

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6996

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GEODÉSICOS SATELITALES GNSS PARA DETERMINAR LA DEFORMACIÓN CORTICAL ASOCIADA A PELIGROS GEOLÓGICOS

Región Arequipa
Provincia Caylloma



DICIEMBRE

2019

**INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DEL INGEMMET – OVI**

Informe Técnico Nro. A6996

**ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS
GEODÉSICOS SATELITALES GNSS PARA
DETERMINAR LA DEFORMACIÓN CORTICAL
ASOCIADA A PELIGROS GEOLÓGICOS**

POR:

Ing. LUIS FERNANDO CRUZ MAMANI

Arequipa – Perú

Diciembre - 2019

RESUMEN

El presente informe resume los resultados obtenidos del procesamiento de datos satelitales de posicionamiento preciso en los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti durante el 2019, peligros geológicos monitoreados por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI).

Para este informe, se realizó el análisis de la deformación para el año 2019 (hasta el mes de septiembre) en los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti, mediante el procesamiento por líneas base entre cada par de estaciones de las redes geodésicas.

Los resultados en el volcán Sabancaya muestran dos tipos de procesos de deformación: uno de tipo volcánico y el otro de tipo tectónico. La actividad volcánica muestra una inflación con una tasa máxima de 33.43 ± 0.71 mm/año en la línea base SBMI-SBMU. La actividad tectónica al este del volcán, ocurrida durante el mes de septiembre, causó desplazamientos superficiales, evidenciándose en los resultados de las líneas base del mes de septiembre.

Los resultados en el volcán Ubinas muestran un proceso de inflación de una magnitud de 7.15 ± 1.12 mm/año desde mayo hasta el 27 de julio. Este proceso precedió a los eventos explosivos reportados el 19 y 22 de julio. Anterior y posterior a este periodo se evidencia un proceso de estabilidad.

Los resultados en el volcán Misti, son coherentes con su nivel de actividad actual, no evidencia procesos de deformación asociados a un probable proceso pre-eruptivo.

Estos resultados fueron posibles de obtener tras la realización de las actividades programadas en la orden de servicio N° 01208.

INDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCION.....	5
2. ANTECEDENTES	5
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO	7
4. PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLCÁNICA.....	7
5. MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN VOLCÁNICA CON GNSS	7
6. REDES GEODÉSICAS GNSS DE MONITOREO DE DEFORMACIÓN VOLCÁNICA EN EL SUR DEL PERU	8
7. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS GPS.....	11
8. RESULTADOS	12
8.1. Deformación Volcánica en el Sabancaya.....	12
8.2. Deformación Volcánica en el Ubinas	16
8.3. Deformación Volcánica en el Misti	17
9. CONCLUSIONES.....	18
10. RECOMENDACIONES	18
11. BIBLIOGRAFIA.....	19

1. INTRODUCCION

Una de las actividades del INGEMMET es identificar, evaluar y realizar el seguimiento de los peligros geológicos asociados a la actividad volcánica. En ese sentido, a través del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), la institución viene trabajando en el monitoreo de deformación de los volcanes activos en el sur del Perú, a través de redes geodésicas GNSS¹ instaladas en los macizos volcánicos. Estas redes geodésicas se encargan de monitorear la deformación superficial del volcán, causada generalmente por la intrusión de un cuerpo magmático.

2. ANTECEDENTES

Los primeros resultados asociados a procesos de deformación magmática en los volcanes del sur del Perú, han sido publicados por Pritchard M. E. (et al. 2002, 2003, et al. 2004), quien usando imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) basados en el procesamiento por interferometría (InSAR), identificó un proceso de inflación con una tasa constante de 2 cm/año ubicado en el volcán Hualca Hualca, entre junio de 1992 y abril de 1996 (Figura 1).

Posterior a este estudio, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), desde el 2014, ha implementado una red de estaciones GNSS para monitorear deformaciones asociadas a procesos de intrusión de cuerpos magmáticos en los volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú: Sabancaya, Ubinas, Misti y Ticsani.

¹ Siglas de Sistemas Satelitales de Navegación Global

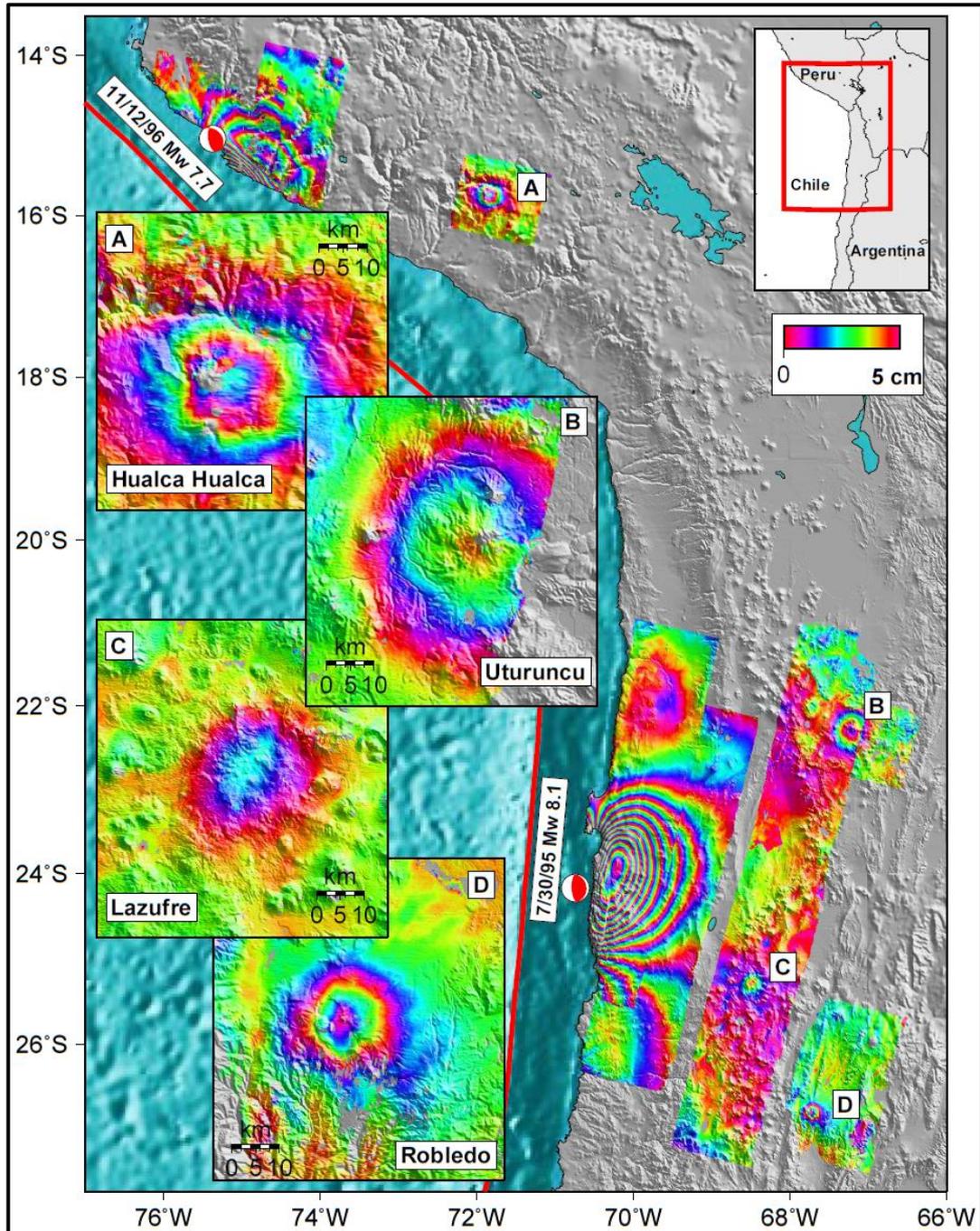


Figura 1. Resultados InSAR entre 1992 y 2000. (A) Inflación en Hualca Hualca, Perú; (B) Inflación en Uturuncu, Bolivia; (C) Inflación en Lazufre, frontera de Chile y Argentina; (D) Deflación en Cerro Blanco (Robledo), Argentina. Los círculos de color rojo y blanco, corresponden a los mecanismos focales de sismos que también causaron deformación. (Tomado de Pritchard, 2003).

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Analizar la deformación cortical asociada a los peligros geológicos volcánicos a través de la adquisición y procesamiento de datos geodésicos satelitales (receptores GNSS).

4. PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLCÁNICA

La deformación superficial causada por una intrusión magmática es reconocida como un importante precursor de actividad eruptiva en un volcán (Janssen, 2003).

Antes de la ocurrencia de una erupción, generalmente la superficie del suelo tiende a expandirse debido al aumento de presión dentro de la cámara magmática superficial. Este proceso físico es llamado *inflación* y es causado por movimientos ascendentes magmáticos por debajo del volcán. Por otro lado, llamaremos *deflación*, al mismo proceso físico en dirección inversa, aquel causado por la deficiencia de presión tras la liberación del magma fuera de la cámara magmática (Figura 2).

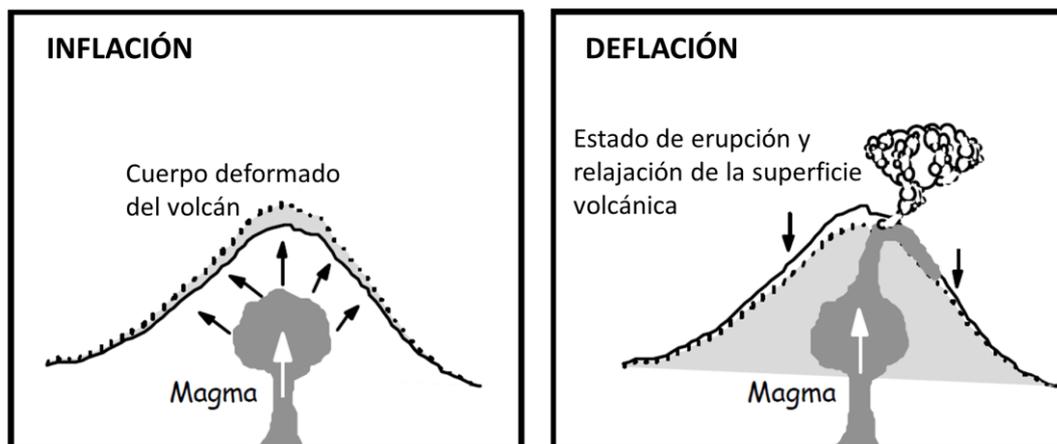


Figura 2. Diagrama de la deformación superficial causada por los procesos de inflación y deflación (modificado de Abidin, 1998).

5. MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN VOLCÁNICA CON GNSS

Recientemente, técnicas de geodesia espacial, tales como el Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS) han sido usados para medir el desplazamiento superficial en volcanes activos (Dvorak & Dzurisin, 1997). El monitoreo con datos GNSS está basado en la recepción y procesamiento de información emitida por una constelación de satélites y registrada por receptores geodésicos instalados en la superficie volcánica. Estos satélites proveen la posición de un punto en sus tres dimensiones

con un nivel de precisión hasta milimétrico (Janssen, 2003). Los pequeños cambios de estas posiciones relativas, reflejan las deformaciones superficiales a causa de la dinámica de una intrusión magmática en profundidad. Posteriormente el modelamiento de estos datos sirve para calcular los parámetros de la fuente causante de estos procesos en superficie (Figura 3).

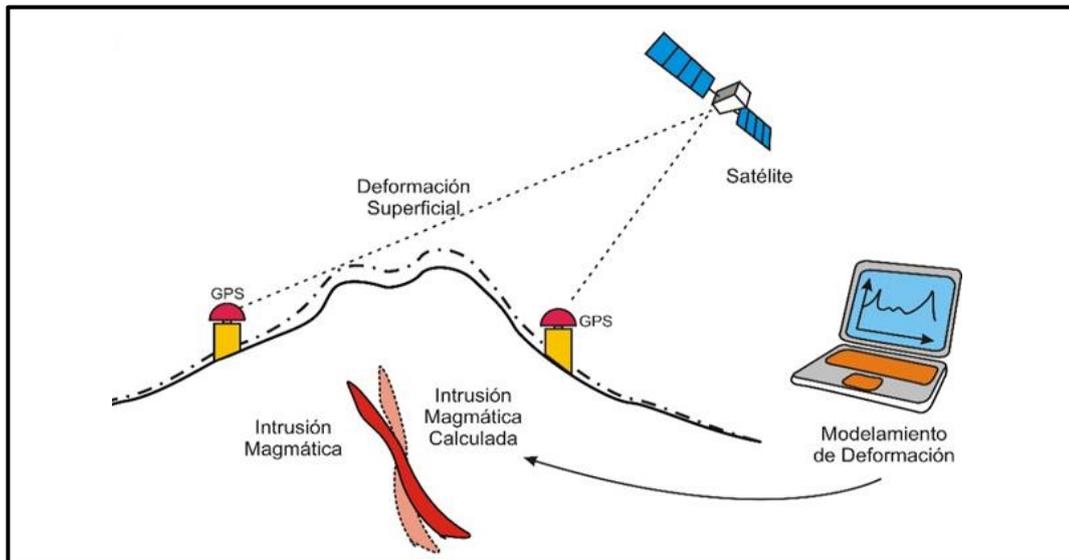


Figura 3. Diagrama del principio de aplicación de los datos GPS para el monitoreo de deformación volcánica (modificado de Galland, 2012).

6. REDES GEODÉSICAS GNSS DE MONITOREO DE DEFORMACIÓN VOLCÁNICA EN EL SUR DEL PERU

Como se mencionó anteriormente, desde 2014, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), ha implementado una red de estaciones GNSS que permita monitorear a través de los datos registrados diariamente, procesos asociados a la intrusión de cuerpos magmáticos en ascenso a la superficie en los volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú.

Para este informe se trabajó con los datos GNSS registrados durante 2019 por las redes geodésicas instaladas en los volcanes: Sabancaya, Ubinas y Misti. La red del volcán Sabancaya, durante el periodo a analizar, ha operado con cuatro estaciones geodésicas ubicadas de acuerdo a la Figura 4.

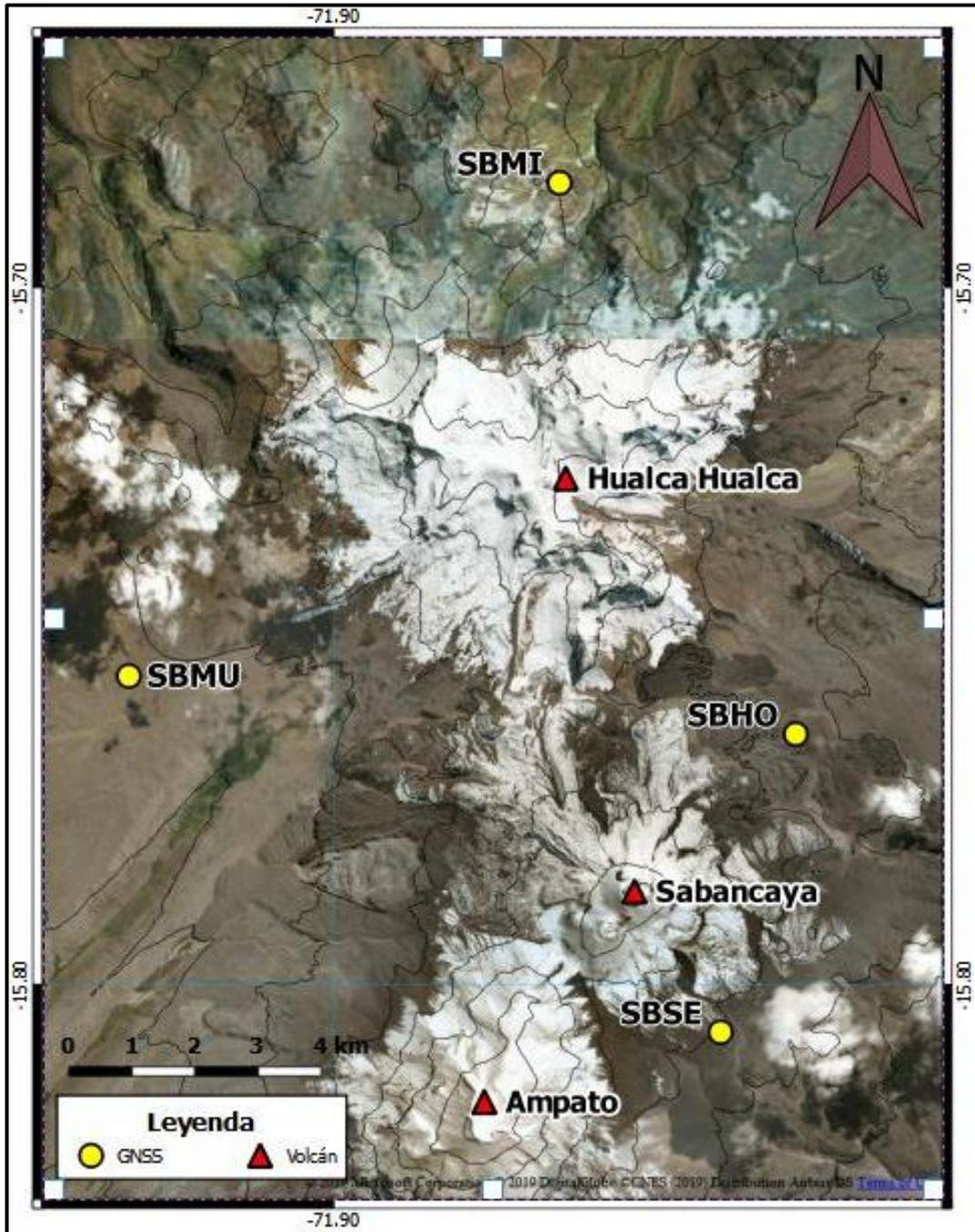


Figura 4. Red geodésica de estaciones GNSS de operación continua del volcán Sabancaya durante el 2019.

La red del volcán Ubinas durante el periodo a analizar, ha estado constituida por dos estaciones geodésicas ubicadas de acuerdo a la Figura 5.



Figura 5. Red geodésica de estaciones GNSS de operación continúa del volcán Ubinas durante el 2019.

La red del volcán Misti durante el periodo a analizar, ha operado con una estación geodésica ubicada en el flanco norte del volcán, ver Figura 6.

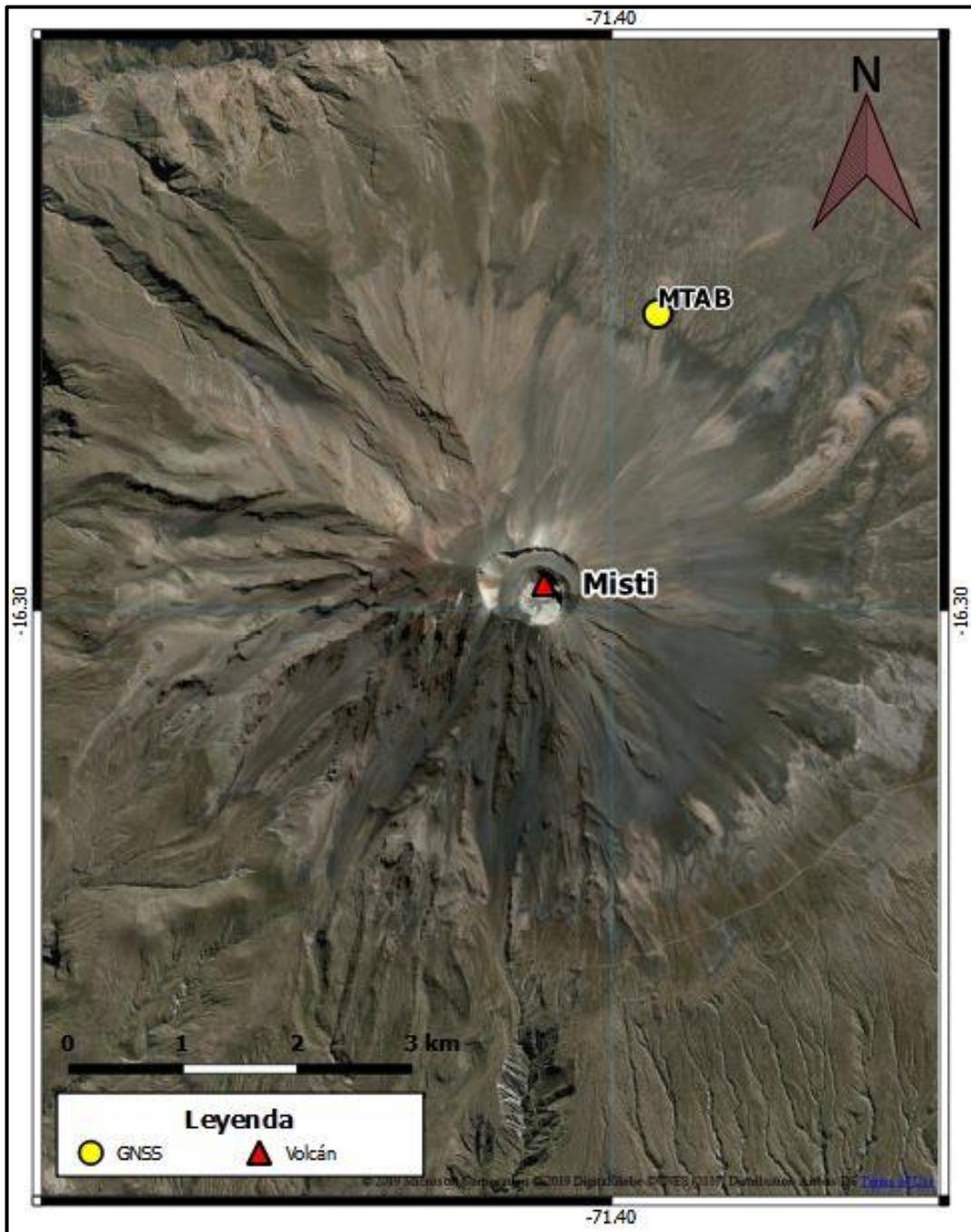


Figura 6. Estación GNSS de operación continua del volcán Misti.

7. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

El procesamiento de los datos GNSS se trabajó utilizando el programa científico GAMIT/GLOBK v.10.7 (Herring et al., 2010), dos programas desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en colaboración con el Instituto Scripps de Oceanografía y el Centro Harvard-Smithsonian para la Astrofísica con soporte de la Fundación Nacional de Ciencias.

Tanto GAMIT como GLOBK, son un conjunto de módulos, librerías y subprogramas compilados bajo un mismo entorno, trabajando de manera contigua bajo una metodología. Para este análisis de deformación volcánica, se utilizó los resultados del procesamiento de líneas base.

Una línea base es la distancia que existe entre un par de estaciones geodésicas, para las cuales se han tomado datos GNSS simultáneamente. Este es uno de los resultados más exactos en el procesamiento de datos de posición satelital, debido a que es independiente de cualquier marco de referencia. Las series temporales de línea base nos permiten reconocer deformaciones superficiales entre cada par de estaciones dentro de una red geodésica.

Las líneas base procesadas entre cada par de estaciones de la red geodésica de cada volcán se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Líneas base procesadas de las redes geodésicas de los volcanes Sabancaya y Ubinas. .

Sabancaya	Ubinas
SBSE – SBHO	UBGW - UBHU
SBSE – SBMI	
SBHO – SBMI	

Para el caso del volcán Misti, debido a la ausencia de una estación adicional para poder realizar la línea base, se consideró procesar la serie temporal de las coordenadas verticales.

8. RESULTADOS

8.1. Deformación Volcánica en el Sabancaya

Las líneas base de la Figura 7, procesadas para el volcán Sabancaya, muestran pendientes. Este tipo de pendientes son sinónimo de un proceso de extensión, que a su vez, es interpretado como un proceso de inflación, en este caso, se da de manera lenta y constante durante todo el año 2019. Los valores de la tasa de extensión anual (velocidad de línea base) calculados para cada línea base son de 1.5 – 3 cm/año (Tabla 2).

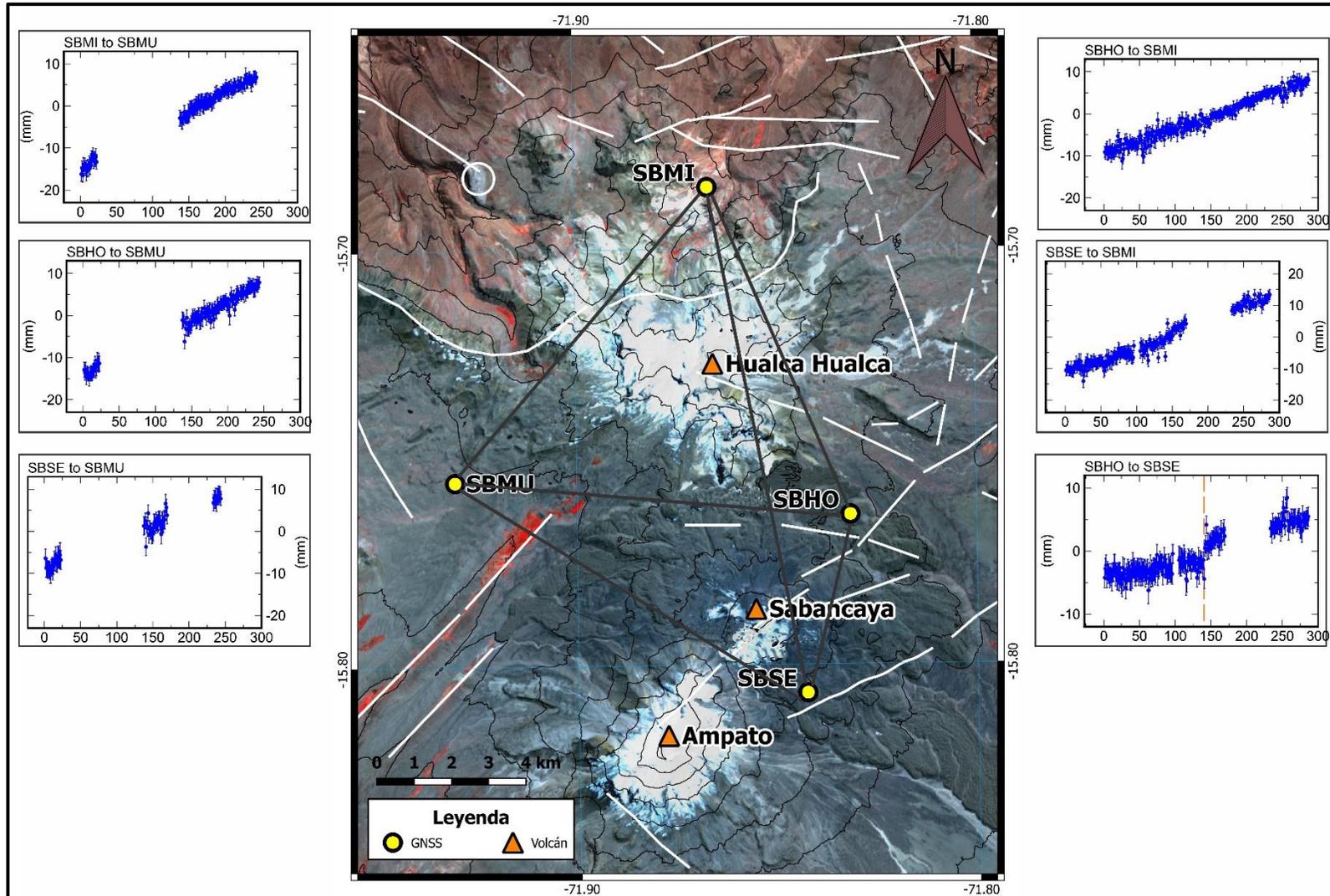


Figura 7. Resultados de las líneas base en la red geodésica de estaciones GNSS del volcán Sabancaya durante el 2019.

Tabla 2. Tasa de extensión anual (velocidad) para las líneas base procesadas en el volcán Sabancaya. Los calores de wrms y nrms representan a la raíz media cuadrática ponderada y a la raíz media cuadrática normalizada de los residuales.

Línea Base	Velocidad (mm/año)	wrms (mm)	nrms (mm)
SBHO - SBSE	13.54 ± 0.44	1.3	0.84
SBHO - SBMI	22.63 ± 0.33	0.9	0.78
SBHO - SBMU	32.20 ± 0.76	1.0	0.57
SBSE – SBMI	31.96 ± 0.47	1.5	0.89
SBSE – SBMU	25.40 ± 1.12	1.3	0.65
SBMI - SBMU	33.43 ± 0.71	0.6	0.42

Adicionalmente la línea base SBHO-SBSE presenta procesos de deformación asociados a eventos tectónicos. La línea naranja en la Figura 8 representa a los dos sismos ocurridos el 21 de mayo (4.5 y 4.1 ML) y procesos similares se observan durante el mes de septiembre, mes en el que la ocurrencia de sismos (Tabla 3) estuvo localizada al este del volcán Sabancaya (Figura 8).

Tabla 3. Lista de eventos sísmicos ocurridos al este del volcán Sabancaya (Fuente: Instituto Geofísico del Peru).

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud
21/05/2019	-15.79	-71.83	12 km	4.5 ML
21/05/2019	-15.80	-71.85	12 km	4.1 ML
01/09/2019	-15,79	-71,76	9 km	3,3 ML
02/09/2019	-15,79	-71,74	9 km	3,4 ML
02/09/2019	-15,81	-71,74	7 km	3,7 ML
06/09/2019	-15,81	-71,72	10 km	3,4 ML
06/09/2019	-15,79	-71,75	13 km	3,6 ML
08/09/2019	-15,80	-71,75	9 km	3,4 ML
10/09/2019	-15,70	-71,97	11 km	3,6 ML
15/09/2019	-15,80	-71,73	10 km	3,5 ML

15/09/2019	-15,81	-71,74	10 km	3,7 ML
15/09/2019	-15,82	-71,74	9 km	3,5 ML
16/09/2019	-15,81	-71,74	9 km	3,7 ML
23/09/2019	-15,81	-71,74	13 km	3,4 ML
25/09/2019	-15,79	-71,74	11 km	3,4 ML
25/09/2019	-15,81	-71,74	12 km	3,6 ML
27/09/2019	-15,81	-71,74	12 km	3,5 ML
28/09/2019	-15,80	-71,72	9 km	3,4 ML

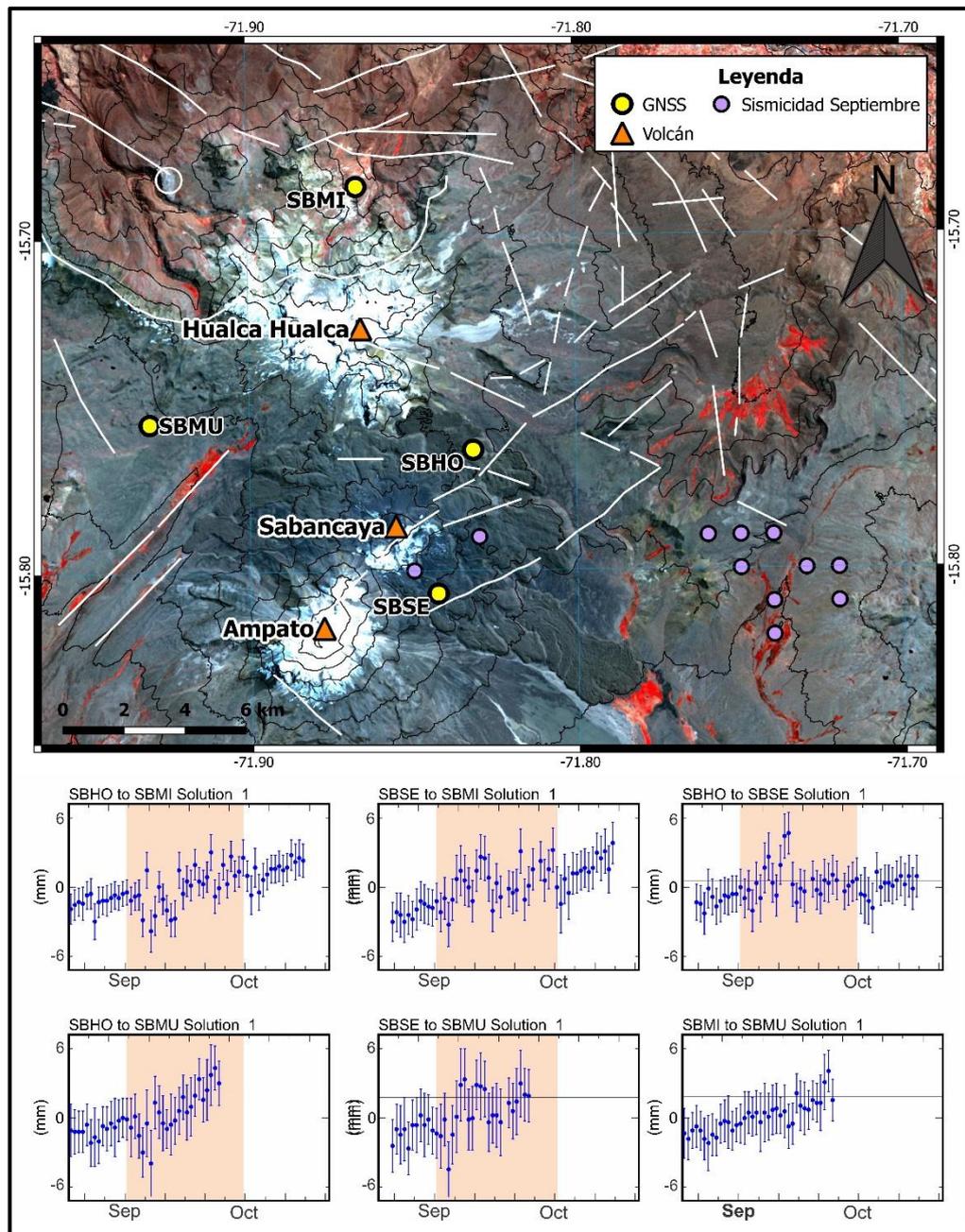


Figura 8. Correlación de la línea base SBHO-SBSE con la tasa de sismicidad

ocurrida en el volcán Sabancaya.

8.2. Deformación Volcánica en el Ubinas

La línea base UBGW-UBHU (Figura 8) procesada para el volcán Ubinas muestra desde mayo hasta el 27 de julio una pendiente positiva de 7.15 ± 1.12 mm/año. Este proceso de extensión, precedió a los eventos explosivos reportados el 19 y 22 de julio (Figura 9). Anterior y posterior a este periodo se evidencia un proceso de estabilidad.

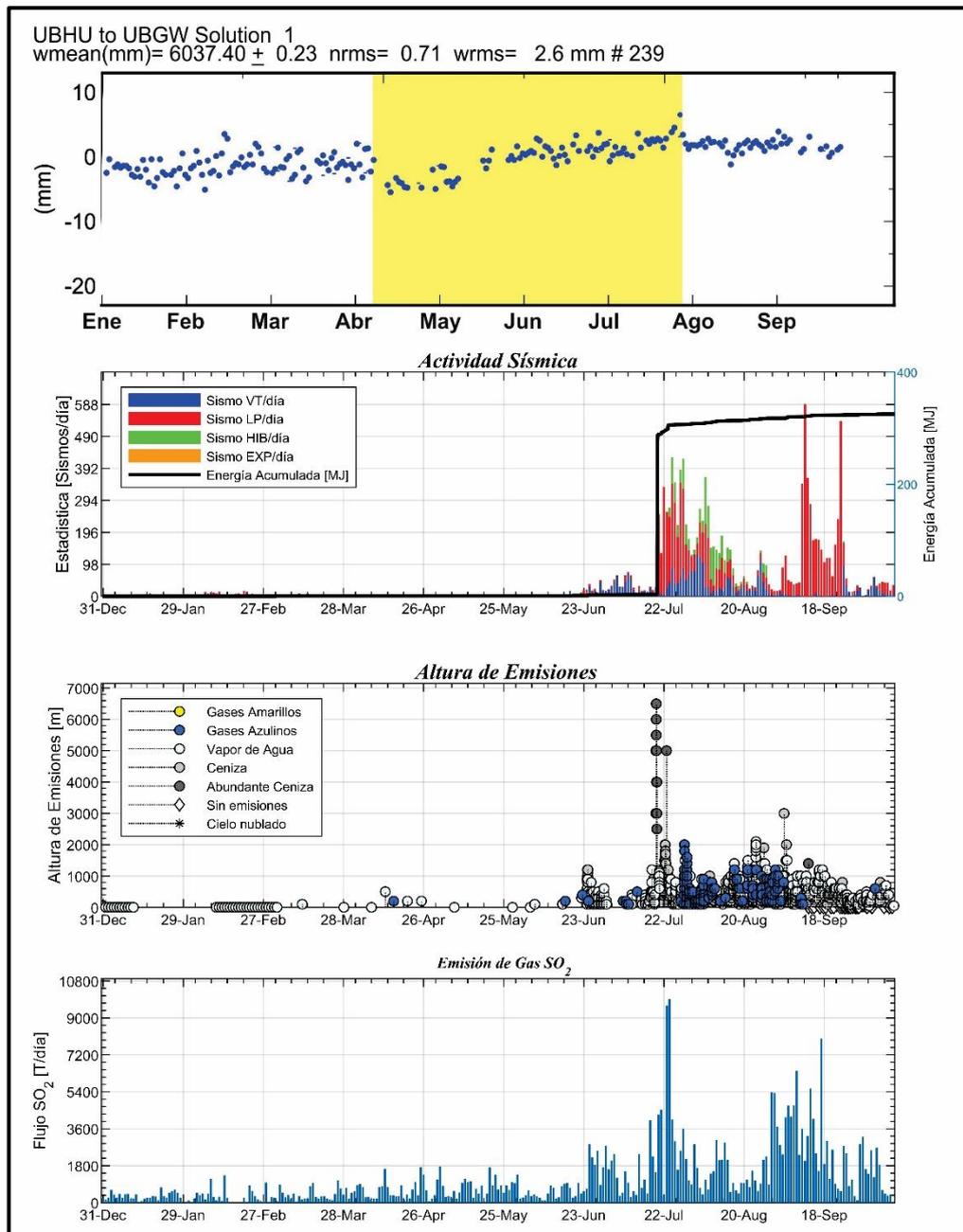


Figura 8. Resultado de la línea base en la red geodésica de estaciones GNSS del volcán Ubinas durante el 2019.

8.3. Deformación Volcánica en el Misti

La componente vertical de las coordenadas, expresada en la serie temporal de la estación MTAB (Figura 9), no muestra cambios asociados a procesos de inflación o deflación. El resultado muestra que el volcán se encuentra en una etapa estable.

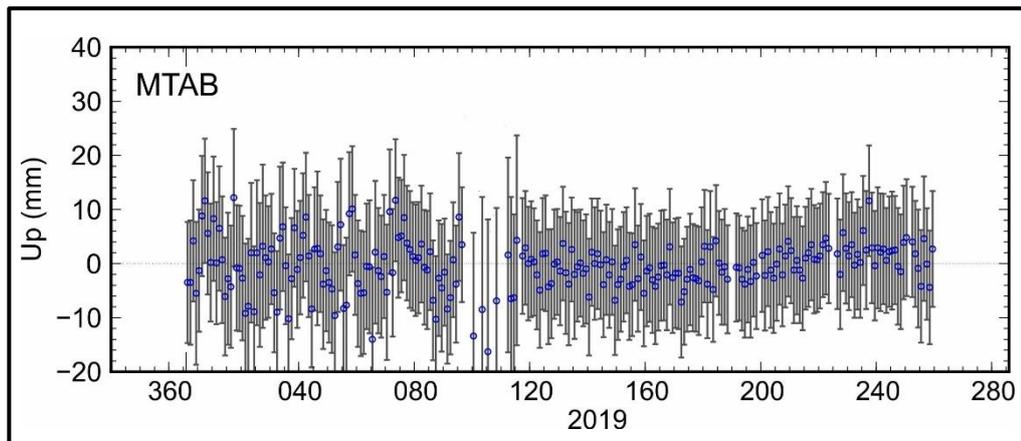


Figura 9. Resultado de la serie temporal vertical de la estación GNSS del volcán Misti (MTAB) durante el 2019.

9. CONCLUSIONES

1. El procesamiento de datos GNSS del volcán Sabancaya, ha permitido determinar procesos de deformación asociados a eventos volcánicos y tectónicos. La actividad volcánica muestra un claro proceso inflacionario, con una tasa máxima de 33.43 ± 0.71 mm/año en la línea base SBMI-SBMU.
La sismicidad ocurrida durante el mes de septiembre causó desplazamientos entre las estaciones de monitoreo geodésico ubicadas al este del volcán, evidenciándose en los resultados de las líneas base del mes de septiembre.
2. El procesamiento de datos GNSS del volcán Ubinas, ha permitido determinar un proceso de inflación de una magnitud de 7.15 ± 1.12 mm/año desde mayo hasta el 27 de julio. Este proceso, interpretado como un proceso de inflación, precedió a los eventos explosivos reportados el 19 y 22 de julio. Anterior y posterior a este periodo se evidencia un proceso de estabilidad.
3. El procesamiento de datos GNSS del volcán Misti, ha permitido determinar que el volcán no muestra procesos de deformación volcánica que impliquen señales precursoras de una erupción.

10. RECOMENDACIONES

- Los trabajos de procesamiento de datos GNSS, deben mantenerse como técnica imprescindible en el monitoreo de volcanes activos como el volcán Sabancaya y Ubinas, o de muy alta amenaza eruptiva, Misti, Ticsani, Coropuna, Yucamane, entre otros pertenecientes a la cadena volcánica sur del Perú.
- Complementar los resultados en el volcán Sabancaya con el modelamiento de las velocidades de deformación de los datos GPS.
- Complementar los estudios de deformación volcánica con datos de inclinometría.
- Ampliar la red del volcán Ubinas y Misti con al menos una estación geodésica GNSS para poder realizar el modelamiento respectivo.
- Ampliar la red del volcán Misti con al menos una estación geodésica para poder procesar resultados de línea base, teniendo en cuenta su alto nivel de peligro para la ciudad de Arequipa.
- Implementar estudios de deformación mediante el uso de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) y procesamiento de interferometría (InSAR).

BIBLIOGRAFIA

- Abidin, H. Z. (1998). Monitoring the volcano deformation using repeated GPS surveys: Experiences and plans. *In Proc. Int. Workshop on Advances in GPS Deformation Monitoring, Perth, Australia* , pp. 24-25.
- Dvorak, J. J., & Dzurisin, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 343-384.
- Galland, O. (2012). Experimental modelling of ground deformation associated with shallow magma intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 317, 145-156.
- Herring, T., Floyd, M., King, R., & McClusky, S. (2010). Introduction to Gamit/Globk. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Janssen, V. (2003). *A mixed-mode GPS network processing approach for volcano deformation monitoring*. Doctoral Thesis, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales.
- Pritchard, M. E. (2003). Recent crustal deformation in west-central South America. Doctoral dissertation, California Institute of Technology.
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. *Nature*, 418(6894), 167.
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(2).