



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



REPORTE
TÉCNICO
ESPECIAL



Investigación y Monitoreo de Volcanes Activos en el Sur del Perú

Elsa Galarza Contreras
Ministra del Ambiente

Hernando Tavera
Presidente Ejecutivo (e) IGP

Edmundo Norabuena
Director Científico (e) IGP

Orlando Macedo
Director OVS

Edición de contenidos
Jorge Andrés Concha Calle

Diseño y diagramación
Jorge Andrés Concha Calle

Portada
Monitoreo visual volcán Sabancaya
Explosión en el volcán Ubinas

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

Hecho en el depósito legal en la
Biblioteca Nacional del Perú
N° 2016-17952
Tiraje: 1000 ejemplares

Impreso por:
Gráfica Real SAC
Jirón Independencia 953 - Trujillo,
La Libertad
Teléfono: +5144253324

Primera edición - enero de 2017
Arequipa, enero de 2017

Emisión de fumarolas a través del cráter del volcán Misti.
FOTO OVS

CONTENIDO

4	PRÓLOGO
6	INVESTIGACIÓN
7	Evolución de la actividad sismovolcánica en la zona del volcán Sabancaya (2013-2016)
11	Distribución del valor de "b" bajo el volcán Sabancaya y nevado Hualca Hualca, periodo 2013-2016
15	Identificación de patrones de reconocimiento para clasificación automática de eventos sísmicos del volcán Misti
19	Características de la actividad sísmica en la región del volcán Ticsani durante el periodo 2014-2016
24	<i>A new method for volcanic eruption forecasting applied with success on Ubinas volcano</i>
31	MONITOREO
32	Resumen de la actividad sismovolcánica del volcán Ubinas en 2016
38	Resumen de la actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya en 2016
44	Resumen de la actividad sismovolcánica del volcán Misti en 2016
50	Resumen de la actividad sismovolcánica del volcán Ticsani en 2016
56	CAPACITACIÓN
58	Talleres en zonas vulnerables - Chivay
60	Talleres en zonas vulnerables - Ubinas
62	Talleres en instituciones educativas de Arequipa
64	Talleres en municipios de Arequipa
66	PROYECTO
70	Staff

PRÓLOGO



En 2016, el OVS efectuó trascendentales investigaciones que permitieron pronosticar nuevos episodios explosivos en los volcanes Ubinas y Sabancaya. Asimismo, ha estrechado lazos con la sociedad, explicándoles el fenómeno volcánico y la importancia de tener vigilados a nuestros volcanes. Este es el reporte técnico especial **“Investigación y Monitoreo de Volcanes Activos en el Sur del Perú en 2016”**.



Escribe:



Dr. Carlos Cardona
Sismólogo del Observatorio
Vulcanológico de los Andes del Sur
(OVDAS) del Sernameomin (Chile)

El territorio sudamericano alberga una de las cadenas volcánicas más activas del mundo, que ha impactado enormemente a población e infraestructura producto de su actividad. Uno de los casos mundialmente recordados hace referencia a la erupción del volcán nevado del Ruiz en Colombia en el año de 1985, que cobró la vida de más de 20000 personas. Este hecho puso de manifiesto la necesidad de fortalecer, consolidar y promover la creación de Observatorios Vulcanológicos en los países de esta región del planeta.

La Cadena Volcánica de los Andes es considerada como una de las provincias volcánicas más activas mundialmente y con sistemas volcánicos con un alto potencial de generar erupciones que impacten directamente a las comunidades, infraestructura y la economía de los países, concentrando una serie de sistemas volcánicos de diferente composición, estilo eruptivo, explosividad y nivel de afectación sobre la infraestructura y población asentada en sus zonas de influencia. Un claro ejemplo de ello son las recientes erupciones volcánicas acontecidas durante los últimos dos años en el volcán Nevado del Ruiz en Colombia; los volcanes Tungurahua y Cotopaxi en Ecuador; los volcanes Ubinas y Sabancaya en Perú, y los volcanes Villarrica y Calbuco en Chile.

Por este motivo, durante los últimos años los diversos países latinoamericanos han centrado sus esfuerzos en fortalecer los centros de vigilancia volcánica, con el fin de enfrentar el desafío de establecer sistemas de vigilancia multiparámetros permanentes sobre los

volcanes activos bajo su responsabilidad. De otro lado, pero no menos importante, es el propósito de consolidar grupos científicos con la capacidad de monitorear, interpretar, modelar y pronosticar el tamaño, tipo y probabilidad de ocurrencia de erupciones volcánicas, con el fin de comunicar y proporcionar información oportuna a las comunidades, gobernantes y sistemas de protección civil, base fundamental para una buena gestión del riesgo, salvaguardar vidas y minimizar el nivel de impacto de las erupciones volcánicas.

Perú no ha sido ajeno a este desafío, ya que cuenta con dos centros de monitoreo volcánico ubicados en la ciudad de Arequipa, los denominados Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP (OVS-IGP) y el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), que mancomunadamente se han centrado en el objetivo de vigilar permanentemente los 7 volcanes peruanos más activos (Ubinas, Sabancaya, Misti, Ticsani, Coropuna, Huaynaputina, Yucamane y Tutupaca) y otros 9 potencialmente activos, para ello cuentan con redes de vigilancia multiparamétricas que proporcionan información valiosa sobre el estado y niveles de actividad de los volcanes a su cargo.

Es un honor poder presentar el boletín anual del Observatorio Vulcanológico de Sur del IGP, el cual contiene todas las labores técnico-científicas desarrolladas por su grupo de profesionales; una labor ardua y silenciosa que incluye los reportes periódicos emitidos sobre los volcanes vigilados y las investigaciones científicas desarrolladas.



Medición de temperatura en géiser cercano al volcán Ticsani.
FOTO OVS

INVESTIGACIÓN



- Nino Puma ⁽¹⁾
- José Torres ⁽¹⁾
- Orlando Macedo ⁽¹⁾
- Riky Centeno ⁽¹⁾
- Jose Del Carpio
- John Cruz ⁽¹⁾

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA EN LA ZONA DEL VOLCÁN SABANCAYA (2013-2016)

⁽¹⁾ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

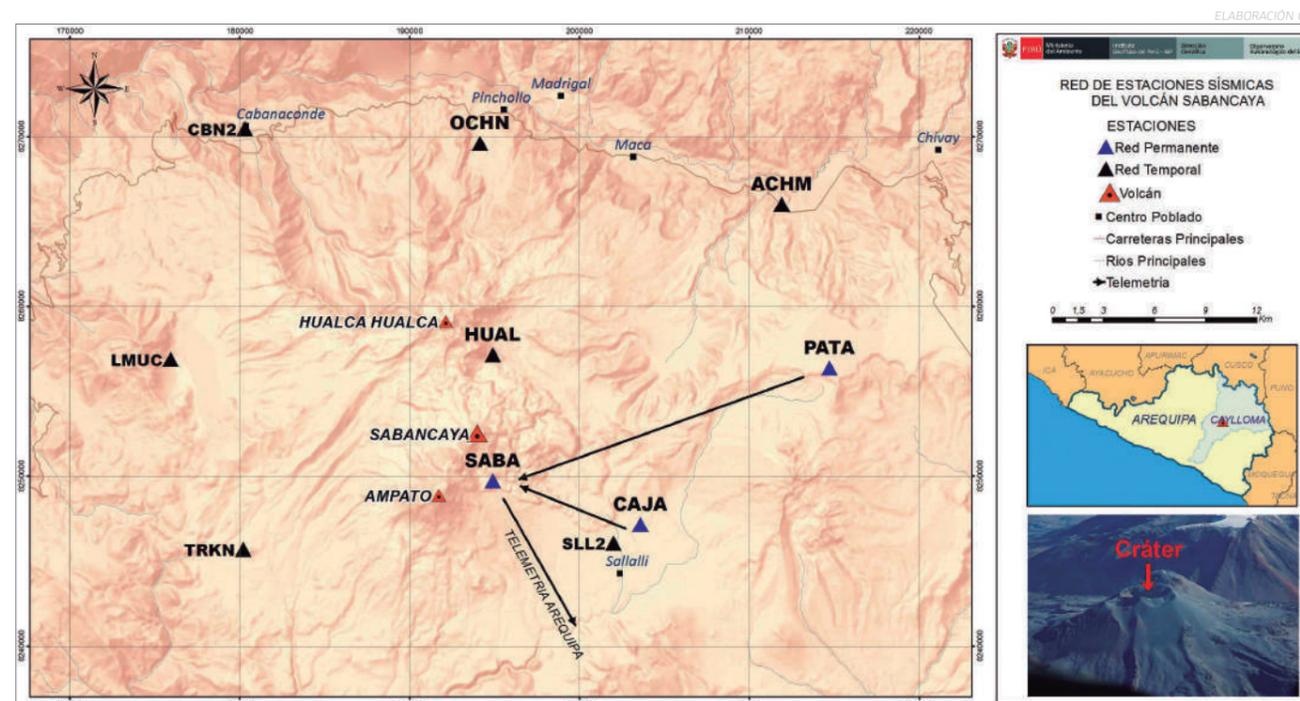


Figura 01.- Ubicación de las estaciones sísmicas para el monitoreo del volcán Sabancaya. Las flechas que unen las estaciones PATA, SABA y CAJA, así como la flecha que se dirige hacia el SE, indican la dirección de las señales que son enviadas hasta el OVS vía telemetría (Red Sísmica del Sabancaya).

RESUMEN

La sismicidad en la zona del volcán Sabancaya ha registrado un incremento notorio y sostenido desde el inicio de la intranquilidad en febrero de 2013. Según White (2011), la intrusión magmática genera transmisión de presión de fluidos, lo cual provoca la generación de eventos Volcano-Tectónicos lejos en el cono volcánico, seguidamente eventos de Largo Periodo hasta la aparición eventual de eventos Híbridos y Tornillos. Durante el estudio se ha analizado la evolución de los eventos sismovolcánicos, habiéndose registrado a la fecha dos explosiones confinadas (agosto de 2014). Este incremento ha sido también registrado en otros parámetros como: densidad de SO₂ y altura de las fumarolas.

Se ha observado que los eventos Volcano-Tectónicos fueron migrando desde 22 km en febrero de 2013 hasta menos de 6 km en 2015 e inicios de 2016. En esos mismos años aparecieron en mayor número los eventos de Largo Periodo, Tremores, Híbridos y Tornillos. Finalmente, en febrero y marzo de 2016, los eventos sismovolcánicos fueron disminuyendo.

La evolución de la actividad viene siguiendo los patrones indicados por White (2011); de este modo, si la intrusión magmática se diera con rapidez y en proporciones importantes, se podría llegar a un nuevo proceso eruptivo.

INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya (15°47' S; 71°72'W; 5967 msnm), ubicado a 80 km en dirección NNO de la ciudad de Arequipa, es un estratovolcán de composición andesítica de edad Holocénica reciente. La última erupción del volcán Sabancaya ocurrió entre 1990-1998, alcanzando un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 3. Luego de 15 años de tranquilidad, a partir del 22 de febrero de 2013, el volcán ha mostrado un incremento notorio de sismicidad y de emisiones fumarólicas. En este estudio se analizaron y clasificaron 103237 eventos sismovolcánicos que corresponden a sismos Volcano-Tectónicos (VT), Largo Periodo (LP), Híbridos (HIB), Tremores (TRE) y Tornillos (TOR). Por otro lado, usando el programa HYPOELLIPSE (Lahr, J. 1999), se calculó los parámetros hipocentrales de los sismos y luego se ploteó 1108 eventos VT, los cuales se distribuyeron al NO, N, NE y E de cráter.

En estos más de 26 años, el Observatorio ha venido fomentando el desarrollo de investigaciones en vulcanología, consolidando un equipo de profesionales geofísicos que realizan constantes indagaciones sobre la actividad de los macizos activos del país. Estos trabajos, innovadores y de gran calidad, son publicados en prestigiosas revistas científicas y expuestos en eventos nacionales e internacionales.

EVOLUCIÓN DE LA SISMICIDAD VOLCÁNICA DEL SABANCAYA 2013-2016

Del total de 103237 eventos registrados entre febrero de 2013 y marzo de 2016, 60859 (59%) son eventos VT, 34761 (33.7%) son eventos LP, 3899 (3.8%) son eventos HIB. Además, se registraron 3830 (3.6%) TRE y TOR; finalmente, se registraron 2 explosiones freáticas confinadas (figura 02). 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 SO₂ (Global Sulfur Dioxide Monitoring-NASA). Asimismo, se ha registrado un incremento progresivo y sostenido de la densidad de SO₂ durante todo el periodo (figura 4D), similar a la tendencia experimentada por los eventos sismovolcánicos registrados.

Una característica notable es que los eventos ocurridos al inicio de la intranquilidad (22-23 febrero de 2013, Mag. 4.6 ML, 5.2 ML, 5.0 ML y 4.5 ML) así como aquellos del 16-17 de julio del mismo año (Mag. 4.9 ML, 4.2 ML y 5.7 ML), han ocurrido en enjambre. White (2011) ha mostrado que la ocurrencia de sismicidad en "enjambre" en ambientes volcánicos es un frecuente precursor de actividad eruptiva. Según el modelo de White (2011), al inicio de la intranquilidad volcánica ocurre sismicidad de fractura (VT) que se sitúa lejos del cráter del volcán, pudiendo llegar hasta los 30 km de distancia, además del incremento de LP, TRE, emisiones fumarólicas y aparición de HIB y TOR.

A continuación se presenta las características de la

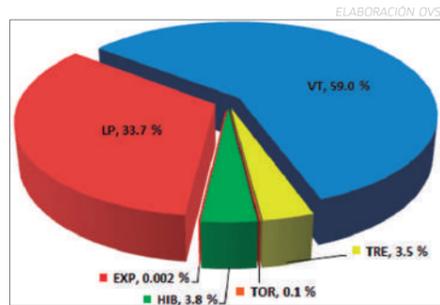


Figura 02.- Eventos registrados entre el periodo febrero de 2013- marzo de 2016. Se observa el predominio de los VTs (59 %), seguido de los LPs (33.7 %).

sismicidad observada:

a) Migración de los eventos Volcano-Tectónico Distales (VTd) a Proximales (VTp): Los VT localizados han ido migrando hacia la zona del cráter a lo largo de todo este periodo; se traza una circunferencia con radio de 6 km desde el cráter del volcán (figura 03A), la cual ayuda al monitoreo de los VT que se están aproximando hacia el volcán, denominados VTp. Los VT que se encuentran fuera de este límite serán llamados VTd. En la figura 03A y B se ha planteado sismos mayores a 2.0 ML.

Sismicidad VT en el 2013 (Círculos rojos). La mayoría de los epicentros de los VTs se localizaron a 19 km al NO del cráter del volcán y cercanos al pueblo de Cabanaconde. En esta zona, la sismicidad se presentó principalmente en julio de 2013 (enjambre del 16-17 julio de 2013) con deformación importante (Jay, J, 2015). Otros hipocentros, aunque en menor número, se localizaron al NE a 10 km

del cráter. Durante este año se registraron y localizaron 88 VTp, con una magnitud máxima de 4.2 ML (11/08/2013). El mayor número de eventos se registró durante los meses de agosto a octubre.

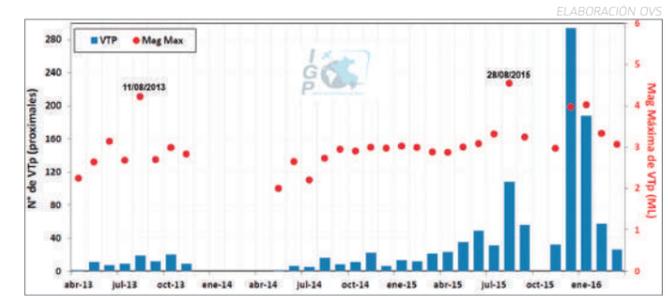


Figura 03B.- Sismicidad mensual VTp vs magnitud, donde se observa el crecimiento progresivo de los VT proximales durante el 2015 y una disminución en el primer trimestre de 2016. Las figuras A y B muestran la migración de los VT hacia la zona del volcán (VTp).

Sismicidad VT en el 2014 (Círculos verdes). Dichos epicentros se agruparon al NNE, a 12 km (sur de Maca-Pinchollo) y a 14 km al E del cráter. Se registraron y localizaron 75 VTp, alcanzando una magnitud máxima de 3.0 ML. Dichos eventos ocurrieron entre los meses de agosto-noviembre. Se observa un incremento días antes de la primera explosión (09 de agosto).

Sismicidad VT en el 2015 e incremento de VTd (Círculos azules). Los epicentros de los VTs se localizaron principalmente en un grupo numeroso, a 12 km al NNE del cráter. Dicho agrupamiento sísmico se extendió por el sur hasta las cercanías del cráter del volcán, principalmente durante el mes de diciembre (mayor número de VTp registrados en lo que va de la intranquilidad). Otro pequeño grupo de epicentros de VTs se ubicaron a 19 km al NO del cráter del volcán. La magnitud máxima calculada fue de 4.5 ML, registrada el 29 de enero de 2016.

Sismicidad VT de enero a marzo de 2016 y disminución de los VTd (círculos amarillos). Durante el primer trimestre de este año, los epicentros se distribuyeron principalmente a 13 km al NE del cráter, poniendo en manifiesto una posible falla orientada en dirección NO – SE. El mayor número de sismos VTp se registró en enero y durante las dos primeras semanas de febrero, con un evento de magnitud máxima de 4.0 ML.

b) Incremento de los eventos LP: Los LP han ido incrementándose sostenidamente entre el 2013-2015, alcanzando promedios de 9.5 LP/día en 2013; 40.9 LP/día en 2014 (pico de 260 LPs el 04 de agosto, cinco días antes de la primera explosión). Después de las 2 explosiones (09 y 26 de agosto de 2014), los LP disminuyeron hasta diciembre de 2014. Para el 2015, se registró un incremento importante y sostenido, alcanzando un promedio de 66 LP/día, máximo promedio registrado desde el inicio de la intranquilidad. El primer trimestre de 2016 muestra una disminución notoria del promedio de LP (16.1 LP/día) (figura 04 A).

c) Aparición de los eventos HIB, TRE y TOR: Los eventos HIB exhibieron un notable incremento en 2014, mostrando un importante enjambre entre el 06 de junio y 14 de julio, con un pico de 145 HIB el 21 de junio. También se observó un nuevo incremento importante entre el 02 y 08 de agosto de 2014, destacando un pico de 255 HIB el 02 de agosto. Del mismo modo, los TRE se incrementaron notablemente 3 semanas antes de las 2 explosiones. Dos picos, de 34 TRE y 52 TRE, fueron registrados los días 22 de julio y 02 de agosto de 2014; posteriormente, estos disminuyeron hasta el 15 de junio de 2015, fecha a partir de la cual se observa un incremento sostenido hasta marzo de 2016.

Los eventos TOR comenzaron a ser registrados a partir del 10 de agosto de 2014, después de la primera explosión, observándose un pico de 9 TOR el 21 de septiembre de 2014. Estos eventos finalmente fueron

Continúa en la pág. 10 →

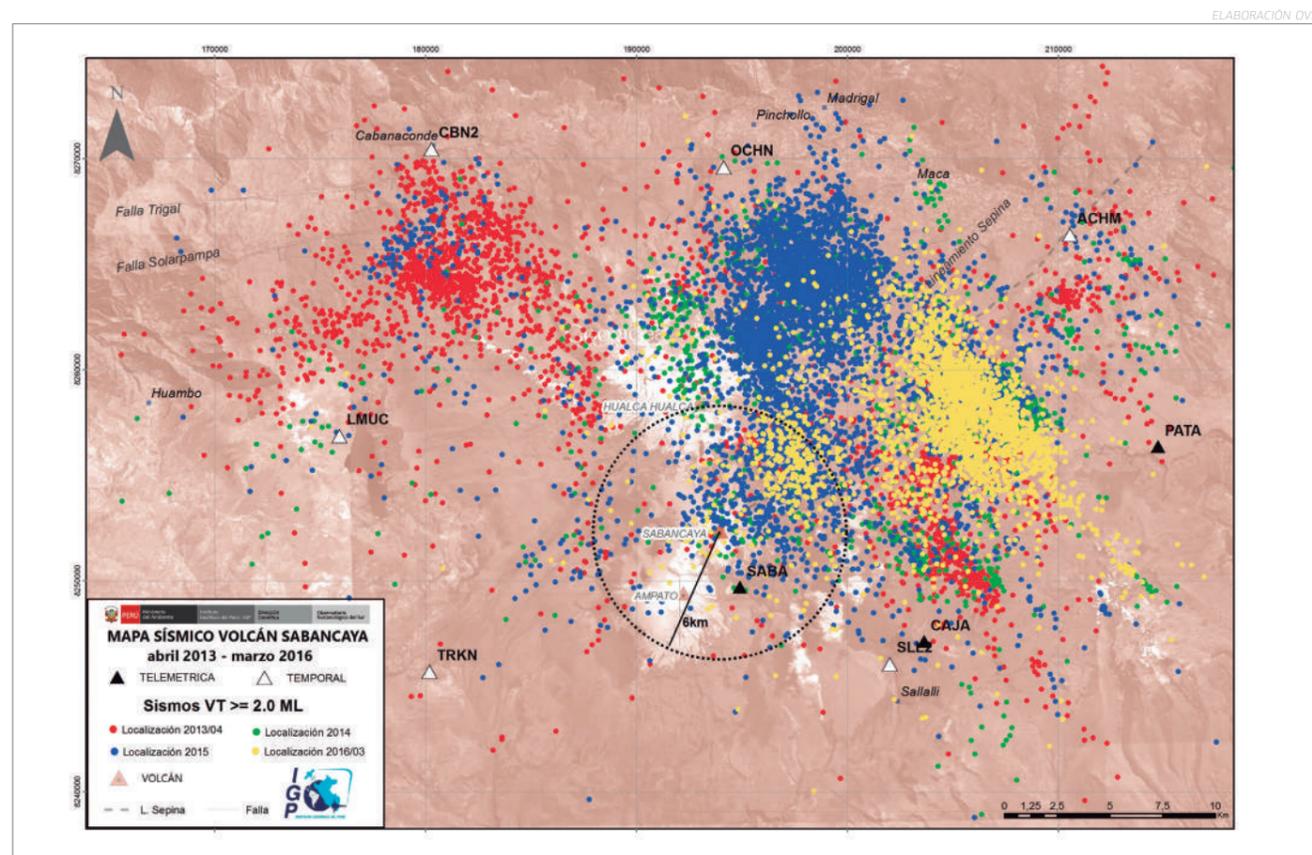


Figura 03A.- Sismos VT localizados y planteados (febrero de 2013-marzo de 2016) con magnitudes mayores a 2.0 ML. Círculos rojos VT-2014, círculos verdes VT-2014, círculos azules VT-2015 y círculos amarillos VT 2016.

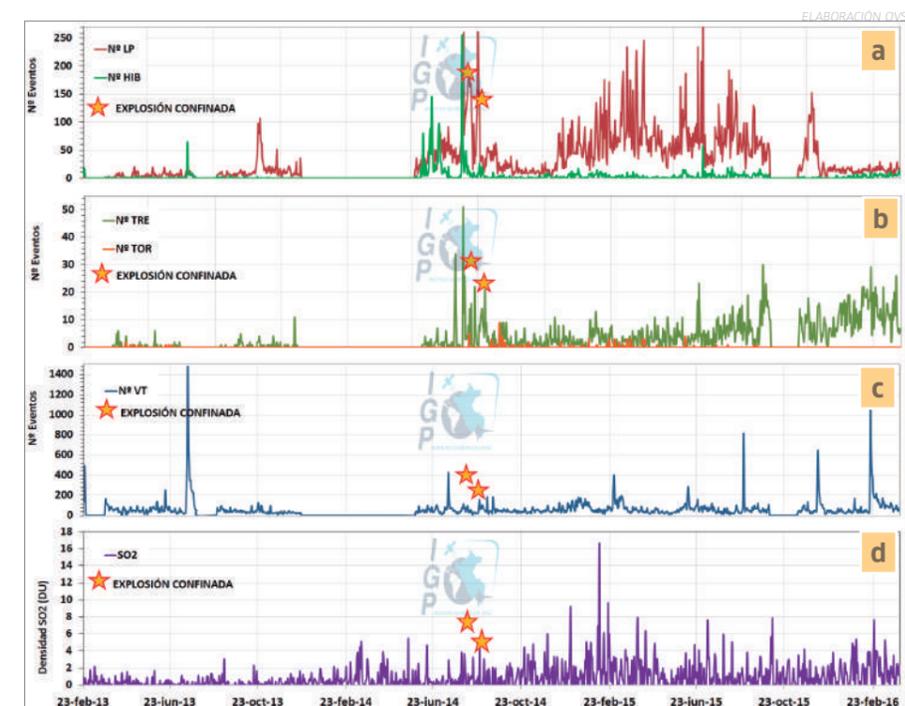


Figura 04.- Estadística de los eventos registrados durante el periodo febrero de 2013-marzo de 2016. La sismicidad (LP, HIB y TRE) se incrementó notoriamente un mes y medio antes de las explosiones. Se observan los VTs registrados (VTp más VTd). Por otro lado, se observa que la densidad de SO₂ durante todo el periodo muestra un incremento progresivo y sostenido acorde con el registro sismovolcánico.

decaendo en número hasta fines de septiembre de 2015, para posteriormente desaparecer (figura 04 A y B).

d) **Registro de las Explosiones freáticas confinadas:** Después del incremento de los eventos LP, TRE y aparición de los TOR, además de la migración de los VT hacia el cráter del volcán, se registraron 2 explosiones freáticas confinadas: la primera ocurrió el 09 de agosto de 2014 a las 09:29 horas UTC, con energía de 9083 Megajoules (MJ) y una duración de 50 segundos; la segunda explosión se registró dos semanas más tarde, el 26 de agosto de 2014, a las 01:39 horas UTC, liberando una energía de 1151 MJ y 82 segundos de duración. Finalmente, el 11 de noviembre del mismo año, se registró una explosión freática de menor energía (431 MJ; 170 s de duración) (figura 05).

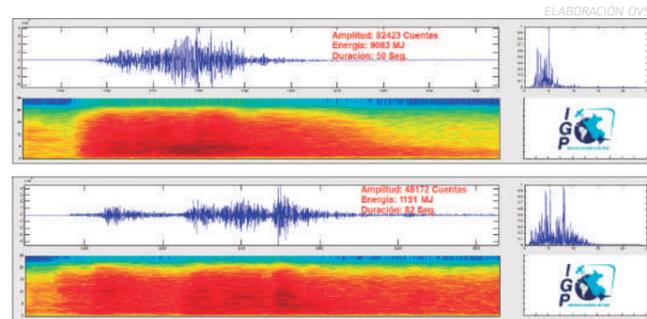


Figura 05.- Explosiones freáticas confinadas registradas por la estación SABA, localizada a 3 km al S del cráter. La primera explosión fue registrada el 09 de agosto de 2014; la segunda, el 26 de agosto de 2014.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Desde el inicio de la intranquilidad, la actividad del Sabancaya muestra un predominio de los eventos VT (59%); asimismo, se distinguió que los eventos registrados al inicio de la intranquilidad en 2013 fueron de tipo "Swarm" o enjambre (22-23 de febrero y el 16-17 de julio) y no de *mainshock* -*aftershock*. Según White y McCausland (2016), los VTs son el primer precursor de erupciones en volcanes en estado inactivo durante décadas o más años, y preceden a erupciones de diferentes proporciones (IEV 0 hasta IEV 6). Además, dichos eventos ocurren en zonas distales y rara vez por debajo del volcán. Los eventos VTs han ido migrando desde 22 km (VTd) del cráter hasta eventos menores a 6 km (VTp) del mismo, como se muestra en la figura 03B.

Por otro lado, en 2014 se registraron dos explosiones, precedidas por el incremento de eventos HIB, TRE, LPs y aumento en la altura y densidad de las emisiones fumarólicas. Para entender la evolución de la actividad sismovolcánica del Sabancaya, se ha tomado en cuenta el modelo de White (2011) y Fournier (1999), los cuales indican que la presión de fluidos generada por intrusiones magmáticas origina eventos sismovolcánicos en etapas y con ubicaciones de la sismicidad dominante durante la evolución hacia un nuevo proceso eruptivo; además, es indispensable tener en cuenta el importante tectonismo que afecta permanentemente a esta parte de los Andes, donde los esfuerzos extensivos NE-SO son predominantes (Sévrier M. and Soler P., 1991). Por otro lado, durante todo este periodo (febrero de 2013-marzo de 2016), se determinó a partir de la ley de Gutenberg-Richter (1944) el valor de "b" de 1.6, valor típico en ambientes volcánicos (McNutt, 2005). Si bien es cierto, la actividad de los

VTp disminuyó entre febrero-marzo de 2016, la actividad aún persiste en las inmediaciones del volcán.

A la fecha todavía se registra una cantidad considerable de TRE y eventos HIB asociados a ascenso de fluidos, pero no de gran energía. Todos estos parámetros presentes, pero sin un aumento acelerado de una intrusión magmática importante, indicarían un probable estancamiento y posible disminución de la actividad volcánica.

CONCLUSIONES

- Se identificaron 103237 eventos: 59 % VT, 33.7 % LP, 3.8 % HIB y 3.6 % eventos TRE y TOR.
- Los VTs registrados y localizados se distribuyeron en la zona NO, N, NE y E del volcán. Los epicentros de los eventos fueron migrando desde 22 km del cráter en 2013, pasando de 14 km-12 km en 2014 hasta una distancia menor a 6 km en 2015 y 2016. El mayor número de VTs que migraron hacia el cráter se registró en 2015 e inicios de 2016, y posteriormente disminuyeron; no obstante, su número continúa siendo alto con relación al registrado en 2013 y 2014.
- Se registraron 2 explosiones freáticas confinadas: la primera registrada el día 09 de agosto de 2014 a las 09:29 horas UTC, con una energía de 9083 MJ; la segunda explosión se registró el 26 de agosto a las 01:39 horas UTC, con una energía de 1151 MJ.
- La sismicidad viene siguiendo los patrones indicados por White (2011); no obstante, sin un aumento acelerado de una intrusión magmática importante, la sismicidad del volcán Sabancaya probablemente se estancaría y disminuiría notablemente. A la fecha se continúan registrando eventos LPs e HIB; además, el registro de los TRE continúa siendo alto.

BIBLIOGRAFÍA

- 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. 105-1208.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185-188.
- 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.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. U.S. Geological Survey open-file report 99-23, on-line edition.
- McNutt, S. R. (2005), Volcanic seismology, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33(1), 461-491, doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122459.
- Sévrier M. and Soler P. (1991).- Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the Present. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 265, 259-278.
- White, R. & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020, P. 139-155.
- White, R. 2011. Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. Volcano observatory best practices workshop: eruptions forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.

- José Torres ⁽¹⁾
- Nino Puma ⁽¹⁾
- Orlando Macedo ⁽¹⁾
- Riky Centeno ⁽¹⁾
- Jose Del Carpio ⁽¹⁾
- Yovana Álvarez ⁽¹⁾
- Jesús Cáceres ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

DISTRIBUCIÓN DEL VALOR DE "b" BAJO EL VOLCÁN SABANCAYA Y NEVADO HUALCA HUALCA, PERIODO 2013-2016

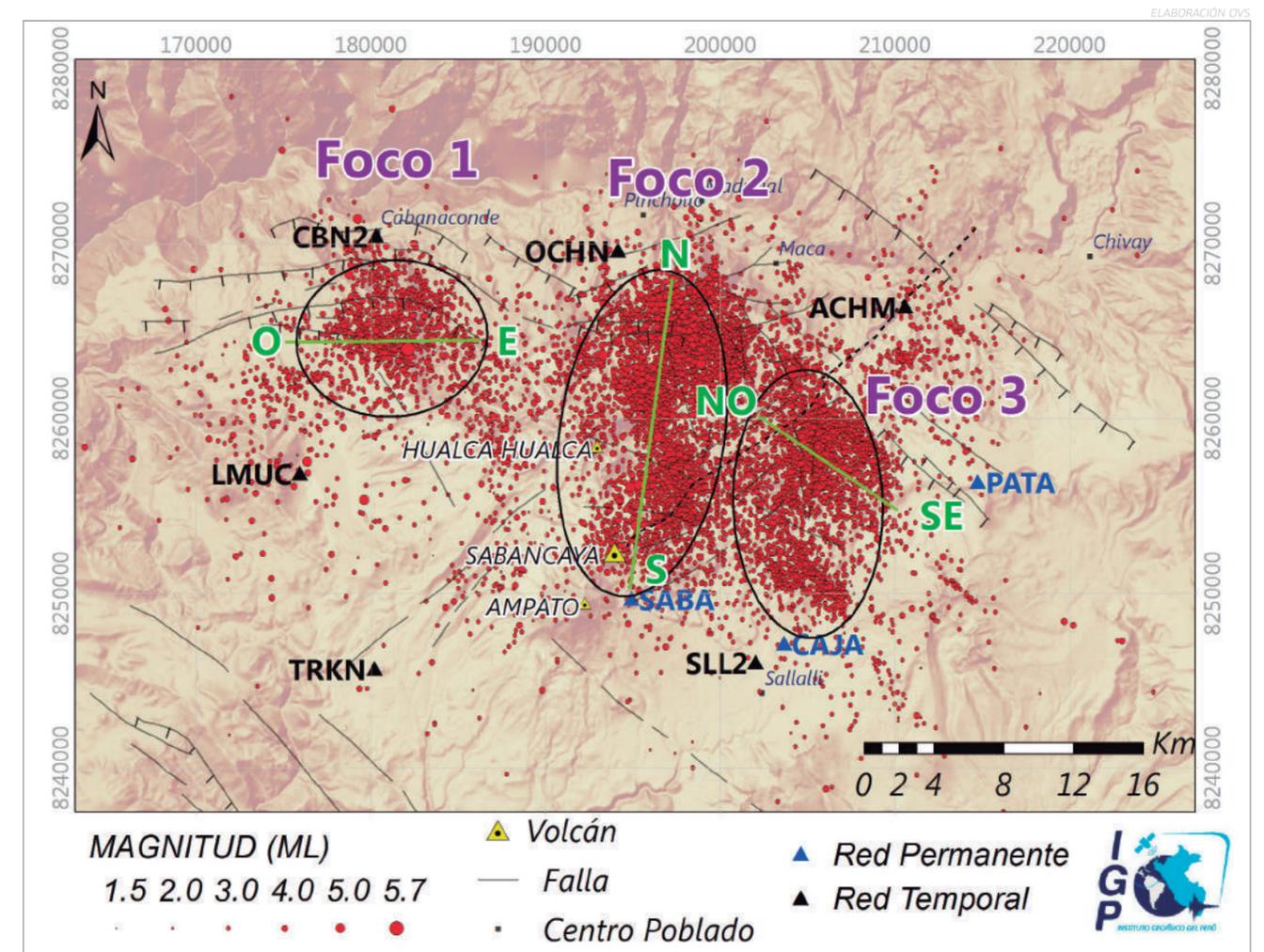


Figura 01.- Mapa de actividad sísmica del complejo volcánico Sabancaya-Hualca Hualca (puntos rojos). Las elipses negras delimitan los 3 focos sísmicos y las líneas verdes indican los perfiles realizados en dirección O-E, S-N y NO-SE.

RESUMEN

Se realizó mapa y perfiles del "valor de b" para la sismicidad Volcano-Tectónica registrada en la zona del volcán Sabancaya y nevado Hualca Hualca entre 2013 y 2016. Se identificaron tres anomalías ($b \geq 1.4$) de valor de "b": la primera (A), con $b=1.4-1.9$, localizada al noroeste del cráter del volcán Sabancaya, probablemente asociada a una zona altamente fracturada ($z=13$ km) y alterada por pulsos de cuerpos magmáticos provenientes de reservas más profundas ($z=14-20$ km); la segunda (B), con $b=1.4-2.3$, ubicada al norte del volcán Sabancaya, ocurre en dos

niveles de profundidad: el primer nivel estaría asociado a una reserva magmática somera ($z=5-10$ km) y el segundo asociado a un reservorio magmático más profundo ($z=14-20$ km). Finalmente, la tercera zona (C) de anomalía, con $b = 1.4-2.4$, es superficial ($z=8-15$ km), y se localiza al sureste del volcán y estaría asociada al sistema hidrotermal.

Continúa en la pág. 12 →

INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya (193998E; 8252525S; 5967 msnm) es un estratovolcán ubicado a 80 km al NNO de Arequipa (Perú). Su última erupción –previa al proceso eruptivo iniciado en noviembre de 2016– ocurrió en 1990-1998, y alcanzó un IEV (Índice de Explosividad Volcánica) de 3 (Siebert et al, 2010). A partir del 22/02/2013, el volcán mostró importantes signos de intranquilidad, traducido en una intensa actividad sísmica y fumarólica. Entre 2013-2016, se registraron 99342 eventos sismovolcánicos, de los cuales el 59 % del total fueron clasificados como Volcano-Tectónicos (VT), asociados a ruptura de roca sólida. Con base en dichos VTs registrados en el periodo 02/2013-02/2016, en este estudio se intenta ubicar probables cuerpos magmáticos, basándose en la determinación del parámetro “b” o distribución Frecuencia-Magnitud (Ley de Gutenberg-Richter, 1994). Diversos trabajos han mostrado que “b” resulta tener altos valores y es asociado a gradientes térmicos elevados, así como a ambientes con aumento de presión de poro y alto grado de heterogeneidad, frecuentes en ambientes volcánicos (Wyss, 1973 y Wiemer y McNutt 1997). Para este estudio, el valor “b” ha sido calculado por el método de Máxima Verosimilitud (Aki, 1965 y Utsu, 1965). Por otra parte, Frohlich y Davis (1993) y Kagan, (2003) asocian los valores de “b” con las características físicas de cada zona sísmica, en donde mayores valores de “b” implican predominio de sismos de menor magnitud y son asociados a una zona de baja resistencia a deformarse. Por el contrario, menores valores de “b” sugieren el predominio de sismos de mayor magnitud y son asociados a una zona de mayor resistencia a deformarse. En general, el valor de “b” varía entre 0.4 y 1.8, siendo 1 el valor promedio a nivel global.

DATOS Y PROCESAMIENTO

Los datos sismovolcánicos utilizados provienen del registro de estaciones sísmicas instaladas por el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS (6 temporales y 3 telemétricas, ver Figura 01). Con los tiempos de las fases P y S, el algoritmo Hypoellipse (Lahr, 1999) y haciendo uso del modelo de velocidades de Dorbath (1991), se ha calculado los parámetros de localización de los sismos VT. Asimismo, se determinaron las magnitudes locales (ML) mediante la relación de Lee (1975). Por otro lado, la expresión (1) ha sido usada para calcular la distribución Frecuencia – Magnitud, donde N es el número acumulado de eventos con magnitudes mayores a M; a y b son constantes y M es la magnitud del evento.

Expresiones matemáticas:

$$\begin{aligned} \log_{10}(N) &= a - bM & (1) \\ b &= \frac{\log_{10} e}{|M - M_c|} & (2) \end{aligned}$$

Para calcular el “valor de b”, se utiliza la expresión (2), es decir, el método de máxima verosimilitud. En dicha expresión, [M]=valor medio de todas las magnitudes y M_c =Magnitud de Completitud que ha sido definida por el método máxima curvatura, medido en la primera derivada de la distribución Frecuencia-Magnitud (Wyss et al., 2000).

Con los valores obtenidos, se elaboraron mapas y perfiles del “valor de b” haciendo uso del programa ZMAP (Wiemer y Wyss, 1997). Para los mapas se escogió una densa retícula de puntos (nodos), cuyo espaciado fue de 100 m x 100 m, y se consideró todo evento dentro de un radio de 2 km alrededor de cada nodo. Para el caso de perfiles, el espaciado fue de 100 m (horizontal) x 100 m (profundidad).

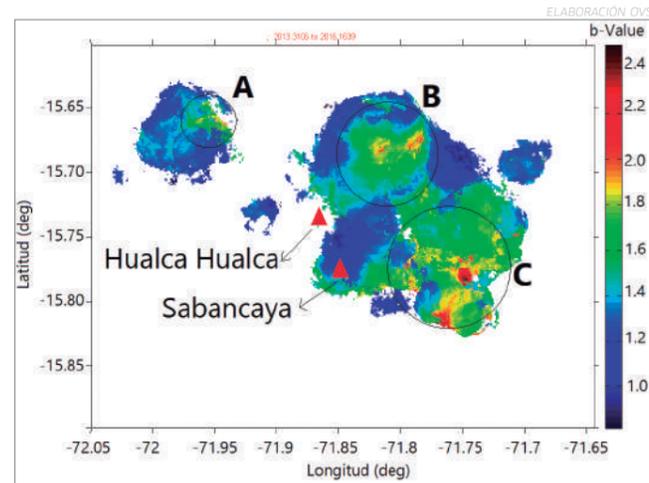


Figura 02.- Mapa del valor de “b” para z=0 km. Se muestra tres zonas anómalas A, B y C. Los triángulos rojos representan los volcanes.

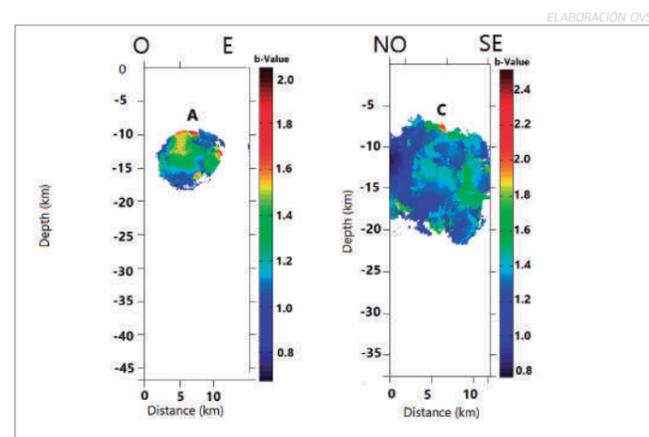


Figura 03.- Perfiles de valor de “b” en dirección O-E (izquierdo) y NO-SE (derecha). En profundidad, el comportamiento de las anomalías A y C se muestra variado.

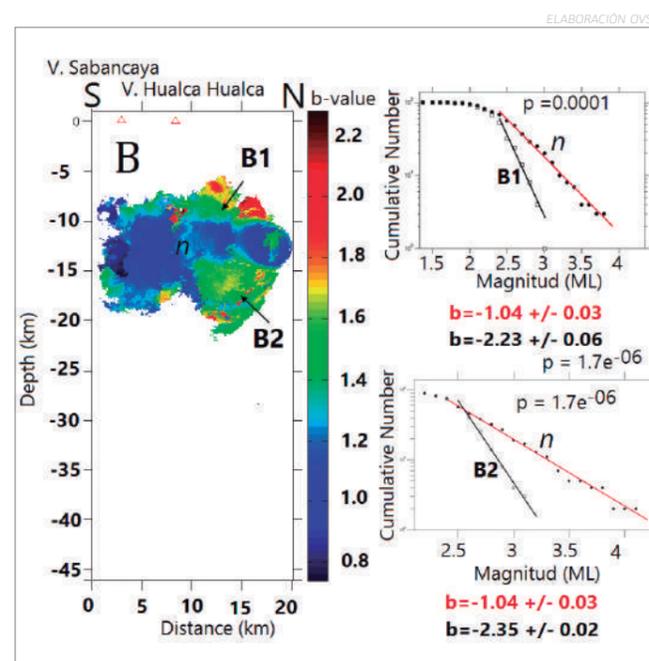


Figura 04.- Perfil del valor de “b” en dirección S-N. En profundidad se divide en dos sectores anómalos (B1 y B2). El lado derecho muestra la relación frecuencia-magnitud de cada zona anómala con “n” de valor de “b” normal (<1.2).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se ha dispuesto de un total de 11190 VTs bien localizados, con magnitudes entre 1.5 ML y 5.7 ML, cuyos focos se encuentran en dirección NO, N y E respecto al volcán Sabancaya (figura 01).

En la figura 02, se observa el mapa de “valor de b” para z=0 km, y se distingue 3 zonas anómalas (b≥1.4) denominadas A, B y C. La primera (zona A) está situada a 17 km en dirección noroeste del cráter del volcán Sabancaya, sobre el foco sísmico 1 (b=1.4-1.9). La zona B está ubicada a 8 km en dirección norte del cráter, sobre el foco 2 (b=1.4-2.3), y la zona C está emplazada al sureste del cráter, a 12 km, sobre el foco 3 (b=1.4-2.4). La figura 03 y figura 04 muestran, por su parte, tres perfiles en dirección O-E, NO-SE y S-N sobre los 3 focos sísmicos principales (foco 1, foco 2 y foco 3), entre 12 km y 20 km de longitud y 10 km de espesor.

La zona anómala A del perfil O-E (figura 03), ubicada al Noroeste a 13 km de profundidad, correspondería a una zona altamente fracturada (materiales heterogéneos y/o sistema hidrotermal) y alterada posiblemente con presencia de fluidos magmáticos que ascienden de reservas más profundas (14 km-20 km). Es posible que tales condiciones hayan generado el enjambre sísmico del 16-17 de julio de 2013 (3 sismos de 4.9 ML, 4.2 ML y 5.7 ML) y reactivado las fallas (Sebrier y Soler, 1991) existentes en la zona, con deformaciones medidas en superficie por Jay et al (2015) entre mayo y julio de 2013. Por otro lado, la zona anómala C del perfil NO-SE (ver figura 03, derecha), no aparece bien delimitada aproximadamente entre 8 km y 15 km de profundidad. En este sector, se registró la ocurrencia de un enjambre sísmico (20 de febrero de 2016) con eventos principales de 4.2 ML y 5.4 ML, y en superficie se han reconocido fallas activas; por su posición, posiblemente esté relacionada al sistema hidrotermal en superficie.

En lo que respecta al perfil S-N (figura 04), se observa que bajo la zona B existen dos sectores anómalos (B1 y B2). La zona superficial (B1), ubicada entre 5 km y 10 km de profundidad, correspondería a una zona de reserva magmática somera o una zona alterada y fracturada, compatible con una posible presencia de fluidos magmáticos en estructuras de sill y diques interconectados, tal como

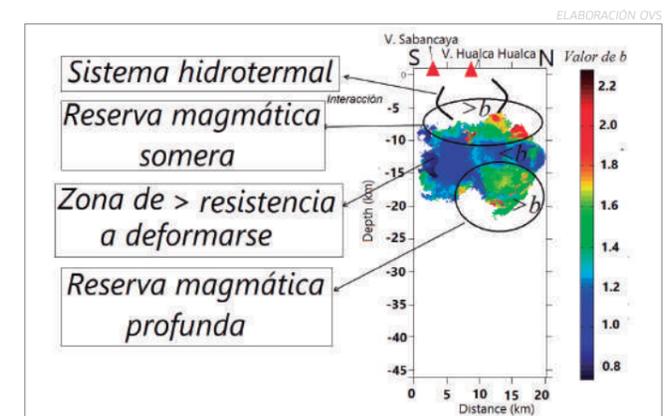


Figura 05.- El perfil S-N muestra delimitado en elipses negras la posible ubicación de las reservas magmáticas somera y profunda. En estos sectores se observó mayores valores de valores de “b” y ocurrencia de sismos de menor magnitud. Los triángulos rojos representan los volcanes.

sugiere Chouet et al (2005) en este tipo de ambientes.

Por otro lado, en las partes más superficiales de la zona B1, es posible que exista la interacción del sistema hidrotermal y la reserva magmática somera (figura 05), lo cual puede explicar la generación de las dos explosiones freáticas registradas el 09 y 25 de agosto de 2014 (Reportes IGP-OVS N° 08-2014 y N° 10-2014). En esa época, se observó también fumarolas de hasta 3 km de altura (Reporte N°07-2014) e incremento en los valores de temperatura de 33 °C en el 2013 (Jay et al, 2015).

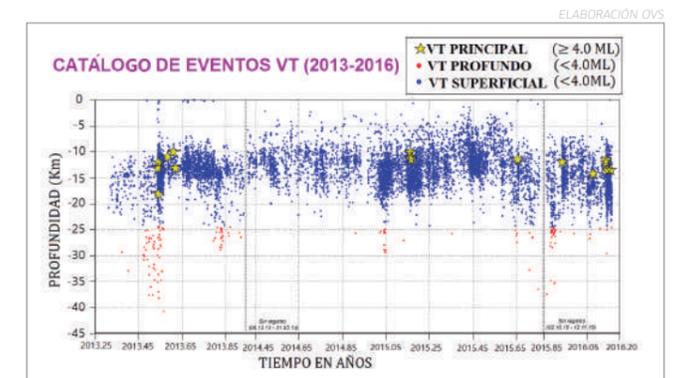


Figura 06.- Gráfico de profundidad de eventos VT versus el tiempo (años). Las estrellas amarillas representan a sismos principales (magnitudes mayores a 4.0 ML) precedidos por sismos profundos de menor magnitud (puntos rojos).

Asimismo, la segunda zona o zona B2 del perfil S-N estaría asociada a un posible reservorio magmático situado entre 14 km y 20 km de profundidad (figura 04 y figura 05). Gran parte de la actividad sísmica de tipo fractura (VT) que se registra por encima de este sector y que alcanza magnitudes importantes (≥4 ML) sería causada por la dinámica de ascenso de fluidos hacia la superficie. En la figura 06 se observa eventos principales de magnitud ≥ 4.0 ML, entre 10 km-15 km de profundidad (estrellas amarillas), precedidos por eventos precursores profundos de menor magnitud (puntos rojos). Asimismo, en la figura 05 se observa que en estos mismos niveles de profundidad (10 km-15 km) los valores de “b” son normales, lo cual indica que esta zona es mucho más resistente a la deformación. Por encima y por debajo de esta zona, los sismos que han ocurrido son de menor magnitud (ver figura 06), lo cual indica una tendencia a no acumular tensiones, es decir, menor resistencia a deformarse. Nosotros pensamos que los sismos profundos (puntos rojos en la figura 06) ocurrirían por perturbación de la reserva magmática profunda (B2) en etapas de ascenso de material magmático, y serían seguidos de sismicidad más superficial asociada al ascenso de fluidos en dirección de la superficie.

Finalmente, las reservas magmáticas obtenidas en este trabajo se sitúan por debajo del área ocupada por el nevado Hualca-Hualca, y podrían estar asociadas a la zona de deformación reportada durante la anterior erupción 1990-1998 que fue estudiada por Pritchard et al (2002).

CONCLUSIONES

- Con 11190 eventos VT de magnitudes entre 1.5 ML- 5.7 ML, se han identificado 3 focos sísmicos situados

Continúa en la pág. 14 →

en dirección NO, N y NE del volcán Sabancaya. Asimismo, se identificaron 3 sectores anómalos de valor de "b" ($b \geq 1.4$), localizados a 17, 8 y 12 km en dirección NO, N y SE, respectivamente, donde se han obtenido 3 perfiles según las direcciones O-E, S-N y NO-SE, e identificado 3 anomalías: A, B, C.

- La zona de anomalía A ($b=1.4-1.9$), localizada al noroeste del volcán Sabancaya y a 13 km de profundidad, probablemente esté altamente fracturada y alterada en presencia de fluidos magmáticos provenientes de reservas más profundas ($z=14-20$ km). La zona de anomalía B ($b=1.4 - 2.3$) situada al norte del volcán, se divide en dos subniveles de profundidad: el primero (B1) asociado a una posible reserva magmática somera ($z=5-10$ km) y el segundo (B2) asociado a un reservorio magmático más profundo ($z=14-20$ km). La zona de anomalía C ($b=1.4-2.4$), situada al Noreste en una zona de alta sismicidad en enjambre, no aparece bien delimitada; posiblemente está asociada a una zona hidrotermal en superficie.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K (1965). Maximum Likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. In: Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 43 Tokyo (Japan): University of Tokyo, p. 237-239. ISSN: 0040-8972.
- Chouet, B., Dawson, P., Arciniega-Ceballos, A. (2005). Source mechanism of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from

moment-tensor inversion of very-long-period signals. J. Geophys. Res. 110, B07301.

- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. Jour. of South American Earth Sciences., 4, 13-24.
- Frohlich C. y Davis S. (1993). Teleseismic b-Values: Or, Much Ado about 1.0 Jour Geophys. Res. 98, 631-644.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185-188.
- Jay J, Delgado F., Torres J., Pritchard M., Macedo O., and Aguilar V., (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.
- Kagan, Y. Y. (2003). Accuracy of modern global earthquake catalogs. Phys. Earth Planet. Inter. 135, 173-209.
- Lahr, J. (1999). - Hypoellipse user guide, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.
- Lee, W. H. K., & Lahr, J. C. (1975). HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. US Department of the Interior, Geological Survey, National Center for Earthquake Research.
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformations of volcanic centres in the central Andes. Nature, 418(6894), 167-71.
- Seberier M. and Soler P. (1991). Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the Present. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 265, 259-278.



Estación sísmica telemétrica SAB, instalada a 3 km al sureste del volcán Sabancaya. Esta es una de las 5 estaciones que constituyen la red local que monitorea la actividad de este macizo.

- Riky Centeno ⁽¹⁾
- Orlando Macedo ⁽¹⁾
- Nino Puma ⁽¹⁾
- José Del Carpio ⁽¹⁾
- José Torres ⁽¹⁾
- John Cruz ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE RECONOCIMIENTO PARA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE EVENTOS SÍSMICOS DEL VOLCÁN MISTI (PERÚ)

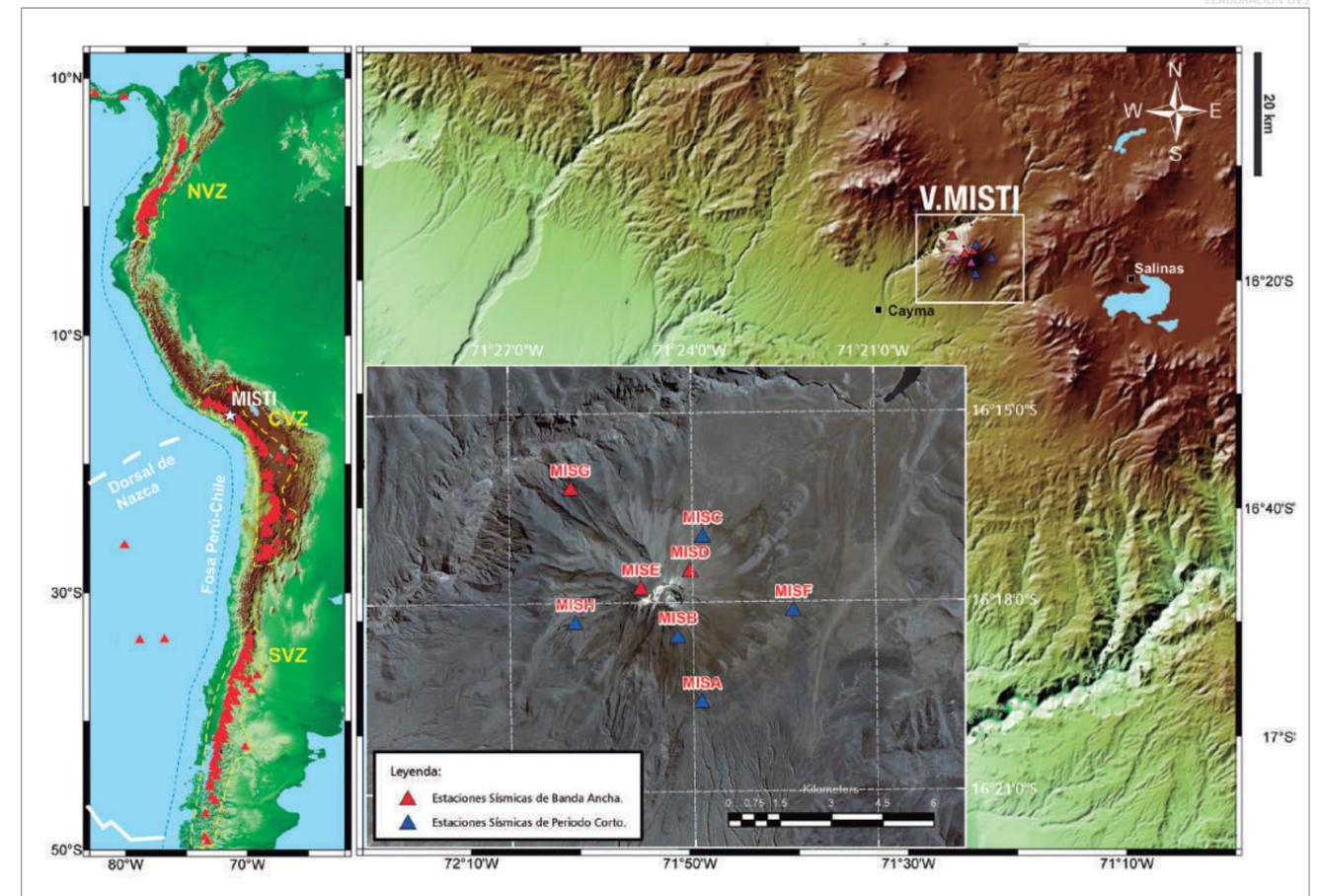


Figura 01.- Ubicación de las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio, así como la red sísmica de monitoreo volcánico del Misti.

INTRODUCCIÓN

La principal tarea del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) es analizar minuciosamente la actividad sísmica asociada a los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y Ticsani, debido a que hoy en día, el método sísmico ha demostrado ser una herramienta eficaz en la comprensión de procesos volcánicos internos y el pronóstico de erupciones (Aki y Richards, 1980; McNutt, 1996; Chouet, 2003). Tradicionalmente, este análisis requiere primero la detección y, posteriormente, la clasificación manual de los eventos sismovolcánicos. Sin embargo, el correcto etiquetado de los eventos muchas veces se ve afectado por diferentes factores, tales como la baja relación señal-ruido de los eventos o por el incremento notable de la sismicidad (centenares de sismos) justo antes de una erupción, lo cual

requiere de decisiones rápidas (Ibáñez et al., 2009).

Recientemente, los modernos observatorios tratan de complementar el trabajo manual con modernos sistemas de reconocimiento automático de eventos sismovolcánicos, lo cual ayuda en gran medida a reducir el volumen de trabajo en el análisis de los datos y permite concentrarse en actividades más complejas como la elaboración de reportes técnicos e implementación de modelos que expliquen el comportamiento volcánico, etc. Según el catálogo de sismos del volcán Misti, existen tres tipos de eventos principales: Volcano-Tectónicos (VT), Largo Periodo (LP) y Tremor (TRE).

Continúa en la pág. 16 →

El objetivo de este trabajo es seleccionar parámetros de identificación de señales y diseñar un algoritmo de clasificación asistido por computador, con base en máquinas de soporte vectorial (SVM) que automaticen la clasificación de los eventos del volcán Misti. A su vez, que la metodología empleada sea de utilidad para los sismos de los volcanes Ubinas, Sabancaya y Ticsani.

SELECCIÓN DE DATOS

Para este estudio se emplearon datos de tres estaciones sísmicas de la red sísmica de monitoreo permanente del volcán Misti (figura 01). Estas son: la MISC, de

periodo corto y que utiliza un sensor Lennartz LE-3D Lite de 1 segundo; la MISC y MISE, ambas de banda ancha y cada una tiene un sensor Guralp GMG-3SPEC de 30 segundos. Todas estas estaciones son de tres componentes (Z, N, E), pero solo fue necesario utilizar la componente vertical (Z), debido a que proporciona una mejor relación señal-ruido en la mayoría de eventos. La base de datos contiene una selección de 100 eventos volcánicos por clase: VT, LP y TRE, así como otros 100 eventos de origen no volcánicos, denominados OTR. Todos estos eventos fueron registrados en al menos dos de las tres estaciones mencionadas, durante los meses de enero a diciembre del año 2015 (figura 02).

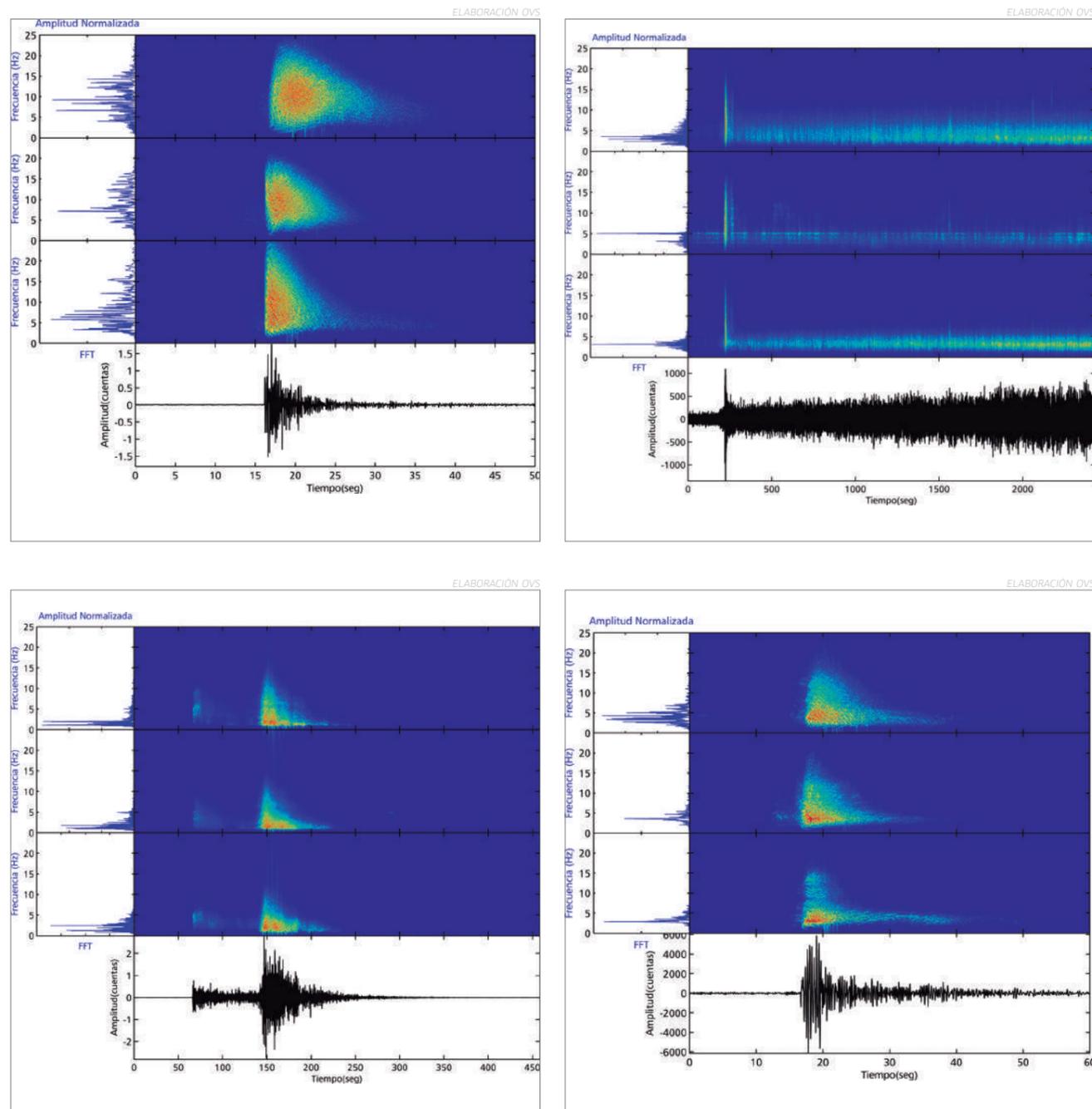


Figura 02.- Representación espectral y en el tiempo de los cuatro tipos de eventos (VT, LP, TRE y OTR) registrados en la componente vertical (Z) de las estaciones MISC, MISE y MISC.

PROCESAMIENTO

El método adoptado en este estudio se dividió en dos etapas: preprocesamiento y clasificación. En la etapa de preprocesamiento se aplica a la señal sísmica un filtro pasa-banda *butterworth* de cuarto orden entre las frecuencias 0.5 Hz-24 Hz, debido a que la energía sísmica de los eventos volcánicos está contenida en ese rango de frecuencias. Luego, "uno a uno", se selecciona de cada evento registrado en la base de datos el máximo de características o patrones típicos de cada tipo de evento, siendo seleccionadas en este estudio 6 características.

En la Tabla 1 se describe cada uno de los elementos seleccionados. Dos de estos parámetros fueron extraídos de la representación en el dominio del tiempo y los cuatro restantes se obtuvieron a partir del espectro de potencia de Fourier, construido con ventanas de longitud variable que cubrían la duración completa del registro. Seguidamente, se forma una matriz o vector de "n" características por "m" estaciones (n=6; m=3), y al final se obtiene un vector de 18 características por evento. Este vector es clave en el éxito del modelo de clasificación seleccionado.

Dominio	Característica	Descripción
Tiempo	Dt	Duración del evento (inicio-fin).
Frecuencia	F5	Frecuencia pico principal del evento total.
Frecuencia	Es	Frecuencia pico máxima al 97% de la energía espectral máxima.
Tiempo	Ev	Índice asimétrico de la envolvente (amplitud normalizada al cuadrado) de la señal en los primeros 35 segundos.
Frecuencia	Kt	Medida de la kurtosis espectral.
Frecuencia	As	Medida del índice de asimetría del espectro de Fourier.

Tabla 1.- Descripción general de las características utilizadas para clasificar los eventos volcánicos.

En la etapa de clasificación se diseñó un modelo con base en máquinas de soporte vectorial (SVM), que es uno de los métodos más modernos utilizados en modelos de clasificación y una herramienta muy útil en sistemas de aprendizaje automático.

En general, un modelo de clasificación automática requiere básicamente tres cosas: una tabla o matriz de aprendizaje, en la cual están las variables predictoras (características) y la variable a predecir (tipo de evento); una tabla de decisión, en la cual el usuario va a validar la construcción del modelo (esta tabla debe contener las variables predictoras y la variable a predecir en el mismo orden de la anterior) y, por último, un modelo de clasificación generado a partir de la tabla de aprendizaje que, en este caso, sería una máquina de soporte vectorial. Este modelo estadístico se construye a partir de la tabla de decisión y en esta misma se evalúa el modelo de clasificación diseñado, es decir, se compara el resultado del modelo con el valor verdadero de la variable a predecir (tipo de evento). Si ambos coinciden, el modelo es aceptable, y se le aplica a nuevos individuos o eventos volcánicos futuros.

La idea principal del algoritmo de las máquinas de soporte vectorial (SVM) es encontrar un hiperplano que

separe dos clases o grupos con el mayor margen posible. En principio, este algoritmo solo funciona para dos clases, pero si se aplica iterativamente puede aplicarse a más de dos clases. El problema en la clasificación consiste en observar en qué lado del hiperplano queda el vector que representa a un nuevo individuo. Entonces, el problema matemático será encontrar estas separaciones mediante una simple función lineal $g(x)=wtx+b$, donde: $g(x)$ representa a la clase, x a las variables predictoras, w y b son las variables a calcular que determinan el plano de separación. Mientras esta función lineal discriminante tenga un mayor margen de separación, se reducirá en gran medida la posibilidad de mezcla entre las clases.

Para la aplicación de las máquinas de soporte vectorial, así como el procesamiento de las señales (lectura, filtrado, reconocimiento de patrones, etc.), se utilizó el software Matlab.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Muchos trabajos de clasificación automática de señales sismovolcánicas se han enfocado en la aplicación de redes neuronales artificiales (ANN), modelos ocultos de Markov (HMM) y, en algunos, redes bayesianas, pero todos ellos basados únicamente en señales provenientes de una sola estación de registro (Chu et al., 2010). Muchas veces, diferenciar un evento VT y un LP resulta difícil, debido a que las señales en su trayecto (fuente-estación) sufren alteraciones en su forma y firma espectral (efectos de sitio), por lo que un VT fácilmente puede ser confundido por un LP. En este estudio se propone utilizar información proveniente de varias estaciones para mejorar la estructura de nuestro modelo de clasificación utilizando máquinas de soporte vectorial (SVM).

Para determinar la precisión del algoritmo de clasificación aplicado a los eventos sismovolcánicos (VT, LP, TRE y OTR) del Misti, según la metodología propuesta en este estudio, se analiza primero la matriz de confusión (Tabla 2). Los resultados muestran que los eventos VT están correctamente clasificados en un 99% de los casos; los eventos LP, en un 97%; los tremores, en un 91% y la categoría OTR en un 90%. En promedio, las máquinas de soporte vectorial clasifican correctamente las señales en un 94%. El análisis de los resultados muestra que hay una buena concordancia entre el resultado del modelo aplicado a la tabla de decisión construida con el valor manual (real). La clasificación de los eventos VT y LP fue la mejor, debido a dos de sus principales características: su duración y energía espectral. Otro buen resultado fue la clasificación de los eventos TRE y OTR con un 91 % y 90% de efectividad.

Clase		Pronóstico				Total
		VT	LP	TRE	OTR	
Real	VT	97	0	0	1	98
	LP	0	91	3	2	96
	TRE	0	3	83	6	92
	OTR	1	0	9	84	93
%	VT	99	0	0	1	100
	LP	0	97	2	1	100
	TRE	0	2	91	7	100
	OTR	1	0	9	90	100

Tabla 2.- Matriz de confusión como resultado de la clasificación de las máquinas vectoriales de soporte.

CONCLUSIÓN

- En este trabajo de investigación se ha desarrollado con éxito un algoritmo asistido por computador, con el cual, utilizando máquinas de soporte vectorial (SVM), se ha logrado identificar seis patrones de reconocimiento automático para los tres tipos de eventos sismovolcánicos del Misti: Volcano Tectónicos (VT), Largo Periodo (LP) y Tremor (TRE), además de un cuarto tipo que no tiene ninguna relación con la actividad volcánica del Misti, denominado OTR. En lo posterior, este algoritmo será implementado y complementará el monitoreo permanente que viene realizando el OVS para los volcanes Ubinas, Sabancaya y Ticsani.

AGRADECIMIENTO

- Sirva este trabajo de investigación para agradecer al director del OVS, Dr. Orlando Macedo Sánchez, por haberme permitido trabajar estos últimos 5 años en el monitoreo sísmico de volcanes Ubinas, Misti y Sabancaya, lo cual me permitió desarrollar mi talento en el arte del procesamiento de señales sísmo-volcánicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Benson P., Vinciguerra S., Meredith P. and Young P. 2010. Spatio-temporal evolution of volcano seismicity: A laboratory study, Earth and Planetary Sciences Letters, p. 297, 315-323.
- Centeno, R. 2012. Análisis de la actividad sísmica del

- volcán Misti entre octubre 2005-diciembre 2008 y su dinámica interna actual. Tesis de Grado, Universidad nacional de San Agustín, p. 73-99.
- Chu, A., Orozco M., Londoño M. 2010. Combinación fija de clasificadores para la discriminación de señales sísmicas volcánicas, Boletín de Ciencias de la Tierra número 27, Noviembre de 2009 - Junio de 2010, Medellín, ISSN-01203630, pp.37-48.
- Cortés, G., García, L., Alvarez, I., Benítez, C., De la Torre, A. and Ibáñez, J.M. 2014. Parallel System Architecture (PSA): An efficient approach for automatic recognition of volcano-seismic events. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 271, 1 February 2014, p 1-10.
- Curilem, M., Vergara, J., Martín, C. S., Fuentealba, G., Cardona, C., Huenupan, F. and Yoma, N. B. 2014. Pattern recognition applied to seismic signals of the Llaima volcano (Chile): An analysis of the events' features. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 282, 134-147.10.1016/j.jvolgeores.2014.06.004
- Orozco M., Acosta C., Londoño M., 2012, The Automated Identification of Volcanic Earthquakes: Concepts, Applications and Challenges, Earthquake Research and Analysis - Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology, Dr Sebastiano D'Amico (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/27508, pp.377-379
- Scarpetta, S., Giudicepietro, F., Ezin, E. C., Petrosino, S., Del Pezzo, E., Martini, M. and Marinaro, M., 2005. Automatic classification of seismic signals at Mt. Vesuvius volcano, Italy, using neural networks. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 95, no. 1, pp.185-196.



Estación sísmica telemétrica MisA, instalada a 3 km al sureste del volcán Misti. Esta es una de las 6 estaciones que conforma la red local de monitoreo que vigila a este macizo desde octubre de 2005.

CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) DURANTE EL PERIODO 2014-2016

- John Cruz ⁽¹⁾
- Orlando Macedo ⁽¹⁾
- Nino Puma ⁽¹⁾
- José Del Carpio ⁽¹⁾
- Riky Centeno ⁽¹⁾
- José Torres ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)

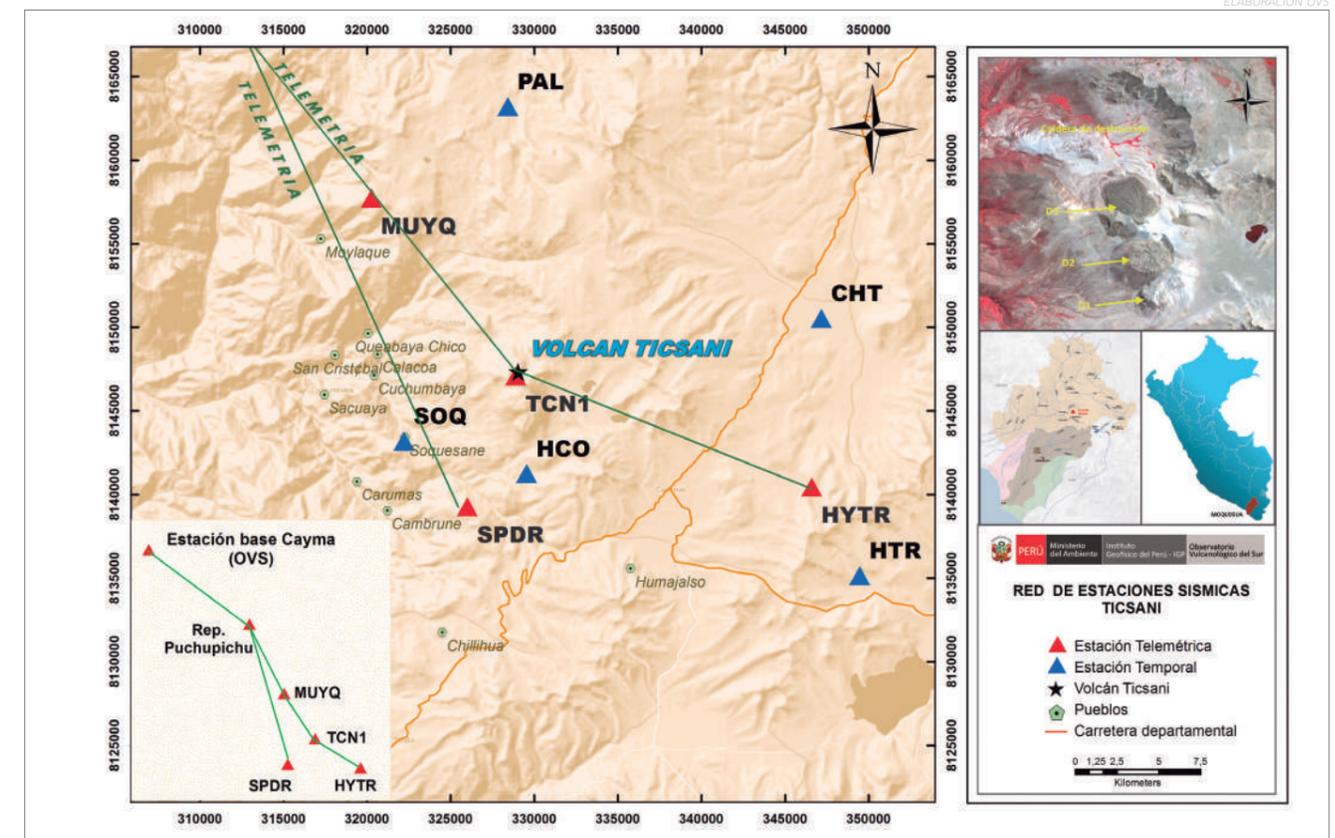


Figura 01.- Distribución de estaciones sísmicas en la región de estudio. Se observan los domos D1, D2 y D3 (recuadro de la esquina superior derecha). El recuadro de la esquina inferior izquierda muestra el enlace de telemetría hasta el OVS.

RESUMEN

Se ha instalado y operado una red de 10 estaciones sísmicas entre mayo de 2014 y abril de 2016 en la zona del volcán Ticsani, con el fin de investigar el tipo y características de los sismos, así como la naturaleza de sus fuentes. Se identificaron 38 mil sismos Volcano-Tectónicos (VT) y 53 eventos tipo Híbrido. Los registros de sismos VT muestran la ocurrencia de enjambres de sismos superficiales ($2 \text{ km} < h < 13 \text{ km}$) con magnitudes entre 1.5 ML y 4.0 ML. La sismicidad se encuentra distribuida en dos agrupaciones principales: la primera bajo el cráter, y la segunda a 6 km al este del volcán. Asimismo, se ha estimado un valor para el parámetro "b" de 1.76 ± 0.05 , propio de ambientes influenciados por actividad volcánica.

Con base en el momento sísmico acumulativo, se ha estimado que en este periodo habría ocurrido una intrusión

de magma con un volumen estimado en $970,000 \text{ m}^3$. Los resultados sugieren ingresos de magma a la posible cámara magmática situada en profundidad, acumulando esfuerzos que luego son transmitidos al sistema hidrotermal generando enjambres de sismos VT que reactivan fallas aledañas, tal como la falla F2 identificada en estudios previos.

INTRODUCCIÓN

El volcán Ticsani (-16.751°S , -70.604°O 5133 msnm) es un estratovolcán perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes, dentro del grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée et al., 2009). Está constituido por un complejo de domos (D1, D2, D3) de lavas andesíticas y dacíticas y una caldera de destrucción (figura 01). La más

Continúa en la pág. 20 →

reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 2 y 3 de tipo freatomagmática (Mariño y Thouret, 2003). Actualmente, existen fumarolas dispersas próximas al cráter y una actividad hidrotermal importante. La zona del volcán Ticsani recientemente ha presentado una actividad sísmica importante asociada a la tectónica local (Aguilar et al., 2001; Tavera, 2006). El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) monitorea este volcán desde mayo de 2014 con 10 estaciones portátiles de periodo corto y desde agosto de 2015 con estaciones telemétricas de banda ancha. Los datos analizados en el presente trabajo corresponden al periodo de mayo de 2014 a abril de 2016.

ACTIVIDAD SÍSMICA

En región del volcán Ticsani se ha observado principalmente sismos Volcano-Tectónicos (VT), caracterizados por tener fases P y S impulsivas y por su amplia banda espectral (figura 02c). Durante este periodo de estudio, se registraron 38 mil sismos VT que ocurrieron con una tasa diaria media de 55 VT/día. A partir de septiembre de 2015, se observa un incremento de sismicidad que alcanzó un pico máximo

de 1251 eventos el día el 30 de marzo de 2016 (figura 02a). También se registraron sismos de baja frecuencia o LP, así como eventos tipo Tremor, aunque con tasas muy pequeñas.

Por otro lado, se ha registrado sismos de tipo Híbrido (figura 02d) desde diciembre de 2015. Estos eventos son raros pero fácilmente identificables, ya que contienen altas y muy bajas frecuencias (~8.8 Hz y ~0.35 Hz, respectivamente). La figura 02a muestra la aparición e incremento de sismos Híbridos desde diciembre de 2015, siendo el evento del 10 de febrero de 2016 el más notorio y energético (23 Megajoules), ocurrido durante el periodo de este estudio.

Una importante característica de la actividad sísmica en esta región es la ocurrencia de sismos en enjambre (figura 02e). Este tipo de sismicidad, que es propia de ambientes volcánicos (McNutt, 1996), ya había sido observada en esta misma zona en 2005 (Holtkamp et al, 2011; Cruz, 2016). Durante el periodo de estudio, dichos enjambres se intensificaron en septiembre de 2015, alcanzando su mayor energía el 30 de marzo de 2016 cuando se presentó un enjambre con sismos que alcanzaron magnitudes de 4 ML (figura 02b).

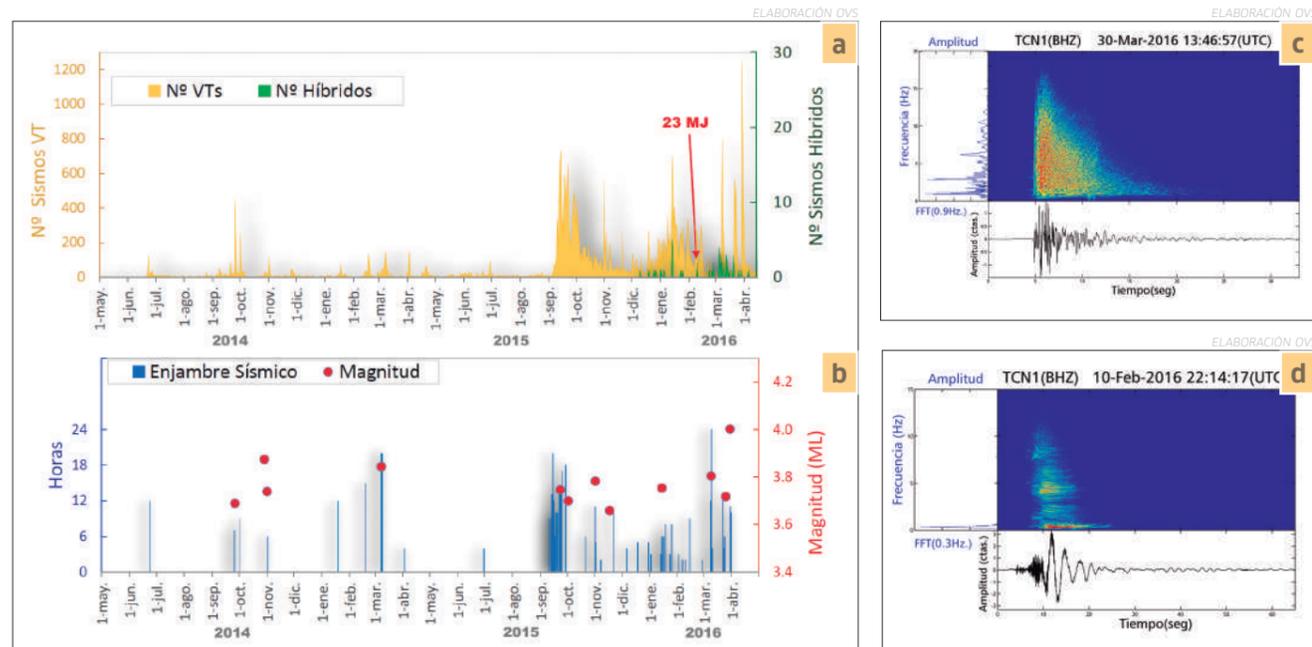
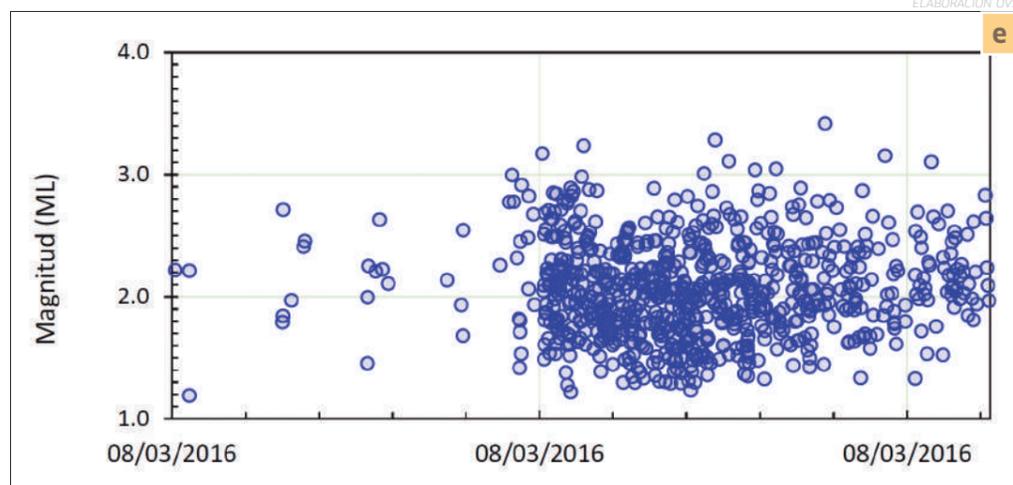


Figura 02.- Estadística de sismicidad y eventos característicos. A: Sismos VT e Híbridos. B: Distribución de enjambres sísmicos en el tiempo y magnitud de sismos principales. C: Ejemplo de sismo VT. D: Sismo tipo Híbrido. E: Ejemplo de enjambre sísmico típico ocurrido el 8 de marzo de 2016 en la región del volcán Ticsani



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

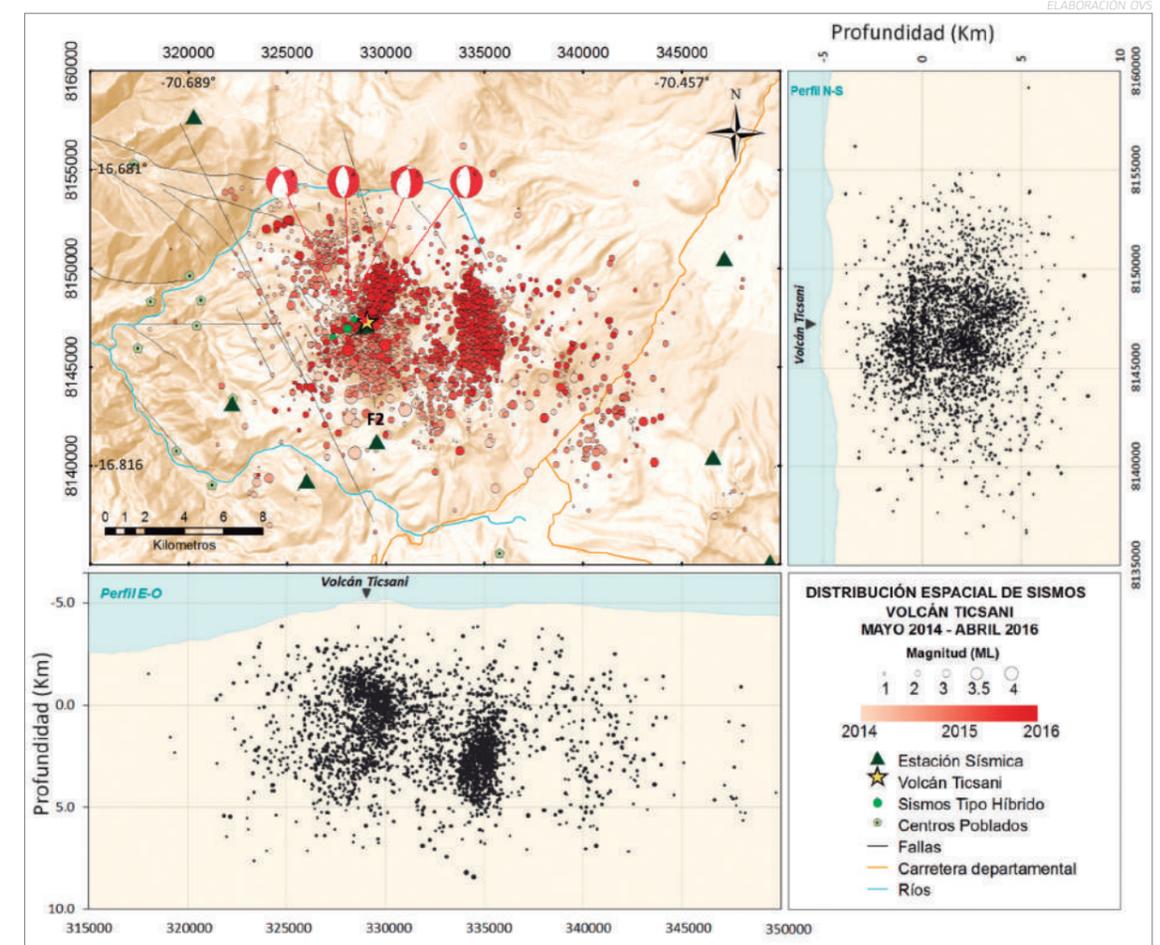


Figura 03.- Distribución de la sismicidad entre mayo de 2014 y abril de 2016. En los perfiles W-E y N-S se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán.

Los parámetros hipocentrales de 3158 eventos VT con claros registros de sus fases P y S, fueron estimados usando el programa Hypoellipse (Lahr, 1999), lográndose resultados de calidad A y B en la precisión del epicentro y de la profundidad focal (A significa un error ≤ 1.34 km; B un error ≤ 2.67 km). El modelo de velocidades utilizado fue el de Villegas (2009) modificado para sismos superficiales y una relación de velocidad $V_p/V_s=1.77$ (Aguilar et al., 2001).

Los sismos presentan magnitudes entre 1.5 ML y 4 ML, y su distribución muestra dos agrupamientos sísmicos: el primero se encuentra muy próximo al domo D3, extendiéndose hacia el NE y hacia los domos D1 y D2. Cruz (2016) ha mostrado que estos sismos siguen un alineamiento cuyo buzamiento es próximo a los 70° al Oeste, y que coincide con la falla F2 descrita por Lavallé et al., (2009). Asimismo, Cruz (2016) ha mostrado también que el cálculo de sus mecanismos focales corresponden a desplazamientos de tipo normal con componente transcurrente, guardando también correspondencia con la falla F2.

El segundo agrupamiento sísmico se encuentra un poco más profundo que el anterior y está situado a 6 km al este del volcán (figura 03). Por otra parte, también, ha sido posible localizar tres sismos tipo Híbrido, los cuales se ubican bajo el domo D3 (figura 03). El evento Híbrido más energético fue de 3.2 ML y ocurrió a una profundidad de 7.8 km.

CÁLCULO DEL VALOR DE "b"

El cálculo del valor de "b" determinado para el periodo comprendido entre mayo de 2014 y abril de 2016, con 3158 eventos registrados en el volcán Ticsani, fue de 1.76 ± 0.05 . Este valor "b" fue calculado con el programa Zmap (Wiemer & Wyss, 2002) mediante el método de Máxima Probabilidad, con una Magnitud de Completitud de 2.4 (figura 04). En la relación Gutenberg-Richter un alto valor de "b" implica alta heterogeneidad, cambios temporales y espaciales en esfuerzos de cizalla y un alto gradiente termal. (Farrel et al., 2009). En general, se han observado valores mayores a 1.0 en áreas volcánicas (Mc Nutt, 2005).

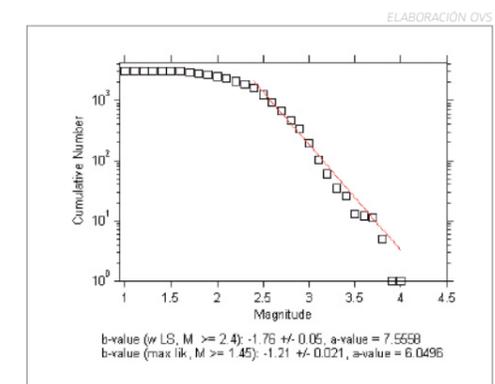


Figura 04.- Relación G-R para los sismos de fractura del volcán Ticsani, $b=1.76$.

VOLUMEN DE MAGMA INTRUIDO

A partir de los resultados del presente estudio, se ha estimado el momento sísmico cumulativo de los sismos VT en la zona del volcán Ticsani, habiéndose obtenido un valor de $1.077E+16Nm$, lo cual equivale a una magnitud acumulada de 4.6 ML (figura 05).

Recientes investigaciones muestran que los enjambres de sismos VT preceden a las intrusiones magmáticas en volcanes que no presentaron erupciones por décadas y que este tipo de actividad precursora ocurre días hasta años antes de una erupción (White & McCausland, 2016). Asimismo, dichos autores muestran que el volumen de magma intruido puede ser estimado de manera sencilla a partir del momento sísmico cumulativo de los sismos VT, mediante la expresión: $V=0.71 \text{ Log log}_{10} \sum \text{Momento}-5.32$.

Usando la mencionada expresión y el momento sísmico cumulativo de la zona del volcán Ticsani, se obtiene un volumen de magma intruido de $970,000 \text{ m}^3$ (figura 05) entre mayo de 2014 y abril de 2016 bajo el área que ocupa el volcán Ticsani. Si bien no ha habido ascenso de magma y/o fluidos magmáticos hasta la superficie, esta importante actividad puede ser indicio de una próxima reactivación, por lo cual resta permanecer vigilantes.

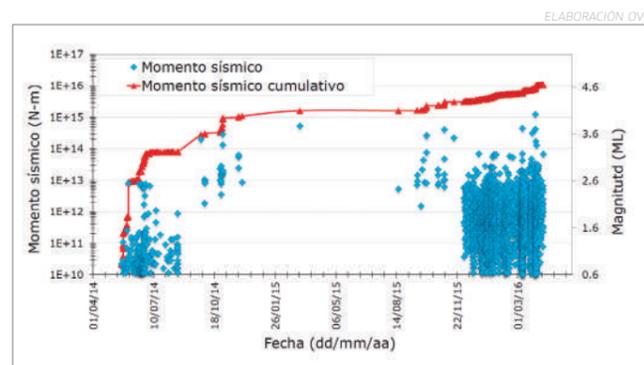


Figura 05.- Momento sísmico cumulativo versus el tiempo.

MODELO PROPUESTO SEGÚN LA SISMICIDAD REGISTRADA

Tomando como base el modelo de Fournier (1999), se elabora un esquema para explicar la ocurrencia de sismos Híbridos y los enjambres sísmicos. Los sismos tipo Híbrido registrados en el volcán Ticsani, en especial sus bajas frecuencias, constituyen indicios del ascenso de magma e ingreso a una probable cámara magmática. El magma en ascenso genera incremento de temperatura y de presión en el entorno. White and McCausland (2016) estiman que los fluidos del sistema hidrotermal pueden transmitir la presión hasta decenas de kilómetros, favoreciendo la aparición de sismicidad VT distal. Para el Ticsani, se asume que los enjambres de sismos VT y su desaparición ocurrirían debido a la presurización del sistema y su posterior relajación. Cada pulso de intrusión de magma transmite pulsos de presión a través de acuíferos que intersecan fallas tectónicas preestablecidas.

Es probable que mientras el magma intruye gradualmente, se sobrepresurizan los acuíferos y, por tanto,

aumenta el lubricante en la fallas alledañas locales. Una falla afectada es la F2 descrita por Lavallée et al. (2009) y otra posible falla F no reconocida o descrita hasta la actualidad también sería afectada por estas presiones (figura 06).

Por tanto, se propone que los enjambres VT en la región del volcán Ticsani serían principalmente consecuencia de intrusiones magmáticas. La evidencia de tales intrusiones está constituida por el registro de sismos de tipo Híbrido. Asimismo, el incremento del valor de "b" está relacionado a la gran cantidad de sismos de fractura en enjambre debido a ingresos de fluidos magmáticos.

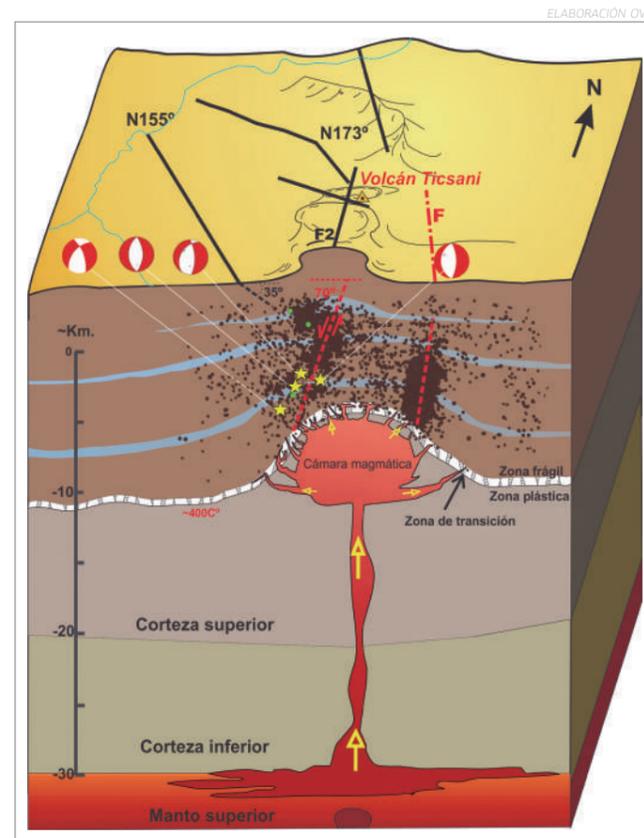


Figura 06.- Esquema a partir de Fournier (1999) el cual explica la generación de los sismos de fractura debido a intrusiones de magma y a la presión de fluidos volcánicos. Los círculos en verde representan sismos Híbridos.

CONCLUSIONES

- Los sismos VT representan la sismicidad dominante en la región del volcán Ticsani y se presentan principalmente en secuencias de enjambres sísmicos. La sismicidad presenta un incremento a partir de septiembre de 2015, registrándose sismos de hasta 4 ML. Se registran también señales de tipo Híbrido ubicados bajo el cráter del volcán.
- La sismicidad de tipo VT se encuentra distribuida en dos agrupaciones principales: la primera ubicada sobre el volcán Ticsani guardando correspondencia con la falla F2 y la segunda a 6 km al este del volcán. La segunda agrupación podría estar relacionada a una falla F no reconocida por estudios anteriores. La distribución de sismos en profundidad se encuentra entre 2 km y 13 km.
- Los cálculos de valor de "b" dan como resultado 1.76 ± 0.05 , con una magnitud de completitud de 2.4 ML, valor relacionado a los esfuerzos de cizalla registrados

en los enjambres de sismos VT y propio de ambientes influenciados por la actividad volcánica.

- Los cálculos de volumen intruido de magma basados en el momento sísmico cumulativo de los sismos VT corresponden a $970,000 \text{ m}^3$, equivalente a una magnitud acumulada de 4.6 ML
- Este estudio propone que los enjambres de sismos VT ocurren como consecuencia del ingreso de fluidos hidrotermales y/o volcánicos en la zona de la falla F2 y F, a causa de la sobrepresurización generada por la intrusión de magma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 91 (2001) p.69-80.
- Cruz, J. (2016). Actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (Moquegua) para el periodo mayo setiembre del 2014. Tesis de ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, 159 p.
- Farrell, J., Husen, S., & Smith, R. (2009). Earthquake swarm and b-value characterization of the Yellowstone volcano-tectonic system. Journal of Volcanology and Geothermal Research 188 (2009) 260–276.
- 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.
- Holtkamp, S., Pritchard, M., y Lohman, R. (2011). Earthquake swarms in South America. Geophys. J. Int. 187,128-146.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. U.S. Geological

Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.

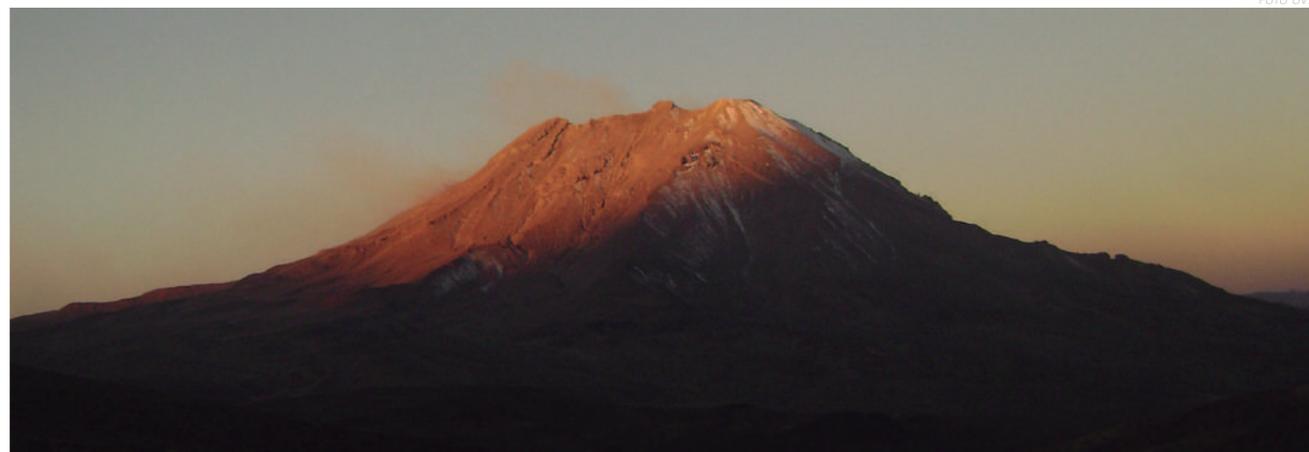
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., y Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. Journal of Volcanology and Geothermal Research 186 (2009) 253–264.
- Mariño, J., y Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima.
- McNutt, S. (1996). Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories. Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. Springer-Verlag, Berlin New York, Pp. 99-146.
- McNutt, S. (2005). Volcanic seismology. Annual Review Earth and Planetary Science. 33, 461-491.
- Siebert, L., Simkin, T., y Kimberly, P. (2010). "Volcanoes of the world". Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Villegas, J. C. (2009). Modelos de velocidad unidimensionales para las regiones del Norte, Centro y sur del Peru, a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S de sismos locales. Tesis de ingeniero, 97.
- White R., & McCausland W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research 309 (2016) 139–155. Published by Elsevier B.V.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. Advanced in Geophysics. 45, 259–302.



Figura 07.- Estación sísmica telemétrica TCN, emplazada en el domo reciente del volcán Ticsani. Esta es una de las 4 estaciones que componen la red local que monitorea la actividad de este volcán ubicado en la región Moquegua.

A NEW METHOD FOR VOLCANIC ERUPTION FORECASTING APPLIED WITH SUCCESS ON UBINAS VOLCANO

⁽¹⁾ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS)



Con más de 25 erupciones en los últimos 500 años, el Ubinas es el volcán más activo del Perú. El OVS vigila su comportamiento con cuatro estaciones sísmicas permanentes.

SUMMARY

Between February 2006 and August 2009, the Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) belonging to the Geophysical Institute of Peru (OVS-IGP) recorded the seismic signals of the first eruption of the Ubinas volcano occurred in 37 years. Upon studying such records, it was possible to identify seismic signals closely associated with rapid magma rise and imminent explosions. With this experience, four years later, when a new eruptive process began, the specialists of the OVS-IGP were prepared to make forecasting of its explosions.

This work explains the method found whose high effectiveness has been demonstrated during the 2013-2015 eruption which presented three periods of intense activity separated by lapses of relative calm: (1) Period 1, from 6/3/2013 to 29/10/2013, highlighting the occurrence of 9 explosions in seven days. (2) Period 2, from 01/01/2014 to 23/11/2014, where it occurred the greater activity of the entire eruptive process. (3) Period 3, from the 7/12/2014 to the 7/11/2015 where the rise of magma remained a moderate explosive activity. The analysis of seismic signals shows that in each period a sequence of particular type of earthquakes (ie a "seismic pattern") occurring at the beginning, during and after the rapid rise of magma to the surface, which culminates with explosions. In parallel, this seismic pattern has been contrasted with satellite thermal image data from the crater, obtained by the MIROVA system of the University of Turin (Italy). We found a direct association between the advent of seismic events of a particular type called "HIBRID earthquakes" and the arrival of magma to the surface evidenced by the satellite thermal image, which

meant a very high probability of explosion.

The seismic pattern that accompanies the activity of the volcano towards its final explosive activity corresponds to: (1) "Tornillo" earthquakes and "Volcano-Tectonic" earthquakes occur. The tornillos are associated with circulation of fluids (water, steam, gases and magma) into cavities inside the volcano. The "Volcano-Tectonic" earthquakes are associated with rock fracture due to immense pressures. (2) "Tremors" occur. They are related to perturbation of the hydrothermal system by proximity of the ascending magma body. (3) "Hybrid" earthquakes occur. They are directly associated with the ascent of magma in its last kilometers before reaching and / or reaching the surface. A few moments later the MIROVA images detect the hot body. (4) Finally, "Explosions" occur. At that time, the seal or plug is destroyed in the most superficial zone of the volcanic conduit. (5) "Spasmodic tremors" immediately occur. They are associated with the expulsion of large volumes of ash and gases into the atmosphere, which is visible for many kilometers around the crater. The finding of this seismic pattern during the eruption of the volcano Ubinas has allowed to predict the behavior of the volcano as well as to give the warning of imminence of explosion to the authorities of the SINAGERD local and national. This is an example of the great importance of science to protect lives that may be in imminent danger.

Finally, recently in October 2016, the Self Potential (SP) geoelectric method was successfully applied to identify the disturbances that magma causes to the hydrothermal system just before an imminent explosion. All this new scientific knowledge gained has further increased the prognostic capacity of the OVS.

INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas es el más activo del Perú, habiendo presentado 25 erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-3) desde el año 1550. La frecuencia en sus erupciones es de 6 a 7 por siglo. La más reciente erupción tuvo lugar entre marzo de 2006 a junio de 2009, alcanzando un IEV igual a 2. El inicio de esta crisis eruptiva se presentó dominado por una actividad freática y luego, a partir del 19 de abril de 2006, la actividad deviene en magmática de tipo vulcaniano con emisión de material andesítico básico. Posteriormente, y luego de 4 años de inactividad, en septiembre de 2013 el volcán Ubinas entró en un nuevo proceso eruptivo, el cual se fue acelerando en febrero de 2014 al tiempo que se registraba Tremores sísmicos de gran energía, eventos de tipo Híbrido, así como emisiones persistentes de gases y ceniza, etc. Finalmente, esta alta actividad sísmica y fumarólica culminó con la ocurrencia de la primera explosión magmática el día 14 de febrero de 2014. A partir de entonces y hasta el presente, la actividad eruptiva del volcán Ubinas ha continuado de manera intermitente.

Este trabajo muestra principalmente los resultados de las observaciones y monitoreo instrumental efectuados entre enero de 2013 y diciembre de 2015: actividad sísmica e información satelital de tipo térmico. Adicionalmente, se expone los resultados de un nuevo método geofísico aplicado en este volcán, el Potencial Espontáneo o PE, que muestra muy buena concordancia con los resultados sísmicos.

SISMICIDAD

a) **Tipos de sismos.**- Los principales tipos de sismos que se han observado en el curso de esta erupción han sido: Tornillos, Volcano-tectónicos, Tremores, Híbridos y explosiones. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

• **Sismos Tornillos.**- Presentan un pico de frecuencia dominante seguido de picos armónicos. Son asociados a la presión y/o paso de gases en una cavidad, generando resonancia.

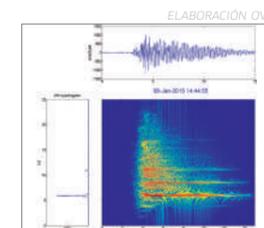


Figura 01.- Sismo de tipo Tornillo registrado en el volcán Ubinas el 6 de enero de 2015.

• **Sismos Volcano-Tectónicos.**- Sismos de alta frecuencia, que presentan claramente fases P y S. Están relacionados a fractura de rocas como consecuencia de esfuerzos en buena parte causados por presión de fluidos.

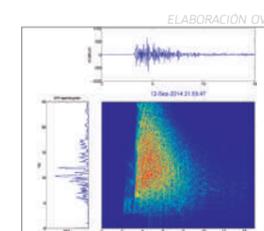


Figura 02.- Sismo de tipo VT registrado en el volcán Ubinas el 12 de septiembre de 2014.

• **Sismos Tremor.**- Estos eventos presentan amplia banda espectral y tienen duraciones mayores a 50 segundos. En la etapa preruptiva están generalmente asociados a perturbación del sistema hidrotermal; en la etapa eruptiva, a la emisión de tefras.

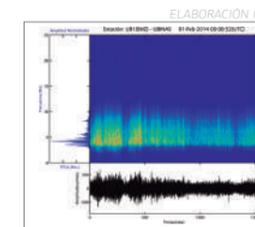


Figura 03.- Sismo de tipo Tremor registrado en el volcán Ubinas el 01 de febrero de 2014.

• **Sismos Híbridos.**- Son eventos mixtos que contienen tanto altas como bajas frecuencias. Están relacionados al ascenso de magma en sus últimos tramos (pocos kilómetros) antes de llegar a la superficie.

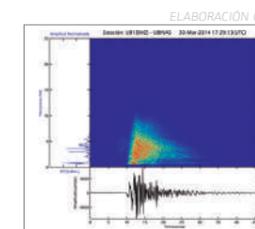


Figura 04.- Sismo de tipo Híbrido registrado en el volcán Ubinas el 30 de marzo de 2014.

• **Sismos de Explosión.**- Una explosión genera una señal sísmica de gran energía que presenta inicio impulsivo y una componente de muy baja frecuencia o VLF.

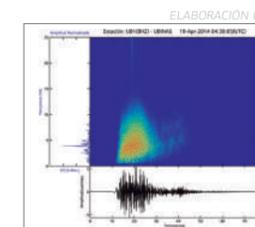


Figura 05.- Sismo de tipo Explosión registrado en el volcán Ubinas el 19 de abril de 2014.

b) **Característica de la sismicidad observada.**- Durante la erupción del volcán Ubinas, se ha observado que se producen periodos de actividad mayor seguidos de periodos de calma relativa. En cada retorno a una actividad mayor y que culmina con erupciones explosivas, los resultados de los análisis diarios (Reportes periódicos publicados en <http://ovs.igp.gob.pe/reportes-vulcanologicos>) de la sismicidad registrada en las cuatro estaciones sísmicas que funcionan sobre el volcán Ubinas, han puesto en evidencia que ocurre el "patrón sísmico" o secuencia de las fases siguientes:

- * **Fase A:** se registran sismos de tipo Tornillo y Volcano-Tectónico (VT).
- * **Fase B:** se registran los sismos de tipo Tremor (asociados a perturbación del sistema hidrotermal).
- * **Fase C:** aparecen los sismos de tipo Híbridos y, finalmente.
- * **Fase D:** ocurren las Explosiones, seguidas inmediatamente por sismos de tipo Tremor espasmódico.

En la figura 06 se muestra gráficamente la secuencia referida, incorporando una curva cualitativa que representa la energía sísmica asociada a cada fase.

(Fase A) Tornillos y VT-(Fase B) Tremor- (Fase C) Híbridos- (Fase D) Explosiones y Tremor espasmódico

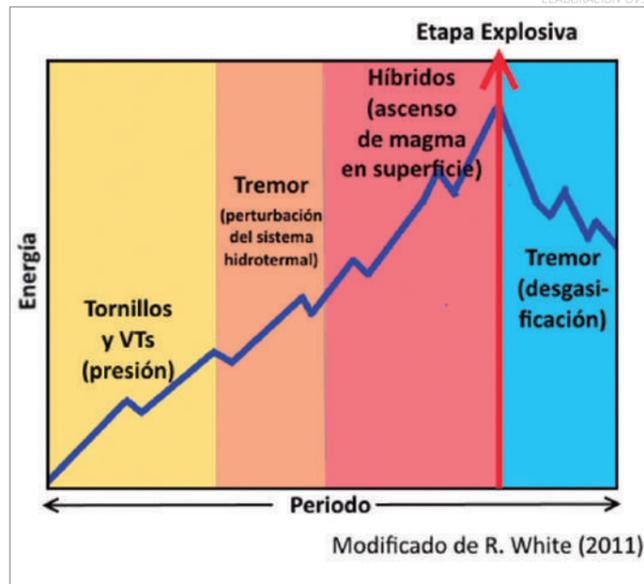


Figura 06.- Las cuatro fases representadas por barras de color que integran el "patrón sísmico" o secuencia de tipos de eventos sísmicos puestos en evidencia en el proceso eruptivo del volcán Ubinas. La curva azul representa la energía sísmica asociada a cada fase.

El patrón sísmico que hemos descrito se ha repetido durante los siguientes tres periodos de actividad mayor: (1) Periodo 1: de marzo a octubre de 2013, donde resalta la ocurrencia de 8 explosiones en cinco días. (2) Periodo 2: de enero a noviembre de 2014, donde se produjo la mayor actividad de todo el proceso eruptivo. (3) Periodo 3: del 07/12/2014 al 07/11/2015, donde el ascenso de magma ha continuado, generando una moderada actividad explosiva.

Por otro lado, adicionalmente al análisis de las señales sísmicas, nuevas herramientas fueron utilizadas durante el monitoreo del actual proceso eruptivo, tales como el sistema MIROVA (*Middle InfraRed Observation of Volcanic Activity*) y el sistema de registro continuo del Potencial Espontáneo (PE) sobre el volcán. El sistema MIROVA es un detector de puntos calientes (*hot-spot*) que proporciona resultados en tiempo casi real, basado en el análisis de imágenes espectroradiométricas de moderada resolución (Coppola et al, 2015). El sistema de registro continuo del PE instalado por el OVS en el flanco noroeste del volcán, es un arreglo de electrodos conectados al suelo que permite determinar las variaciones del potencial eléctrico natural, las cuales están directamente relacionadas a cambios en el sistema hidrotermal del volcán. Los datos proporcionados por estas dos nuevas herramientas

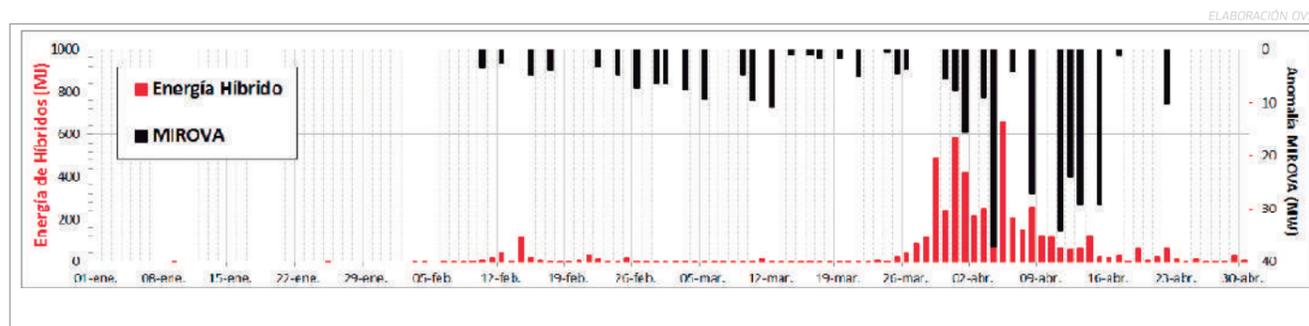


Figura 07- Relación entre la energía sísmica de sismos Híbridos y detecciones de anomalías térmicas MIROVA en el periodo 2014, entre enero y abril de ese año.

de monitoreo han sido correlacionados con los resultados del análisis de señales sísmicas (figura 07, energía de Híbridos y datos MIROVA) a fin de emitir reportes de actividad ocurrida y adelantar pronósticos de erupción.

• **Periodo 1 (06/03/2013 al 29/10/2013).**- Al analizar la sismicidad de este periodo y comparando con los siguientes, se ha observado una diferencia fundamental: la fase C (presencia de sismos Híbridos) no se ha presentado. En efecto, entre el 06/03/2013 y el 29/10/2013 se observó sismos de tipo VT y Tornillo asociados a la presurización del sistema (fase A), seguidos rápida y directamente con la fase D en la que ocurrieron una serie de 9 explosiones freáticas entre el 02 y 05 de septiembre (Macedo et al., 2013). La fase B en este periodo, con presencia de actividad de Tremor espasmódico asociada a perturbación del sistema hidrotermal, se registró finalmente. Posteriormente, se instaló una calma relativa que duró hasta fin del año.

• **Periodo 2 (01/01/2014 al 23/11/2014).**- Desde los primeros días de enero de 2014, se registró un notorio incremento de la sismicidad en el volcán Ubinas. En la figura 08 se observa que los valores RSAM (medida de la amplitud sísmica en tiempo real), muestran un muy fuerte incremento el 31 de enero, correspondiendo a Tremor de alta energía y dando inicio a la fase B. El día 09 de febrero hay una disminución del Tremor y se comienza a registrar sismos Híbridos, dando inicio a la fase C. Al día siguiente, 14 de febrero, ocurrió una explosión de 239 MJ de energía.

A continuación se detalla cada fase.

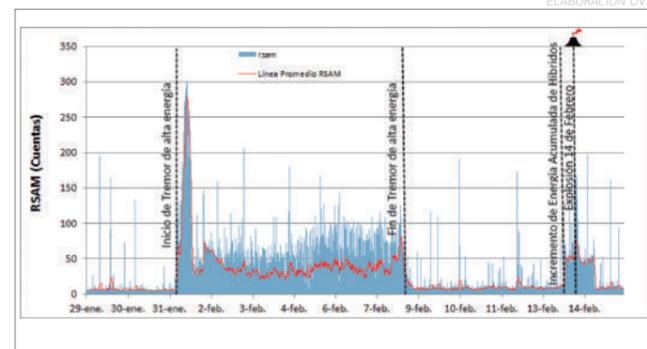


Figura 08.- Evolución del RSAM del 29 enero al 14 febrero de 2014. Se observa un incremento notable el 31 de enero (inicio de fase B), originado principalmente por la aparición de un intenso y persistente Tremor sísmico. El 14 de febrero, luego de 4 días de relativa calma al disminuir el Tremor, ocurre la primera explosión magmática con 239 MJ de energía.

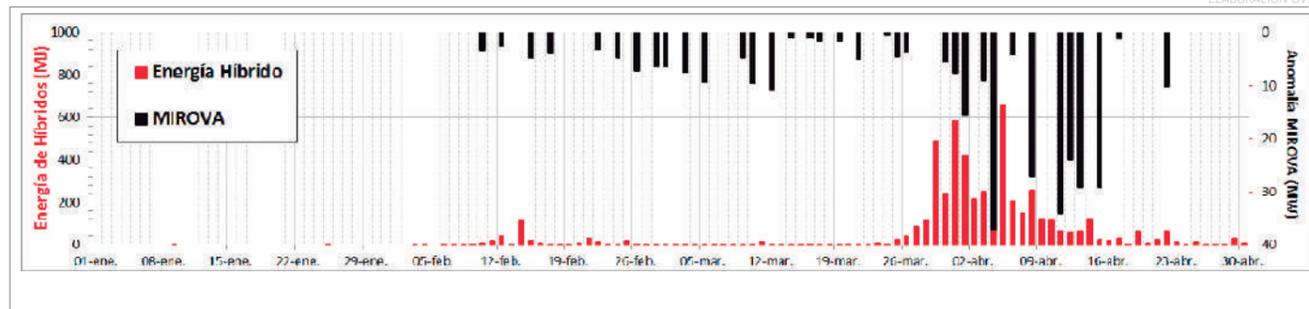


Figura 07- Relación entre la energía sísmica de sismos Híbridos y detecciones de anomalías térmicas MIROVA en el periodo 2014, entre enero y abril de ese año.

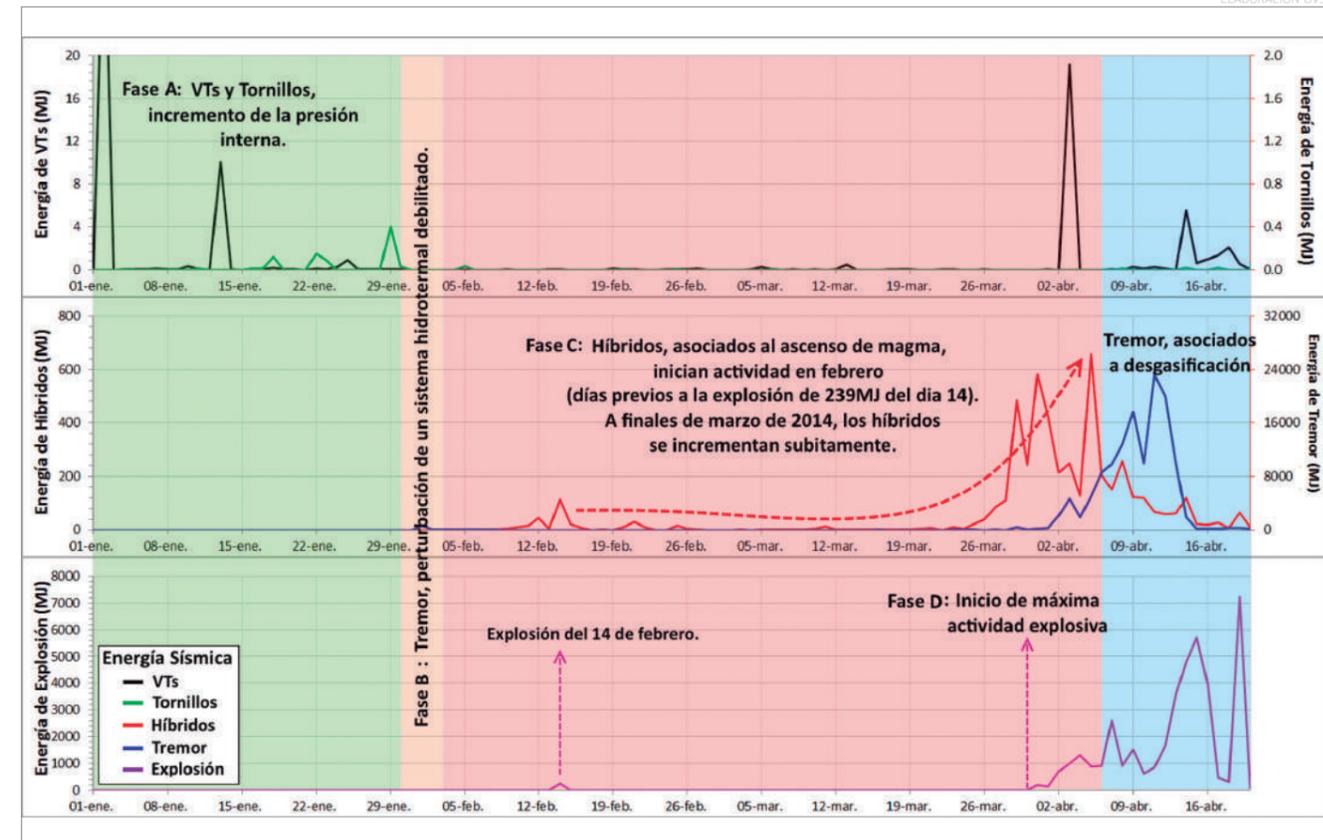


Figura 09.- Sismicidad entre enero-abril de 2014. En la fase A (enero), los VTs y Tornillos indican un incremento de presión al interior del volcán. En la fase B (inicios de febrero), los Tremores indican que el sistema hidrotermal es perturbado, hay ebullición y recirculación de fluidos. En la fase C (desde el 09 de febrero hasta fines de marzo), el ascenso de magma con poco débito es continuo y se registran híbridos; a finales de marzo de 2014, la energía acumulada de Híbridos muestra un incremento súbito. En la fase D (desde el 31 de marzo hasta el 23 de noviembre) se da la actividad explosiva, siendo abril el mes con las mayores tasas de emisión de tefras.

- **Fase A.**- La sismicidad VT y Tornillo estuvieron presentes al inicio de 2014 (Fig. 09, Fase A). En enero de 2014, se incrementó la tasa de sismos VT, pasando de 3 VTs/día a 20 VTs/día; estos sismos fueron localizados a 1 km al oeste del cráter y con profundidades entre 1 km a 3 km. En cuanto a los sismos Tornillo, estos también se registraron en enero (hasta 23 eventos en este periodo).

- **Fase B.**- El 31 de enero de 2014, durante 14 horas consecutivas se registró un Tremor de alta energía atribuido a "ebulliciones" al nivel del sistema hidrotermal (Fig. 9, fase B). Seguidamente, ocurrieron hasta 5 exhalaciones con emisión de ceniza, intercaladas por Tremores espasmódicos.

- **Fase C.**- A partir del 09 de febrero de 2014, los sismos Híbridos se incrementaron en número y energía. Al día siguiente, el 10 de febrero, el sistema MIROVA detectó por primera vez una anomalía térmica de 3 Mw, poniendo así en evidencia la llegada de magma a la superficie. El 14 de febrero, la energía acumulada de eventos tipo Híbrido se incrementa rápidamente (Fig. 09, fase C), marcando así el desplazamiento del magma a través del conducto en sus últimos tramos. Finalmente, este mismo día a las 19:45 UTC ocurre la primera explosión de tipo magmática del proceso eruptivo, alcanzando 239 MJ de energía.

Luego ocurre una etapa de calma que se prolongó por 15 días. Durante este periodo, el número de Híbridos persiste, pero su energía se mantiene baja. Mientras tanto el sistema

MIROVA continuó detectando anomalías térmicas indicando así que el magma permanecía en la superficie del cráter.

Durante marzo de 2014, se registra un incremento sostenido de eventos sismovolcánicos asociados a movimiento de fluidos. A partir del 26 de marzo, la energía acumulada de sismos Híbridos presenta un fuerte incremento, alcanzando un valor máximo de 582 MJ el 31 de marzo. Casi simultáneamente, desde el 27 de marzo, se observan importantes y constantes exhalaciones de ceniza, cuyos energéticos registros sísmicos elevaron los valores de energía diaria acumulada.

- **Fase D.**- El 31 de marzo de 2014 se inicia el periodo de mayor actividad explosiva y emisión de tefras. Energéticas explosiones expulsaron ceniza y bloques balísticos, siendo las más fuertes registradas durante todo el proceso eruptivo 2013-2015 (Fig. 9, Fase D). La tasa de explosiones llegó a un máximo de 43 eventos/día el 13/04/2014.

A partir del 14 de abril, la energía acumulada de sismos tipo Híbrido muestra franco decaimiento en sus valores. Sin embargo, hubo aún diez días de intensa actividad explosiva, incluyendo la explosión del 19 de abril de 5752 MJ de energía, la más importante de todo el proceso eruptivo. Esta explosión eyectó proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas) de gran tamaño a distancias relativamente

Continúa en la pág. 28 →

lejanas (hasta 2,5 km al NW del cráter).

Posteriormente, desde el 24 de abril ya se observa una franca disminución en el número y la energía de las explosiones/exhalaciones. Como ejemplo de la correspondencia de Híbridos con emisiones (ya sea explosiones o exhalaciones), se ha graficado en la figura 10 la energía acumulada de los sismos Híbridos (asociados al ascenso de magma) y los Tremores (asociados a emisión de cenizas). En dicho gráfico se observa bien que el conjunto de eventos Híbridos preceden al conjunto de eventos Tremóricos. En los meses siguientes, entre mayo-noviembre, la actividad permaneció baja aunque con algunas explosiones/exhalaciones menores y esporádicas. La última explosión del año 2014 ocurrió el 23 de noviembre.

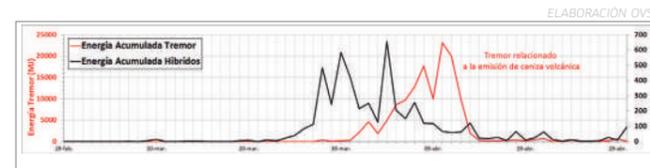


Figura 10.- Curvas de energía de sismos Híbridos y de Tremores. Se puede deducir que el arribo de magma desde las profundidades (firma de Híbridos) es seguido de la salida de magma a la superficie (firma de Tremores).

• **Periodo 3 (07/02/2014 al 07/11/2015).**- Este periodo se mostró muy debilitado. Los aportes magmáticos no tuvieron la energía necesaria para generar una fase explosiva importante. Posiblemente por esta razón las fases "A" y "C" se presentaron en dos etapas.

- **Fase A.-** Entre diciembre de 2014 e inicios de enero de 2015, se observó un breve incremento en el número de sismos de tipo fractura (VTs) y Tornillos (figura 11, fase A), que se interpreta como resultado de un aumento de la presión interna. Esta breve etapa de incremento de VTs (figura 11, 2º etapa), se reinició el 04 de febrero de 2015, mostrando picos 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, ocurren también altas tasas diarias de sismos Tornillos.

Tales sismos VT y Tornillo indicaron que la presión interna en el edificio volcánico iba en aumento.

- **Fase B.-** Desde el 06 de enero de 2015, se registró una señal sísmica Tremor de muy poca energía, similar a un "ruido de fondo", que se fue incrementando y se mantuvo por 31 días consecutivos (figura 11, fase B). Cabe indicar que, entre mediados de diciembre y fines de enero, se registraron también sismos Híbridos, es decir, hubo desde ya ascenso de magma. Por lo tanto, el Tremor sísmico inusual ("ruido de fondo") fue interpretado como consecuencia de la perturbación del sistema hidrotermal originada por presencia de un cuerpo caliente (magma) que ascendió dando lugar a los Híbridos detectados (figura 11, 1º etapa de Híbridos).

- **Fase C.-** Esta fase se inicia casi tres semanas antes de la explosión del 08 de abril de 2015, cuando se comenzó a registrar un incremento de sismos Híbridos de poca energía (figura 11, fase C: 2º etapa de Híbridos), llegándose a tasas de varias decenas de eventos Híbridos por día a inicios de abril (249 sismos Híbridos fueron registrados hasta el 07 de abril 2015). Este hecho fue interpretado como signo de inminente actividad explosiva

- **Fase D.-** Finalmente, el 08 abril ocurrió una pequeña explosión que generó 1 MJ de energía (figura 11, fase D), que abrió nuevamente el conducto y liberó la presión acumulada. Fue la primera explosión que ocurrió luego de poco más de cuatro meses de calma (última explosión: 23 de noviembre de 2014).

En los días siguientes, se registraron Tremores y se observaron emisiones de ceniza, interpretándose como una etapa de desgasificación intensa. Las explosiones en este periodo fueron esporádicas.

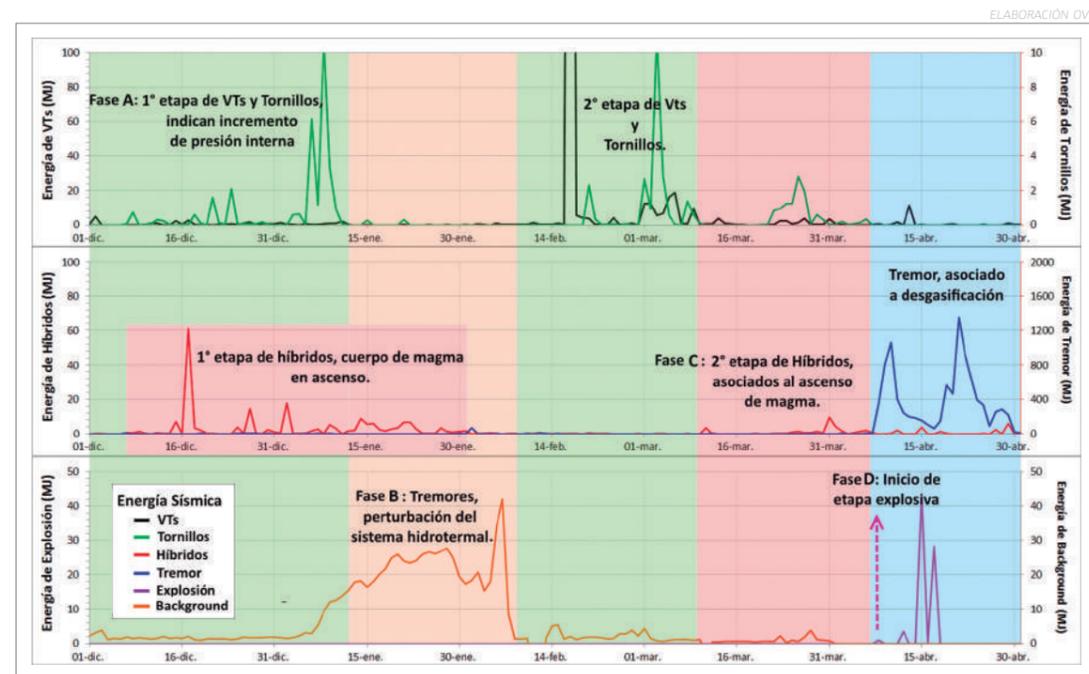


Figura 11.- Fase A: a fines de 2014, se registra un incremento de VTs y Tornillos, indicando acumulación de presión al interior del volcán, en dos etapas; Fase B: un cuerpo magmático en ascenso perturbó el sistema hidrotermal desde el 06 de enero y por 31 días, generando como consecuencia Tremor; Fase C: se registra sismos Híbridos (es decir, hay ascenso de magma) en dos etapas; Fase D: el 08 de abril se inicia la actividad explosiva seguida de desgasificación, aunque las explosiones son esporádicas.

c) Registro continuo de Potencial Espontáneo.- Desde 1998, el Observatorio Vulcanológico del Sur ha realizado diversos estudios sobre el volcán Ubina, entre los cuales están la aplicación de métodos geofísicos eléctricos del Potencial Espontáneo o PE. El PE ha sido medido sobre nueve perfiles radiales que van desde la cumbre hasta la base del volcán y ha servido para investigar la estructura interna del volcán (Macedo et al., 2002). Uno de los perfiles más representativos de tal estructura es el perfil N° 7 situado en el flanco noroeste. Macedo et al. (2002) muestran que en caso de reactivación del volcán, las principales variaciones del PE deberían ocurrir en el sector o zona asociada al hidrotermalismo, la cual está situada hacia la parte central del cono. Luego de mediciones reiterativas sobre el perfil N°7 en diferentes años, se identificó una pequeña área que denotaba variaciones mayores de PE en periodos de erupción. Es así que en septiembre de 2016, sobre una pequeña distancia del perfil N°7, se instaló 5 pares de electrodos distanciados de 20, 40, 60, 80 y 100 m, unidos a un registrador *datalogger* a fin de obtener registro del PE en continuo. El PE fue registrado con un paso de 15 segundos.

En cada uno de los cinco registros continuos de PE obtenidos, los resultados muestran una anomalía muy notoria que ocurre días antes de sobrevenir una explosión en este volcán. La figura 13a muestra la curva PE correspondiente al electrodo de 40 m de distancia, donde se observa que la anomalía se correlaciona perfectamente con la energía de los eventos sísmicos de tipo Híbrido (figura 13b). Los Híbridos son sismos que están estrechamente asociados a ascenso de magma, cuerpo muy caliente que transmite su calor en su entorno. En este caso, el entorno está saturado de agua subterránea (sistema hidrotermal), la que llega a vaporizarse y escapa en dirección de la superficie. Es este cambio (vaporización

y desplazamiento del agua) que se refleja en los valores del PE, los cuales se ven bruscamente incrementados.

De esta manera, se ha identificado y registrado dos fenómenos geofísicos precursores de una explosión inminente: aumento en la energía de los sismos Híbridos y aumento en los valores del PE. En este caso, la anticipación ha sido en más de tres semanas, lo cual es un excelente lapso de tiempo para emitir un pronóstico de explosión inminente y difundirlo. Así se hizo, y el pronóstico llegó a las autoridades del SINAGERD mediante reportes de actividad del volcán Ubina que el OVS emite periódicamente.



Figura 12.- Profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP realizando mediciones del Potencial Espontáneo en el flanco noroeste del volcán Ubina.

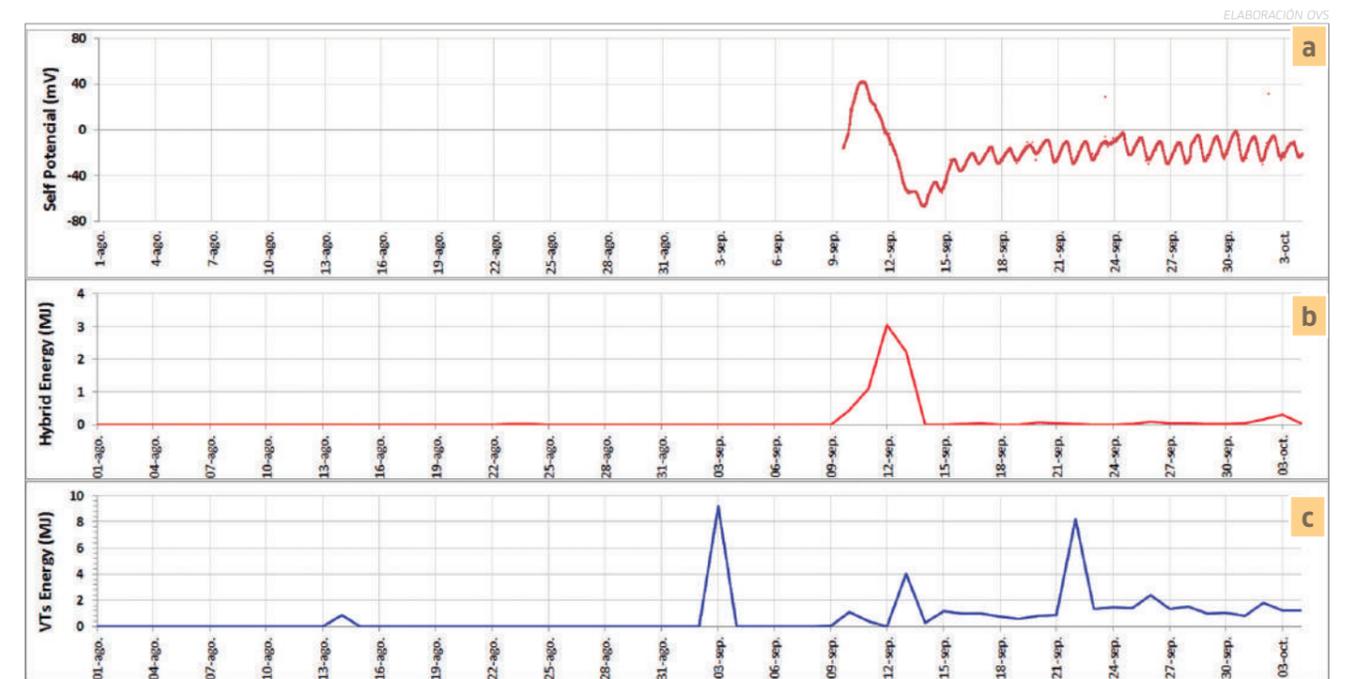


Figura 13.- El registro continuo de PE (a) se correlaciona bien con la energía sísmica de eventos sísmicos de tipo Híbrido (b). Asimismo, en el gráfico (c) se observa que en días previos a las anomalías de (a) y (b), la energía de los sismos VT (indicadores de aumento de presión dentro del volcán) se incrementa. Finalmente, el evento explosivo esperado ocurrió el día 03 de octubre.

CONCLUSIONES

- Las observaciones realizadas en el actual proceso eruptivo 2013-2015, han mostrado la misma secuencia sísmica o "patrón sísmico" en los periodos eruptivos de tipo freático (periodo 2013) y magmático (periodos 2014 y 2015). El inicio de tales secuencias pudieron observarse con anticipación de hasta cuatro meses en el caso del proceso eruptivo 2006-2009. Esta secuencia corresponde a: (fase A) Tornillos y VTS, (fase B) Tremor, (fase C) Híbridos, (fase D) Explosiones y Tremor espasmódico.
- La secuencia del proceso corresponde a: (Fase A) acumulación de presión y paso limitado de fluidos magmáticos, (fase B) perturbación del sistema hidrotermal, (fase C) ascenso de material magmático, (fase D) inicio de etapa explosiva y desgasificación del sistema volcánico.
- Un nuevo método geofísico ha sido empleado con éxito para identificar perturbaciones en el sistema hidrotermal asociado a ascenso de magma e inminente explosión. Se trata del Potencial Espontáneo medido en continuo, el cual, al ser correlacionado con la curva de energía de sismos Híbridos, ha demostrado concordar perfectamente. Por lo tanto, ambos métodos, el sísmico (Híbridos) y el eléctrico (Potencial Espontáneo), han demostrado servir para efectuar pronósticos de explosión inminente en el volcán Ubinas.

AGRADECIMIENTO

- El diseño del sistema de instalación y de registro en campo

del PE ha sido efectuado por J. Vilca y R. Chijcheapaza del OVS. Agradecemos a A. Finizola, investigador de la Universidad de La Reunion (Francia), por los consejos relativos a la instalación de los instrumentos en el campo. Este trabajo ha sido realizado con fondos del PP0068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencia por desastres", que han sido asignados al Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP.

BIBLIOGRAFÍA

- Coppola D., Macedo O., Ramos D., Finizola A., Delle Donne D., Del Carpio J., White R., McCausland W., Centeno R., Rivera M., Apaza F., Ccallata B., Chilo W., Cigolini C., Laiolo M., Lazarte I., Machaca R., Masias P., Ortega M., Puma N., Taipei E. – "Magma extrusion during the Ubinas 2013-2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015.
- Macedo O., Gonzáles K., Finizola A., Métaixian J-Ph, Fournier N. & Sortino F.(2002). Estudio estructural y del Sistema hidrotermal del volcán Ubinas, por métodos geofísicos y geoquímicos.- Resúmenes Extendidos del XI Congreso Peruano de Geología, Lima-Perú, 26-28 Setiembre, 2002.
- Macedo O, Del Carpio J, Centeno R, Machacca R, Portugal D, Huancco O, Chijcheapaza R. (2013).- "Características Sísmicas de la Actividad Explosiva del Volcán Ubinas ocurrida en septiembre 2013".
- White R. (2011).- "Monitoring volcanoes and forecasting eruptions". Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.

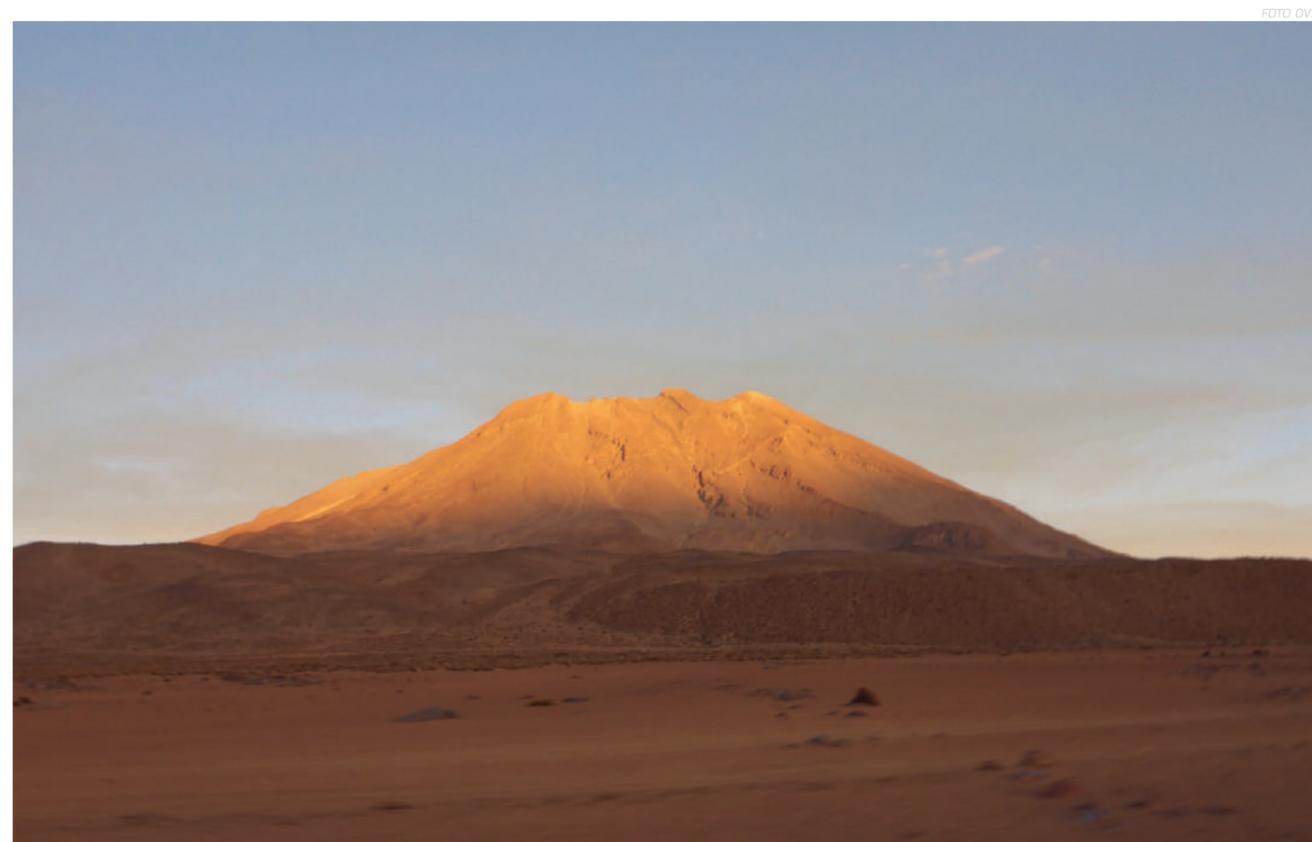


FOTO OVS

Las continuas erupciones del Ubinas lo han convertido en un volcán laboratorio en el Perú. El OVS ha probado su modelo de pronóstico de erupciones exitosamente.



MONITOREO

El OVS monitorea cuatro volcanes del sur del Perú: Misti y Sabancaya en Arequipa y Ubinas y Ticsani en Moquegua. La vigilancia que realiza es en tiempo real, mediante estaciones sísmicas telemétricas que envían ininterrumpidamente información. De este modo, los profesionales del Observatorio pueden identificar las primeras señales de actividad de los volcanes emplazados en nuestro país.

UBINAS

“ El seguimiento del ascenso de magma por la sismología volcánica y su llegada a la superficie del cráter del Ubinas por observaciones satelitales del sistema MIROVA, tal como se hizo en esta reciente erupción, son herramientas importantes para comprender mejor los procesos extrusivos”



Dr. Diego Coppola
Responsable del sistema de monitoreo satelital MIROVA

Introducción

El volcán más activo del Perú aún no pretende mostrar signos que lo lleven al reposo. Durante el 2016, la actividad eruptiva disminuyó considerablemente, y tanto las explosiones como las emisiones de ceniza fueron observadas esporádicamente. Este macizo nos ha enseñado mucho, en un lenguaje sísmico que ha llevado al OVS a ser capaz de pronosticar durante un periodo eruptivo el inicio de la etapa explosiva. El trabajo científico que desarrolla el Observatorio está basado en el registro continuo de información sísmológica adquirida durante los últimos 10 años.

De esta manera, en 2016 se han realizado nuevos trabajos científicos sobre el volcán Ubinas. En agosto se realizó por primera vez el sobrevuelo del cráter utilizando un dron (altura de vuelo récord de 6000 msnm). Gracias a esta experiencia reconocimos las limitaciones técnicas de estos aparatos en

ambientes volcánicos, para mejorar sus capacidades operativas en nuestros próximos drones aún en construcción.

Así también, sobre el Ubinas se desarrolla la implementación de un registro en continuo de Potencial Espontáneo. Esta instrumentación adquiere datos del tipo eléctrico con el fin de poder identificar cambios al nivel del sistema hidrotermal. Es así que en septiembre, días previos a la explosión del 03 de octubre, se comprobó que esta técnica tiene la capacidad de pronosticar el arribo de magma.

El proceso eruptivo del Ubinas nos ha brindado experiencia científica invaluable, la cual está siendo aplicada en otro volcán activo, el Sabancaya, y en un futuro el Misti con la misma eficiencia con la que hemos abordamos al Ubinas.



*El volcán Ubinas, localizado en la región Moquegua, ha registrado más de 25 erupciones en los últimos 500 años.
FOTO OVS*



Figura 01.- Imágenes de la explosión registrada el 15 de enero de 2016 a las 12:53 hora local, captadas por la cámara Campbell Scientific del IGP.

La actividad del Ubinas en este primer trimestre (enero-marzo), fue descrita por el OVS en 13 reportes técnicos (2016_01 - 2016_13). En este periodo, el volcán Ubinas mostró una disminución en sus valores sísmicos con relación a lo observado en el último trimestre de 2015, registrando, por ejemplo, un promedio de 73 VT/día en los meses de febrero y marzo. Este comportamiento fue más evidente días después de haberse producido la única explosión en lo que va del año, evento generado el 15 de enero a las 17:53:51 UTC, con una duración de 83 segundos y que liberó una energía de 11 Megajoules (MJ).

Días anteriores al evento explosivo, se observaron altas tasas de VTs relacionados al incremento en la presión interna y eventos Híbridos que alcanzaron una energía máxima de 10 Megajoules (MJ). Con el transcurso de las semanas, el número de sismos registrados y la energía sísmica mantuvo, en general, tendencias negativas.

Los eventos Híbridos, asociados a ascenso de magma, presentaron promedios de 3 HIB/día y 4 HIB/día en febrero y marzo, respectivamente. Igualmente, los sismos de tipo Largo Periodo (LP), llegaron a un mínimo de 95 LP/día, tasa muy inferior a lo observado en enero (213 LP/día). Este bajo nivel de actividad sísmica permitió, en febrero, la formación de una laguna cratérica como consecuencia directa de importantes precipitaciones pluviales. Un equipo de reconocimiento del OVS verificó dicho suceso en marzo de 2016.



Figura 03.- Laguna cratérica formada en el fondo del cráter del volcán Ubinas como consecuencia de las precipitaciones pluviales estacionales.

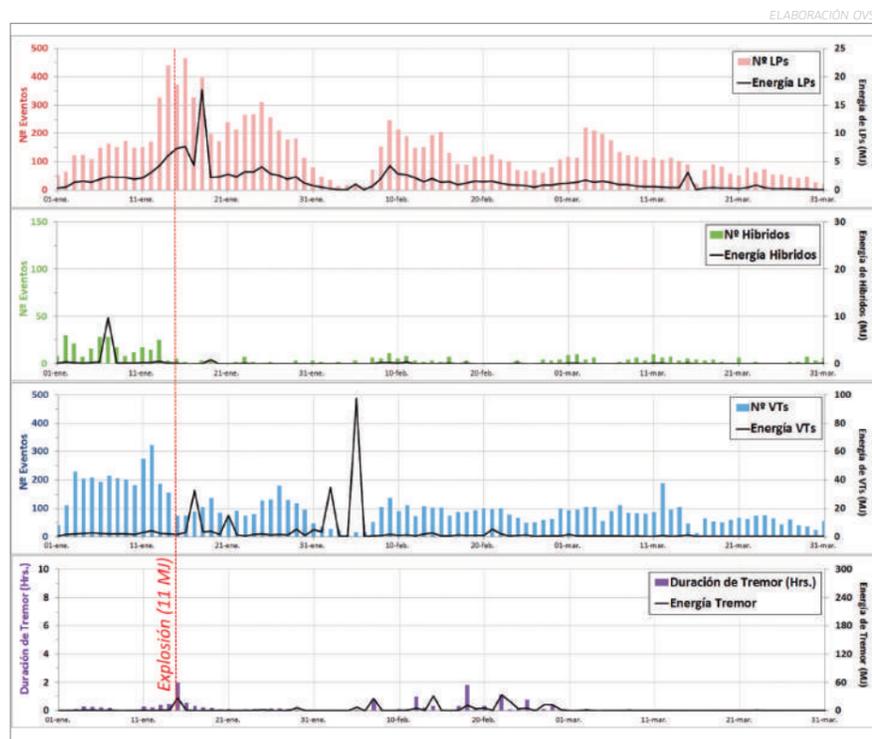


Figura 02.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1 entre el 01 de enero y 31 de marzo de 2016.

En el segundo trimestre (abril-junio de 2016), el OVS publicó 11 reportes (2016_14 - 2016_24). La actividad volcánica mostró un comportamiento similar al trimestre anterior. El enjambre sísmico más importante se presentó el 05 de abril (114 sismos Volcano-Tectónicos). El VT más energético ocurrió el 25 de abril a las 08:48 UTC (03:48 Hora Local), con una magnitud de 2.5 ML y fue localizado a 1 km de profundidad por debajo del cráter. Es preciso mencionar que desde el 04 de junio se empezaron a detectar eventos de tipo Tornillo, sismos que, según el modelo de pronóstico, son precursores del inicio de una nueva fase eruptiva.

Por otro lado, la laguna que había sido identificada en el fondo del cráter del Ubinas comenzó a desaparecer, esto como consecuencia de la disminución de las precipitaciones y el final de la temporada de lluvias. Melquiades Álvarez, colaborador del OVS y de la municipalidad de Ubinas, constató mediante fotografías el estado del cráter.

Finalmente, en este trimestre no se registró la expulsión de ceniza ni algún otro material volcánico. Se observaron, en tanto, esporádicas emisiones de vapor de agua con alturas entre los 300 y 1000 m sobre la cima del volcán.



Figura 04.- Con el pasar de las semanas, y como consecuencia del fin de la temporada de lluvias, la laguna en el fondo del cráter del Ubinas comenzó a desaparecer.

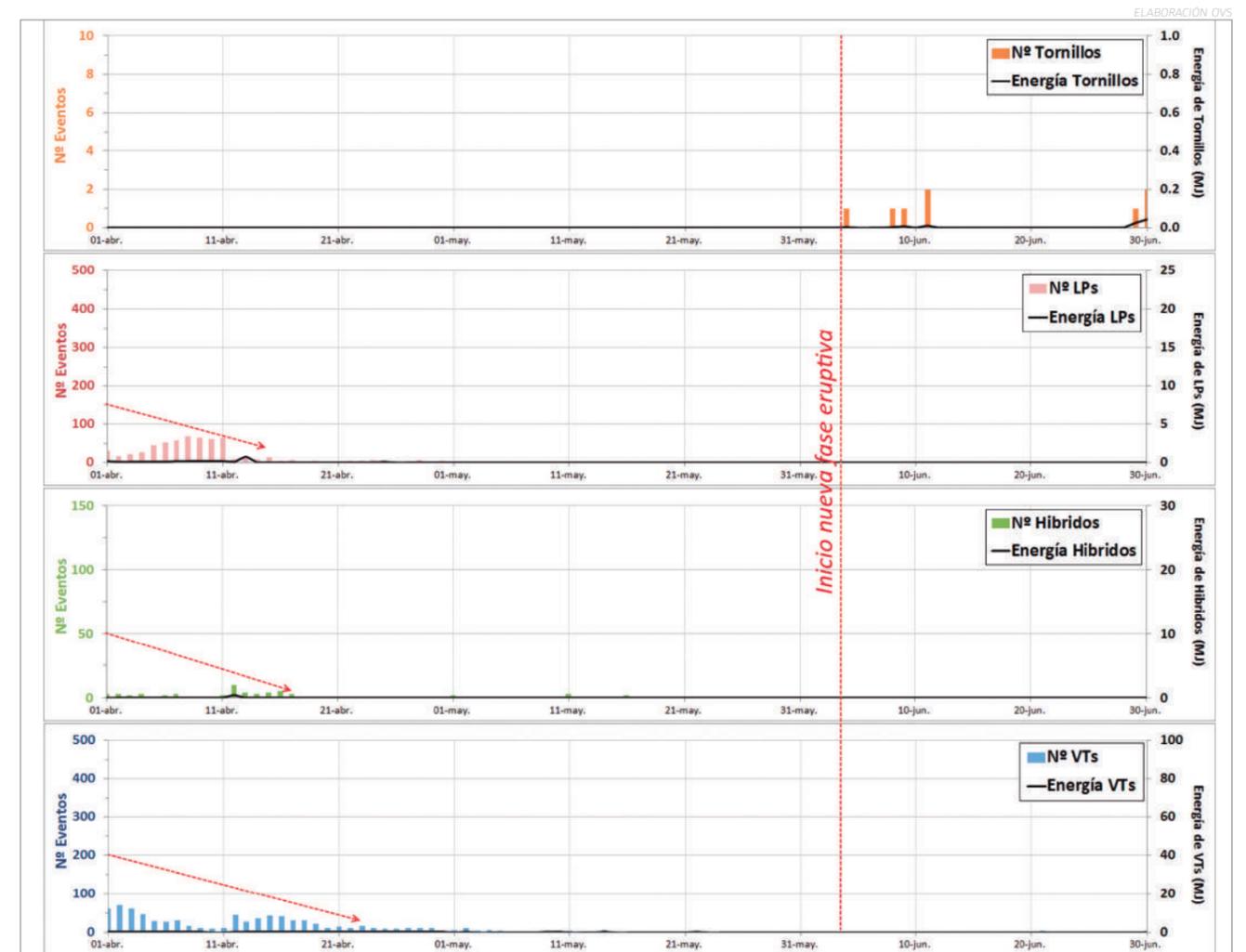


Figura 05.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1 entre el 01 de abril y 30 de junio de 2016. Se aprecia una evidente disminución de la actividad del volcán y el inicio de una nueva fase eruptiva debido al registro de eventos Tornillo.

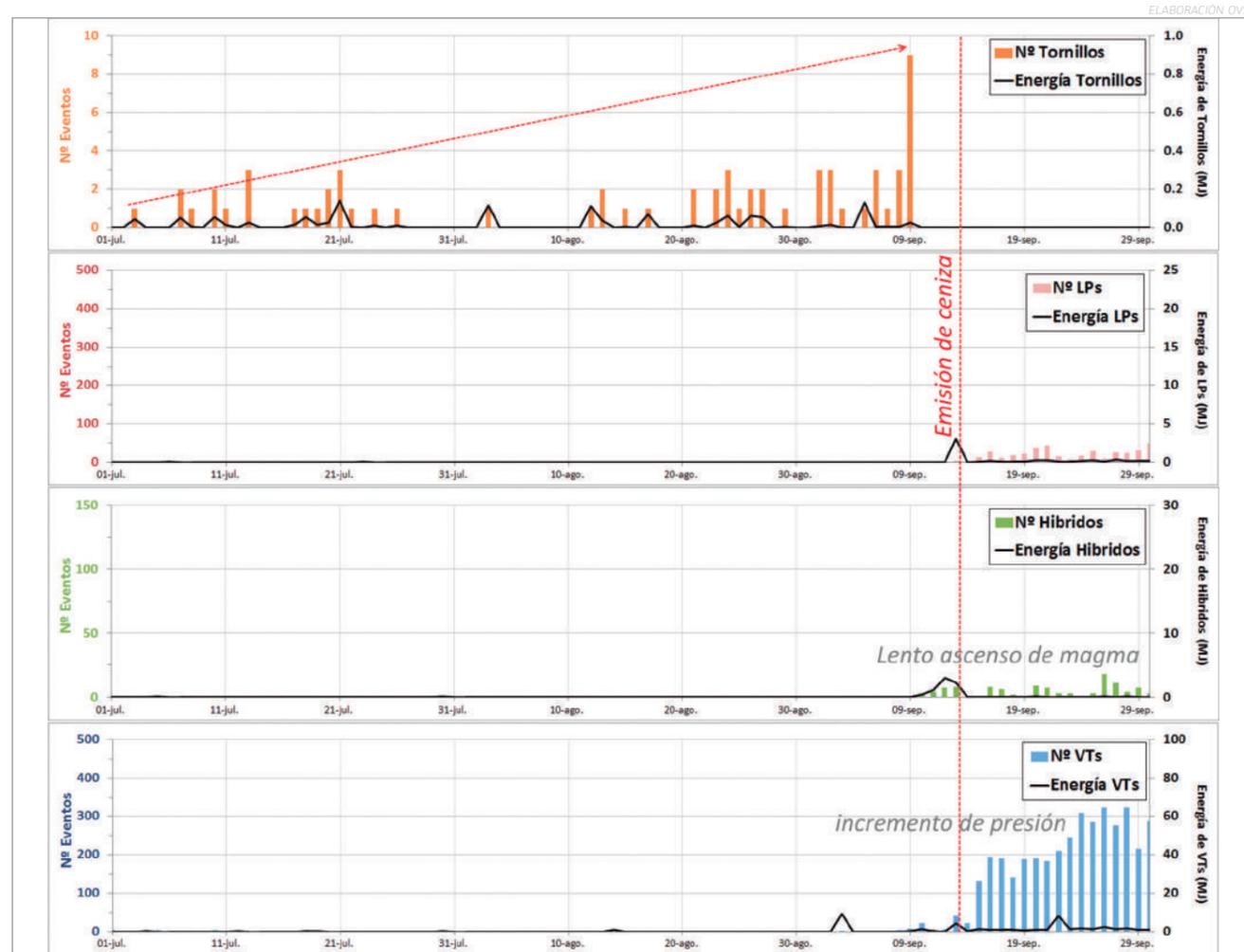


Figura 06.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1 entre el 01 de julio y 30 de septiembre de 2016. Se distingue la aparición de eventos VT, asociados a presión interna, a partir del 09 de septiembre.

En este tercer trimestre (julio–septiembre de 2016), el OVS publicó 6 reportes sobre la actividad del Ubinas (2016_25 - 2016_30). La actividad sísmovolcánica mostró un comportamiento similar al trimestre anterior. Eventos de tipo Tornillo, asociados a presión en cavidades internas, mantuvieron gran actividad en este periodo.

El registro de estos eventos se dio de manera casi exclusiva a lo largo de todo julio, agosto y hasta los primeros días de septiembre, lo cual denotaba un estado de presurización relativamente profundo. El 09 de septiembre se observó un incremento importante de eventos VT (sismos relacionados a fractura por acumulación de presión). En paralelo, los eventos Híbridos aumentaron tanto en número y energía (ver figura 06).

Finalmente, el 13 de septiembre se observó la emisión de ceniza. Asimismo, el sistema MIROVA registró una anomalía térmica de 0.4 Mw el 20 de septiembre. El magma estaba arribando a la superficie en pequeñas cantidades. En este contexto, el OVS advirtió la inminencia de nuevas explosiones acompañadas por la emisión de ceniza. Gases azulinos (gases magmáticos) comenzaron a ser expulsados a través del cráter del Ubinas.



Figura 07.- Gases de coloración azulina comenzaron a apreciarse en el volcán Ubinas con mayor frecuencia. Esta imagen fue capturada el 27 de septiembre en horas de la mañana por nuestro colaborador en Ubinas, Melquiades Álvarez.



Figura 08.- Tal como fue advertido por el OVS, nuevas explosiones con columnas de hasta 2000 m ocurrieron en el volcán Ubinas a partir del 03 de octubre (UTC), expulsando ceniza en dirección noreste, este, sureste y suroeste de este coloso. Estas imágenes fueron capturadas por nuestro colaborador, Melquiades Álvarez.

La actividad del Ubinas en este periodo fue dada a conocer por el Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP a través de 6 reportes técnicos (2016_31 - 2016_36).

Durante este último trimestre del año, se desarrolló la etapa explosiva de una nueva fase eruptiva, iniciada en junio de 2016 (ver figura 05) con el registro de sismos de tipo Tornillo asociados a un estado de presurización interna.

Posteriormente, en septiembre, se observó el incremento en el número y en la energía de sismos de tipo VT, asociados a presión al interior del volcán, y eventos Híbridos (ascenso de magma). Fue el 03 de octubre cuando se produjo una explosión de 0.6 MJ. A lo largo de este mes y noviembre, las tasas de sismos registrados ascendieron a 130 sismos por día. Es así que en noviembre ocurrieron 4 explosiones más, las cuales acumularon 41 MJ de energía.

Finalmente, durante la primera quincena de diciembre, los valores sísmicos disminuyeron considerablemente; no obstante, el OVS no descartó la ocurrencia de próximas explosiones y/o emisiones de ceniza dado que el proceso eruptivo del Ubinas no ha concluido.

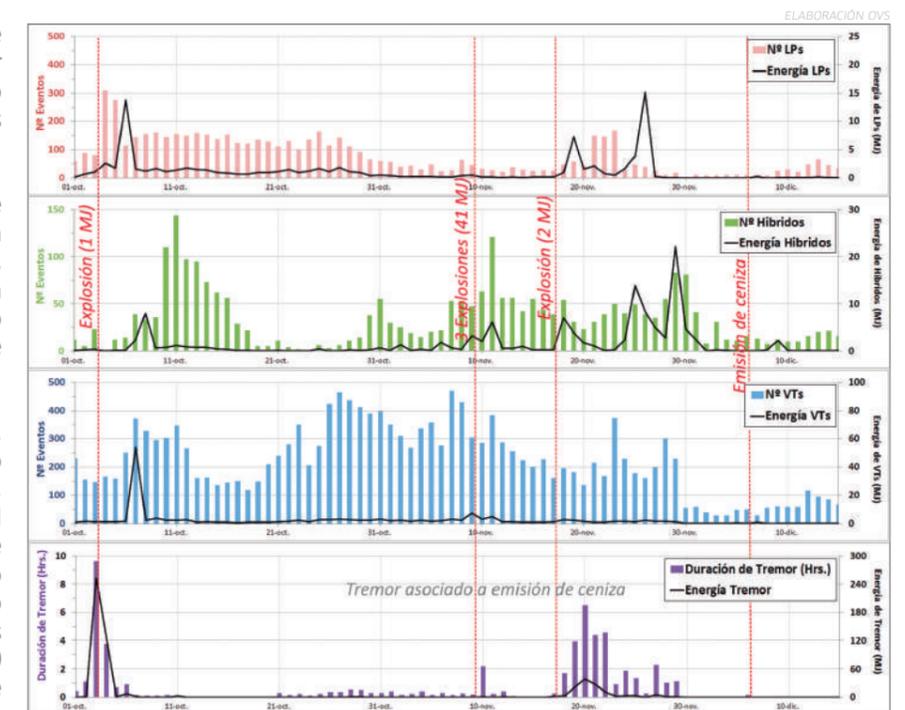


Figura 09.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica UB1 entre el 01 de octubre y 15 de diciembre.

En 2016, el Observatorio cumplió con advertir anticipadamente el inicio de esta nueva fase eruptiva en cada uno de sus reportes publicados. Asimismo, como miembro del Comité Científico de Monitoreo Permanente del volcán Ubinas, elaboró conjuntamente con el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) alertas de dispersión de ceniza que fueron enviadas al Comité de Defensa Civil de este distrito para mitigar daños en la población.

SABANCAYA

“ La sismología volcánica permite dar pronósticos de erupción a mediano y corto plazo. Así, el OVS pudo reportar desde febrero de 2013 las primeras señales sísmicas de ascenso de magma en el Sabancaya, que desembocó en la erupción de noviembre 2016”



Dr. Orlando Macedo
Director del OVS

Introducción

Luego de tres años de intranquilidad volcánica, el volcán Sabancaya inició un nuevo proceso eruptivo. Recordemos que la última actividad eruptiva se desarrolló entre 1990 y 1998. En esa oportunidad, el IGP desplegó en la zona del volcán estaciones sísmicas analógicas y algunas de ellas transmitían sus registros en tiempo real. Basándonos en esa experiencia es posible estimar el tipo de actividad explosiva que se desarrolla desde noviembre de este año hasta el día de hoy. Este proceso mantiene por el momento un comportamiento similar al registrado en la década de 1990.

Desde que inició el actual proceso eruptivo de este coloso, los centros poblados aledaños son testigos presenciales de decenas de explosiones acompañadas de grandes volúmenes de ceniza en dispersión y

columnas eruptivas de más de 4 km que se alzan sobre el cráter.

El Observatorio Vulcanológico de Sur fue capaz de avizorar e informar a la población en general acerca de este proceso eruptivo gracias a sus redes sísmicas. En la actualidad, la red del Sabancaya está constituida por seis estaciones sísmicas modernas, dos de las cuales fueron adicionadas en los últimos meses para mayor eficacia en el monitoreo sísmico. Gracias a ellas, la vigilancia volcánica se desarrolla minuciosamente en el OVS y los resultados de procesamiento y análisis de señales se plasman de manera conjunta mediante los reportes y comunicados emitidos periódicamente por el Comité Técnico-Científico para la Gestión del Riesgo Volcánico de la Región Arequipa.



El volcán Sabancaya, en la provincia de Caylloma en Arequipa, inició su proceso eruptivo el 06 de noviembre de 2016, luego de 18 años.
FOTO OVS

ENERO-MARZO

Durante este primer trimestre de 2016 (enero-marzo), el Observatorio Vulcanológico del Sur publicó 13 reportes acerca de la actividad del volcán Sabancaya (2016_01 - 2016_13). Los valores de sismicidad se mostraron disminuidos respecto al último trimestre de 2015 y no presentaron picos predominantes de actividad. Los eventos LP (Largo Periodo) e Híbridos registraron un promedio de 14 LP/día y 4 Híbridos/día, mientras que la energía se mantuvo en niveles bajos (2 MJ en promedio).

Los eventos VTP o "Volcano-Tectónico Proximales" (menores a 6 km), también se apreciaron muy reducidos, registrando un promedio de 10 VTP/día y una magnitud máxima de 4.0 ML (Magnitud Local) registrada el 29 de enero de 2016. Por su parte, los eventos de tipo Tremor registraron un promedio de 14 TRE/día y un pico importante de 2700 MJ de energía el 28 de enero.

En general, la sismicidad asociada a ruptura de material (VT y VTP) se localizó formando dos agrupaciones sísmicas en el sector noreste y este del cráter del Sabancaya: el primer foco se presentó en dirección Noreste a 14 km del cráter, compuesto por eventos denominados "distales" al estar más allá de los 6 km de distancia del cráter. Se resalta la ocurrencia de un evento importante de 5.4 ML a una profundidad de 7 km el día 20 de febrero a las 02:05 UTC (21:05 Hora Local del 19 de febrero). El segundo foco también se localizó en el sector NE, a menos de 6 km del cráter. Estos eventos son denominados eventos VTP proximales debido a su cercanía al cráter del Sabancaya. En este agrupamiento resaltó el evento de magnitud 4.0 ML, ubicado a una profundidad de 9 km (29/01/2016 a las 16:06 UTC), a solo 5 km de distancia del cráter del volcán.

En total se contabilizaron 2433 VTs, con magnitudes entre 1.5 y 5.4 ML y profundidades que variaron entre 1 y 25 km. Del total de eventos, 288 fueron eventos proximales.

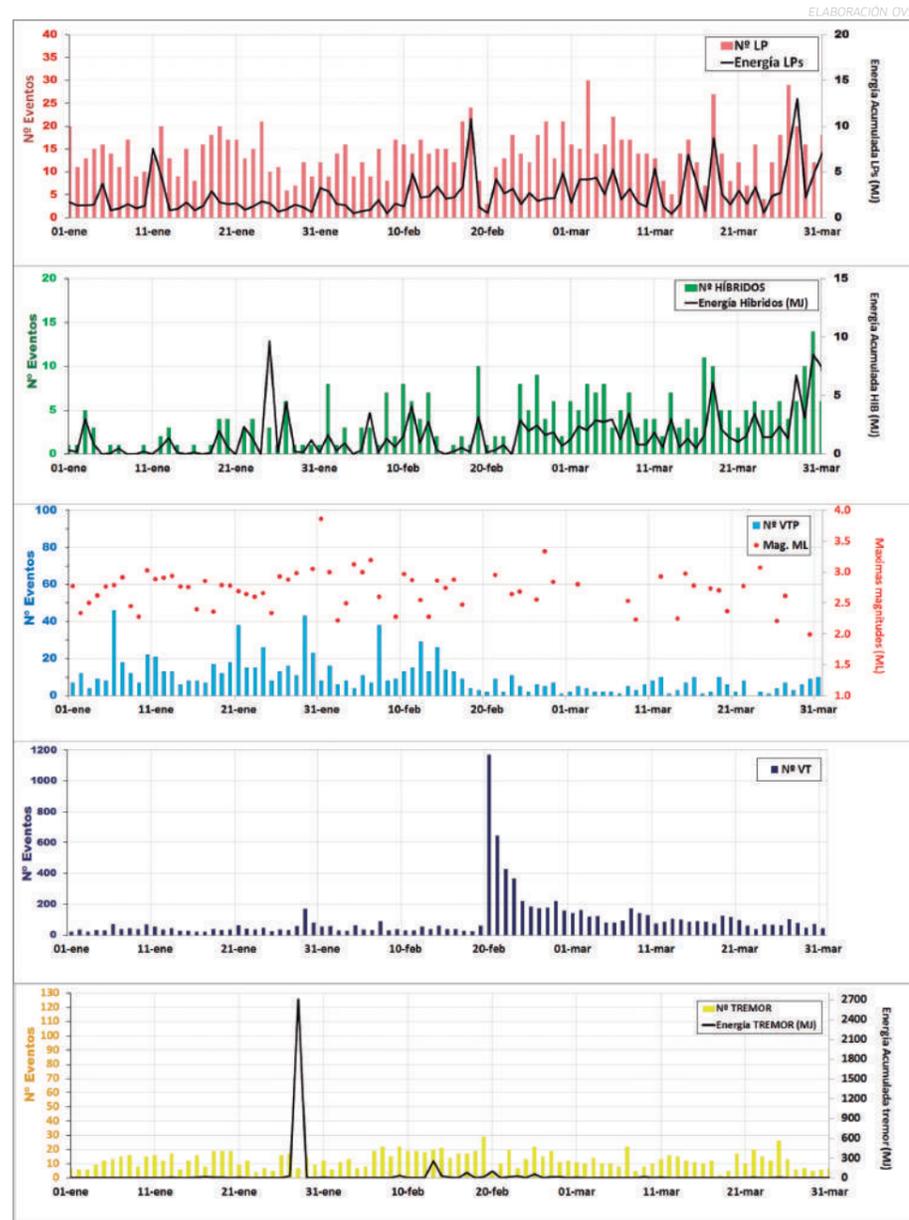


Figura 01.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados entre el 01 de enero y 31 de marzo de 2016 en el volcán Sabancaya.

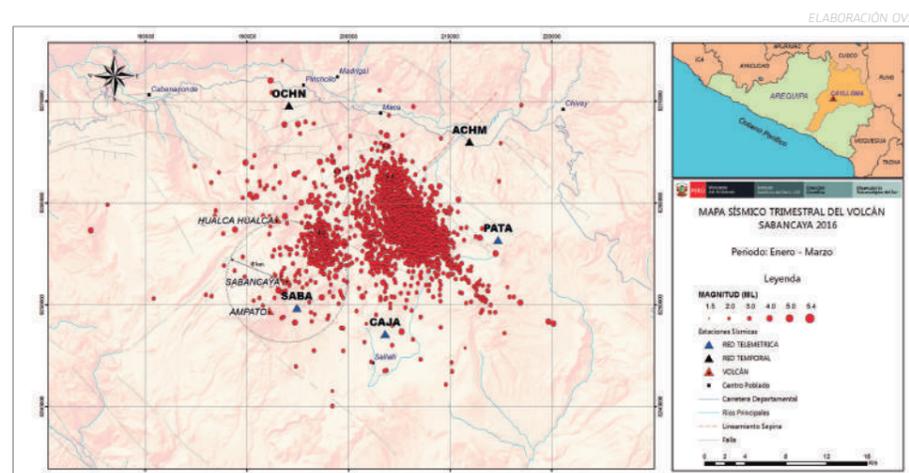


Figura 02.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre enero y marzo de 2016 en el volcán Sabancaya. Se distingue dos focos sísmicos a 6 km y 14 km al noreste del cráter.

ABRIL-JUNIO

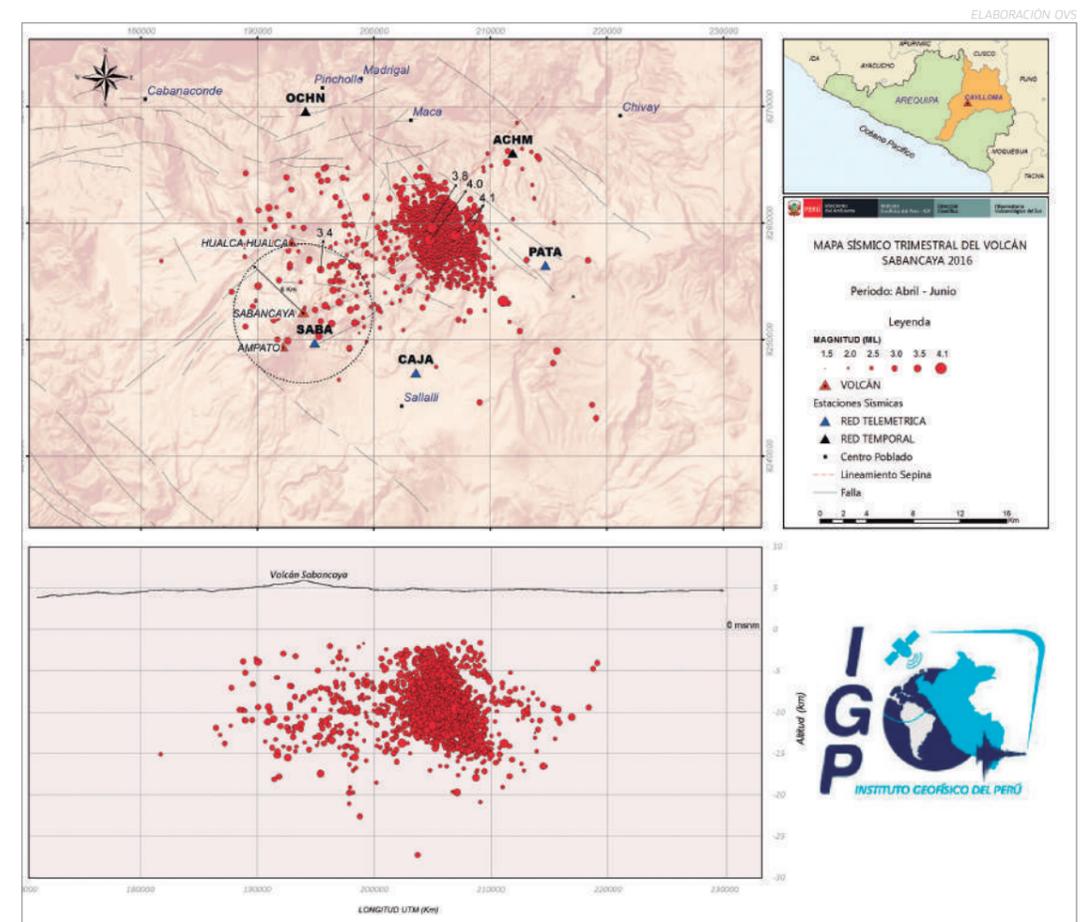


Figura 03.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre enero y marzo de 2016 en el volcán Sabancaya. Se distingue un foco sísmico principal a 14 km al noreste del cráter.

En este segundo trimestre de 2016, la actividad del Sabancaya fue descrita por el OVS en 9 reportes técnicos (2016_14 - 2016_22). Durante este periodo, la actividad sísmica se mantuvo sin variación importante en sus valores (número de sismos y valores de energía) en comparación con el primer trimestre de 2016.

Los eventos LP (Largo Periodo) mostraron valores similares a los vistos entre enero y marzo (13 LPs/día); por otro lado, su energía se mantuvo en niveles bajos. Los eventos de tipo Híbrido experimentaron un incremento sostenido desde el inicio del primer trimestre, alcanzando un pico máximo de hasta 19 HIB el 8 de mayo; no obstante, empezaron a disminuir a partir del mes de junio. Durante este trimestre se registró un promedio de 6 HIB/día; su energía, en tanto, se mantuvo sin cambios importantes y en niveles bajos.

Con respecto a los eventos VTP o "Volcano-Tectónico Proximales", estos disminuyeron en número y magnitud sostenidamente, es decir, los sismos a una distancia menor a 6 km del cráter del volcán dejaron de producirse. Los eventos de tipo Tremor no sufrieron variación y conservaron un promedio de 17 TRE/día y energías bajas.

En la figura 03, se observa que la sismicidad VT (asociada a fractura de rocas), en general, se localizó en un solo foco predominante a 14 km al NE del cráter del volcán, registrándose y calculándose 2 sismos con magnitudes de 4.0 ML y 4.1 ML en el mes de abril, y 1 sismo de 4.1 ML en

el mes de junio, todos ellos ubicados en dicho foco.

Por su parte, los eventos VTP (sismos proximales) fueron escasos durante este trimestre y se mostraron de manera muy dispersa en toda el área del volcán. La máxima magnitud de los VTP registrada en este trimestre fue de 3.4 ML, correspondiente a un sismo ocurrido el 15 de abril localizado a 5 km al N del cráter a una profundidad de 17 km.

En total se contabilizaron 1230 VTs, con magnitudes entre 1.5 ML y 4.1 ML y profundidades que variaron entre 2 km y 20 km. Dentro de todos estos eventos resalta 4 sismos registrados en dirección Noreste, con magnitudes de 3.8, 4.0 y 2 de 4.1 ML.

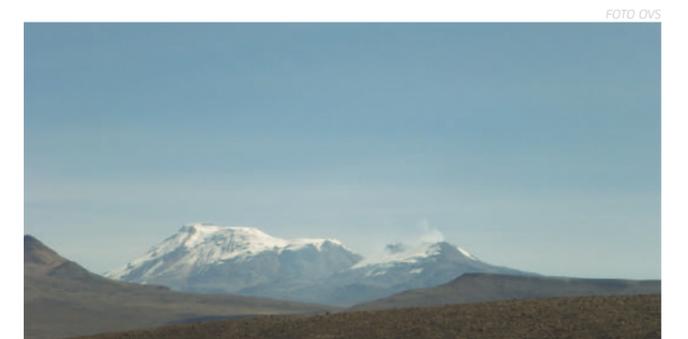


Figura 04.- Imagen del complejo volcánico Ampato, Sabancaya. Las fumarolas en este trimestre oscilaron entre los 200 y 1400 metros sobre el borde del cráter.

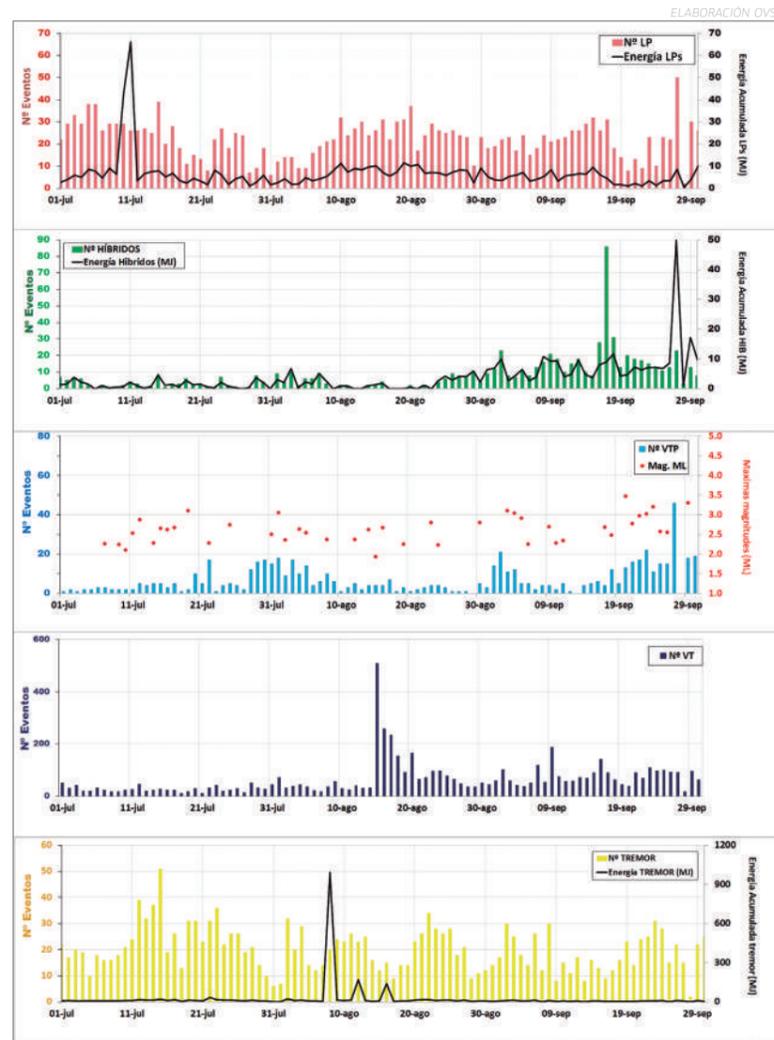


Figura 05.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados entre el 01 de julio y 30 de septiembre de 2016 en el volcán Sabancaya.

La estadística de los eventos sismovolcánicos mostró que los eventos HIB son los sismos que más variación experimentaron. Posterior a la explosión del día 27 de agosto, la actividad de los HIB continuó incrementándose, alcanzando un pico máximo de 93 HIB el 17 de septiembre, para finalmente disminuir. Además, cabe mencionar que el 27 de septiembre se registró un enjambre energético de HIB (50 MJ de energía). En esa misma línea, los eventos LP y TRE experimentaron un incremento, alcanzando promedios de 23 LPs/día y 20 TRE/día en este periodo, respectivamente.

Por otro lado, los eventos VT se incrementaron con respecto al segundo trimestre. Estos se distribuyeron en dos focos predominantes: el primer foco ubicado a 14 km al NE del cráter del volcán, donde destacó un sismo de 4.0 ML registrado el 09 de agosto a las 05:52 UTC (00:52 Hora Local). Dicho foco sísmico mantuvo su actividad desde la segunda semana de febrero de 2016. El segundo foco sísmico se localizó a 25 km al NE del cráter en la zona de Ichupampa. Los eventos de este foco fueron ocasionados por la falla de Ichupampa y fueron sentidos con intensidades de III y IV en los centros poblados de Yanque, Achoma, Lari, Madrigal e Ichupampa, donde se registraron al menos cuatro muertos y cuantiosas pérdidas materiales (fuente Diario El Comercio). En dicho foco destacaron dos sismos principales de 5.3 ML y 4.1 ML, registrados el 15 y 27 de agosto, respectivamente.

El OVS publicó 7 reportes acerca de la actividad del volcán Sabancaya (2016_23 - 2016_29) entre julio y septiembre de 2016. Durante este periodo y de manera general, la actividad sísmica del volcán Sabancaya experimentó un ligero incremento principalmente en el último mes de este trimestre. Dicho incremento se vio reflejado en los promedios de los eventos sismovolcánicos. Los promedios alcanzados fueron: 23 LPs/día (evento Largo Periodo - asociado a movimiento de fluido), 8 HIB/día (eventos Híbrido - asociado a ascenso de magma) y 20 TRE/día (evento Tremor- asociado a paso de fluido). Por otro lado, la energía de estos eventos se mantuvo sin variación, a excepción de los HIB, los cuales sí mostraron un incremento notorio en su energía, alcanzando un pico máximo de 50 MJ. Tal incremento se originó como consecuencia de los enjambres de HIB registrados el 27 de septiembre.

El 27 de agosto de 2016 a las 11:51 UTC (06:51 Hora Local) se registró una nueva explosión de 72 MJ de energía; dicha explosión fue precedida por un incremento en número y energía de eventos HIB. Los eventos VTP o "Volcano-Tectónico Proximal", se incrementaron ligeramente, principalmente en septiembre, alcanzando un promedio de 7 VTP/día.

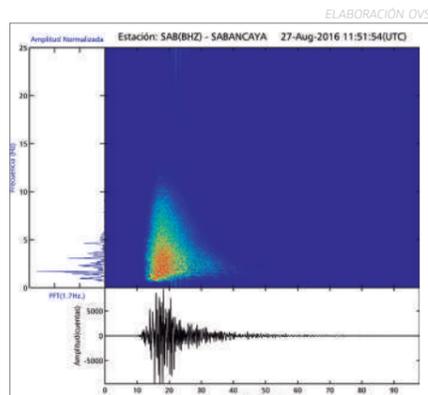


Figura 06.- Espectrograma de la explosión registrada en el volcán Sabancaya el 27 de agosto a las 06:51 Hora Local. Este evento liberó una energía de 72 MJ.

Los eventos VTP proximales, si bien se incrementaron ligeramente en este trimestre, continuaron siendo escasos y se mostraron de manera dispersa en toda el área del volcán. Resaltan dos eventos de magnitudes 3.0 ML y 3.5 ML, registrados el 04 y 20 de septiembre a profundidades de 15 km y 4 km, respectivamente. En total se contabilizaron 2009 VTs, entre magnitudes de 1.0 ML y 5.3 ML y profundidades entre 2 km y 20 km.

Durante este último trimestre del año, el volcán Sabancaya inició una etapa explosiva. En ese contexto, el OVS inició la publicación conjunta de reportes con el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), en su calidad de miembros del Comité Técnico-Científico para la Gestión del Riesgo Volcánico de la Región Arequipa.

Este nuevo proceso eruptivo inició el día 07 de noviembre de 2016 a las 01:40 horas UTC (08:40 Hora Local del 06 de noviembre), registrándose una explosión importante de 3.5 ML de magnitud. Esta explosión marcó el comienzo de una leve fase eruptiva de este volcán.

La actividad sísmica semanas antes de las explosiones mostró un notorio incremento de eventos Híbridos y LPs. Los HIB vinieron ocurriendo desde la primera semana de octubre de 2016, habiendo alcanzado magnitudes de hasta 3.8 ML el día 06 de octubre. Estos sismos Híbridos se tornaron muy energéticos durante la primera semana de noviembre, alcanzando magnitudes entre 3.4 ML y 5.4 ML. Posteriormente, los Híbridos se incrementaron en número, presentando en promedio 14 híbridos/día. Los eventos LPs registraron un pico de 99 LPs el 8 de octubre y un pico de energía de 203 MJ el día 12 de octubre. Seguidamente, entre el 17 de noviembre y el 15 de diciembre, los LPs se incrementaron, alcanzando un promedio de 52 LPs/día con picos de energía de hasta 102 MJ (08 de diciembre).

Los eventos Volcano-Tectónico Proximal, días antes del periodo explosivo, presentaron picos importantes de 95 VTPs el 01 de noviembre; posteriormente, entre el 20 de noviembre y el 15 de diciembre, se observó un incremento sostenido y un pico máximo de 53 VT el día 07 de diciembre.

Los eventos de tipo Tremor se incrementaron en las últimas semanas de este periodo. Resalta un pico importante de 880 MJ de energía el 05 de diciembre.

Finalmente, lo más resaltante en este periodo ha sido la ocurrencia de eventos explosivos. En promedio, se produjeron 39 explosiones/día (entre el 07 de noviembre al 15 de diciembre), presentando un máximo de 63 explosiones el 30 de noviembre.

La última erupción del Sabancaya duró 8 años. El Comité no descarta que este proceso persista en un periodo de tiempo similar.



Figura 07.- Explosiones registradas en el Sabancaya expulsaron ceniza por encima de los 4000 metros de altura. Los profesionales del OVS viajaron inmediatamente para verificar la magnitud de la erupción.

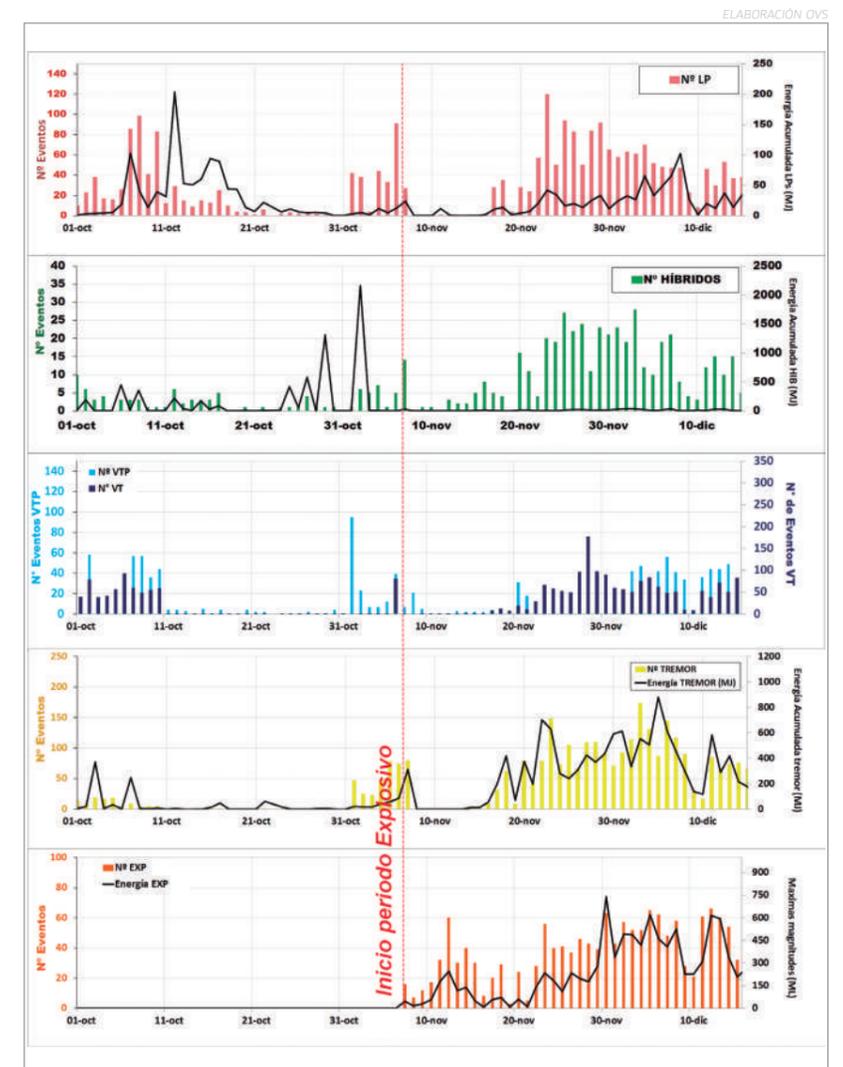


Figura 08.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados entre el 01 de octubre y 15 de diciembre de 2016 en el volcán Sabancaya.

MISTI

“

Es de suma importancia no descuidar la vigilancia del Misti. Arequipa está expuesta a un gran daño de producirse una erupción. En esa línea, es destacable el esfuerzo del OVS de monitorear día a día los sismos que se producen en su interior”



Dr. Anthony Finizola
Universit  de la Réunion
Francia

Introducción

Aproximadamente un mill n de personas viven a la sombra de un importante riesgo volcánico en la segunda ciudad del Perú, Arequipa. Esta ciudad, cuyo centro est  a tan solo 17 km del volcán activo Misti, aparece con un impresionante desnivel de 3500 metros con relación a la cima del volcán. Al pie del flanco norte y noroeste discurre el río Chili seccionando un profundo ca n en donde se han construido las centrales hidroeléctricas de Charcani; asimismo, algunos kilómetros aguas arriba se ubican importantes reservorios (Aguada Blanca y El Frayle) que constituyen la principal fuente de agua para los habitantes de la ciudad de Arequipa y para la agricultura local. También, a proximidades del volcán Misti, a una veintena de kilómetros hacia el sureste, se encuentra la laguna de Salinas que forma parte de la Reserva Nacional Aguada Blanca – Salinas.

La última erupción del Misti data de los años 1440-70

y tuvo un índice de Explosividad Volcánica IEV=2. Si la ciudad de Arequipa hubiera existido en esa época, no hay duda que la destrucción habría sido notable.

Ante tal realidad, el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) ha puesto como prioridad la vigilancia de este coloso. Una moderna red de 6 estaciones s micas toma el pulso del volcán las 24 horas del día, los 365 días del año. Desde octubre de 2005 en que se puso en funcionamiento la red de vigilancia, el Misti ha mostrado tener intensa actividad s mica superficial. Afortunadamente, hasta hoy nunca se han presentado signos de ascenso de magma, pero si alguna vez ocurriera, los sismómetros del OVS lo detectarán y se podrá dar la alerta probablemente con días de anticipación. Mientras tanto, todo habitante de esta volcánica tierra tiene el deber de prepararse para esos tiempos, pues la pregunta no es si el Misti erupcionar  sino cuándo lo har .



*El volcán Misti, ubicado a solo 17 km del centro de la ciudad de Arequipa, es el macizo más vigilado de todo el país.
FOTO OVS*



Figura 01.- Evolución trimestral y anual de la actividad del volcán Misti. Se aprecia el desempeño de los eventos Volcano-Tectónicos, Largo Periodo, Tremores y la evolución de la energía liberada.

La actividad del volcán Misti entre enero y marzo de 2016 fue reportada por el Observatorio Vulcanológico del Sur por medio de 3 reportes técnicos mensuales (2016_01 - 2016_03), todos ellos enviados al gobierno regional de Arequipa, municipalidades distritales e instituciones vinculadas a la gestión del riesgo de desastres.

En este primer trimestre (enero – marzo de 2016), el Misti presentó una ligera disminución en la sismicidad respecto al trimestre anterior (octubre-diciembre de 2015). El registro de eventos Volcano-Tectónicos, asociados a fractura de rocas en el interior del volcán, mostró promedios de 20, 16 y 23 VT/día entre enero y marzo, respectivamente. El evento VT más energético ocurrió el 05 de febrero a las 11:57 UTC (06:57 Hora Local), con una magnitud de 1.9 ML y fue localizado a 2.5 km de profundidad por debajo del cráter. Cabe resaltar la ocurrencia de un enjambre sísmico importante el día 03 de marzo, en el cual ocurrieron 82 eventos de ruptura.

relacionados al movimiento de fluidos, estos se mantuvieron en niveles bajos. El día con mayor ocurrencia de LPs fue el 03 de marzo, registrándose hasta 5 eventos. La actividad Tremórica, por su parte, presentó un incremento importante en su actividad, sobre todo los días 23, 24 y 25 de febrero, llegando a tener el mayor de ellos una duración de 21 minutos y una energía de 17 MJ (Megajoules).

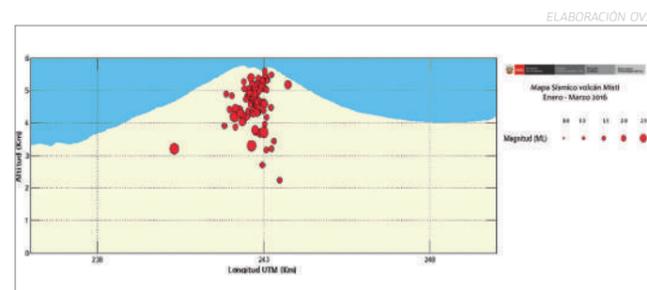


Figura 02.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre enero y marzo de 2016 en el volcán Misti.

En cuanto a los sismos de Largo Periodo (LP),

Durante este trimestre, el OVS publicó 3 reportes técnicos mensuales (2016_04 - 2016_06), explicando al detalle la actividad sismovolcánica del Misti. En este periodo (abril-junio de 2016), la actividad volcánica presentó un comportamiento similar al trimestre anterior.

Los eventos Volcano-Tectónicos registraron promedios de 24, 15 y 17 eventos por día entre abril, mayo y junio, respectivamente. El sismo VT más energético (2.5 ML) ocurrió el 25 de abril a las 08:48 UTC (03:48 Hora Local) y fue localizado a 1 km de profundidad por debajo del cráter. Asimismo, el enjambre sísmico más importante tuvo lugar el 05 de abril, en donde ocurrieron 114 sismos VT.

Con relación a los eventos de Largo Periodo, no se apreció mayor variación con respecto a lo registrado entre enero y marzo de 2016. Su tasa de ocurrencia diaria fue de un evento LP por día en este trimestre. Igualmente, la actividad del Tremor no evidenció mayores cambios a lo largo de estos tres meses. Los días 26 de mayo y 05 de junio se registraron cinco casos representativos consistentes en el tiempo, con duraciones menores a 10 minutos y energías de hasta 1 MJ.

Por otro lado, el OVS emprendió entre el 07 y 08 de abril una nueva jornada de campo en el volcán Misti, esta vez para realizar nuevas mediciones del Potencial Espontáneo. Los registros fueron efectuados en una línea de trabajo de más de 5 km de longitud, con orientación noreste-suroeste. El Ing. Riky Centento y el Téc. Rolando Chijcheapaza tuvieron a su cargo este trabajo. Los estudios de PE son empleados por el OVS para identificar perturbaciones en el sistema hidrotermal del Misti y anomalías producidas por el ascenso de magma.



Figura 03.- Especialistas del OVS realizaron mediciones del Potencial Espontáneo en una línea de trabajo de más de 5 km de longitud en el volcán Misti.

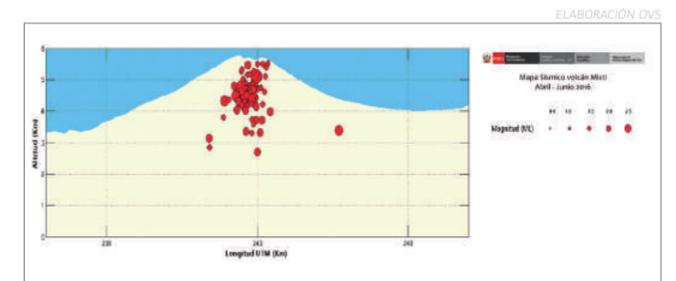


Figura 04.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre abril y junio de 2016 en el volcán Misti.



Figura 05.- Evolución trimestral y anual de la actividad del volcán Misti. Se aprecia el desempeño de los eventos Volcano-Tectónicos, Largo Periodo, Tremores y la evolución de la energía liberada.

JULIO-SEPTIEMBRE

En el tercer trimestre de 2016, el OVS publicó 3 reportes mensuales (2016_07 - 2016_09) para informar acerca de la actividad del volcán Misti. En líneas generales, la actividad sismovolcánica no registró mayor cambio en comparación al trimestre anterior.

La tasa promedio de eventos Volcano-Tectónicos en julio, agosto y septiembre fue de 15, 19 y 22 sismos por día, respectivamente. El 23 de agosto se registró el evento VT más energético del trimestre, a las 00:30 UTC (18:30 Hora Local del 22 de agosto), con una magnitud de 1.8 ML y fue localizado a 1.6 km por debajo del cráter del Misti. Asimismo, el enjambre sísmico más importante tuvo lugar el 02 de septiembre, fecha en la cual ocurrieron 73 eventos de ruptura.

La actividad de los eventos de Largo Periodo, vinculados al movimiento de fluidos, no ha mostrado mayor cambio con relación a lo visto entre abril y junio. Su tasa de ocurrencia diaria se mantuvo por debajo de 5 LPs/día. La jornada con mayor ocurrencia de eventos de Largo

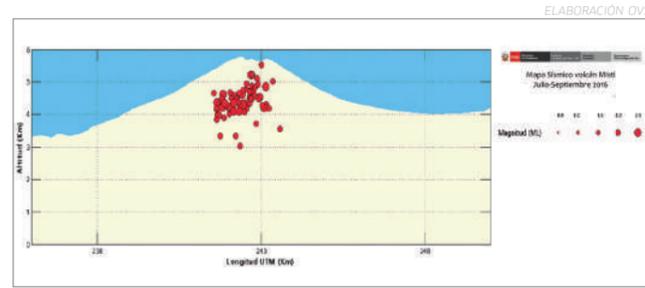


Figura 06.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre julio y septiembre de 2016 en el volcán Misti.

Periodo fue el 12 de julio, con 10 sismos.

Por otro lado, el registro de eventos de tipo Tremor se mantuvo en un nivel bajo. El 03 de agosto fue el día con mayor actividad, con ocho casos representativos, todos con duraciones menores a 10 minutos y energías inferiores a 1 MJ.

OCTUBRE-DICIEMBRE

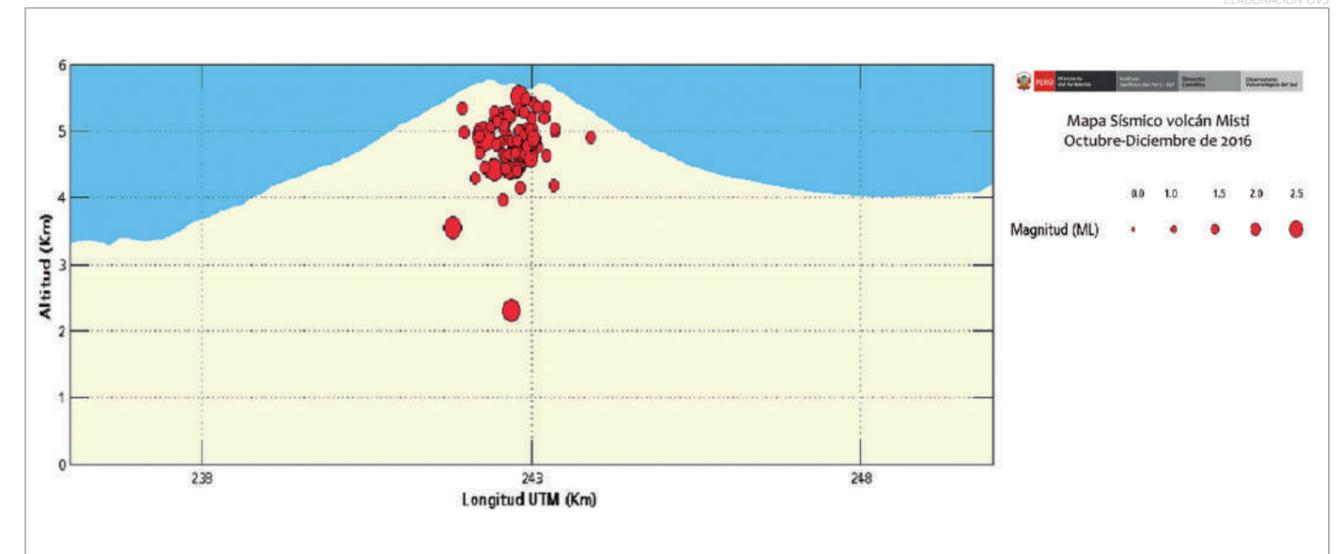


Figura 08.- Mapa de localización de eventos de tipo Volcano-Tectónico registrados entre octubre y diciembre de 2016 en el volcán Misti.

El OVS publicó 3 reportes técnicos mensuales (2016_10 - 2016_12) acerca de la actividad del Misti entre octubre y diciembre, la misma que no mostró mayor variación con relación a lo visto a lo largo de los primeros tres trimestres de 2016.

Durante este periodo, la actividad sismovolcánica del Misti continuó en niveles bajos. Los eventos Volcano-Tectónicos presentaron valores promedio de 11, 17 y 17 sismos por día en octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. El comportamiento del Misti, tal como viene siendo observado desde el año 2005, muestra predominancia de este tipo de eventos.

El sismo de mayor magnitud en esta etapa de análisis fue registrado el 04 de octubre a las 10:25 UTC (05:25 Hora Local), de 2.3 ML. Este evento fue localizado a 1 km por debajo del cráter del Misti. Por otra parte, el enjambre sísmico más importante se presentó el 12 de noviembre, día en el que ocurrieron hasta 69 sismos de fractura.

La actividad de los sismos de Largo Periodo, relacionados a movimiento de fluidos, fue escasa. Un aspecto resaltante en este periodo es el registro de eventos de tipo Tornillo (vinculados a presurización en cavidades), los días 17 de octubre y 21 de noviembre,



Figura 09.- Evolución trimestral y anual de la actividad del volcán Misti. Se aprecia el desempeño de los eventos Volcano-Tectónicos, Largo Periodo, Tremores y la evolución de la energía liberada.

con energías de 11 MJ y 0.01 MJ. Asimismo, se apreciaron sismos Híbridos relacionados al ascenso de magma, con una energía de 0.003 MJ. Pese a ello, el OVS no ha observado que estos eventos hayan incrementado sus valores en el transcurso del tiempo, lo cual descarta una variación en el comportamiento habitual del Misti.

Finalmente, en este 2016, los resultados de monitoreo térmico efectuado por el sistema MIROVA y de gases realizado por el satélite "EOS-Aura" GSDM-NASA, no mostraron anomalías ni variación en los niveles de SO₂ en el Misti.

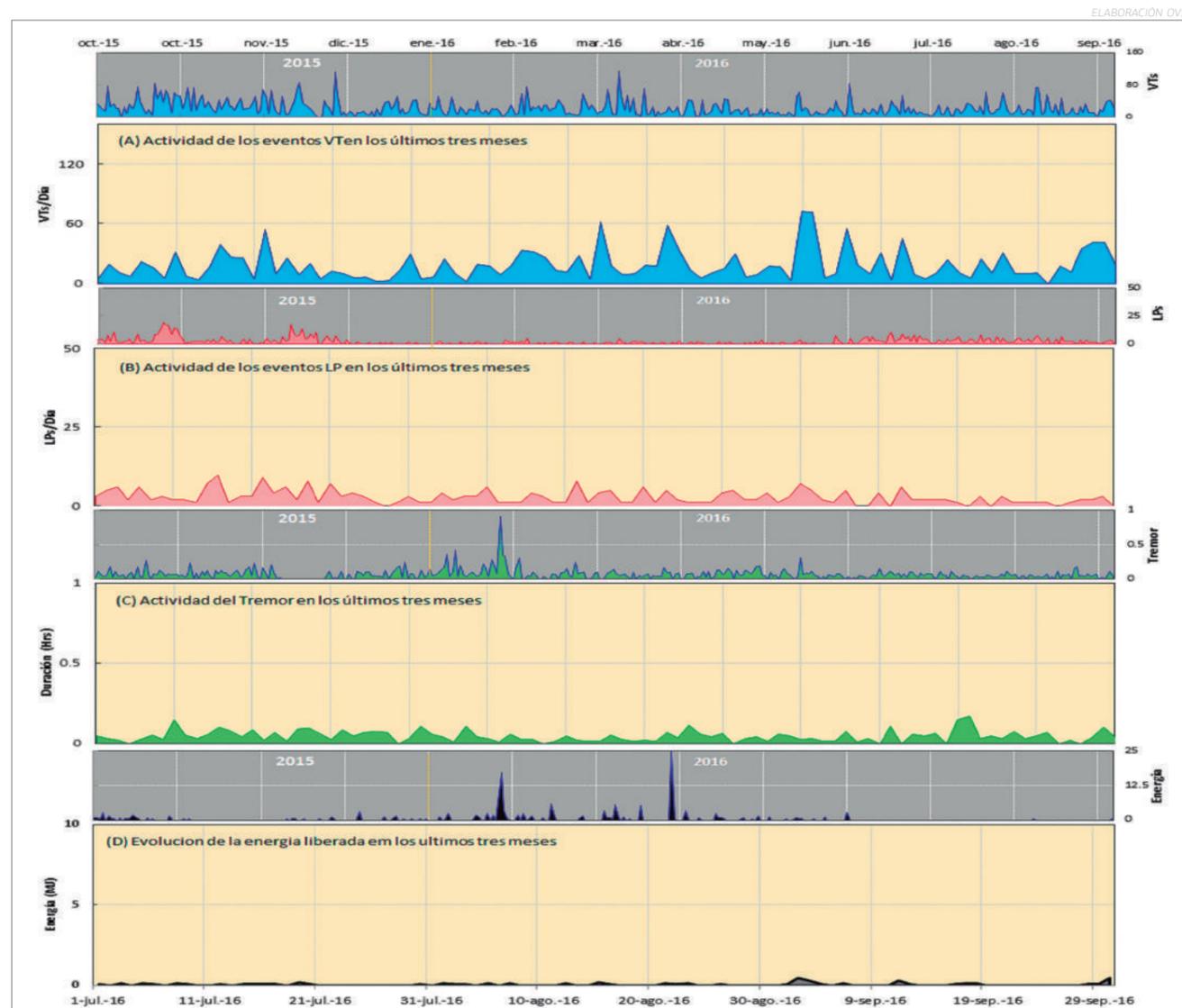


Figura 07.- Evolución trimestral y anual de la actividad del volcán Misti. Se aprecia el desempeño de los eventos Volcano-Tectónicos, Largo Periodo, Tremores y la evolución de la energía liberada.

TICSANI

“ En el tiempo que lo venimos monitoreando, el Ticsani ya ha dado muestras que no está del todo dormido. Aunque poco conocido, dará que hablar en un futuro cercano. Nuestra misión en el IGP es contribuir en la alerta para proteger a las poblaciones vecinas”



Dr. José Macharé
Director Científico
del IGP

Introducción

El volcán Ticsani es uno de los volcanes activos del sur Perú y pertenece a la Zona Volcánica Central de los Andes, dentro del grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani. El Observatorio Vulcanológico del Sur monitorea ininterrumpidamente este volcán desde 2014. A pocos kilómetros de este macizo se encuentran centros poblados importantes como Calacoa y Carumas, de ahí la importancia de la vigilancia permanente que realiza el OVS.

Actualmente, este volcán presenta una actividad sísmica persistente. Ya en 2014 se observaron sismos superficiales localizados próximos al volcán Ticsani; también fue observable la aparición de nuevas agrupaciones de sismos en esta región en los años siguientes, expresados principalmente en forma de enjambres sísmicos. Finalmente, fue posible observar sismos relacionados al movimientos de

magma registrados hasta decenas de kilómetros, captados por las redes sísmicas de los volcanes Ubinas y Sabancaya.

La instrumentación sísmológica de última generación desplegada en esta región consta de cuatro estaciones sísmicas que transmiten datos en tiempo real, permitiendo el monitoreo constante de este coloso. Los datos sísmicos de esta red han permitido ahondar en el conocimiento de la actividad sismovolcánica y su relación con su entorno magmático e hidrotermal.

La información sísmica recabada durante las campañas sísmicas y la red telemétrica es invaluable, y construye la línea base a partir de la cual podremos anticipar cualquier variación en el comportamiento del Ticsani que pueda afectar el entorno sociocultural de la zona de estudio.



*Domo reciente del volcán Ticsani, ubicado a 60 km de la ciudad de Moquegua.
FOTO OVS*

ENERO-MARZO

Entre enero y marzo, el Observatorio Vulcanológico del Sur publicó 3 reportes mensuales acerca de la actividad del volcán Ticsani (2016_01 - 2016_03). La actividad sísmica relacionada a fractura de rocas registró 13 enjambres sísmicos con numerosos eventos VT, cuya tendencia graficó un incremento respecto al trimestre anterior. La tasa promedio fue de 167 VT/día, alcanzando un pico máximo de 1253 sismos el día 30 de marzo.

El análisis detallado de la sismicidad registrada por la red telemétrica Ticsani nos ha permitido identificar sismos de tipo Híbrido desde diciembre de 2015. El evento más energético de este tipo fue registrado el día 10 de febrero a las 22:14 UTC (17:22 Hora Local), con 22 MJ de energía. Algunos de estos eventos fueron localizados por debajo del domo reciente del volcán Ticsani. Este tipo de sismicidad indica movimiento de magma al interior de una cámara magmática observándose un incremento en su ocurrencia en el mes de marzo.

Respecto a los eventos de baja frecuencia (relacionados al paso de fluidos), estos presentaron niveles bajos con una tasa promedio de 1 LP/día. Del mismo modo, los eventos de tipo Tremor fueron escasos, con una tasa promedio de 2.3 min/día.

En este trimestre fueron localizados mediante cuatro estaciones un total de 1164 eventos sísmicos. Asimismo,

estos presentaron magnitudes entre 0.8 ML y 4 ML, estando distribuidos entre 2 km y 13 km de profundidad respecto al domo reciente del volcán Ticsani. Los sismos localizados se concentraron principalmente bajo el volcán, con tres clústeres distribuidos de la siguiente manera: el primero se ubicó a 3.5 km al NO del volcán, una segunda agrupación a 5 km al E del volcán y, finalmente, una agrupación a 12 km al SE del macizo volcánico. Es importante mencionar que el día 30 de marzo se registraron sismos de hasta 4.0 ML con intensidades de II y III sentidos por poblaciones aledañas como Calacoa y Soquesane.

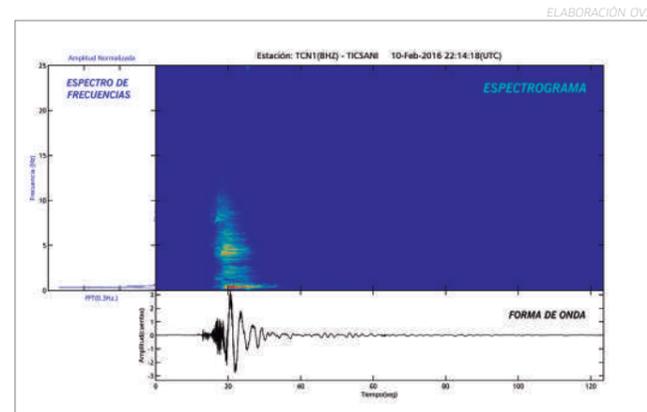


Figura 01.- Sismo de tipo Híbrido registrado el 10 de febrero a las 22:14 UTC. Este evento, de 22 Megajoules de energía, se localizó debajo del domo reciente del Ticsani.

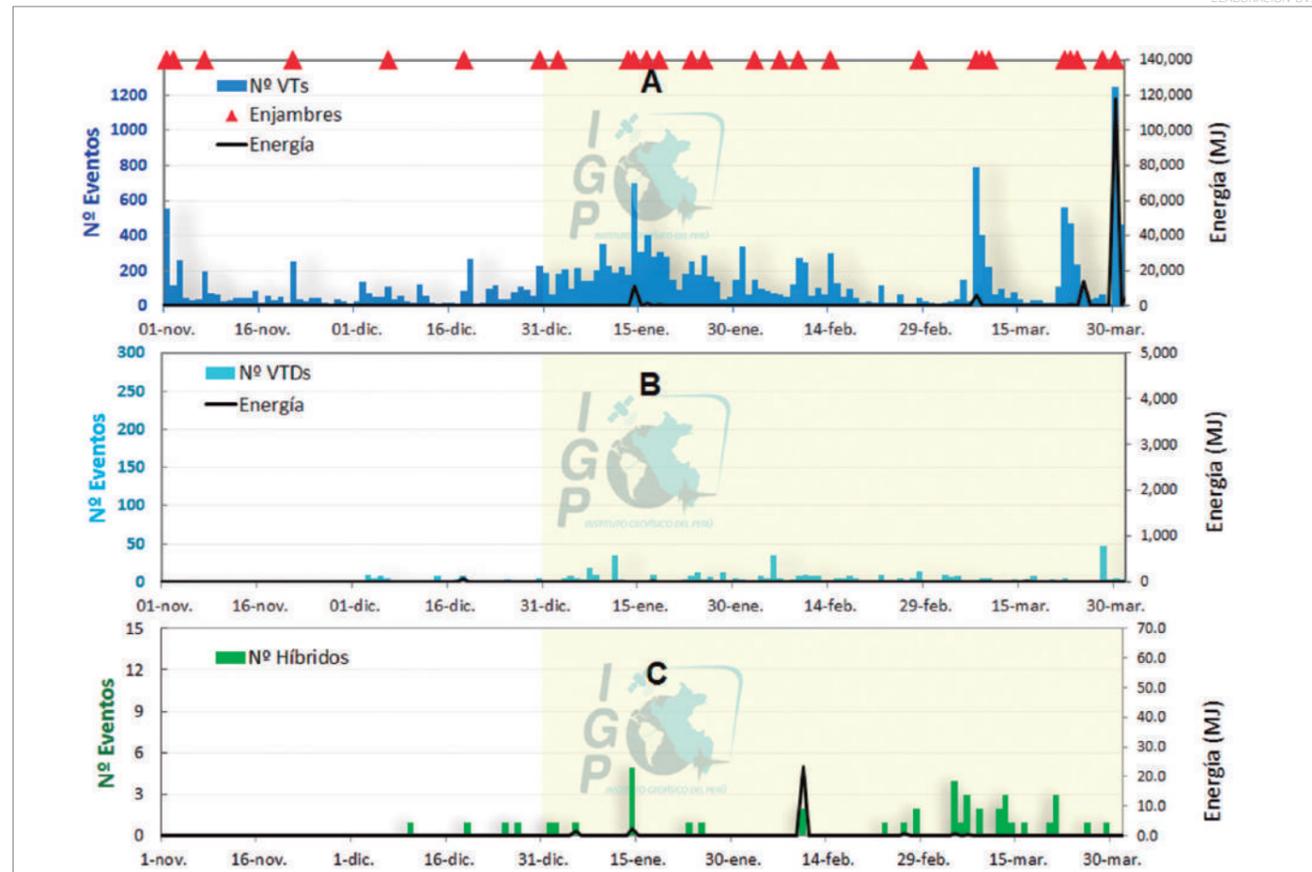


Figura 02.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica TCN1 entre el 01 de noviembre de 2015 y 31 de marzo de 2016. La parte sombreada de amarilla corresponde al primer trimestre de 2016.

ABRIL-JUNIO

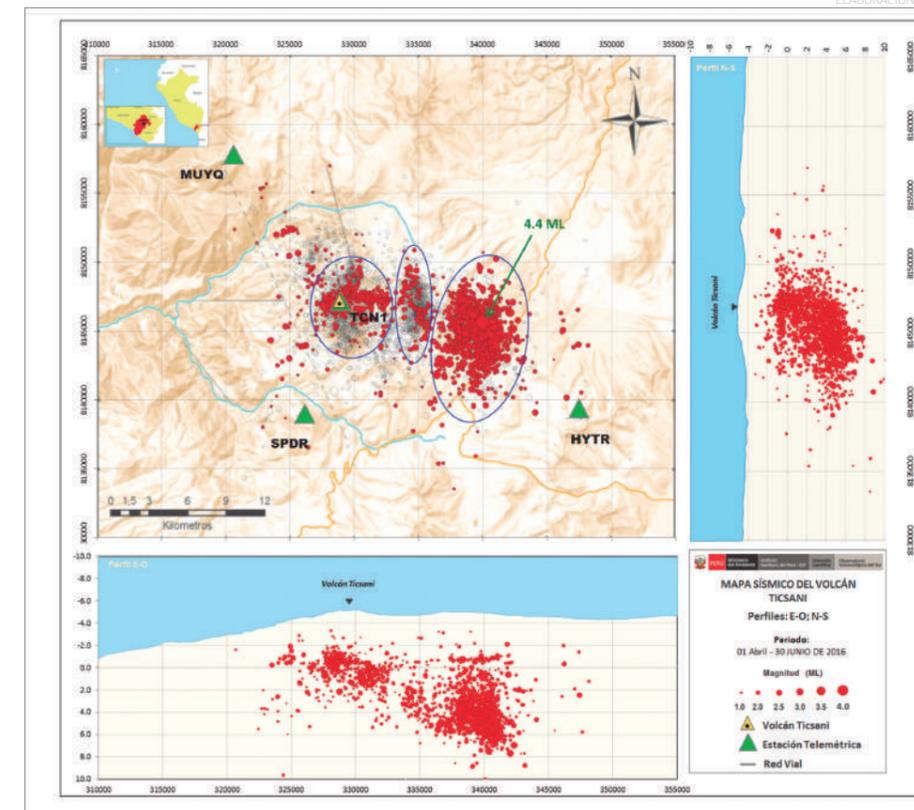


Figura 03.- Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad registrado en la región del volcán Ticsani entre el 01 de abril y 30 de junio de 2016. Se distingue claramente tres agrupaciones de eventos sísmicos relacionados a fractura de rocas.

Durante el segundo trimestre de 2016, el OVS informó la actividad del volcán Ticsani mediante 4 reportes técnicos (2016_04 - 2016_07). En este periodo se observó el incremento y predominio de sismos de fractura distales (VTD) en la región adyacente al macizo volcánico.

La actividad sísmica de tipo VT próxima al domo reciente (menos de 6 km), registró un pico de sismicidad el 26 de mayo con 320 eventos; sin embargo, a lo largo de este periodo se observó una tasa promedio de 55 VT/día. Se produjeron también tres enjambres de sismos VT.

A lo largo de este trimestre se distinguieron numerosos sismos distales. El 02 de junio se observaron alrededor de 1211 eventos, lo cual generó que el promedio de este tipo de eventos fuera de 70 VTD/día en este trimestre. Pese a que estos sismos fueron disminuyendo en el tiempo, no dejaron de ser percibidos por las estaciones del OVS en 2016. Del mismo modo, el análisis de la sismicidad permitió identificar sismos de tipo Híbrido relacionados a movimiento de magma, registrándose hasta 22 eventos de baja energía (menor a 2 MJ).

Los eventos de tipo Tremor se presentaron en números reducidos (0.6 min/día); sin embargo, el 01 de abril tuvo lugar un evento de 4 MJ de energía y 64 segundos de duración. Los eventos de baja frecuencia (relacionados al paso de fluidos) presentaron niveles bajos, registrándose solamente 17 eventos de energía menor a 1 MJ.

Durante este periodo se localizaron un total de 1957 sismos relacionados a fractura de rocas, con una magnitud local máxima de 4.4 ML registrada el 01 de junio a las 19:01

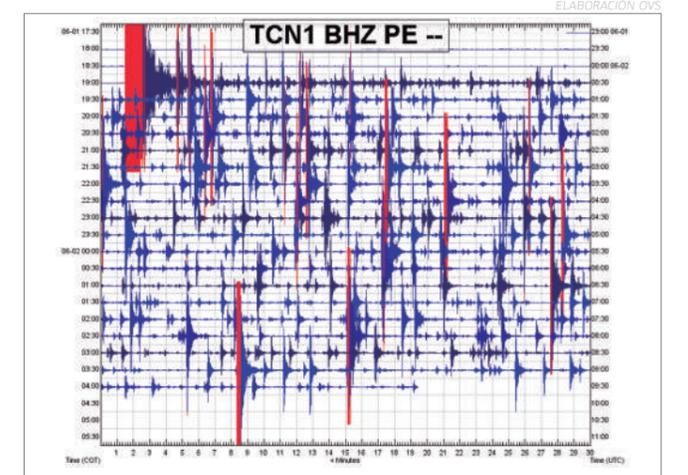


Figura 04.- Enjambre de sismos VTD registrados el 02 de junio de 2016.

(Hora Local) y ubicado a 11 km al SE del volcán Ticsani. Este evento fue percibido por pobladores asentados en los distritos cercanos (intensidad IV), entre otros eventos de menor intensidad.

En la distribución epicentral y en profundidad se identificaron tres agrupaciones de sismos: una primera muy próxima al volcán Ticsani, extendiéndose al este y oeste del macizo con profundidades que alcanzaron los 9.5 km; una segunda agrupación constituida por un menor número de eventos, ubicada a 6 km al este del volcán y, finalmente, la tercera agrupación de sismos distales situada a 10 km al este del Ticsani, donde se concentraron la mayor cantidad de sismos, los mismos que alcanzaron los 15.4 km de profundidad.

El OVS publicó entre julio y septiembre 6 reportes sobre la actividad del volcán Ticsani (2016_08 - 2016_13). En líneas generales, su sismicidad disminuyó en comparación a los trimestres anteriores. Como es ya habitual en este volcán, continuaron predominando los eventos VT, relacionados a fractura de rocas.

La actividad sísmica VT próxima al domo reciente (menos de 6 km) presentó un promedio diario de 19 VT/día, observándose un mayor registro el día el 28 de julio con 81 eventos. Asimismo, la actividad de sismos de fractura distales (VTD) mantuvo un promedio diario ligeramente mayor a los VT, con 24 VTD/día, registrándose hasta 261 eventos el 11 de julio. En este periodo se pudo observar la ocurrencia de cuatro enjambres sísmicos, entre ellos el enjambre del 28 de julio, con 81 sismos próximos al volcán Ticsani. La ocurrencia de estos enjambres sísmicos viene siendo una secuencia sísmica característica en la zona del volcán Ticsani.

La actividad sísmica de tipo Tremor se caracterizó por ser de corta duración y baja energía (menor a 1 MJ). No obstante, presentó un ligero incremento en las últimas dos semanas de septiembre, llegando a registrarse hasta 8 minutos el día 21 de este mes.

Por otro lado, continuó observándose sismos de tipo Híbrido, pero de manera esporádica. Según los análisis sísmicos, durante este periodo se registraron un total de 16 eventos. El día de mayor ocurrencia fue el 04 de septiembre, donde se observaron hasta cuatro de estos eventos de baja energía (menos de 1 hz).

En los 92 días de este trimestre se localizaron un total de 766 sismos relacionados a fractura de rocas, con una magnitud local máxima de 3.8 ML, registrada el 11 de julio a las 22:01 UTC (17:01 Hora Local) y ubicado a 15 km al ESE del volcán Ticsani. La mayoría de estos sismos fueron localizados durante el mes de julio.

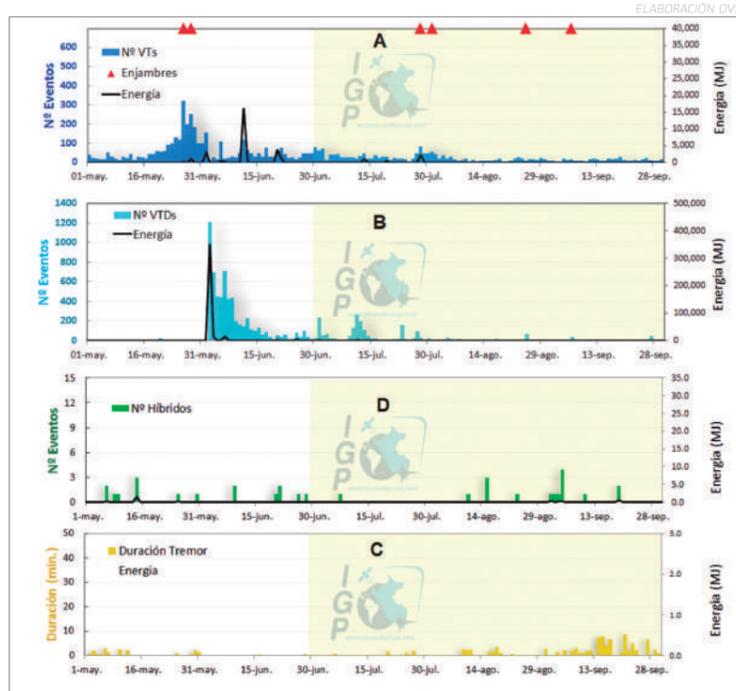


Figura 05.- Número (barras de color) y energía (línea negra) de sismos para los principales eventos volcánicos registrados por la estación telemétrica TCN1 entre el 01 de mayo y 30 de septiembre de 2016. La parte sombreada de amarilla corresponde al tercer trimestre de 2016.

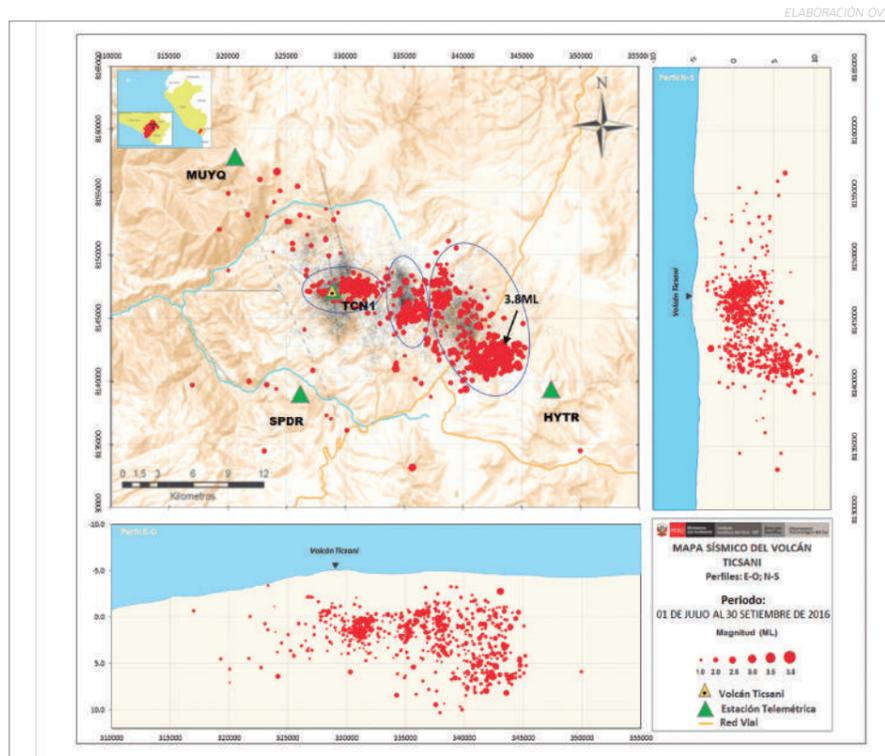


Figura 06.- Mapa de distribución en superficie y en profundidad de sismos de fractura registrados entre el 01 de julio y 30 de septiembre de 2016 en el volcán Ticsani. Persisten las 3 agrupaciones de sismos identificadas en el trimestre anterior.

En la distribución epicentral y en profundidad se pudo identificar tres agrupaciones de sismos: la primera agrupación muy próxima al volcán Ticsani, extendiéndose hacia el Este; los sismos se concentraron a profundidades próximas a los 7 km por debajo del cráter reciente; se observó también una segunda agrupación ubicada a 6 km al este del volcán y, finalmente, la tercera agrupación compuesta por sismos más alejados del Ticsani, situada a 12 km del domo reciente. Cabe destacar que la sismicidad en esta zona se registró desde el segundo trimestre de 2016.

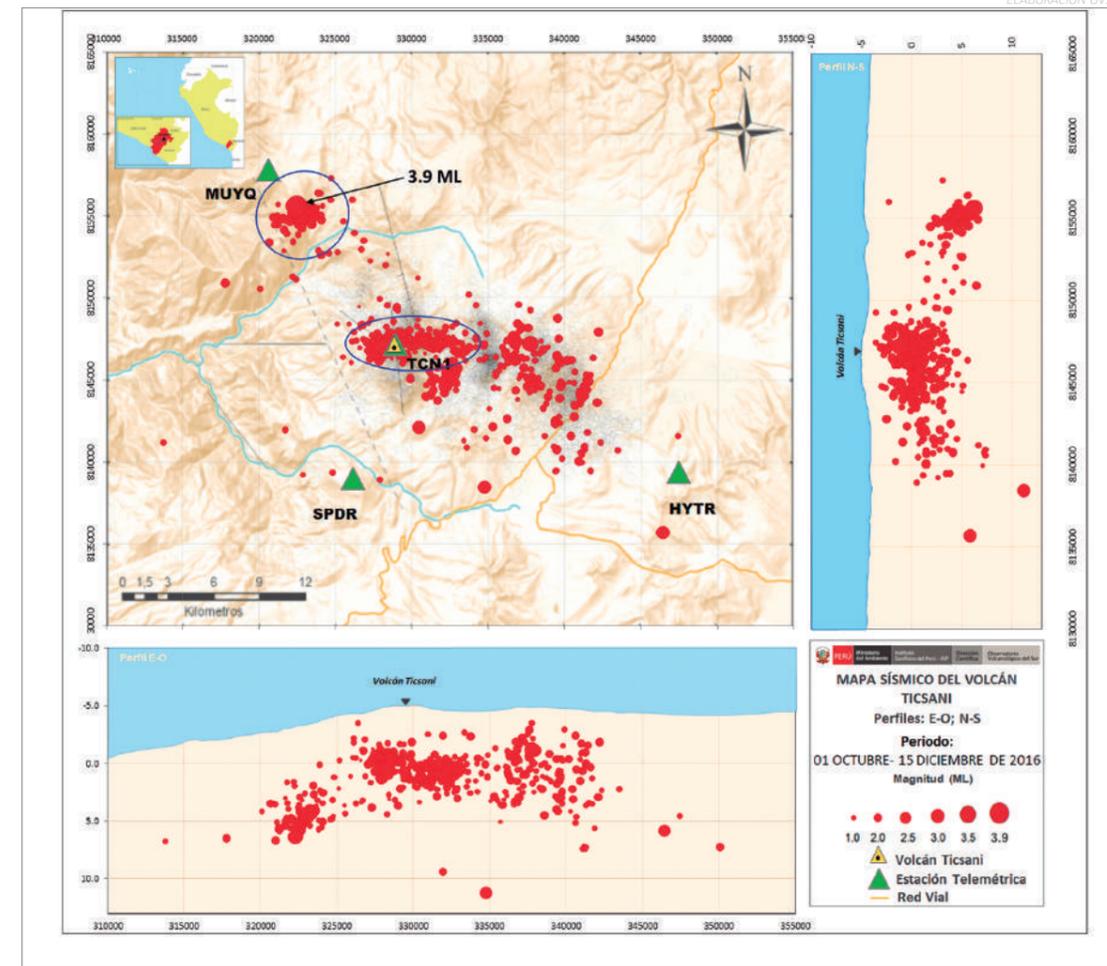


Figura 07.- Mapa de distribución en superficie y en profundidad de sismos de fractura registrados entre el 01 de octubre y 15 de diciembre de 2016 en el volcán Ticsani. Se distingue la nueva agrupación de sismos localizada a 11 km al NO del domo reciente de este coloso.

La actividad del Ticsani durante el cuarto trimestre de 2016 fue descrita por el OVS en 7 reportes técnicos (2016_14 - 2016_20). Con relación a los sismos de tipo VT próximos al volcán Ticsani (menos de 6 km del cráter), se apreció un ligero incremento en su promedio, pasando de 19 VT/día (tercer trimestre) a una tasa de 21 VT/día. Los sismos Volcano-Tectónico Distales (VTD) presentaron una disminución en su tasa promedio (10 VTD/día). A pesar de la baja tasa de sismicidad, los sismos de fractura continuaron siendo la actividad sísmica predominante en esta región.

Los eventos de tipo Híbrido siguieron registrándose, pero de manera muy esporádica y con una muy baja energía (menor a 1 MJ). Respecto a los eventos de tipo Tremor, se produjo un ligero incremento con una tasa de 3 min/día; sin embargo, fueron eventos poco energéticos (menor a 1 MJ).

En la distribución espacial de los sismos de tipo VT, relacionados a fractura de rocas, se distinguió una nueva agrupación a 11 km al NO del volcán Ticsani y próxima a la estación MUYQ. También se distinguió una agrupación próxima al domo reciente, así como sismos dispersos al E y SE de este macizo. Los sismos alcanzaron profundidades de hasta 17 km. Los eventos destacados en este periodo alcanzaron magnitudes de 3.5 ML y 3.9 ML, registrados el 11 y 12 de octubre a las 07:23 y 10:57 Hora local, respectivamente. Ambos sismos se localizaron a 10 km al

NO del volcán Ticsani, dentro esta nueva agrupación.

En resumen, la actividad del Ticsani mostró a lo largo de 2016 importantes episodios sísmicos, con muchos eventos que fueron percibidos por las poblaciones aledañas. Por el momento, no se ha apreciado una variación que sugiera un cambio en el estado actual del volcán. No obstante, el OVS considera que, dada su historia eruptiva y sus características, es imperativo continuar con el monitoreo milimétrico que el IGP inició ya hace más de dos años.



Figura 08.- Estación sísmica telemétrica MUYQ, ubicada a 13 km al noroeste del domo reciente del volcán Ticsani. Esta es una de las cuatro estaciones que componen la red de monitoreo local que vigila el comportamiento de este volcán.

CA PA CI TA CIÓN



En 2016, el OVS ha realizado talleres de capacitación a todo nivel. La labor en la gestión del riesgo volcánico inicia compartiendo conocimientos científicamente comprobados. En esa línea, el OVS ha cumplido condifundir constantemente la más reciente actualidad sobre la actividad de los volcanes del sur del país, buscando contribuir a la formación de una ciudadanía consciente del entorno en donde habita.

Introducción

La labor principal del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) es realizar el monitoreo en tiempo real de los volcanes activos del sur del Perú y desarrollar investigaciones con la información que recibe ininterrumpidamente de sus estaciones de vigilancia sismovolcánica.

Estas actividades, de vital y suma importancia, comprometen gran parte del tiempo de los profesionales del OVS. No obstante, el Observatorio emprende talleres educativos para difundir su trabajo y capacitar a las poblaciones cercanas a estos macizos, con el objetivo de darles el conocimiento necesario para una respuesta eficaz ante una crisis eruptiva.

Este 2016, por segundo año consecutivo, el OVS viajó a la provincia de Caylloma en Arequipa y al distrito

de Ubinas en Moquegua, presentando en ambos eventos los últimos resultados del monitoreo del volcán Sabancaya y Ubinas, así como el Reporte Anual de Volcanes 2015 que entregó a cada autoridad participante.

Asimismo, visitó seis municipios distritales de la provincia de Arequipa, explicándoles cómo se formaron los volcanes en nuestro país y haciendo especial énfasis en los riesgos que supondría una erupción del volcán Misti. Los equipos de Defensa Civil de estas comunas aprendieron a reconocer cada tipo de evento sísmico que aparece camino a una erupción.

El OVS cumplió así un año más de responsable trabajo con la sociedad del sur del país expuesta a los diferentes peligros que conlleva vivir cerca a un volcán.



El Dr. Orlando Macedo, director del Observatorio Vulcanológico del Sur, expone en la Municipalidad de Caylloma sobre la actividad del volcán Sabancaya. FOTO OVS

TALLERES EN ZONAS VULNERABLES

CHIVAY

El 15 de abril de 2016, un equipo de profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) visitó el distrito de Chivay en la provincia de Caylloma y realizó el primer taller del Observatorio en este año, denominado: "Sismicidad en el volcán Sabancaya y alrededores durante 2015-2016".

Esta actividad, efectuada con el propósito de proporcionar material bibliográfico e información reciente a la población cayllomina, fue dirigida por el Dr. Orlando Macedo, director del OVS, y contó con la participación de autoridades municipales, representantes distritales, responsables de la gestión del riesgo de desastres, escolares y población interesada en esta temática.

La ponencia principal, a cargo del Dr. Macedo, explicó el origen de los sismos percibidos en el valle del Colca desde febrero de 2013 y cuál es el rol que

desempeñan en procesos eruptivos. "Estudios han demostrado que sismos asociados a reactivación de volcanes ocurren en un radio de 30 km alrededor del volcán y van acercándose poco a poco al cráter", apuntó.

Cabe precisar que este comportamiento fue observado en el Sabancaya en los últimos años, a partir del cual el Observatorio alertó la inminencia de su erupción, la misma que terminaría iniciando el 06 de noviembre de 2016.

Finalmente, los asistentes a este primer taller recibieron un ejemplar del Reporte Técnico Especial sobre Volcanes Activos en el Sur del Perú 2015. Muchos aprovecharon la ocasión para solicitar el video educativo presentado por el OVS y comenzar de esta manera un efecto multiplicador en sus instituciones, hogares y centros de trabajo.



a) Pobladores del valle del Colca participaron activamente en el taller organizado por el OVS.
b) El Dr. Orlando Macedo atendió a cada una de las interrogantes planteadas en este primer taller de 2016.
c) Representantes de instituciones educativas de la provincia de Caylloma se hicieron presente, planteando interesantes preguntas sobre cómo actuar en una erupción del Sabancaya.
d) El público asistente estuvo integrado por autoridades, población en general, educadores y estudiantes de la provincia de Caylloma.
FOTOS OVS





TALLERES EN ZONAS VULNERABLES

UBINAS

El 20 y 21 de junio, profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) viajaron al distrito de Ubinas con el objetivo de realizar dos diferentes talleres dirigidos a estudiantes y autoridades de esta zona afectada por el último proceso eruptivo del volcán Ubinas.

El equipo del Observatorio, liderado por su director, el Dr. Orlando Macedo, llevó consigo material especial para el público de cada taller. La primera capacitación fue efectuada el día 20 en las instalaciones de la I.E. José Carlos Mariátegui, repartiéndose a los más de 45 estudiantes del nivel secundario cuentos elaborados por el Instituto Geofísico del Perú. Asimismo, se les presentó un video que recopila la actividad del Ubinas desde el inicio de su fase eruptiva en septiembre de 2013.

El profesor Federico Quispitupac, director de esta institución (la más importante del valle de Ubinas), agradeció

la presencia del OVS por segundo año consecutivo, resaltando que este tipo de actividades viene fortaleciendo los conceptos de prevención y preparación frente a peligros volcánicos.

El segundo taller tuvo lugar el día 21 en el auditorio de la municipalidad distrital de Ubinas. Durante su presentación ante las autoridades y representantes de diversas instituciones, el Dr. Macedo dio información detallada de la actividad actual del volcán Ubinas.

Finalmente, el alcalde de este distrito, Arq. Luis Concha Quispitupac, dio su agradecimiento al Comité Científico de Monitoreo Permanente del volcán -del cual es parte el OVS- por el monitoreo constante que realiza de la actividad del Ubinas, así como por la información oportuna que viene siendo brindada a la población e instituciones. "Es con base en la información que recibimos que planificamos el trabajo a efectuar en nuestro distrito de Ubinas", expresó.

a) Autoridades y representantes de instituciones participantes en el taller realizado por el OVS en el distrito de Ubinas en junio de 2016.
 b) El director del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), Dr. Orlando Macedo, presenta el mapa sísmico del volcán Ubinas en el taller efectuado con autoridades.
 c) El OVS organizó también un taller de capacitación dirigido a los estudiantes del nivel secundario de la I.E. José Carlos Mariátegui, la más importante del valle de Ubinas.
 d) Los más de 45 estudiantes de este colegio recibieron material educativo del IGP como parte de esta actividad educativa.
 FOTOS OVS

TALLERES EN COLEGIOS DE AREQUIPA



El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) considera que fortalecer las capacidades de acción y respuesta en la juventud, además de brindarles conocimiento científico de calidad, son las claves para construir una cultura de prevención responsable en la sociedad. En ese sentido, el OVS realizó en 2016 numerosas capacitaciones a estudiantes del nivel primario y secundario de la provincia de Arequipa, así como también a sus docentes.

Más de 1000 estudiantes arequipeños fueron instruidos en nociones básicas de vulcanología y recibieron una explicación muy detallada acerca del nivel de actividad actual del volcán Misti, el más riesgoso de todo el país. "Es importante que la institución directamente encargada de realizar el monitoreo volcánico realice estas charlas educativas. A los

estudiantes les genera mayor interés escuchar estos temas de la boca de sus propios especialistas. Esperamos, con el apoyo del OVS, continuar replicando estas charlas a más estudiantes de nuestro colegio", resaltó la profesora Katia Messa, directora de la Institución Educativa Nuestra Señora de La Asunción, una de los colegios visitados por el Observatorio en 2016.

Asimismo, otro de los importantes temas abordados durante estas faenas educativas fue cómo realizar una correcta gestión del riesgo volcánico. "Cada uno de nosotros puede contribuir a una mejor prevención difundiendo los peligros volcánicos ante los cuales estamos expuestos en una posible erupción del Misti. Evitemos informando que más población ocupe sus cercanías", rescató el Ing. José Del Carpio, vulcanólogo del OVS que participó en estos talleres.



- a) Docentes del nivel inicial, primario y secundario de la I.E. Internacional de Arequipa participaron en ponencia efectuada por el Ing. Del Carpio.
- b) Seguidamente, más de 600 estudiantes de esta misma institución educativa recibieron una detallada ponencia acerca de cómo estar preparados frente a una posible erupción del volcán Misti.
- c) Alumnas del quinto año de secundaria de la I.E. Nuestra Señora de La Asunción, además de los docentes miembros del comité de Defensa Civil, fueron instruidos por el MSc Nino Puma, vulcanólogo del OVS.
- d) El OVS elaboró un programa de charlas conjuntamente con la municipalidad de Yanahuara y explicó a estudiantes de primaria y secundaria de la I.E. Antonio José de Sucre cómo identificar las primeras señales del despertar de un volcán.

FOTOS OVS

TALLERES EN MUNICIPIOS DE AREQUIPA



a

Seis municipalidades de Arequipa participaron en 2016 de completas capacitaciones sobre gestión del riesgo volcánico en esta ciudad, realizadas por un equipo de profesionales del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) como parte de su programa de extensión de conocimiento hacia la sociedad.

De esta manera, más de 140 especialistas de Defensa Civil conocieron de primera mano la labor que desarrolla el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del OVS, en el monitoreo y vigilancia de volcanes activos.

Los representantes de la municipalidad provincial de Arequipa, así como de las municipalidades distritales de Cayma, Yanahuara, Mollebaya, Miraflores y Alto Selva Alegre, recibieron el Reporte Anual de Volcanes 2015 elaborado por el Observatorio Vulcanológico del Sur, el cual contiene artículos de investigación relacionados al comportamiento eruptivo de los volcanes que el Observatorio monitorea en tiempo real. Asimismo, incluye el resumen minucioso de la actividad de los volcanes Ubinas, Sabancaya, Misti y Ticsani a lo largo de 2015.

La coordinación de estas presentaciones fue efectuada por el OVS conjuntamente con los secretarios de Defensa Civil de cada municipalidad. "Hemos tenido la iniciativa de acercarnos a estas primeras seis comunas y explicarles el propósito de estas charlas. Enhorabuena, la respuesta que obtuvimos fue satisfactoria, lo cual propició que todas estas actividades cumplieran con su objetivo: enseñar nociones básicas de vulcanología y mostrarles cómo podemos contribuir en mejorar la gestión del riesgo frente al peligro volcánico", aclaró el Dr. Orlando Macedo, director del OVS.

Esta actividad fue saludada por los secretarios técnicos de Defensa Civil, quienes destacaron que la información científica



b

proporcionada por las instituciones científicas como el OVS sustenta el pedido de no invadir zonas en riesgo volcánico.

El Observatorio Vulcanológico del Sur tiene planeado continuar con estas capacitaciones en 2016 y visitar de este modo a más municipalidades de la provincia de Arequipa y explicarles los peligros volcánicos ante los cuales estamos expuestos en una posible erupción del volcán Misti.

El OVS reitera su compromiso de mantener informados y correctamente capacitados a los responsables de Defensa Civil. Si desea que nuestros vulcanólogos lo visiten, escríbanos a: ovs@igp.gob.pe



c

- a) Miembros de la Plataforma Distrital de Defensa Civil de la municipalidad de Alto Selva Alegre que atendieron la exposición del Ing. José Del Carpio.
- b) La Plataforma de Defensa Civil de Cayma recibió una completa explicación sobre riesgo volcánico.
- c) Los especialistas de la municipalidad de Miraflores muestran los reportes entregados por el OVS.
- d) El M. C. Nino Puma expone a los miembros de Defensa Civil de la municipalidad de Yanahuara.
- e) Representantes de la municipalidad de Mollebaya tras presentación realizada por el OVS.
- f) El Ing. José Del Carpio con los especialistas de la municipalidad provincial de Arequipa.

FOTOS OVS



d



e



f

PROYECTO



En los próximos tres años, el IGP ejecutará el proyecto de **“Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta Volcánica en el Perú”**, aprobado por la PCM en 2015. Concretar este importante proyecto consolidará al OVS como uno de los Observatorios mejor equipados en toda Latinoamérica. Los diez volcanes de mayor riesgo en el sur del país contarán con sofisticadas redes de monitoreo en tiempo real.

Introducción

El Perú es un volcán situado en el cinturón de Fuego del Pacífico, región del planeta que se caracteriza por su gran actividad sísmica y volcánica. Como resultado de ello, nuestro país está atravesado por más de 400 estructuras volcánicas, la mayoría de las cuales se encuentra en estado de inactividad y muestran la rica historia geológica de nuestro territorio.

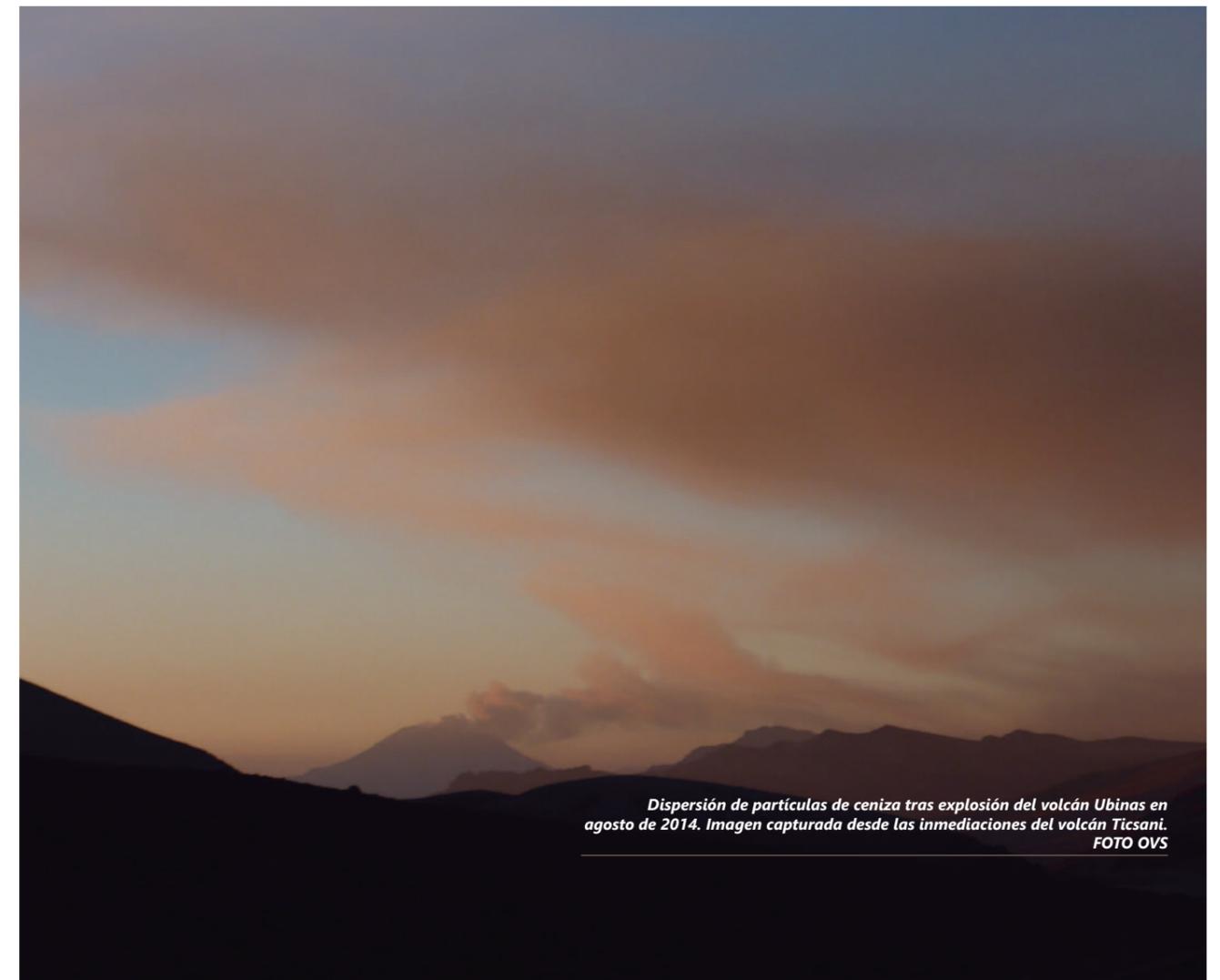
Dentro de este vasto grupo de colosos, existen 10 macizos que son considerados como potencialmente activos y/o activos: Sara Sara en Ayacucho; Coropuna, Sabancaya y Misti en Arequipa; Ubinas, Ticsani y Huaynaputina en Moquegua y Tutupaca, Yucamane y Casiri en Tacna.

En 2015, el Instituto Geofísico del Perú obtuvo la viabilidad del proyecto denominado “Mejoramiento y Ampliación del

Sistema de Alerta Volcánica en el Perú”, mediante el cual, los dos observatorios existentes en nuestro país, el Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP (OVS-IGP) y el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), integrarán sus equipos de trabajo y se consolidarán en un único y moderno edificio dedicado las 24 horas del día al monitoreo volcánico.

Así, en los próximos años, y haciendo uso de un presupuesto cercano a los 10 millones de soles, se implementarán redes de monitoreo en tiempo real en los 10 volcanes anteriormente citados, lo cuales serán monitoreados las 24 horas del día.

El desarrollo de este ambicioso proyecto consolidará al Perú como uno de los países de la región mejor equipados en vigilancia volcánica de toda Latinoamérica.



Dispersión de partículas de ceniza tras explosión del volcán Ubinas en agosto de 2014. Imagen capturada desde las inmediaciones del volcán Ticsani. FOTO OVS



La Oficina General de Planeamiento y Presupuesto de la Presidencia del Consejo de Ministros aprobó en 2015 el perfil de preinversión del Proyecto de Inversión Pública denominado, "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta ante el Riesgo Volcánico en el Perú", con código SNIP N° 271840. La inversión total del proyecto asciende a S/ 9, 737 785 millones, y tiene como objetivo el incremento de generación, registro y

provisión de información sísmica volcánica ante la ocurrencia de eventos de origen volcánico, además de la construcción de una moderna infraestructura para el Observatorio Vulcanológico del Sur.

COMPONENTES

El proyecto consiste en la implementación de 30 estaciones vulcanológicas en 10 volcanes del sur del Perú, con herramientas especializadas para el estudio del

comportamiento sísmico-volcánico, deformación, emisión y composición de gases de origen volcánico. El proyecto plantea los siguientes componentes:

1.- Componente 1: disponibilidad de equipos e instrumental geofísico especializado para evaluar el comportamiento sísmico-volcánico, la deformación, emisión y composición de gases de origen volcánico.

2.- Componente 2: adquisición e instalación de equipamiento y herramientas para el monitoreo.

3.- Componente 3: construcción de infraestructura y su implementación.

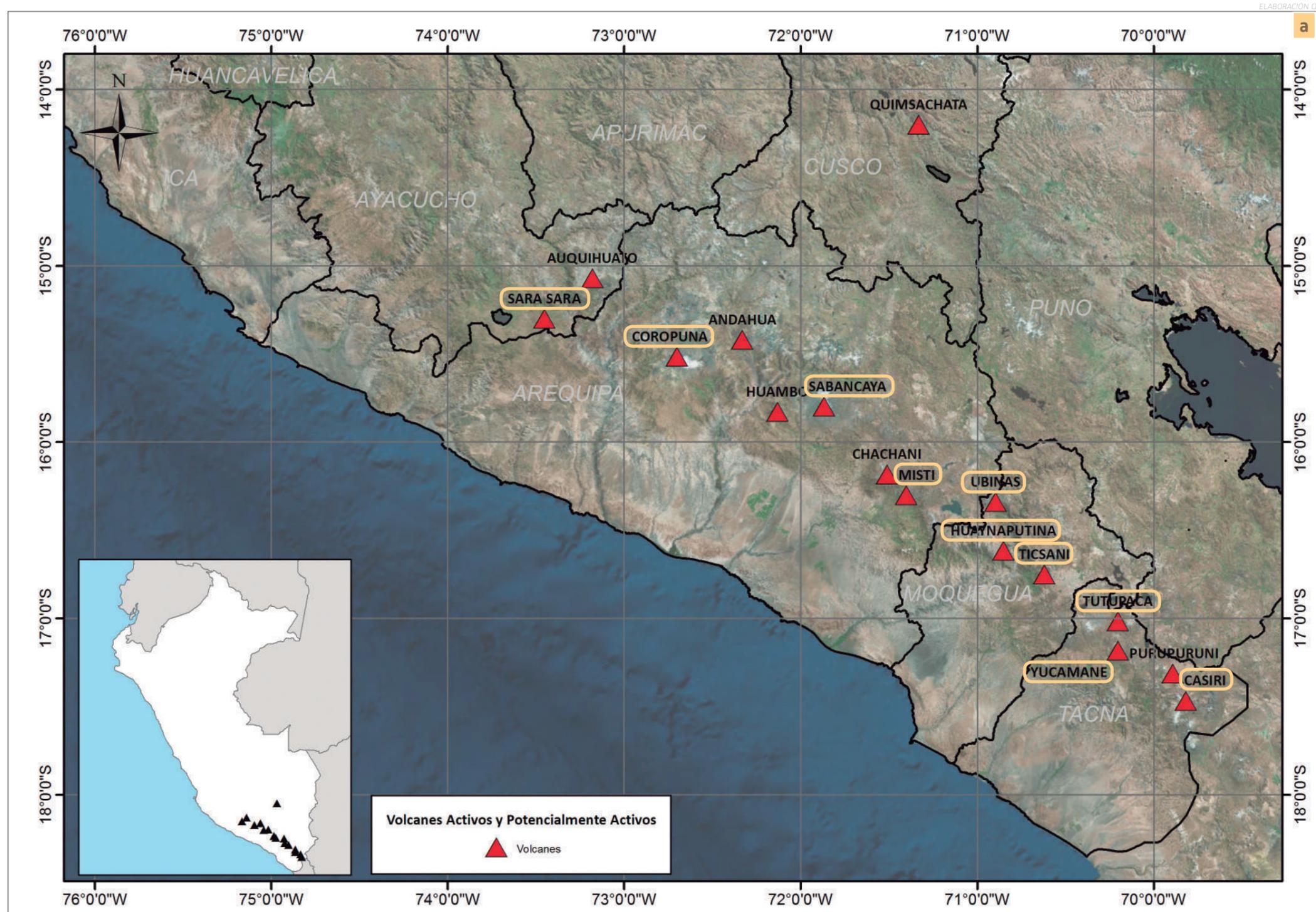
4.- Componente 4: adquisición e implementación de sistemas de comunicación para transmisión de datos en tiempo real.

5.- Componente 5: adquisición de equipos electrónicos, informáticos para el procesamiento y gestión de datos.

POBLACIÓN BENEFICIADA

De los 10 volcanes que el proyecto contempla para ser monitoreados, 4 cuentan a la fecha con redes de vigilancia sismovolcánica en tiempo real: Misti y Sabancaya en Arequipa; Ubinas y Ticsani en Moquegua. Los 6 macizos restantes se emplazan en dichas regiones, así como también en Ayacucho y Tacna.

En estas 4 regiones habitan 4, 976 056 millones de personas (INEI 2013), de las cuales el 32 % (1, 611 849) se encuentran cercanas a estos 10 macizos, constituyéndose como población potencialmente afectada. Este mismo número de personas son la población demandante efectiva del proyecto, esto dado que la población afectada por erupción volcánica es también la que buscaría el servicio brindado por el IGP.



ELABORACIÓN OVS

ELABORACIÓN OVS



ELABORACIÓN OVS



ELABORACIÓN OVS



a) Mapa con los 16 volcanes activos y potencialmente activos del país. Se encierra de color amarillo los volcanes que serán monitoreados gracias a este proyecto.
b), c), d) Arquitectura referencial del futuro Observatorio Vulcanológico del Sur.
FOTOS OVS

STAFF

De izquierda a derecha: Jesús Cáceres, José Torres, Jorge Concha, Nino Puma, Riky Centeno, Alfredo Ramos, Nancy Limachi, Orlando Macedo, Yovana Robles, Rolando Chijcheapaza, Javier Vilca, John Cruz, José Del Carpio.
FOTO OVS





© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú
Central Telefónica: (511) 3172300
<http://www.igp.gob.pe>
 <http://facebook.com/igp.peru>
 http://twitter.com/igp_peru
 http://youtube.com/igp_videos