



Modelamiento de la fuente de deformación con datos GPS del volcán Sabancaya durante el proceso eruptivo del 2016

Rafael Miranda¹, Edu Taipe¹, Luis Cruz¹, Jossep Huanca¹

¹ Observatorio Vulcanológico Ingemmet

Palabras clave: Modelo Deformación, dMODELS, Volcán Sabancaya.

RESUMEN

El volcán Sabancaya, actualmente en proceso eruptivo en la región sur del Perú, de las que se tienen datados siete erupciones desde el año 6600 BCE, hasta la erupción de 1990-1998, en este resumen analizaremos las velocidades de desplazamiento en el volcán Sabancaya, durante el proceso eruptivo del 2016, utilizando 4 estaciones GPS, la amplitud de la deformación registrada en el Sabancaya a través de las estaciones GPS relejan

claramente la deformación volcánica generado por intrusión de un volumen de magma, los patrones de desplazamiento volcánico observados permitirán explicar el comportamiento empleando un modelo analítico para un fuente esférica rodeado por un medio elástico, con una cámara magmática profunda, una inyección constante de magma en el depósito profundo presuriza el sistema constantemente produciendo una inflación de hasta 32 mm en la estación SBSE. Para el análisis de modelamiento de datos GPS se empleó el software dMODELS.

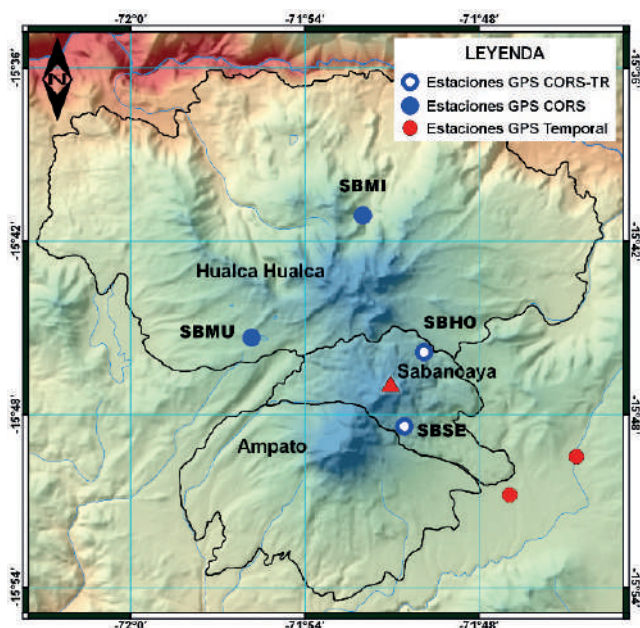


Figura 01. Vista del complejo volcánico Ampato, Sabancaya y Hualca Hualca (CVASHH), situado a 32 km al SW del pueblo de Chivay.

INTRODUCCION

El Sabancaya es uno de los volcanes que constituye el complejo volcánico Ampato Sabancaya Hualca Hualca (CVASHH), considerado el más jóvenes y activos del complejo, es un estravolcán de edad Holocénica (M. Rivera, J. Mariño, P. Samaniego, 2016), ubicado dentro de la zona volcánica Central de los Andes (ZVCA). Nunca antes este volcán fue monitoreado de manera rigurosa, los registros GPS datan desde setiembre del 2014. Después de 17 años de tranquilidad (1990-1198, gerbe y Thouret, 2004) el proceso eruptivo del Sabancaya se inicia con una probable fase pre-eruptiva entre agosto y setiembre de 2014 que duró hasta el 2016 (Informe Anual OVI, 2016), una erupción freato-magmatica del 27 de octubre del 2016 daría inicio a una inminente erupción, la deformación volcánica registrada por la red de monitoreo registro un cambio en la deformación a inicios de mayo a razón de 6 mm/mes, así mismo los vectores de desplazamiento muestran una distribución radial a la fuente de deformación de hasta 55 mm. Después de una inversión del conjunto de datos GPS, la fuente generadora de deformación presenta un origen entre los volcanes Sabancaya y Hualca Hualca, a una profundidad ~ 17 km, con un radio de la cámara magmática de 1 Km, mostrando una forma esferoidal, este modelo se ha ajustado bastante bien al patrón de deformación registrado por la red de monitoreo GPS. Por lo tanto, el volumen de magma que habría migrado hacia la fuente generadora incremento

desde mayo del 2016, posiblemente desde esta fuente principal habría migrado por un conducto secundario hacia una segunda cámara magmática situado debajo del cráter del Sabancaya, observándose una inflación de ~ 30 mm registrado en el flanco sureste (SE) del volcán (Estación GPS SBSE), el proceso de deformación ha sido definido por tres periodos claramente identificados.

OBSERVACIONES Y ANALISIS DE DATOS

La distribución de la red de monitoreo GPS en el Sabancaya se observan en la Figura 01, después de las evidencias de una nueva reactivación del volcán el OVI (Observatorio Vulcanológico del Ingemmet) inicia con la implementación de 03 estaciones GPS, denominados como SBMU, SBHO y SBVO registrándose entre el 22 y 24 de setiembre del 2014, distribuidos azimutalmente al cráter del volcán, y una cuarta estación inicia su registro el 05 de octubre del 2016 (SBMI, Milluca). Con un paso de muestreo de 15 seg. generando un archivo cada 24 horas, estos datos GPS se procesaron con el software GAMIT/GLOBK v.10.5 (Herring, T.; King, B.; McClusky, S, 2010), referidos al marco de referencia de Sudamérica, estabilizados con las estaciones IGS (International GNSS Service) BOGT, RIOP, AREQ, BRAZ, POVE, SALU, etc., con una solución de $X^2 \sim 2.0$ calculado por GLOBK para los archivos h, con las orbitas finales combinadas, para generar una solución final en la cual se muestran los movimientos de la estación de monitoreo en términos de velocidad y desplazamiento, donde la pendiente de la serie temporal equivale a la velocidad promedio.

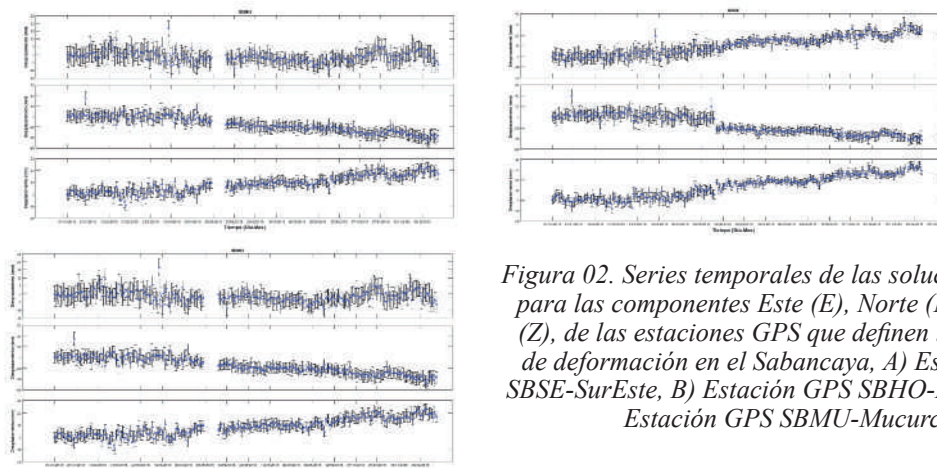


Figura 02. Series temporales de las soluciones diarias para las componentes Este (E), Norte (N) y Vertical (Z), de las estaciones GPS que definen los periodos de deformación en el Sabancaya, A) Estación GPS SBSE-SurEste, B) Estación GPS SBHO-Hornillos, D) Estación GPS SBMU-Murca.

PATRONES DE DEFORMACION EN SERIE DE TIEMPO

En el volcán Sabancaya no existe un historial de mediciones GPS que puedan mostrar cambios durante y antes de un proceso eruptivo, el área de geodesia volcánica del OVI implementó una red que consta de cuatro estaciones GNSS permanentes, se encuentran distribuidos entre 2.5 a 11 km del centro del cráter, en el resumen mostramos los serie temporales correspondientes al año 2016, periodo en las cuales se definen claramente tres etapas de deformación, Primera Etapa: Definido entre enero a mayo, la serie temporal muestra una tendencia sin mayores cambios en las series temporales de deformación, con una tasa de desplazamiento horizontal entre 4 – 6 mm/año y una deformación de 1-2 mm/año (Figura 2A-B y C). Segunda etapa: Esta etapa muestra un cambio sostenido en la serie temporal entre mayo a noviembre con una tasa de desplazamiento horizontal de 22 mm/año y una deformación de 32 mm/año que corresponde al periodo de mayor intrusión magmática hacia la fuente principal localizado probablemente ya a poca profundidad, periodo de mayor presurización con una tasa de inflación mayor, la deformación de este periodo se ha empleado para el modelamiento de la fuente de deformación, debido al mayor cambios en la deformación. Tercera etapa: La tendencia de las series temporales muestra un cambio en la deformación vista en las tres estaciones de monitoreo, este periodo corresponde al periodo de despresurización del sistema magmático donde la cantidad de magma inyectada es inmediatamente liberado debido al sistema volcánico abierto, es decir la cantidad que entra es la cantidad que sales por el conducto volcánico.

ANALISIS DE LA FUENTE DE DEFORMACION

Anteriores investigaciones realizaron modelos e inversiones a fin de determinar parámetros como el tamaño, la profundidad, el radio de la fuente de deformación y el volumen probable de magma eyectado, para ello nos basaremos a las investigaciones de Gerber y Thouret 2004, que en base a estudios petrográficos; Mineralógicos y geoquímicos de tefras juveniles, determinaron la presión del medio, empleándose el método del geobarómetro AL en Horblenda, que proporciona una correlación lineal empírica y experimental entre la presión y el contenido de aluminio en la horblenda (magmas calco-alcalinos) proporcionaron

un rango de presión promedio de 200 a 350 ± 100 Mpa, con una probable cámara magmática debajo de pampa sepina a una profundidad de 11 -13 km con un radio asumido de 4.5 km. Las investigaciones de InSAR (Jay, J. Delgado, F. J., Torres, J. L., Pritchard, M.E-, 2015) mostraron que el centro de deformación se ubicaría entre el volcán Sabancaya y Hualca Hualca, usando las inversiones del Neighborhood Algorithm (NA, Sambridge, 1999a, 1999b) para una fuente esférica en base a 5 interferogramas determinan una profundidad de la cámara magmática entre 12.5 – 13 km. (Pritchard & Simons 2004), con una tasa de volumen inferido en función del tiempo de AV de 24-42 (10^6 m³/yr).

MODELO DE DEFORMACION VOLCANICA

En esta sección determinaremos los parámetros del modelo debido al comportamiento de los vectores de desplazamiento horizontal y vertical de las estaciones GPS, observados en las 4 estaciones, mediante el empleo del modelo analítico, con las series temporales que define la segunda etapa de deformación (Figura 02), los vectores sugieren que la fuente de deformación, corresponda a un modelo de tipo esferoidal, definido por un medio homogéneo y elástico (Okada, 1985; McTigue 1987; Yang et al., 1988), para la inversión del modelo de la fuente se ha empleado el paquete del software DdMODELS (Battaglia et al., 2013) que es un algoritmo de inversión, que permite modelar la geometría de una fuente que mejor se ajuste con los patrones de deformación del Sabancaya, durante el periodo de mayor inflación (2016), para alcanzar la solución para una fuente esférica definida depende básicamente de 4 parámetros con son: el cambio de presión (ΔP), profundidad de la fuente (Z), ubicación (X_0, Y_0), permitiendo estimar el cambio de volumen ($\Delta V = \Delta P \pi a^3 / G$), con estos datos buscamos los parámetros del modelo invirtiendo la velocidad de la deformación observada con dMODELS que combina una cuadrícula de búsqueda aleatoria a través del algoritmo de mínimos cuadrados, con un chi-cuadrado X^2 muy alto en una primera iteración, para el cual asumimos un $G=200$ Mpa, un radio de búsqueda de 10 km, y una profundidad de 20 km, las iteraciones de búsqueda aleatoria como resultados final obtuvo un X^2 de 7.2, resultado aceptable para el modelo.

Por lo cual decimos que el modelo definido como una fuente esférica se ajustó mucho mejor a nuestros vectores de velocidad (Figura 3A), las inver-

siones dieron como resultados los siguientes parámetros: la profundidad de la fuente se calculó ~17 km, para una fuente esférica de 1 km de radio, donde la deformación es generada por un cambio de volumen de 76.70×10^6 m³/año. Dicho volumen de magma presurizó el sistema magmático durante el 2016, en la Figura 03, observamos que los vectores horizontales se ajustan en magnitud y desplazamiento muy bien, mientras la estación SBMI presenta cierta incertidumbre debido al poco periodo de registro. La tasa de inflación obtenida con el modelo y los registros muestran que la deformación fue mucho mayor debido al cambio de volumen eyectado. Lo cual probablemente este asociado a las características geológicas de las áreas circundantes a las estaciones GPS, que no han permitido modelizar y obtener una inversión con el mejor ajuste, estas se encuentran bien correlacionados.

CONCLUSIONES

Muchas investigaciones se han basado sobre cuál es la fuente de deformación en el Sabancaya, o si esta presenta una o varias fuentes de deformación, los resultados obtenidos mediante datos GPS han alcanzado a las siguientes conclusiones:

El volumen involucrado que genera la deformación en Sabancaya es de 76.70 (10^6 m³/año), volúmenes similares fueron calculados por la técnica de InSAR en el 2015 de 24-42 (10^6 m³/yr, Pirtchard & Simons 2004). Ambos resultados muestran una semejanza en el volumen de magma que generaron cambios en la superficie del volcán antes de un proceso eruptivo.

La fuente de deformación que mejor se ha ajustado a los resultados con los datos GPS fue el de una fuente de tipo esférica definido para un medio homogéneo y elástico, para la inversión de los datos se empleó el software dMODELS, que es un modelo analítico, que permite modelar la geometría de diferentes fuentes de deformación, alcanzando un χ^2 de 7.2 dando un mejor ajuste con el modelo.

La fuente de deformación estaría ubicada por debajo del volcán Hualca Hualca (Figura 03A, punto color amarillo), estos resultados muestran que el modelamiento con los datos GPS ubican la profundidad de la cámara magmática a ~ 17 km (Figura 03B) el modelo calcula la profundidad desde el nivel del mar en la cota 0, varios métodos de modelamiento han mostrado profundidades similares entre 12 y 13 km, empleando diversos métodos analíticos, para su análisis.

El radio de la posible cámara magmática obtenido con el modelo es de 1 km, mientras los modelos de Pritchard y Thuoret mencionan que el radio de la cámara magmática es de 4.5, los rangos de diferencia con los diferentes métodos muestran mayor incertidumbre con la correlación de la cámara magmática.

El periodo de análisis de datos GPS corresponde al año 2016 en la cual se han registrado tres etapas de deformación, la segunda etapa presenta mayor inflación con una tasa de desplazamiento de 22 mm/año y una inflación de 32 mm/año, culminando en un proceso eruptivo el 6 de noviembre del 2016.

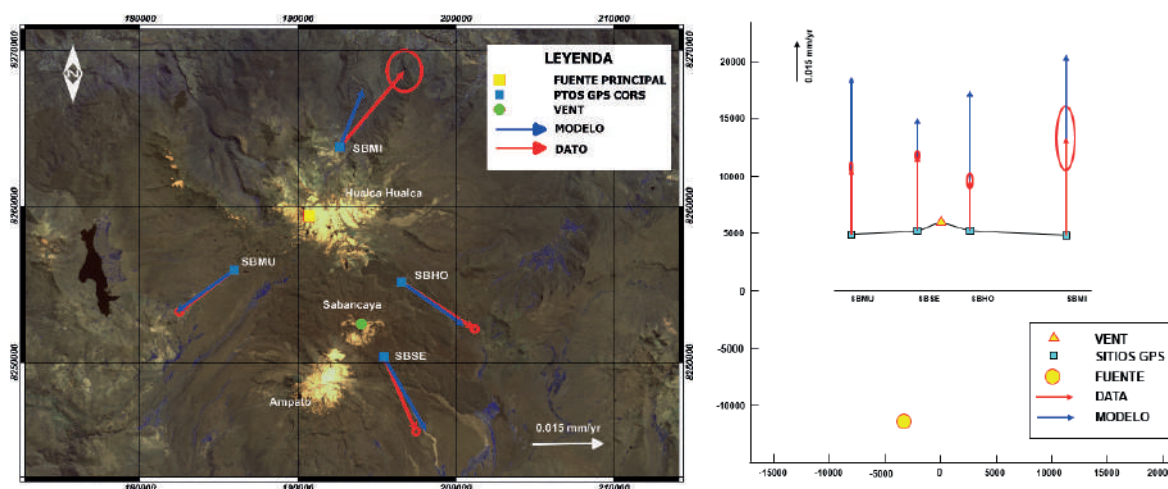


Figura 03. Velocidad de desplazamiento de las estaciones GPS flechas color rojo y los calculados por el modelo son las flechas azules, el periodo corresponde al año 2016, A). Modelo de desplazamiento de la componente horizontal B). Modelos calculados para las componentes verticales.

BIBLIOGRAFÍAS

Battaglia, M., Cervelli, P.F., Murray, J.R., 2013a. Modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers-A catalog of deformation models. US Geol. Surv. Tech. Methods 13–B1.

Gerbe, M. C., & Thouret, J. C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541-561.

Herring, T.; King, B.; McClusky, S. Introduction to GAMIT/GLOBK Reference manual Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3. EAPS. 2010.

Jay, J. A., Delgado, F. J., Torres, J. L., Pritchard, M. E., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2780-2788.

McTigue, D.F., 1987. Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox. *Journal of Geophysical Research* 92, 12931–12940.

Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75, 1135–1154.

Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128.

Sambridge, M. (1999a), Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space, *Geophys. J. Int.*, 138, 479–494.