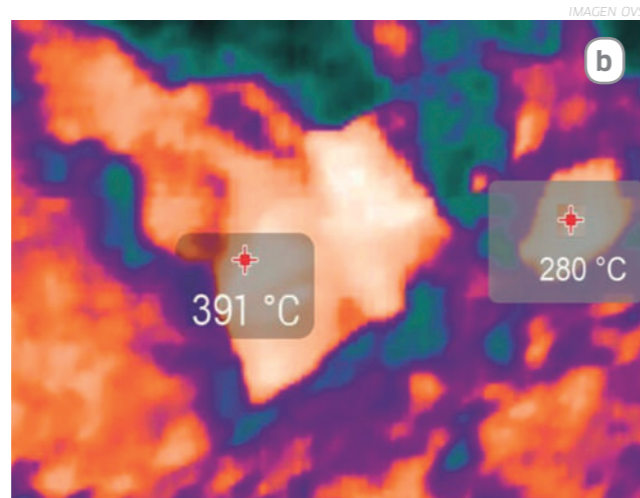


Figura 13.-  
a) Medición de temperatura del fondo del cráter con el sensor infrarrojo Raytek. b) Imagen térmica infrarroja con los puntos de temperatura más elevados. c) Principales puntos calientes en el fondo del cráter del Sabancaya. Se identificó dos orificios con los valores más altos.

## AGOSTO

En este mes, el OVS publicó cuatro reportes técnicos sobre la actividad del volcán Sabancaya (2015\_31 – 2015\_34), entre ellos un reporte técnico extraordinario (2015\_34) debido al incremento importante de la actividad sismovolcánica de este volcán.

A lo largo de todo el mes, la actividad de tipo VT no mostró mayor variación con lo observado semanas atrás. La tasa promedio de estos eventos fue inferior a los 50 VT/día. Estos eventos comenzaron a acercarse hacia el cráter del volcán, en un radio menor a 6 km, observándose por ejemplo el registro 40 eventos Volcano-Tectónicos Proximales (VTp) el día 05 de agosto.

Por su parte, los eventos LP presentaron hasta el 18 de agosto un incremento sostenido de su tasa de promedio (110 LP/día), la cual venía mostrando hace cuatro semanas esa tendencia. A partir de esta fecha, disminuyó de forma importante para cerrar el mes con un rango de 57 LP/día.

Los sismos de tipo Híbrido, en tanto, aumentaron ligeramente hasta la quincena de mes. Cabe precisar que el 05 de agosto se observó un pico de 18 Híbridos con un valor de energía de 1053 MJ. Estos eventos cerrarían agosto con un promedio de 5 Híb/día.

El 28 de agosto, el OVS emitió un reporte extraordinario (2015\_34) como consecuencia del aumento de la actividad sismovolcánica del Sabancaya como consecuencia de una intrusión magmática. Ejemplo de ello fue el considerable aumento de eventos VTp, el cual registró un pico de 495 VTp tan solo el día de publicación de este informe. Este mismo día,

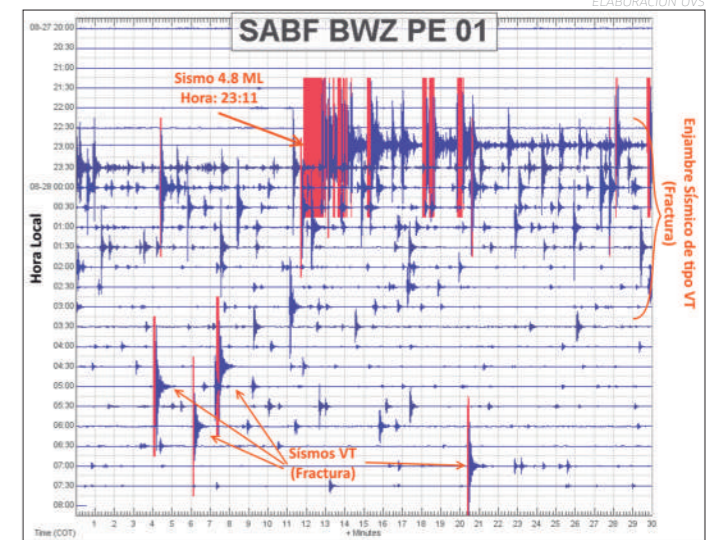


Figura 14.- Sismograma registrado el 28 de agosto, donde se muestra el evento VT de 4.8 ML registrado a las 23:11 hora local.

las estaciones sísmicas del OVS registraron hasta 3 eventos de importante magnitud: El primero de 4.8 ML a las 04:11 UTC, el segundo de 3.5 ML a las 04:18 UTC, y el tercero de 3.4 ML a las 04:17 UTC, localizados a profundidades de entre 6 km y 9 km. Esta fue la primera vez desde 2013 que los sismos se acercaron en gran número hacia la zona del cráter.

Cabe resaltar igualmente que el 31 de agosto se produjo la mayor cantidad de energía de eventos Híbridos en 2015, con un pico de 4145 MJ.

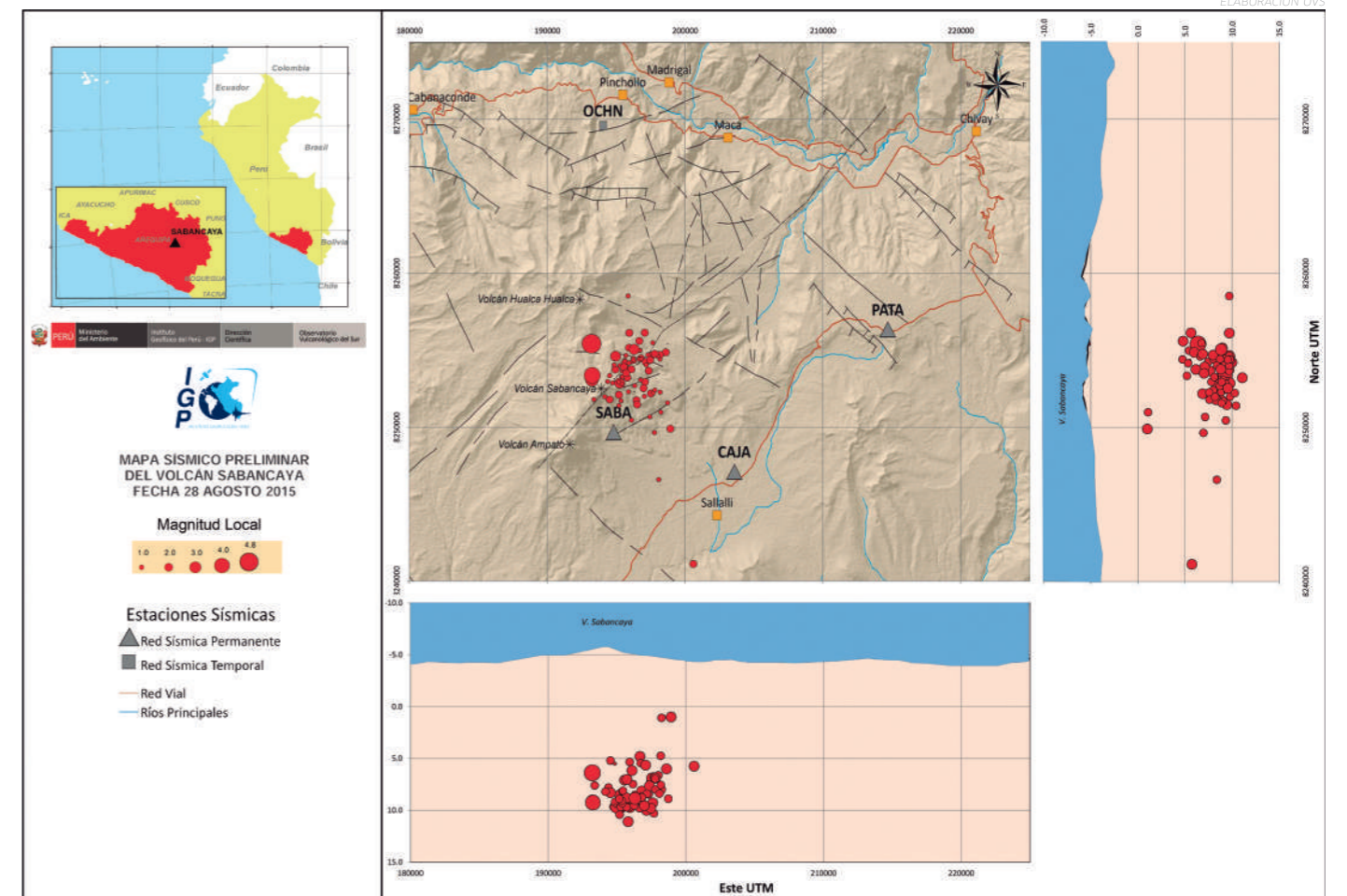


Figura 15.- Sismos de tipo fractura o VT registrados el 28 de agosto de 2015. Los eventos se acercaron notoriamente hacia la zona de cráter, y fueron superficiales.

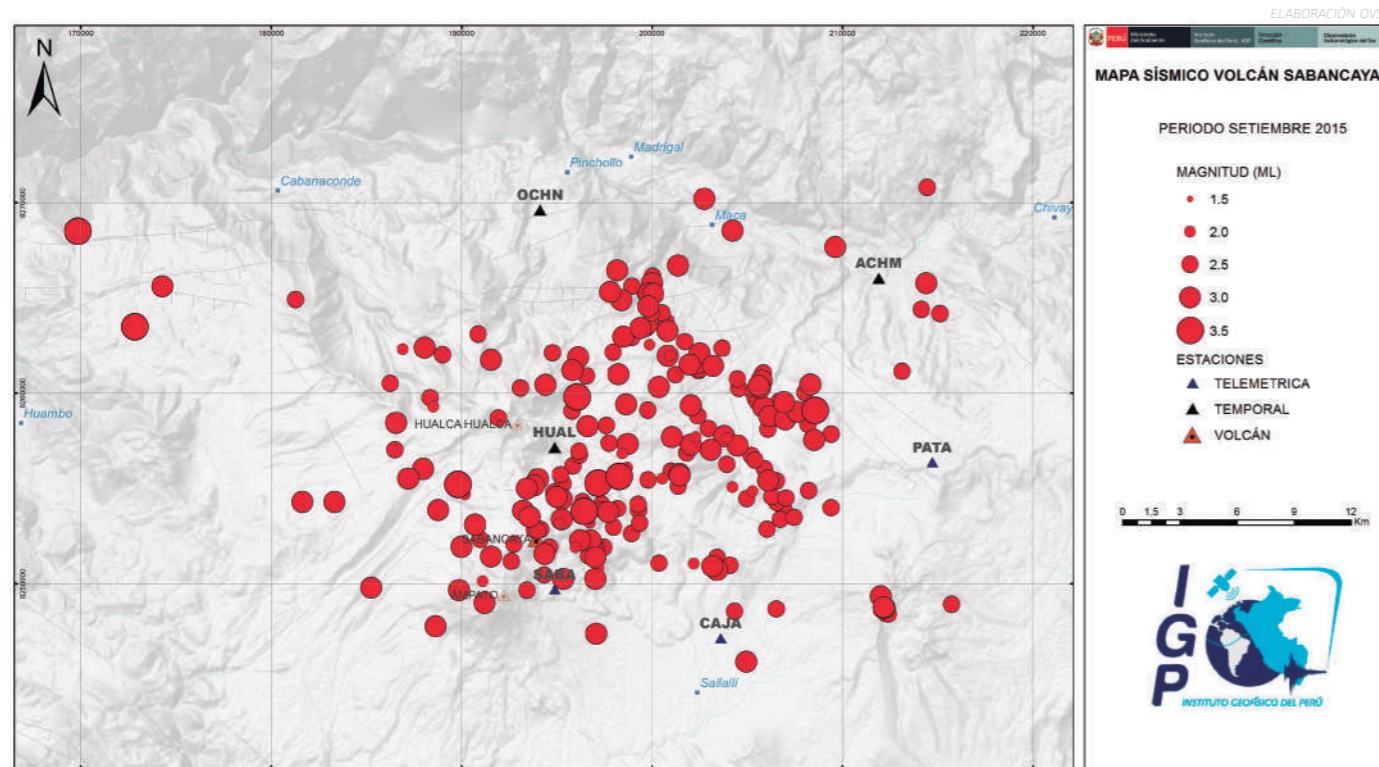


Figura 16.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados durante el mes de septiembre de 2015 en el volcán Sabancaya. La sismicidad a lo largo de todo este mes se presentó dispersa sin formar agrupamientos claros.

Durante este mes, el OVS publicó cinco reportes en los cuales analiza y describe la actividad del Sabancaya (2015\_35 – 2015\_39).

Recordemos que a finales del mes de agosto, el volcán Sabancaya experimentó un ascenso importante en su actividad sísmica, con un gran número de eventos registrados en las cercanías de su cráter. Esta tendencia continuó durante la primera semana de septiembre, en la cual mantuvo una tasa promedio de 109 VTp/día; posteriormente, y en las siguientes semanas, esta decrecería tanto en número como en la magnitud de sus eventos más importantes, cerrando septiembre con una tasa de tan solo 27 VTp/día.

Con relación a los sismos de tipo LP, vinculados al movimiento de fluidos, estos presentaron valores inferiores con relación a lo observado en agosto. El mayor promedio fue de 80 LP/día entre el 08 y 14 de septiembre, periodo en el cual se registró un pico de 130 LP el día 10. Septiembre cerró finalmente con una tasa promedio de 42 LP.



Figura 17.- Las emisiones de vapor de agua y gases magmáticos continuaron observándose de forma continua en el volcán Sabancaya. En septiembre alcanzaron alturas superiores a los 1500 m.

Además, los sismos de tipo Híbrido presentaron promedios muy bajos a lo largo de todo el mes, con valores máximos de 6 Híb/día entre el 08 y 21 de septiembre.

Del mismo modo, fumarolas de vapor de agua continuaron apreciándose ininterrumpidamente durante todo el mes. Estas emisiones fluctuaron entre los 600 y 1600 metros sobre la base del cráter.

Finalmente, tanto el sistema MIROVA como el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA no registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de densidad de SO<sub>2</sub>.



La actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya en octubre fue descrita y detallada por el OVS en un reporte técnico (2015\_40).

Tal como había sido señalado en el mes anterior, los eventos de tipo Volcano-Tectónico, asociados a la fractura de rocas en el interior del volcán, continuaron mostrando valores bajos a lo largo de octubre.

Los eventos de tipo LP, vinculados al movimiento de fluidos, experimentaron igualmente un ligero incremento, el cual no se sostuvo conforme el paso de las semanas.

Igual comportamiento se apreció en el registro de eventos Híbridos, relacionados al ascenso de magma. Estos mantuvieron niveles inferiores en todo octubre, por lo cual se concluyó que el ascenso de nuevo material hacia la zona del cráter fue prácticamente inexistente.

**SEGUNDA INSPECCIÓN DEL CRÁTER**

En este mes, los vulcanólogos del OVS realizaron una segunda inspección del cráter del Sabancaya. Esta visita, que se efectuó el 01 de octubre, fue liderada también por el Dr. Orlando Macedo, director del Observatorio, y en la cual participaron el MsC. Nino Puma, el Ing. José Torres y el Téc. Rolando Chijcheapaza. Una vez en la cumbre realizaron nuevas mediciones de temperatura con el sensor térmico Raytek, obteniendo valores cercanos a lo observado en la inspección de julio (391 °C). La expedición verificó la



Figura 18.- a) Emisiones de vapor de agua y gases magmáticos expulsados a tempranas horas del 01 de octubre en el volcán Sabancaya. b) Profesional del OVS toma medidas de temperatura del fondo del cráter. c) La emisión de gases de vapor de agua y gases magmáticos es constante, las 24 horas del día. En la imagen se observa la expulsión de este material desde el cráter del Sabancaya.

ausencia de material sólido reciente en las proximidades del cráter, apreció además la emisión constante y en gran cantidad de fumarolas de vapor de agua y diferentes gases magmáticos.



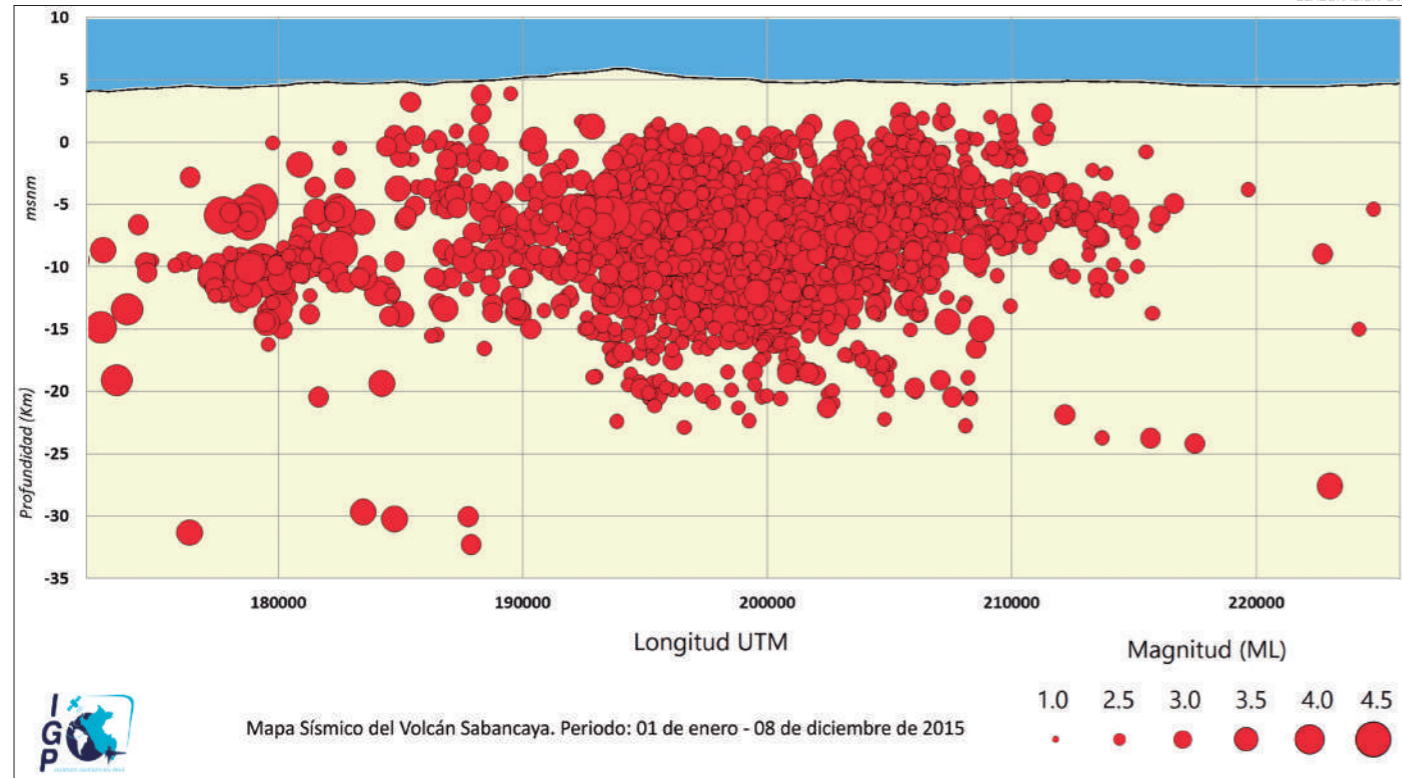


Figura 19.- Mapa sísmico del volcán Sabancaya (perfil W-E) que muestra los sismos de tipo VT registrados entre el 01 de enero y el 08 de diciembre de 2015.

El Observatorio Vulcanológico del Sur publicó en este periodo de análisis ( 01 de noviembre al 08 de diciembre), cuatro reportes técnicos acerca de la actividad del Sabancaya (2015\_41 – 2015\_44).

La sismicidad asociada a fractura de rocas (eventos VT), inició noviembre con valores bajos, presentando un tasa de 39 VT/día hasta la quincena de mes. No obstante, se tuvo registro de dos eventos importantes con magnitudes de 3.0 ML y 3.4 ML el 14 y 16 de noviembre, localizados a una profundidad de 8 km y 9 km, respectivamente. Con el paso de las semanas, la ocurrencia de estos sismos no presentó mayor cambio, finalizando el mes con un promedio de 53 VT/día y con un sismo de regular magnitud (3.6 ML), registrado el día 25 a las 03:12 UTC a una profundidad de 5 km. Posteriormente, en la segunda semana de diciembre se registró un fuerte incremento de eventos VTp, los cuales alcanzaron magnitudes de hasta 3.9 ML. Esta fue la segunda ocasión en 2015 en la cual se registraron sismos muy próximos al cráter del volcán.

Por su parte, los eventos de tipo LP, si bien presentaron registros mínimos a inicios de mes, al finalizar noviembre alcanzaron una tasa de 101 LP/día, siendo el mayor promedio en los últimos tres meses. Los eventos Híbridos, por su parte, fueron escasos. Estos eventos tuvieron una tasa de ocurrencia diaria de 1 Híb/día desde el 11 hasta el 23 de noviembre, para luego desaparecer completamente en la última semana del mes.

El aspecto más significativo en noviembre fue la ocurrencia de Tremor de elevada energía, el más importante registrado luego de tres meses. Este se observó el día 24 de noviembre como resultado de un evento producido a las 16:02 UTC, alcanzando un máximo de 485 MJ y disminuyendo con el transcurso del horas.

Con relación a las fumarolas, estas siguieron siendo expulsadas las 24 horas del día, compuestas principalmente por vapor de agua y gas magmático. Su altura osciló entre los 200 y 1100 metros sobre la base del cráter del Sabancaya.

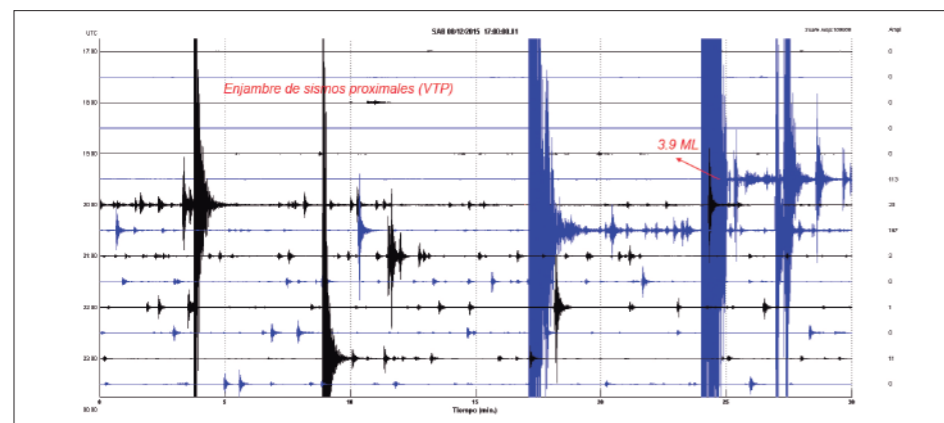


Figura 20.- El día 08 de diciembre se registró un enjambre de sismos en las cercanías del volcán Sabancaya, con sismos de hasta 3.9 ML. Esta fue la segunda ocasión en el año en la que se observó un acercamiento importante de estos eventos hacia el cráter del volcán.

## Conclusiones

- En 2015, la actividad del volcán Sabancaya correspondió en su mayoría a eventos de tipo LP con 49 %, 46 % de eventos VT y seguido de Tremores e Híbridos con 3% y 2%, respectivamente. En tanto, las fumarolas oscilaron entre los 200 y 2400 metros sobre el cráter (valor máximo apreciado en junio.)
- La energía de los LPs se incrementó progresivamente durante los seis primeros meses, alcanzando un pico máximo de 797 MJ (25 de junio) que disminuyó posteriormente. Por su parte, la energía de los Híbridos se incrementó entre los meses de junio – agosto registrando un pico de 4145 MJ.
- La sismicidad en los últimos 2 meses se ha incrementado registrándose un promedio de 61 LP/día, 57 VT/días. Del mismo modo, los Tremores se incrementaron en energía alcanzando 489 MJ el 24 de noviembre; por el contrario, los eventos Híbridos se mantuvieron en niveles muy bajos.
- Los eventos VTp, registrados a menos de 6 km del cráter, se registraron con mayor incidencia en el mes de agosto (4.5 ML magnitud), alejándose con el paso de las semanas. En la segunda semana de diciembre nuevamente se aproximaron hacia el volcán, alcanzando magnitudes de hasta 3.9 ML.

## Introducción

El Misti es un estratovolcán joven ubicado al sur del Perú, en el segmento norte de la Zona Volcánica de los Andes Centrales. Es uno de los volcanes más activos de la región y es considerado el volcán de mayor riesgo del país, ya que la ciudad de Arequipa, el segundo centro económico más importante del país, tiene una población aproximada de 1 millón de habitantes y se encuentra a sus pies.

En el pasado, el Misti ha mostrado numerosas erupciones vulcanianas y algunas plinianas, estas últimas son las más grandes, y se estima que tienen una recurrencia de 2000 a 4000 años. La última conocida ocurrió hace 2030 años y alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 3-4.

Cualquier cambio físico y químico debajo de un volcán, refleja condiciones de intranquilidad, que permiten prever erupciones volcánicas inminentes; algunas pueden ser detectadas a simple vista, mientras que otras solo son detectadas por instrumentos científicos muy sensibles, como los sismómetros.

La sismicidad del volcán Misti fue evidente por primera vez en noviembre de 1998. Luego, desde octubre de 2005, el IGP, a través del Observatorio Vulcanológico del Sur, viene realizando el monitoreo en tiempo real de toda la actividad sísmica del Misti. En estos últimos 10 años se ha trazado una "línea-base", que hoy en día sirve para comparar y hacer seguimiento diario de su actividad.

Por Ing. Ricky Centeno Quico  
Responsable del monitoreo sísmico del volcán Misti

“ El caso del volcán Misti es especial en el mundo, ya que siendo un volcán activo, con fumarolas constantes a elevadas temperaturas, se asienta una ciudad tan importante como Arequipa”.



Dr. Anthony Finizola  
Université de la Réunion  
Francia

# VOLCÁN MISTI

El Misti es un volcán joven, activo, explosivo y es considerado el volcán de mayor riesgo en el Perú, debido a su cercanía a la ciudad de Arequipa que cuenta con una población próxima al millón de habitantes, así como a una muy importante infraestructura (represas, hidroeléctricas, aeropuertos, centros mineros, etc.). Ha tenido por lo menos una erupción explosiva importante y cerca de diez crisis fumarólicas en los últimos 600 años. El OVS, en esta última década de obtención de resultados científicos y de vigilancia sísmica en tiempo real, ha trazado una "línea-base" que hoy en día sirve para comparar y hacer seguimiento a la actividad diaria del Misti.

## RESUMEN DE LA ACTIVIDAD

### ENERO - ABRIL

El Observatorio Vulcanológico del Sur publicó siete reportes técnicos (2015\_01 – 2015\_07) en los cuales analiza el comportamiento del Misti durante este periodo.

En líneas generales, la actividad del Misti no sufrió mayor variación con lo observado en el último trimestre de 2014. En estos primeros meses de 2015, la red de seis estaciones sísmicas telemétricas que el OVS tiene instalada sobre el volcán, registraron 3095 eventos de tipo Volcano-Tectónico (sismos asociados a fractura de rocas en el interior del macizo). El evento VT más importante en este periodo tuvo lugar el 11 de febrero a las 02:15 hora local, con una magnitud de 2.6 ML y fue localizado a 2 km al norte del cráter del Misti. En este día también se registró el mayor promedio de eventos VT en una jornada, con 95 sismos de este tipo.

Por otro lado, la sismicidad de tipo LP, vinculada al movimiento de fluidos, registró un número importante en este periodo. En total se registraron 977 eventos LP, observándose el mayor pico de eventos en un solo día el 11 de febrero, con 41 eventos.

Cabe precisar que a mediados de abril, profesionales del OVS realizaron las primeras mediciones de Potencial Espontáneo (PE) de 2015 en este macizo, las mismas que continuarían en los siguientes meses.

Finalmente, no se registraron anomalías térmicas ni variaciones en los niveles de gas  $SO_2$ , según el monitoreo efectuado por el sistema MÍROVA y el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA.



Figura 01.- Las mediciones de PE fueron efectuadas entre el 16 y 17 de abril para determinar posibles variaciones en el sistema hidrotermal del Misti.

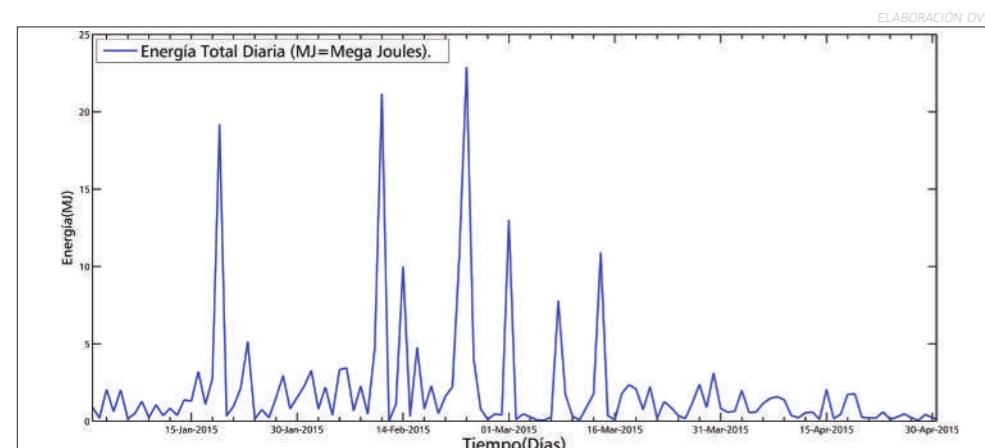


Figura 02.- Evolución de la energía sísmica total diaria asociada a la actividad del volcán Misti entre los días 01 de enero y el 30 de abril de 2015.

### MAYO - AGOSTO



Figura 03.- Especialistas del OVS en el borde del cráter del Misti, el cual tiene una profundidad aproximada de 150 metros y un diámetro de 450 m.

Durante este periodo, el OVS elaboró ocho reportes técnicos (2015\_08 – 2015\_15) en los cuales publicó los resultados del monitoreo del Misti a lo largo de estos meses.

Los eventos de fractura VT, sismos Volcano-Tectónicos, se presentaron en número muy similar al observado en los primeros cuatro meses del año. En total se registraron 3548 VT entre mayo y agosto. El 15 de junio fue la jornada con mayor número de sismos VT en este periodo, con 140 eventos. Igualmente el 11 de julio se produjo el evento de fractura más importante (2.5 ML), a las 06:11 hora local y localizado a 1.1 km por debajo del cráter del Misti.

Los eventos de tipo Largo Periodo (LP), por su parte, fueron menores en número con relación a lo observado entre enero y abril, apreciándose 795 eventos en este periodo. El mayor pico de eventos LP en un solo día se registró el 19 de mayo, con 27 LP en dicha jornada.

Es preciso resaltar la inspección del cráter del Misti efectuada por vulcanólogos del OVS entre el 23 y 24 de junio. En esta visita, liderada por el Ing. José del Carpio, se realizó mediciones de temperatura y se verificó la emisión de gases magmáticos desde el fondo del cráter de este macizo, lo cual demostró que esta parte del volcán se encuentra totalmente activa.



Figura 04.- La actividad fumarólica en el cráter del volcán Misti es constante e intensa. En la figura se observa las emisiones de vapor de agua y diferentes gases magmáticos.

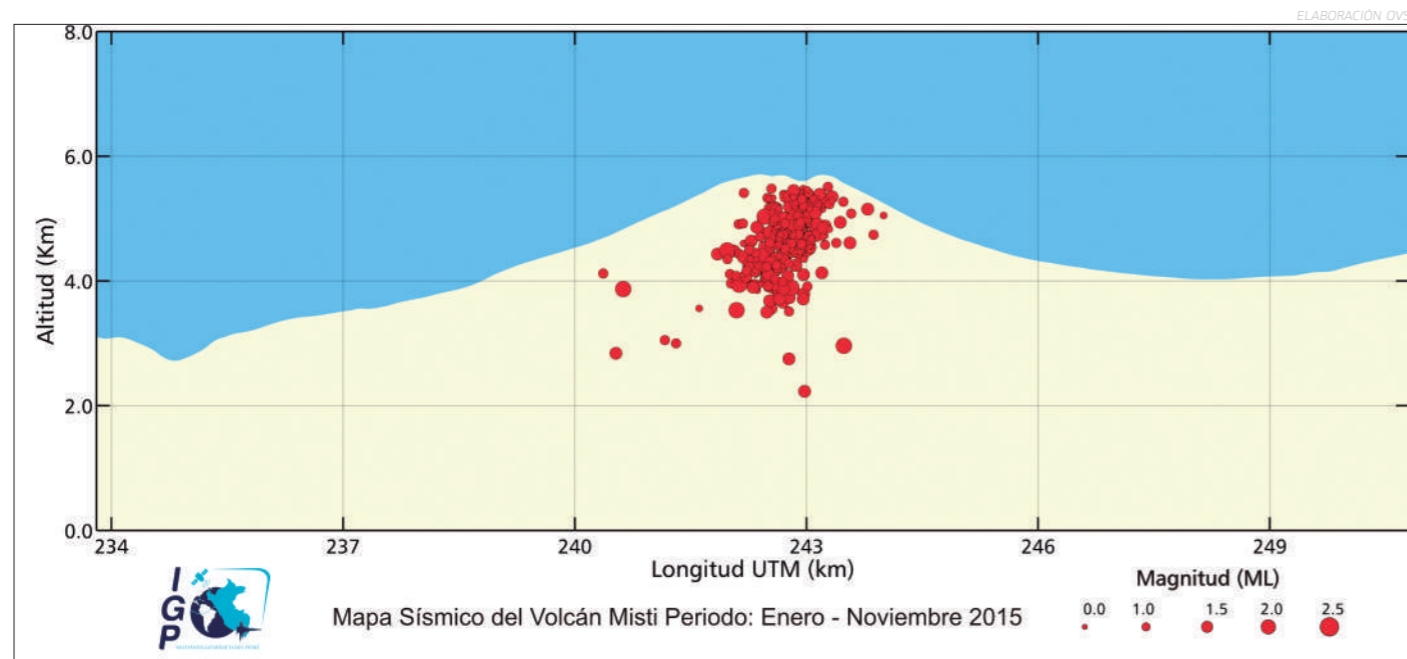
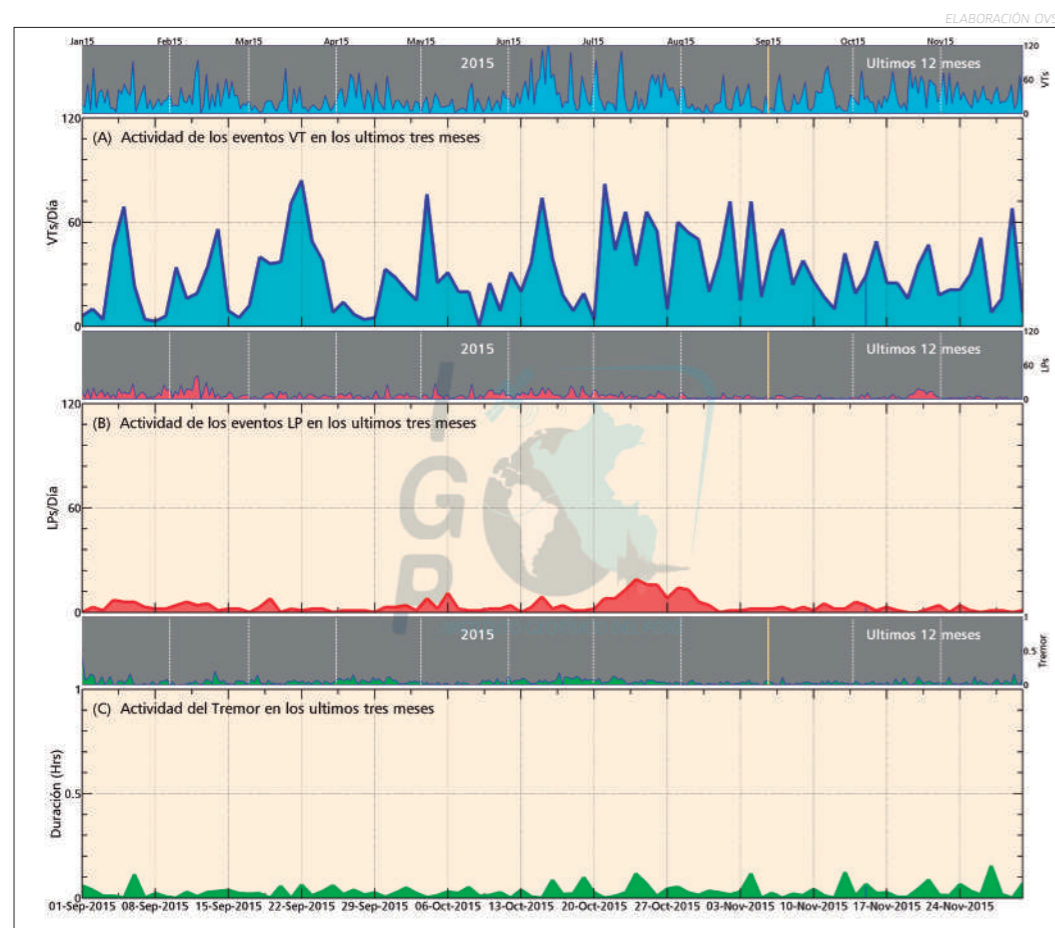


Figura 05.- Mapa sísmico del volcán Misti (perfil W-E) que muestra los eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre enero y noviembre de 2015.

La actividad sismovolcánica del Misti entre septiembre y noviembre de 2015, fue descrita en seis reportes técnicos (2015\_16 - 2015\_21) elaborados por el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS).

En estos tres meses, el registro de eventos Volcano-Tectónicos mostró niveles similares a lo observado entre mayo y agosto. En total, la red Misti registró un total

Figura 06.- Evolución trimestral y anual de la actividad del volcán Misti. Se aprecia el desempeño de los eventos Volcano-Tectónicos, de Largo Período y duración de Tremor volcánico.



de 3320 VT, y un evento importante de 2.3 ML el 23 de septiembre a las 18:01 hora local, localizado a tan solo 1 km por debajo del cráter. El mayor número de eventos VT en una jornada se observó el 22 de septiembre con 84 eventos.

Con referencia a los sismos LP, fueron observados 523 eventos en este periodo, con un valor diario máximo de 19 eventos el 24 de octubre.

Por su parte, la energía sísmica total mostró niveles mínimos, especialmente en el mes de noviembre, en el cual no superó los 5 Megajoules, siendo de este modo el valor más bajo en todo 2015.

En cuanto al monitoreo térmico y de fumarolas, el sistema MIROVA no registró ninguna anomalía térmica sobre el cráter del volcán, al igual que el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA, el cual no identificó variaciones en los niveles de gas SO<sub>2</sub>.

En líneas generales, la actividad del Misti presentó niveles bajos en este periodo así como a lo largo de 2015.

## Conclusiones

- En 2015, la actividad del volcán Misti correspondió un 77% a sismos VT, asociados a fractura de roca, y un 23% a sismos LP, asociados a movimiento de fluidos. Su nivel de actividad es bajo, y durante el año no mostró mayor variación térmica como de gas SO<sub>2</sub>.
- En los cuatro primeros meses, el Misti presentó siete picos de actividad importante en la curva de energía, en todos los casos asociados a algunos sismos VT de magnitud 2 ML a 2.6 ML. Uno de ellos ocurrió el 11 de febrero a las 02:15 hora local, y fue ubicado a 2 km al norte del volcán.
- Los siguientes cuatro meses, la actividad no mostró mayor variación en la curva de energía, pero sí un ligero aumento en el número de sismos VT. El día 15 de junio se registró un enjambre sísmico de hasta 140 VTs. En los últimos tres meses, la curva de energía presentó los niveles más bajos del año 2015.
- Además del monitoreo permanente del volcán, se realizaron dos campañas de Potencial Espontáneo, cuyos resultados no mostraron mayor variación a las realizadas en años anteriores. Asimismo, se efectuó una visita técnica al cráter, observándose todavía un cráter potencialmente activo.



Personal del OVS en pruebas de Potencial Espontáneo en el volcán Misti. FOTO OVS

## Introducción

El volcán Ticsani pertenece al grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani. Es un estrato volcán constituido por un complejo de domos y una caldera de destrucción y se caracteriza por presentar extensos depósitos de avalancha. Su más reciente erupción ocurrió hace menos de 400 años, alcanzando un VEI entre 2 y 3.

La actividad del Ticsani comenzó a ser monitoreada de forma constante mediante estaciones temporales desde mayo de 2014. Los registros sísmicos muestran una importante actividad relacionada a fractura de rocas, siendo el tipo de actividad predominante en esta región.

Como resultado de ello, el IGP, a través del Observatorio Vulcanológico del Sur, inició la adquisición de registros sísmicos con la instalación de la primera estación telemétrica TCN1. Es así que desde agosto de 2015 se procesan datos sísmicos en tiempo real desde esta estación ubicada sobre el domo reciente del volcán.

Los trabajos de implementación de la red del Ticsani concluyeron en noviembre de 2015 con la instalación de tres nuevas estaciones sísmicas en las cercanías de este macizo, transmitiendo información las 24 horas del día a la sede del OVS. De esta forma el Observatorio comunica de manera oportuna a las autoridades y al público en general el estado de actividad de este volcán.

Por Ing. John Cruz Igme  
Responsable del monitoreo sísmico del volcán Ticsani

# TICSANI



“ Los microsismos en Ticsani demuestran que existe actividad interna en este macizo. Es por eso que en el IGP ya empezamos a monitorearlo en tiempo real para anticiparnos a su despertar”.



**Dr. José Macharé**  
Director Científico del IGP

# VOLCÁN TICSANI

El volcán Ticsani, situado a 60 km de la ciudad de Moquegua, es un estratovolcán cuya característica principal es haber presentado grandes avalanchas. En las inmediaciones de este volcán se observa depósitos dispersos que indican una probable erupción freatomagmática importante ocurrida hace menos de 400 años, cuyo centro (cráter) contiene al domo más reciente. Una eventual erupción del Ticsani constituye una amenaza potencial para los poblados aledaños como Calacoa (8 km del cráter reciente), Carumas (11 km), y otros localizados al Oeste y SE dentro de un radio de 12 km alrededor del volcán, donde habitan más de 5000 personas.

## RESUMEN DE LA ACTIVIDAD

### ENERO - MARZO

La actividad sismovolcánica del volcán Ticsani fue detallada en el primer trimestre del año en el reporte técnico 2015\_01, el cual analiza los registros sísmicos hasta el 31 de marzo.

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), vigiló este macizo utilizando estaciones sísmicas temporales hasta agosto de 2015. Esta red, compuesta por dos estaciones y que vino funcionando desde mayo de 2014, brindó la data adecuada para el estudio del Ticsani.

Para la realización de este informe, los profesionales del OVS visitaron en dos ocasiones al volcán, con el propósito de descargar la información sísmica correspondiente. Estas inspecciones fueron hechas los días 19 y 20 de marzo y 07 y 08 de mayo, aprovechándose las condiciones climáticas favorables para la efectuar de estas tareas.

En este primer periodo se registraron 1567 eventos de

fractura (Volcano-Tectónico), con una tasa promedio diaria de 17 VT/día. Asimismo, se ha identificado tres picos importantes los días 19 de enero, 18 de febrero y 09 de marzo, llegando a alcanzar un máximo de 149 VT en una sola jornada.

Con relación a los sismos de Largo Periodo, estos se presentaron disminuidos, con valores diarios menores a 1 LP/día. En este trimestre solo se registraron 18 LP, lo cual indica una muy baja actividad relacionada al paso de fluidos.

Por su parte, la actividad de tipo Tremor (vibraciones continuas) no fue notoria, presentándose durante solo 12 minutos en este periodo.

Finalmente, tanto el sistema MIROVA como el sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA, no registraron anomalías térmicas ni variación en los niveles de SO<sub>2</sub> durante todo este trimestre en el volcán Ticsani.

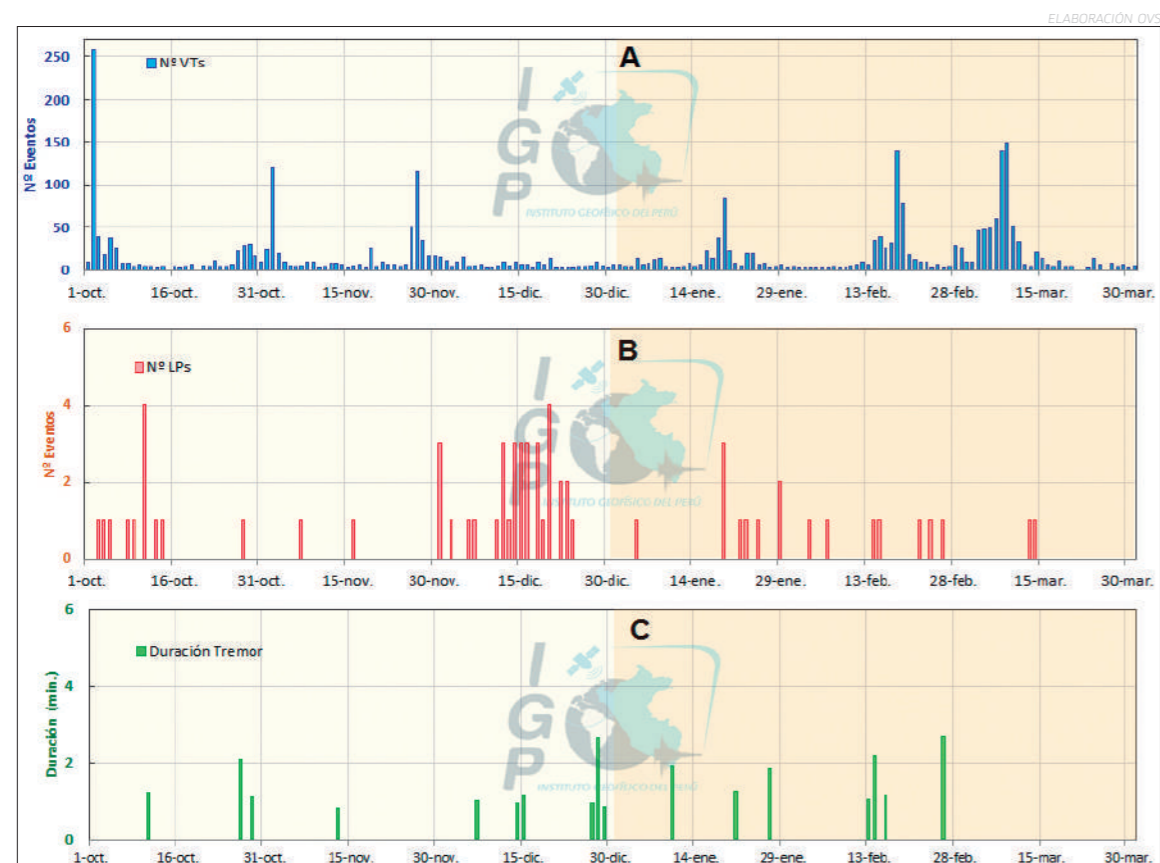


Figura 01.- Número (barras de color) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación temporal TCN1 (Ticsani) entre el 01 de octubre de 2014 y el 31 de marzo de 2015. El área sombreada de color naranja corresponde al periodo efectivo de análisis (enero-marzo 2015).

### ABRIL - JUNIO



Figura 02.- Recojo de información sísmica de la estación temporal instalada por el OVS en el domo actual del volcán Ticsani.

El volcán Ticsani no mostró mayor variación en el segundo trimestre de 2015, según fue descrito y graficado en el reporte 2015\_02 emitido por el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) a inicios de julio.

Apoyándose en la información sísmica obtenida a través de las estaciones temporales, y que fue recogida en dos visitas de campo (07 y 08 de mayo y 06 y 07 de julio), el reporte detalla el comportamiento del Ticsani en sus diferentes parámetros sismovolcánicos.

Así, se observó que los sismos de tipo VT, vinculados a fractura de rocas, disminuyeron ligeramente con relación al primer trimestre, pasando de 17 LP/día a 16 LP/día, acumulando un total de 1518 eventos entre abril y junio. Tal como en el anterior periodo, también se apreciaron picos de sismicidad, en este caso en los días 03 y 22 de abril y 30 de junio, con un máximo de 151 VT/día.

Asimismo, los sismos de tipo LP, relacionados al movimiento de fluidos, se mostraron con niveles bajos, registrándose solamente 35 eventos en todo este periodo. La ocurrencia de este tipo de sismo fue esporádica, presentándose en ocasiones hasta 04 eventos por día (01, 02 y 05 de mayo), mientras que en muchas otras jornadas no se tuvo registro de ninguno de ellos.

La actividad de tipo Tremor, por su parte, registró 19 minutos de duración en total. En todo este periodo, el mayor pico sucedió el día 14 de abril con 10 minutos de duración.

No se registró ninguna anomalía térmica en el Ticsani, según el sistema MIROVA. En tanto, se observó un ligero incremento de la densidad de SO<sub>2</sub> a partir del 02 de abril (09 unidades Dobson -DU), el cual no fue considerado como una variación importante.

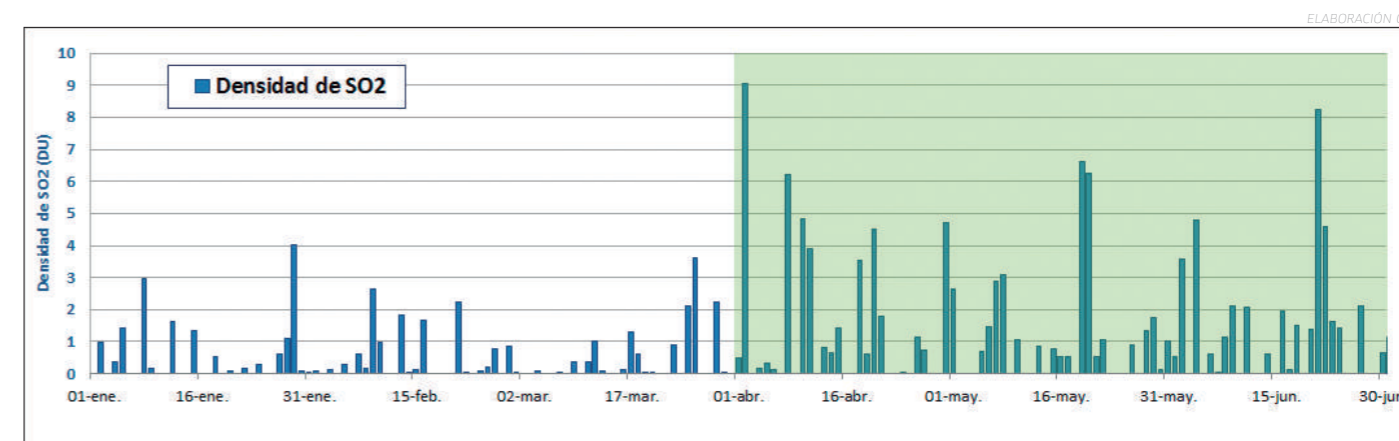


Figura 03.- Cuadro estadístico con información del sistema satelital "EOS-Aura" GSDM-NASA referente al volcán Ticsani. Se aprecia un valor máximo de 9 DU (Unidades Dobson) el día 09 de abril. En líneas generales, durante el segundo trimestre de 2015, este parámetro no presentó mayor variación.

**JULIO - SEPTIEMBRE**

Durante este trimestre, el OVS emitió cuatro reportes técnicos (2015\_02 - 2015\_05) acerca de la actividad del Ticsani.

En este periodo se apreció un incremento importante en la actividad sismovolcánica de este macizo, llegando a registrarse 9684 eventos Volcano-Tectónicos, casi 7 veces más que lo observado entre abril y junio. El número máximo de sismos de tipo VT se dio el 15 de septiembre, con 733 eventos en dicha jornada. En esta misma línea, entre el 06 y 30 de septiembre, el promedio de ocurrencia diaria de estos eventos fue 363 VT/día, alcanzando algunos de estos sismos una magnitud de 4.0 ML.

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) no descartó que este súbito aumento haya estado relacionado a una alteración en la actividad "normal" de este coloso, dada la existencia de fallas geológicas presentes y activas en la zona. Sin embargo, el análisis efectuado de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas, mostró que estos eventos ocurrieron muy cerca del domo reciente del volcán.

Por su parte, la actividad de eventos de Largo Periodo (LP), al igual que el Tremor sísmico, mostró un leve incremento paralelo al de la sismicidad de tipo VT. En estos tres meses se produjeron 111 LPs y se registraron 142 minutos de Tremor.

Uno de los aspectos más importantes en este trimestre, fue la instalación de la primera estación sísmica telemétrica en el país sobre el volcán Ticsani. El 07 de agosto, profesionales del área de Redes Geofísicas del IGP pusieron en funcionamiento esta Red, lo cual le permitió al OVS obtener data sísmica en tiempo real -las 24 horas del día y de forma ininterrumpida- acerca de la actividad de este volcán.



Figura 04.- Estación telemétrica TCN1 instalada sobre el domo reciente del volcán.

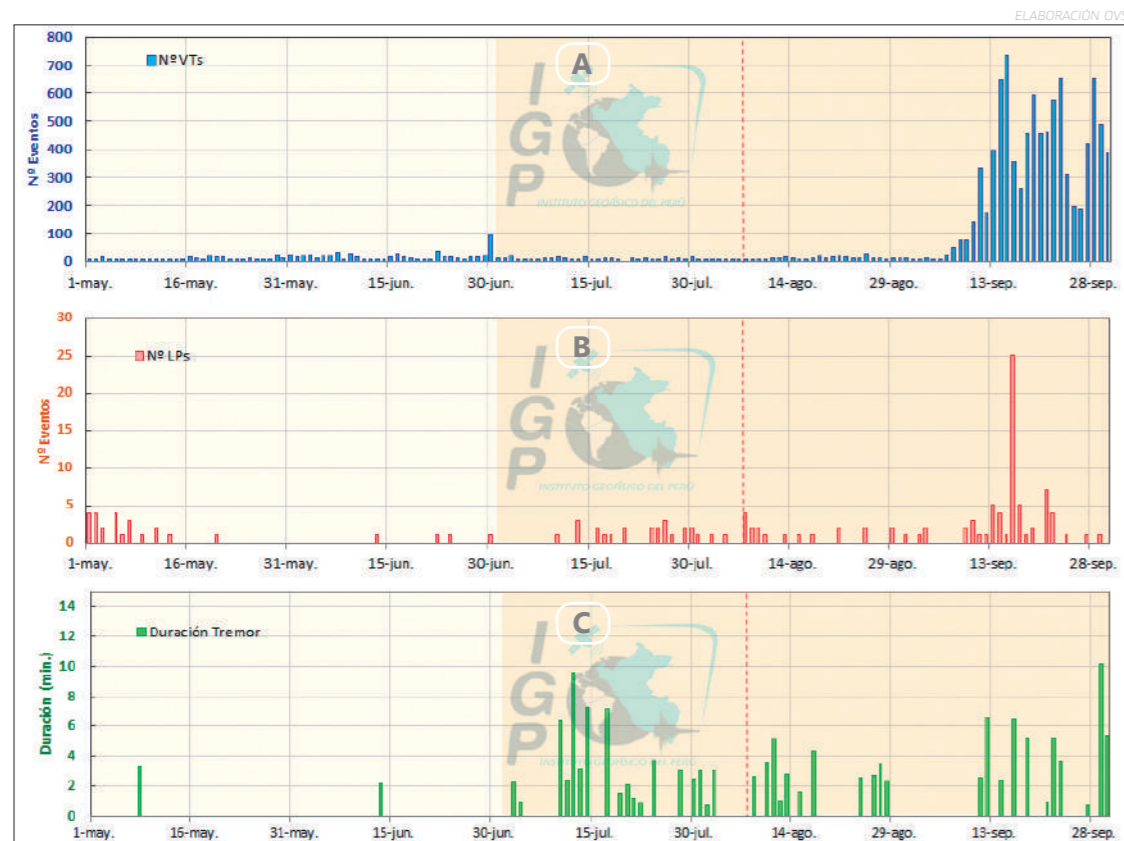


Figura 05.- Número de eventos registrados por la estación telemétrica TCN1. (A) Eventos relacionados a fracturas de rocas. (B) Eventos relacionados al paso de fluidos. (C) Eventos de tipo Tremor. A partir de las líneas rojas discontinuas en adelante se procesan datos mediante telemetría. El área sombreada de color naranja muestra la actividad entre julio y septiembre de 2015, observándose el incremento de la actividad registrado a partir del 06 de septiembre.

**OCTUBRE - NOVIEMBRE**

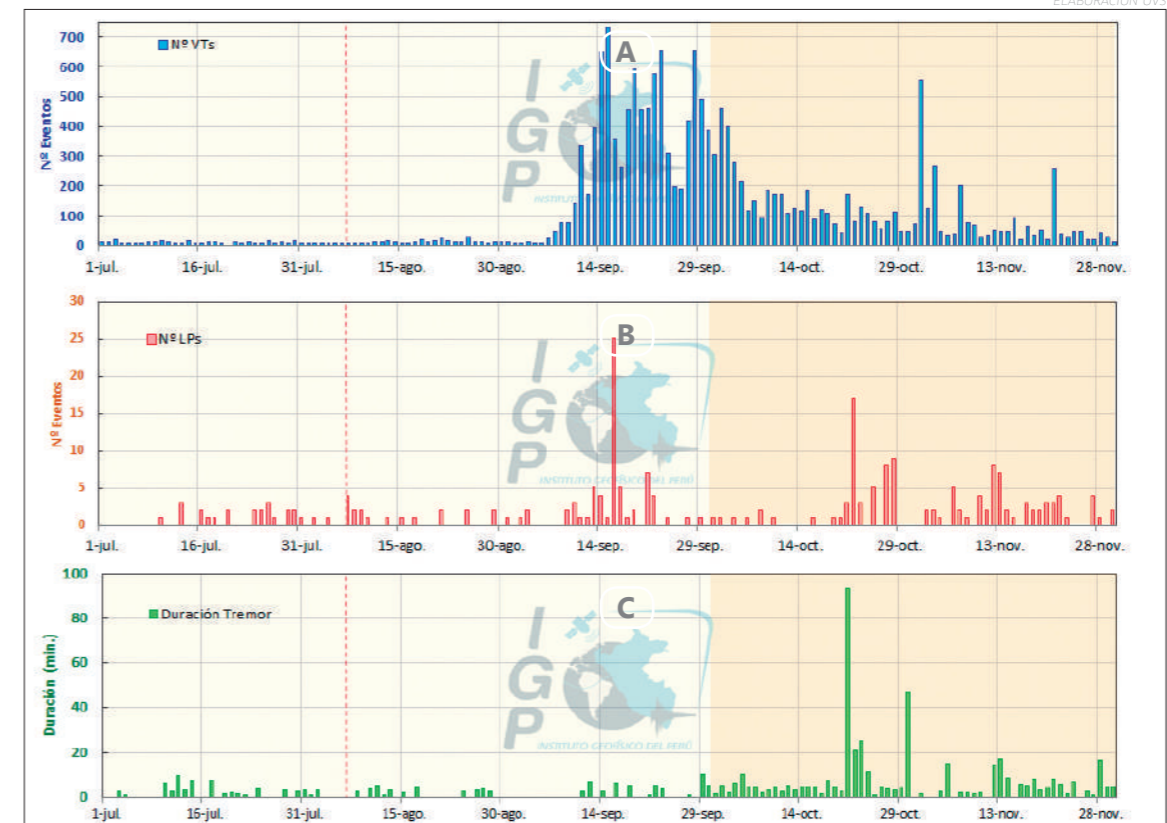


Figura 06.- Número de eventos registrados por la estación telemétrica TCN1 entre el 01 de julio y el 30 de noviembre de 2015. (A) Eventos relacionados a fracturas de rocas. (B) Eventos relacionados al paso de fluidos. (C) Eventos de tipo Tremor. Área sombreada de color naranja corresponde al periodo de análisis comprendido entre el 01 de octubre y el 30 de noviembre.

El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) continuó monitoreando la actividad del volcán Ticsani entre octubre y noviembre (reportes 2015\_06 - 2015\_07), apoyado principalmente en la data sísmica obtenida a través de la estación sísmica telemétrica TCN1, la primera de la Red Local de este volcán instalada en agosto.

La sismicidad de tipo VT, vinculada a fractura de rocas, continuó presentando valores importantes a lo largo de todo octubre hasta el 21 de noviembre. En estos dos meses, se contabilizó 6862 VTs, con un promedio diario de 112 VT/día. La jornada con mayor número de VTs fue el 01 de noviembre, en la cual se identificaron 555 eventos.

Los sismos relacionados a movimiento de fluidos, (eventos LP) se presentaron de forma escasa. En este periodo fueron 117 eventos LPs, con un tasa de ocurrencia diaria de 2 LP/día. El valor máximo de LPs en una jornada fue el 22 de octubre, con 17 eventos.

La actividad de tipo Tremor presentó en estos dos meses valores superiores a los observados en los tres anteriores trimestres. Su duración total fue de 437 minutos, y el día 23 de octubre su jornada más

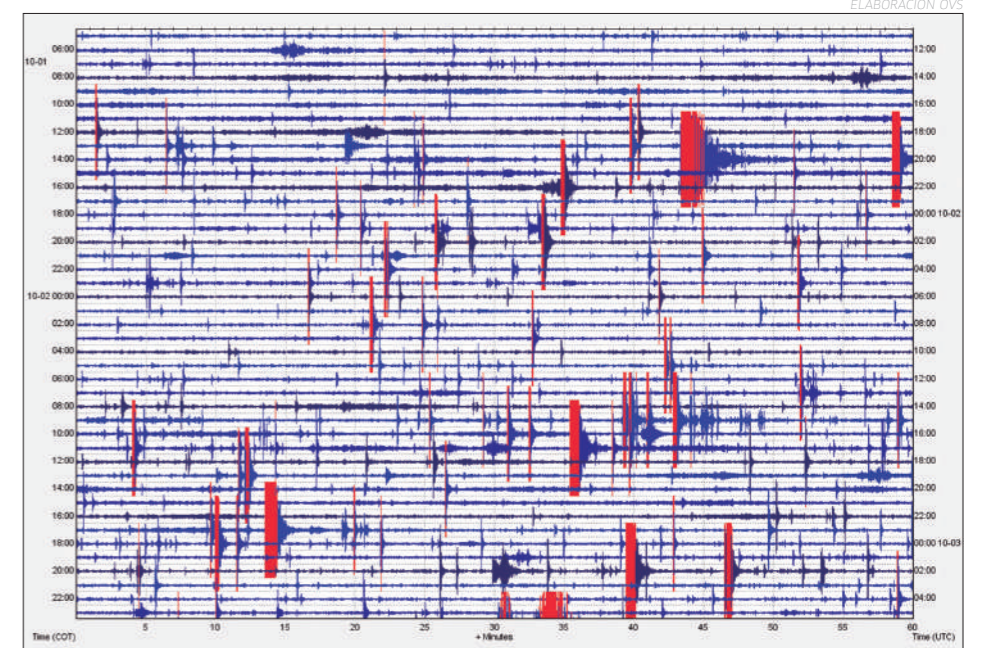


Figura 07.- Sismograma en el que se observan continuos eventos Volcano-Tectónicos ocurridos el 01 y 02 de octubre, registrados por la estación sísmica telemétrica TCN1.

importante con 93 minutos.

Sin lugar a dudas, el aspecto más resaltante en estos últimos meses de 2015, fue la implementación en su totalidad de la Red Sísmica Local del volcán Ticsani.

Profesionales del área de Redes Geofísicas realizaron estos trabajos en la última quincena de noviembre, poniendo en funcionamiento tres estaciones sísmicas adicionales, las cuales se suman a la estación TCN1.

En virtud de ello, los vulcanólogos del OVS pueden identificar los diferentes eventos sismovolcánicos, localizarlos y reconocer posibles variaciones asociadas al posible inicio de un proceso eruptivo.

## Conclusiones

- Entre enero y noviembre de 2015, la actividad sísmica en la región del volcán Ticsani estuvo relacionada principalmente a sismos de fractura de rocas, tal es así que un 97% de la sismicidad total corresponde a este tipo de eventos y un 3% a eventos de baja frecuencia y actividad tipo Tremor.
- Entre el 06 de septiembre y el 21 de noviembre, se registraron numerosos sismos relacionados a fractura de rocas, ocurridos sobre el volcán o muy cercanos al mismo. Estos alcanzaron magnitudes de hasta 4.0 ML, siendo el mayor incremento registrado desde 2014.
- El monitoreo de la actividad del volcán Ticsani viene siendo realizado a partir mayo 2014 mediante estaciones temporales; sin embargo, a partir del 07 de agosto de 2015, se vienen registrando datos sísmicos vía telemetría provenientes de la estación TCN1, ubicada sobre el domo reciente del volcán Ticsani. El funcionamiento de esta estación dio inicio al monitoreo en tiempo real de este volcán.
- Actualmente, la red Ticsani se encuentra completamente implementada, con la instalación de tres estaciones telemétricas adicionales: SPDR, HYTR Y MUYQ, dispuestas estratégicamente en esta región. La puesta en funcionamiento de estas estaciones fue realizada en la última quincena de noviembre por el equipo de Redes Geofísicas del IGP.

Mediciones de temperatura en las cercanías del volcán Ticsani.  
FOTO OVS

## Acrónimos / Abreviaturas

- IGP - Instituto Geofísico del Perú.
- OVS - Observatorio Vulcanológico del Sur.
- MIROVA - Middle InfraRed Observation of Volcanic Activity.
- OMI-NASA - Ozone Monitoring Instrument.
- INSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar.
- STA/LTA - Short Time Average – Long Time Average.
- RSAM - Real -Time Seismic-Amplitude Measurement System.
- EOS Aura GSDM-NASA - Global Sulfur Dioxide Monitoring, satélite del Sistema de Observación terrestre de la NASA.
- UTC - Coordinated Universal Time.
- MJ - Megajoules.
- ML - Magnitud Local.
- Mw - Megavatio

## BIBLIOGRAFÍA

- Reportes de la actividad sismovolcánica del volcán Ubinas (2015\_01 - 2015\_51).
- Reportes de la actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya (2015\_01 - 2015\_44).
- Reportes de la actividad sismovolcánica del volcán Misti (2015\_01 - 2015\_21).
- Reportes de la actividad sismovolcánica del volcán Ticsani (2015\_01 - 2015\_07).

Explosión en el volcán Ubinas  
observada desde el volcán Misti.  
FOTO OVS

# STAFF OVS

De izquierda a derecha.

Fila Superior: Riky Centeno, José Luis Torres, Nancy Limachi, Orlando Macedo, Javier Vilca, José del Carpio.

Fila Inferior: Jorge Concha, Rolando Chijcheapaza, Nino Puna, Alfredo Ramos y John Cruz.



Personal del OVS en el flanco oeste del volcán Ubinas.  
FOTO OVS



© Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú  
Central Telefónica: (511) 317 2300  
<http://www.igp.gob.pe>  
 <http://www.facebook.com/igp.peru>  
 [http://twitter.com/igp\\_peru](http://twitter.com/igp_peru)