



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP



Equipo GNSS instalado en el flanco sureste del volcán Ubina

## INFORME VULCANOLÓGICO

# Monitoreo de la deformación volcánica con GNSS en los volcanes activos del Perú

Fecha: abril de 2020

2020

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe vulcanológico

IGP/CENVUL-UBI/IV 2020-0002

Monitoreo de la deformación volcánica con GNSS en los volcanes activos del Perú

Autores:

Katherine Andrea Vargas Alva

John Edward Cruz Igme

Juan Carlos Villegas Lanza

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz n.º 169, Mayorazgo, Ate

Teléfono: 51-1-3172300

## RESUMEN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), realiza el monitoreo de la deformación de los volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú utilizando los Sistemas de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS). Estos equipos permiten determinar cambios milimétricos en la superficie del edificio volcánico previo, durante y después de un proceso eruptivo.

Las series de tiempo obtenidas con GNSS permanentes, en correlación con los datos sísmicos, proporcionan información importante acerca de los procesos que ocurren al interior del volcán. En el **volcán Misti**, en el periodo agosto de 2017 y diciembre de 2019 no se ha registrado deformación significativa en el flanco sureste. Se calculó una tasa de desplazamiento de 1.9 mm/año en dirección suroeste y un levantamiento de 0.1 mm/año, lo cual se correlaciona con el bajo índice de sismicidad. En el **volcán Sabancaya**, entre diciembre de 2018 y diciembre de 2019, se ha registrado un desplazamiento de 5.1 mm/año en dirección sureste y un levantamiento del sector norte, a una tasa de 33 mm/año. El cambio de aceleración del proceso inflacionario del volcán Sabancaya se correlaciona con la actividad sísmica, ligada a la ocurrencia de enjambres sísmicos producto de probables intrusiones o ascensos de magmas. En el **volcán Ubinas**, entre febrero a diciembre de 2019, se ha registrado en el flanco suroeste un desplazamiento de 2.6 mm/año en dirección noreste y una aceleración en la componente vertical (inflación) de 10 mm/año, la cual se acentuó a partir de mayo de 2019, posiblemente ligada al inicio del proceso eruptivo del volcán Ubinas. Posteriormente, la sismicidad cesó considerablemente a inicios de noviembre, corroborada con una desaceleración en la tasa de deformación.

Desde noviembre de 2018, se ha realizado la implementación de una red de puntos de control geodésico temporal en 13 volcanes, a fin de establecer puntos de referencia fijos y líneas de base las cuales permitirán evaluar la evolución de la deformación de los volcanes activos del sur del Perú. Se presentan resultados preliminares de los puntos de control GNSS medidos en dos oportunidades. En el **volcán Sara Sara**, los vectores de desplazamiento para el punto de control geodésico, ubicado en su flanco sureste (medido en marzo y diciembre de 2019), muestra una dirección de desplazamiento horizontal de

28 mm hacia el suroeste y un desplazamiento positivo en la componente vertical de 6 mm, lo cual sugiere levantamiento. En el **volcán Coropuna**, el punto de control geodésico, ubicado en el sector norte de dicho volcán, muestra un desplazamiento de 34 mm hacia el noroeste y un desplazamiento positivo de 41 mm en la vertical (levantamiento), medido entre abril y diciembre de 2019. Por último, en el **volcán Tutupaca** se midieron dos puntos de control, ubicados en el cráter del volcán y en el sector norte. En el primero, medido en noviembre de 2018 y diciembre de 2019, se registró un desplazamiento horizontal de 13 mm en dirección noreste y un levantamiento de 12 mm en la vertical. El punto ubicado en el sector norte (medido en abril y diciembre de 2019) ha registrado un desplazamiento horizontal de 6 mm hacia el norte y un levantamiento de 5 mm en la vertical. Los resultados preliminares muestran que esta ligera deformación estaría asociada a la actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico generada tras el fracturamiento de rocas al interior de los volcanes y a la actividad de fallas locales. Los desplazamientos calculados no son de magnitud significativa. Correlacionados con la actividad sísmica, estos sugieren que no existen indicios vinculados al desarrollo de una erupción en el corto o mediano plazo en estos volcanes.

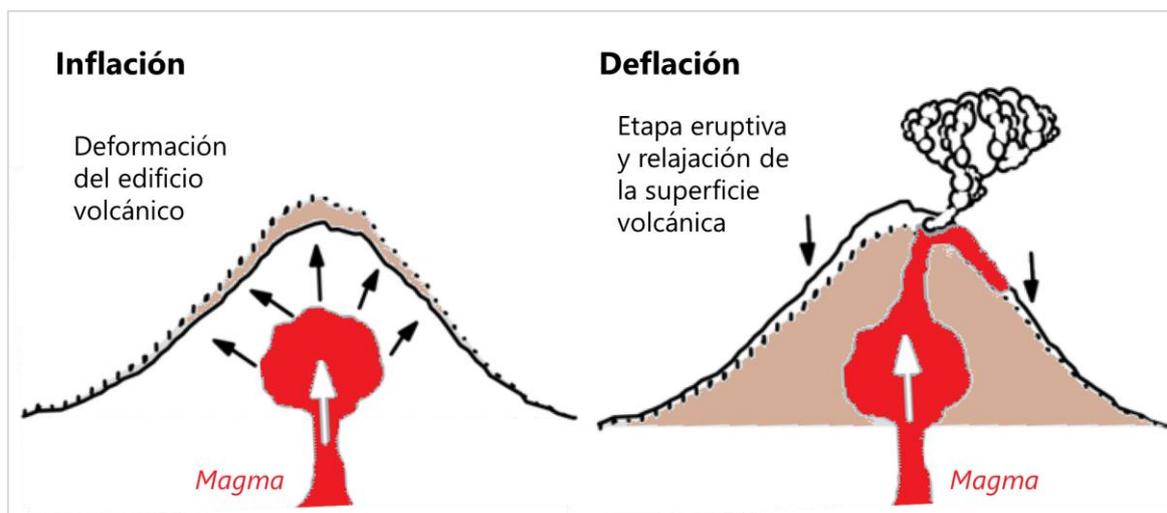
# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN VOLCÁNICA UTILIZANDO GNSS .....	10
1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	11
1.3. OBJETIVO .....	13
<b>CAPÍTULO II: MONITOREO GNSS PERMANENTE DE LOS VOLCANES MISTI, SABANCAYA Y UBINAS .....</b>	<b>14</b>
2.1. METODOLOGÍA .....	15
2.1.1. <i>Instalación</i> .....	15
2.1.2. <i>Transmisión de datos y procesamiento</i> .....	16
2.2. VOLCÁN MISTI .....	17
2.2.1. <i>Equipos y periodo de registro</i> .....	17
2.2.2. <i>Resultados</i> .....	17
2.3. VOLCÁN SABANCAYA .....	21
2.3.1. <i>Equipos y periodo de registro</i> .....	21
2.3.2. <i>Resultados</i> .....	22
2.4. VOLCÁN UBINAS .....	25
2.4.1. <i>Equipos y periodo de registro</i> .....	25
2.4.2. <i>Resultados</i> .....	26
<b>CAPÍTULO III: IMPLEMENTACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICOS TEMPORALES EN LOS VOLCANES ACTIVOS DEL PERÚ.....</b>	<b>33</b>
3.1. METODOLOGÍA .....	34
3.1.1. <i>Monumentación e instalación</i> .....	34
3.1.2. <i>Ubicación de puntos de control geodésico</i> .....	35
3.1.3. <i>Procesamiento</i> .....	41
3.2. RESULTADOS PRELIMINARES .....	41
3.2.1. <i>Volcán Sara Sara</i> .....	42
3.2.2. <i>Volcán Coropuna</i> .....	44
3.2.3. <i>Volcán Tutupaca</i> .....	46
<b>DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>49</b>

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>52</b>

## INTRODUCCIÓN

La deformación del suelo debido al ascenso de magma se reconoce como una señal precursora importante de la actividad eruptiva en un volcán. Antes de que ocurra una erupción, la superficie del suelo generalmente se expande debido al aumento de la presión ligado al ascenso de magma hacia la cámara magmática superficial o a través del conducto volcánico. La tendencia se invierte después que el magma es expulsado hacia la superficie y causa la deflación de los flancos del edificio volcánico (Figura 1). El patrón y la velocidad de los desplazamientos superficiales revelan la profundidad y la velocidad por el aumento de la presión al interior de la cámara magmática (Dvorak y Dzurisin, 1997), lo que brinda información importante sobre el estado de un volcán. Como la deformación del suelo tiende a preceder a las erupciones por períodos de horas a meses, el monitoreo geodésico es una herramienta efectiva para la mitigación de riesgos (Janssen, 2007; Battaglia et al., 2019).



**Figura 1.-** Deformación de la superficie de un volcán causada por actividad magmática (modificado de Abidin, 1998).

Entre las técnicas utilizadas para el monitoreo de la deformación de volcanes se encuentran el sistema global de navegación por satélite (GNSS), que mide los cambios en la pendiente del cono volcánico utilizando inclinómetros electrónicos, medida electrónica de distancias (EDM) y la interferometría diferencial de radar de apertura sintética (dInSAR).

En el sur del Perú, existen 16 volcanes activos y potencialmente activos que representan un riesgo para más de 3 millones de personas. Durante los últimos siglos, las erupciones

de estos volcanes afectaron muchos poblados. El desastre de origen volcánico mejor documentado ocurrido en época histórica está ligado a la gran erupción pliniana del volcán Huaynaputina (Índice de Explosividad Volcánica-IEV 6), ocurrida en el año 1600 e. c. (Thouret et al., 1999), que causó la muerte de cerca de 1500 personas en los valles de Omate y Tambo. En menor medida, la erupción explosiva del volcán Tutupaca (1802 e. c.) que afectó la zona altoandina de Tacna (Samaniego et al., 2015). Recientemente, las erupciones del volcán Sabancaya (1990-1998; 2016-actualidad) y del volcán Ubinas (2006-2009; 2013-2017; 2019-actualidad) (Rivera et al., 2010; 2014; Del Carpio & Tavera, 2019; Puma & Del Carpio, 2019), a pesar de ser erupciones leves (IEV 1-2), generaron considerables impactos en el medio ambiente, las poblaciones, terrenos de cultivos, fuentes de agua, etc.

Por este motivo, el IGP realiza el monitoreo de los volcanes activos del Perú (Figura 2) a través de redes geofísicas compuestas por instrumentos sismológicos, geodésicos, geoquímicos y visuales instalados en los volcanes y áreas aledañas. La información técnico-científica generada por el CENVUL, a través de alertas, reportes, boletines e informes vulcanológicos, es emitida de manera oportuna a las autoridades de los diferentes niveles de gobierno para la toma de decisiones.



**Figura 2.-** Volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano. Doce ellos son monitoreados en tiempo real por el IGP.

El monitoreo geodésico continuo y temporal que realiza el IGP permite detectar desplazamientos milimétricos y monitorear tasas de deformación que sirven para evaluar y correlacionar el potencial eruptivo de un volcán. Actualmente, se cuentan con 5 estaciones GNSS permanentes instaladas en los volcanes Misti, Sabancaya y Ubinas que han sido progresivamente instaladas desde 2017 y vienen funcionando hasta la actualidad. Las series de tiempo GNSS son insumos para la elaboración de reportes diarios, boletines semanales y quincenales de estos tres volcanes. Además, se ha realizado la implementación de 34 puntos de control geodésicos de campaña en 13 volcanes: Cerro Auquihuato (1), Sara Sara (3), Coropuna (5), Solimana (1), Sabancaya (2), Chachani (1), Misti (1), Huaynaputina (3), Ubinas (5), Ticsani (4), Tutupaca (4), Yucamane (2) y Casiri (2).

## **1.1. MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN VOLCÁNICA UTILIZANDO GNSS**

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es posiblemente la herramienta de navegación, topografía y geodésica más versátil jamás desarrollada. Aunque su uso es relativamente reciente en la vulcanología, el GNSS rápidamente se ha hecho espacio entre las técnicas convencionales de monitoreo de volcanes. A diferencia de la mayoría de las otras técnicas geodésicas, el GNSS mide no solo un único parámetro relacionado con las posiciones relativas de dos puntos (p. ej., diferencia de altura, longitud de línea o rumbo), sino también la posición tridimensional completa de cada punto en un marco de referencia absoluta. Esta es la única técnica que permite monitorear los desplazamientos de la superficie en 3D de forma remota y continua con precisión milimétrica, independientemente de las condiciones climáticas, las 24 horas del día. Además, no hay requisitos de visibilidad entre estaciones dentro de una red GPS y las mediciones pueden realizarse a distancias relativamente largas (Dzurisin, 2007).

Desde la década de 1990, las estaciones de GNSS continuas fueron utilizadas en ciencias de la Tierra, siendo de mucho beneficio para controlar los movimientos del suelo en numerosos sistemas volcánicos, con ejemplos de casos exitosos en el volcán Hekla en Islandia (Foulger et al., 1987; Sigmundsson et al., 1992), volcán Monte Unzen en Japón (Nishi et al., 1999) y volcán Soufriere Hills en Montserrat (Shepherd et al., 1998).

## 1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, son escasos los estudios sobre la deformación de los volcanes del Perú, debido principalmente a la falta de información proveniente de redes o instrumentos de monitoreo que permitan cuantificar los cambios de deformación de los edificios volcánicos. A continuación, se describen resultados y principales conclusiones de algunos estudios de investigación que abordan la deformación de algunos volcanes peruanos. Cabe precisar que en la mayoría de estas investigaciones se ha utilizado la técnica InSAR con ayuda de imágenes satelitales.

Con relación al **volcán Sabancaya**, Pritchard y Simons (2002) analizaron imágenes InSAR para el periodo junio de 1992 y abril de 1996 y evidenciaron deformación al noreste del volcán Hualca-Hualca, la cual probablemente estuvo asociada al proceso eruptivo del volcán Sabancaya (1990-1998) y a la actividad tectónica. Posteriormente, Gonzáles et al., (2009) compararon imágenes de radar de diciembre de 2002 y septiembre de 2003 y observaron deformación al noroeste del volcán, la cual fue asociada a la actividad de fallas normales activas Solarpampa y Trigal, probablemente influenciada por la actividad volcánica del Sabancaya. Estudios recientes de Delgado et al., (2018) comparan imágenes de diciembre de 2015 y diciembre de 2017, las que mostraron que la mayor deformación ocurre al norte del volcán Sabancaya con una gran zona que muestra levantamiento. Dicha deformación incluye movimiento asísmico de una falla con ruptura superficial, además de deformaciones de menor envergadura localizadas en varias áreas diferentes.

Respecto al **volcán Coropuna**, Pritchard (2003) analizó imágenes satelitales de radar para el periodo del 9 de abril de 1996 al 9 de enero de 2002 y obtuvo un interferograma que muestra deformación importante. El autor presume que dicha deformación pudo haber ocurrido entre el 21 de octubre de 1997 y el 9 de enero de 2002. Aunque el momento exacto de la deformación no se puede precisar, el autor propone que la deformación podría estar relacionada con el terremoto de Arequipa del 2001 (8.4 Mw) y su secuencia de réplicas, ya que esta deformación parece ser única en este intervalo de tiempo. Pritchard (2003) plantea que la deformación puede deberse a la consolidación de un depósito poroso (probablemente volcánico) y la expulsión de líquido, principalmente a los ríos cercanos, aunque hay un levantamiento limitado en el interferograma del Coropuna.

Con relación al **volcán Ticsani**, existen dos estudios de interferometría radar (InSAR) realizados por Gonzales et al., (2006) y Jay et al., (2013). En ambos estudios los autores identificaron dos zonas de deformación que probablemente estuvieron asociadas a los eventos sísmicos ocurridos en octubre de 2005. La interpretación de las imágenes InSAR, muestra que la deformación habría ocurrido entre el 29 de junio y el 22 de noviembre de 2005 (Jay et al., 2013). La primera zona deformada se ubica a 7 km al noroeste del volcán Ticsani y presenta un área de subsidencia y otra de levantamiento, con desplazamientos de tipo normal que coinciden con una falla activa de orientación N155° (Gonzales et al., 2009). La segunda zona de deformación se localiza a 17 km al sureste del volcán y corresponde a una amplia subsidencia de forma elíptica; en este caso, no se ha observado asociación alguna con deformaciones por fractura superficial. Jay et al., (2015) sugieren una posible relación entre las dos deformaciones, a 7 km al NO y a 17 km al sureste del volcán, sugiriendo que el enjambre de sismos ocurridos inicialmente podría haber debilitado el sistema de fallas, lo que provocó la liberación de los fluidos atrapados al sureste del volcán y, generó a su vez, nuevos sismos de fractura y subsidencia de la zona.

En el **volcán Cerro Auqui huato** (región Ayacucho), Morales et al., (2016), mediante la comparación de imágenes InSAR adquiridas entre los años 2007-2011, detectaron tasas de deformación de hasta 1.8 cm/año localizadas a 7 km al SE de dicho volcán. La proximidad de tal deformación al volcán Auqui huato sugiere que la señal es de origen volcánico y ha sido atribuida a presurización de una fuente magmática, aunque también se sugiere que esta puede ser de origen hidrotermal.

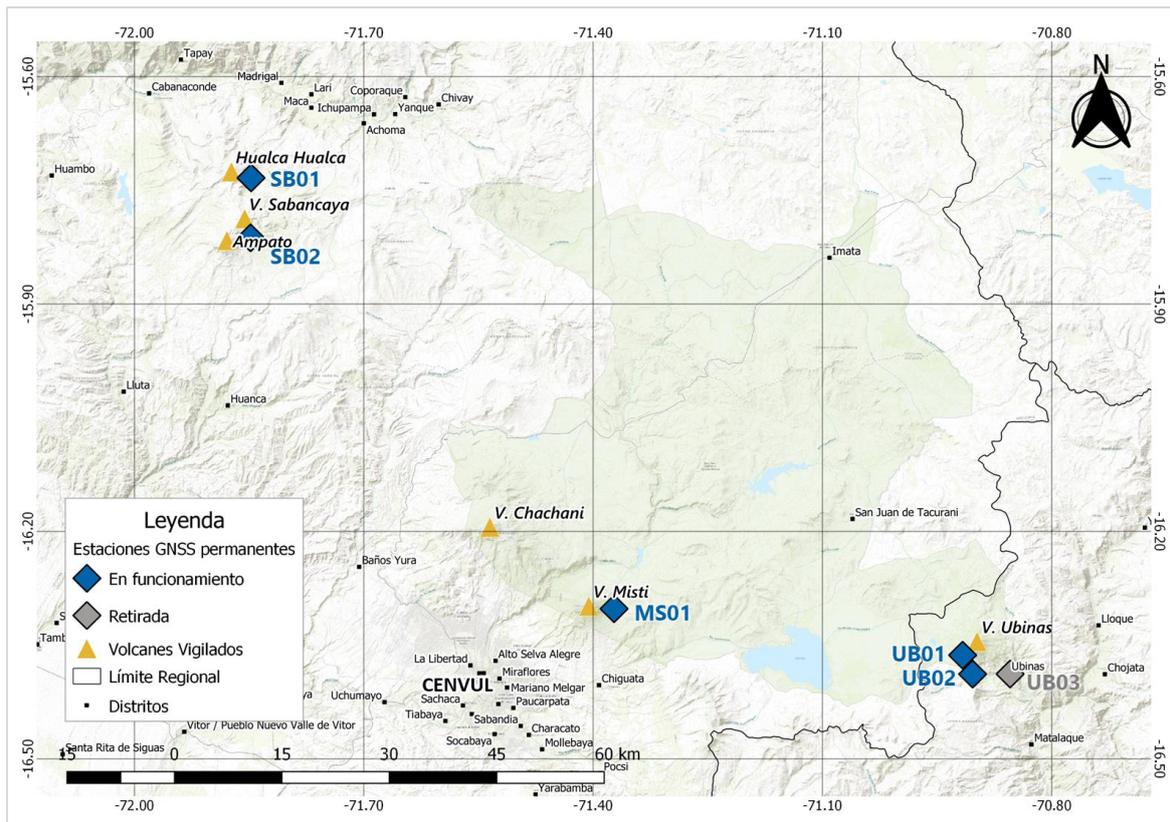
Los estudios mencionados anteriormente muestran importantes resultados sobre los procesos de deformación e inferencias sobre la estructura interna de algunos volcanes peruanos. Dichos estudios también sugieren que, para una mejor interpretación, los resultados deberían ser correlacionados con datos medidos directamente en campo. Por otro lado, para realizar un adecuado pronóstico de una erupción volcánica es importante implementar y fortalecer el monitoreo geodésico de la deformación en los volcanes activos del sur del Perú, razón por la cual el IGP viene realizando la instalación de instrumentos de monitoreo permanente y de puntos de control geodésicos que tienen en consideración los resultados antes mencionados.

### **1.3. OBJETIVO**

El presente informe tiene como objetivo presentar resultados del monitoreo de la deformación de los volcanes Misti, Ubinas y Sabancaya realizado mediante instrumentos GNSS y documentar la reciente implementación de puntos de control geodésicos en 12 volcanes activos del Perú con resultados preliminares en 3 de ellos. Con esto, se busca evidenciar que el monitoreo de la deformación volcánica es muy útil para comprender la dinámica interna de un volcán previo, durante y posterior a un proceso eruptivo, información que sirve de insumo para la generación de información técnica-científica para la gestión del riesgo de desastres.

## CAPÍTULO II: MONITOREO GNSS PERMANENTE DE LOS VOLCANES MISTI, SABANCAYA Y UBINAS

La implementación de la red de monitoreo GNSS permanente se inició en el año 2017 con la instalación de una estación GNSS en el flanco este del volcán Misti gracias al apoyo del Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP, por sus siglas en inglés) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Posteriormente, en el marco del proyecto “Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta Volcánica en la Región Sur del Perú”, el IGP adquirió en 2018 cuatro estaciones GNSS, las cuales han sido progresivamente instaladas en los volcanes Sabancaya y Ubinas. En la Figura 3 se presenta la ubicación de las estaciones GNSS permanentes que integran la actual red de monitoreo volcánico permanente para el pronóstico, análisis y estudio de las erupciones volcánicas.



**Figura 3.-** Red de monitoreo de estaciones GNSS permanentes instaladas por el IGP en los volcanes Misti, Sabancaya y Ubinas, la cual transmite información en tiempo real al CENVUL en Arequipa.

## 2.1. METODOLOGÍA

### 2.1.1. Instalación

Una estación geodésica consta básicamente de una antena y un receptor. Para el caso de las estaciones permanentes, la antena GNSS es instalada sobre un monumento de concreto (Figura 4A). La antena direccionada hacia el norte se instala y ajusta sobre la base nivelada (Figura 4B y 4C). Como medida de protección el equipo es cubierto por un domo tipo SCIGN (Figura 4D). El receptor GNSS es guardado en una caja metálica donde se ubica el registrador, batería, entre otros (Figura 4E). Además, es conectado por puerto Ethernet al mismo equipo que transmite los datos sísmicos vía telemetría a las oficinas del CENVUL para su posterior análisis (Figura 4F).



**Figura 4.-** Instalación de estación GNSS: A) monumento, B) base nivelante y ducto protector, C) antena, D) domo protector, E) configuración del receptor y F) estación completa GNSS.

### **2.1.2. Transmisión de datos y procesamiento**

La estación GNSS del volcán Misti, cuyo receptor es marca *Javad*, adquiere datos cada 15 segundos. Para el caso de las estaciones de los volcanes Ubinas y Sabancaya (marca *Trimble*), se tienen configuradas dos sesiones de muestreo: la primera cada 30 segundos (permite registrar ~1000 días de datos, 2 GB), luego de ello, empezará a eliminar el dato más antiguo; todos los datos son enviados vía telemetría a las oficinas del CENVUL en Arequipa; y la segunda sesión de muestreo se realiza cada 0.2 segundos (5 Hz); se almacena hasta un mes y medio de datos (6 GB) que son analizados en casos de crisis volcánica.

Una vez que los datos son recepcionados en los servidores del CENVUL, se realiza la descarga y conversión en diferentes formatos. Para la simplificación y automatización de dicha actividad se han elaborado rutinas de procesamiento automático con el programa *Python*. Es así que se descargan los archivos diarios desde el servidor, luego se convierten a formato TGD (para los archivos *Trimble* T02) y, finalmente, se transforman al formato universal *Rinex 2.0* en compresión *Hatanaka*.

El procesamiento de datos GNSS se ha realizado con el software licenciado *Trimble Business Center* (TBC), a través de la obtención de soluciones diarias con las que se elaboran series de tiempo que representan el desplazamiento calculado en las componentes este, norte y elevación. El software TBC permite el procesamiento de datos brutos de observaciones GNSS de Trimble como también RINEX en todos sus formatos. El flujo de trabajo consiste en importar los archivos de observación, fijar puntos de referencia con sus respectivas coordenadas precisas, configurar el estilo de procesamiento y ajustar las redes. Como estación de referencia se viene utilizando la estación AREG del Servicio Internacional de GNSS (IGS), ubicada en el distrito de Characato (Arequipa), que se encuentra a 22.2 km de distancia del volcán Misti (el volcán más cercano) y a 89.4 km del volcán Sabancaya (el volcán más alejado). Actualmente, se viene trabajando en la automatización del procesamiento de

datos GNSS con el software Gamit/Globk del *Massachusetts Institute of Technology* y evaluando el uso de GipsyX desarrollado por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA.

## 2.2. VOLCÁN MISTI

### 2.2.1. Equipos y periodo de registro

El Misti es monitoreado por el IGP desde el año 2001 con estaciones sísmicas temporales y, desde el año 2005, permanentemente con una red sísmica compuesta por 6 estaciones sísmicas telemétricas. En agosto de 2017, el IGP y el programa VDAP del USGS, en el marco de un programa de cooperación científica, instalaron la estación GNSS **MS01**, ubicada en el flanco este del volcán Misti (Figura 5), a una distancia aproximada de 3.5 km del cráter. Esta estación viene operando desde agosto de dicho año y está compuesta por un receptor Javad TRE\_G3TH y una antena RingAnt-DM.



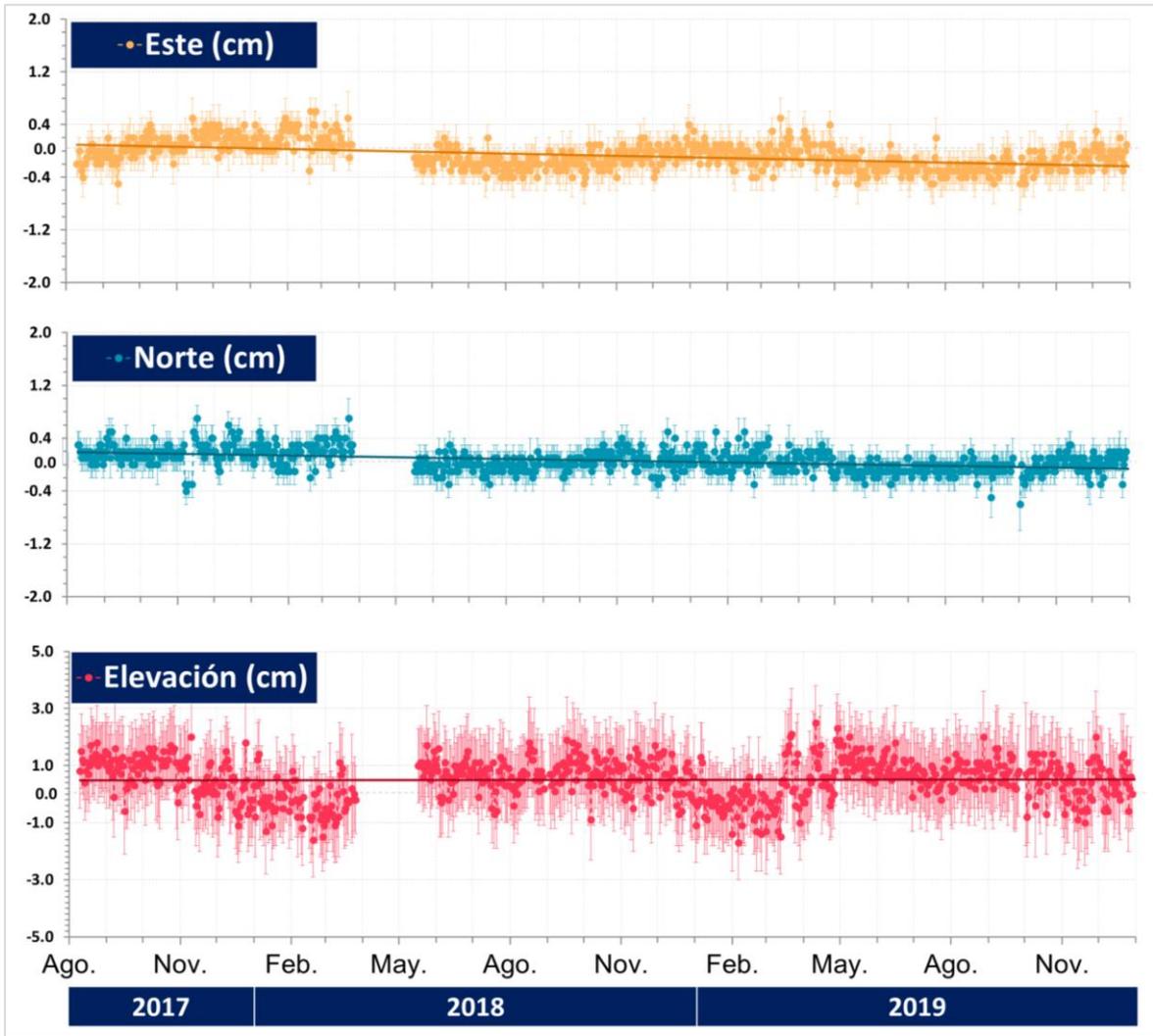
**Figura 5.-** Estación GNSS MS01 para monitoreo del volcán Misti.

### 2.2.2. Resultados

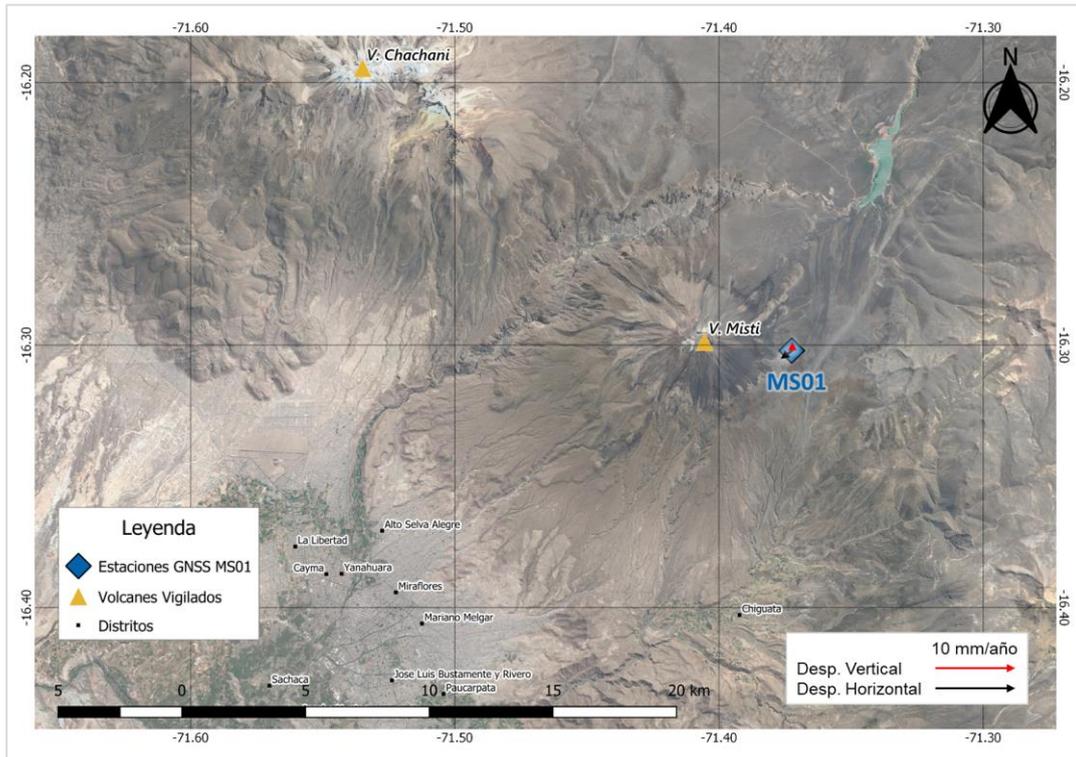
Los resultados del procesamiento de datos GNSS de la estación **MS01** comprenden el periodo desde el 10 de agosto de 2017 al 29 de diciembre de 2019 (798 días de datos). Las coordenadas fueron calculadas utilizando el

software TBC, la estación de AREG del IGS como estación de referencia y las efemérides finales calculadas por el IGS.

En la Figura 6 se muestra la serie de tiempo GNSS de la estación MS01 para el periodo 2017-2019, según la pendiente de la línea de tendencia. Se observa que el desplazamiento neto en la componente este es de -3.6 mm; en la componente norte, -2.7 mm y, en la vertical, +0.3 mm. Se calcula una velocidad de deformación resultante de 1.9 mm/año en dirección suroeste y 0.1 mm/año en la componente vertical (elevación), la cual es representada en la Figura 7. De manera general, la serie de tiempo no muestra variación significativa de deformación en el volcán Misti. Cabe precisar que en la componente vertical se observa una tendencia sinusoidal que resalta una tendencia negativa a partir del mes de noviembre de cada año y positiva a partir de marzo. Dicha tendencia está asociada a la variación estacional, la cual no tiene relación directa a la actividad volcánica. Además, las barras de errores todavía ubican los datos aproximados al "nivel cero", lo que indica que no hay indicios de deformación en el flanco este del volcán Misti.

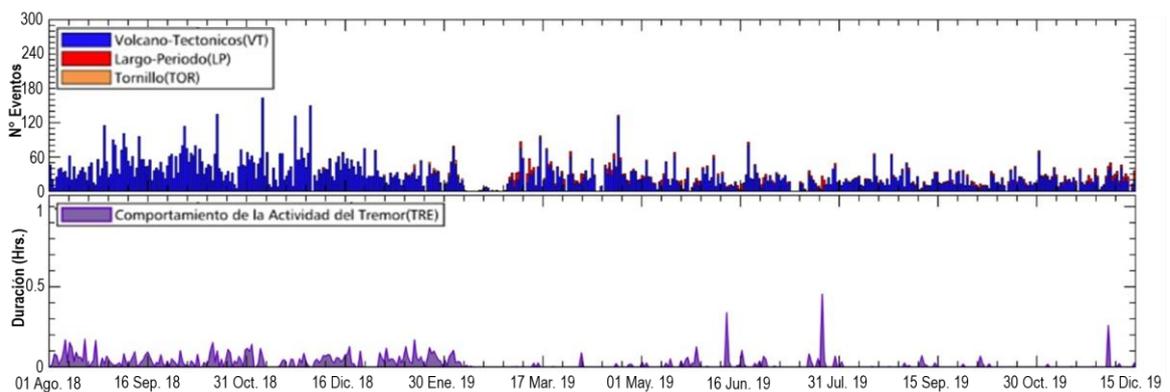


**Figura 6.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente MS01 instalada por el IGP para el monitoreo del volcán Misti procesado con TBC.



**Figura 7.-** Velocidad calculada para la estación MS01 localizada en el flanco sureste del volcán Misti.

Por otro lado, la actividad sísmica del volcán Misti registrada por las redes de monitoreo del IGP no muestra ningún incremento significativo durante el periodo analizado (Figura 8). La dinámica interna del volcán se mantiene en niveles normales, con una tasa de ocurrencia de 45 sismos diarios en promedio, la mayoría de los cuales corresponden a sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) asociados a la ruptura de rocas al interior del macizo que son, por lo general, imperceptibles al sentido humano.



**Figura 8.-** Sismicidad registrada en el volcán Misti desde agosto de 2018 a diciembre de 2019. La actividad de eventos de tipo Volcano-Tectónicos (de ruptura), Largo Periodo (movimiento de fluidos) y Tornillos (presurización de fluidos) se encuentra en los niveles normales.

## 2.3. VOLCÁN SABANCAYA

### 2.3.1. Equipos y periodo de registro

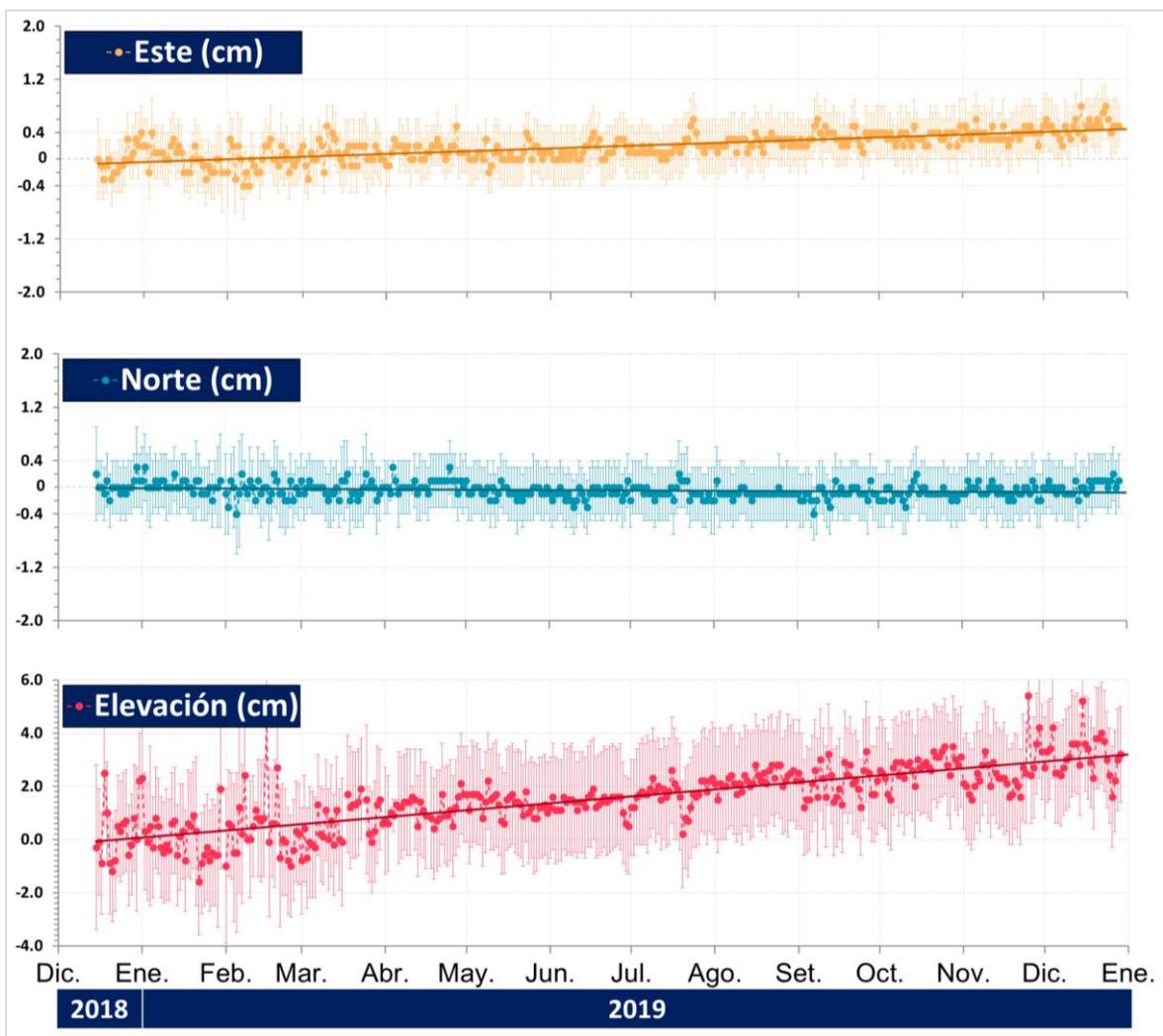
En el año 2013, el IGP instaló una red de monitoreo sísmico en tiempo real para el monitoreo del volcán Sabancaya que permanece operativa hasta la actualidad. Posteriormente, el 15 de diciembre de 2018 se instaló la primera estación geodésica GNSS permanente, denominada **SB01**, la cual se encuentra ubicada al norte del volcán Sabancaya, próxima a la estación sísmica HUAL (Hualca Hualca), a 6 km del cráter del volcán (Figura 9, izquierda). Esta ubicación fue escogida luego de haber analizado resultados preliminares de un interferograma procesado con imágenes recientes mediante la técnica dInSAR, para lo cual se comparó imágenes de diciembre de 2015 y diciembre de 2017 (Delgado et al., 2018). También, debido a que se observaron indicios del crecimiento de un domo de lava en el cráter, el cual había sobrepasado el nivel de la cima del volcán hasta una altura de 15 metros (Puma & Del Carpio, 2019), el 16 de diciembre de 2019 se instaló la estación GNSS **SB02** a 3 km del cráter, en el flanco sureste del Sabancaya (Figura 9, derecha). Ambas estaciones están equipadas con receptores Trimble Net R9 y antenas Choke Ring, protegidas con domo modelo SCIGN.



**Figura 9.-** Estaciones GNSS permanentes SB01 y SB02 ubicadas en los sectores norte y sureste del volcán Sabancaya, respectivamente.

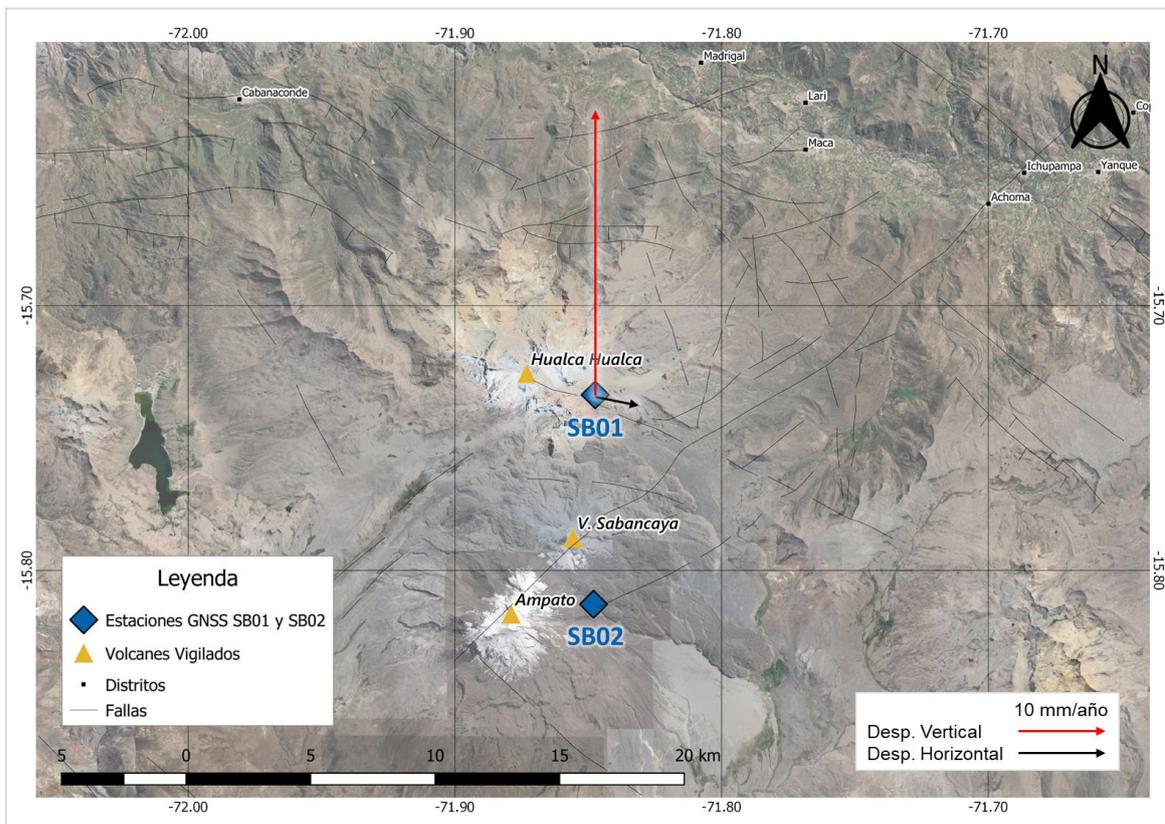
### 2.3.2. Resultados

La serie de tiempo de la estación **SB01** fue obtenida con el software TBC, procesada con la estación de referencia AREG. Los resultados muestran un desplazamiento importante en todas las componentes durante el año 2019 (Figura 10). El desplazamiento y velocidad han sido calculados con base en 379 días de datos, lo que indica una velocidad positiva de 5.0 mm/año hacia el este, velocidad negativa de 1.0 mm/año en la componente norte y un levantamiento de 33.0 mm/año en la componente vertical (inflación). El vector resultante en la componente horizontal es de 5.1 mm/año en dirección sureste (Figura 11).



**Figura 10.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente SB01 instalada por el IGP para el monitoreo del volcán Sabancaya procesadas con TBC.

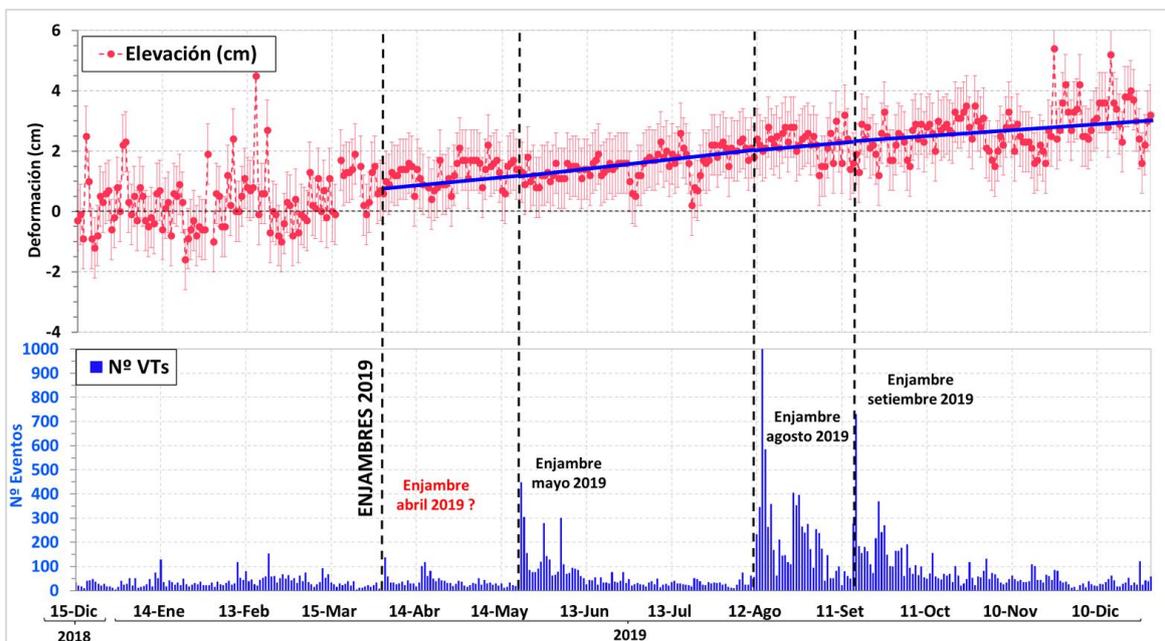
Este levantamiento se sostiene hasta fines de 2019, con tendencia a continuar. La estación **SB02** solo cuenta con dos semanas de datos desde la instalación, por lo cual aún no se puede calcular un vector de desplazamiento.



**Figura 11.-** Velocidad calculada para la estación SB01 localizada en el sector norte del volcán Sabancaya.

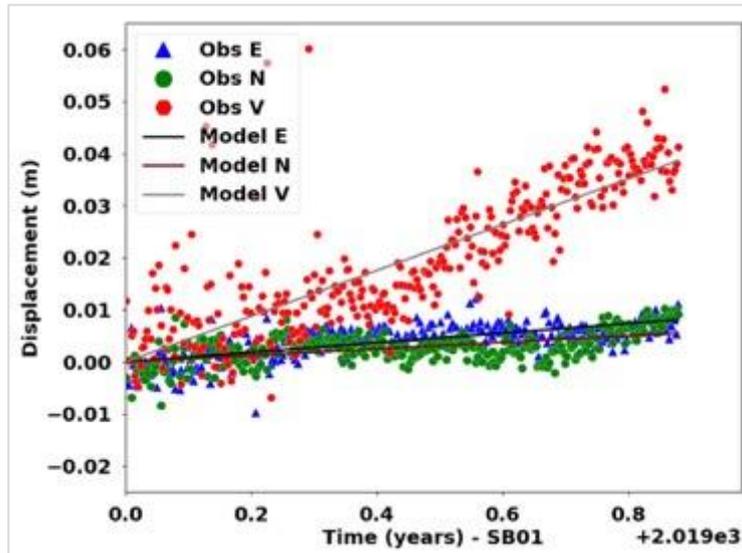
La actual actividad eruptiva del volcán Sabancaya se inició el 6 de noviembre de 2016, con una explosión a las 20:40 h, luego de la cual se registraron emisiones continuas de ceniza con columnas eruptivas que tuvieron alturas entre 1000 m y 3000 m sobre la cima del volcán. A lo largo de estos tres años de actividad, el volcán Sabancaya ha presentado niveles de actividad moderada, con el registro constante de explosiones volcánicas y con la consecuente emisión de cenizas dispersadas en todas las direcciones cardinales del volcán (Del Carpio et al., 2019). En la Figura 12 se muestra una comparación de la deformación registrada por el sistema GNSS con el registro de la actividad sísmica de tipo enjambre. En la gráfica se observa que, desde abril de 2019, la tendencia positiva en la componente vertical (elevación, representado de color magenta) es muy significativa (33 mm en 12 meses). Se

observa que este incremento se acentúa con la ocurrencia de los enjambres sísmicos registrados en mayo (M4.1, ~2850 sismos de tipo Volcano-Tectónico), agosto (M3.5, ~6860 sismos de tipo VT) y, el último, en septiembre de 2019 (M3.7, ~4560 sismos de tipo VT).



**Figura 12.-** Serie de tiempo GNSS correlacionada con los sismos de tipo Volcano-Tectónico que ocurren en forma de enjambre, eventos que estarían relacionados a nuevas intrusiones magmáticas.

Por otro lado, a fin de corroborar los resultados obtenidos con TBC, se realizó el procesamiento de los mismos datos con el software *GipsyX*. Los resultados preliminares muestran que la componente vertical presenta un claro proceso de levantamiento en respuesta un proceso de inflación (Figura 13). La tendencia indica un desplazamiento de 4 cm en la componente vertical en casi 11 meses y, además, la aceleración de la inflación es más evidente a partir de mayo de 2019, fecha en que se observa un incremento de la actividad sísmica de tipo enjambre que habría ocurrido en respuesta al arribo o intrusiones de magma iniciadas en mayo de 2019 (Figura 12).



**Figura 13.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente SB01 procesadas con GipsyX.

## 2.4. VOLCÁN UBINAS

### 2.4.1. Equipos y periodo de registro

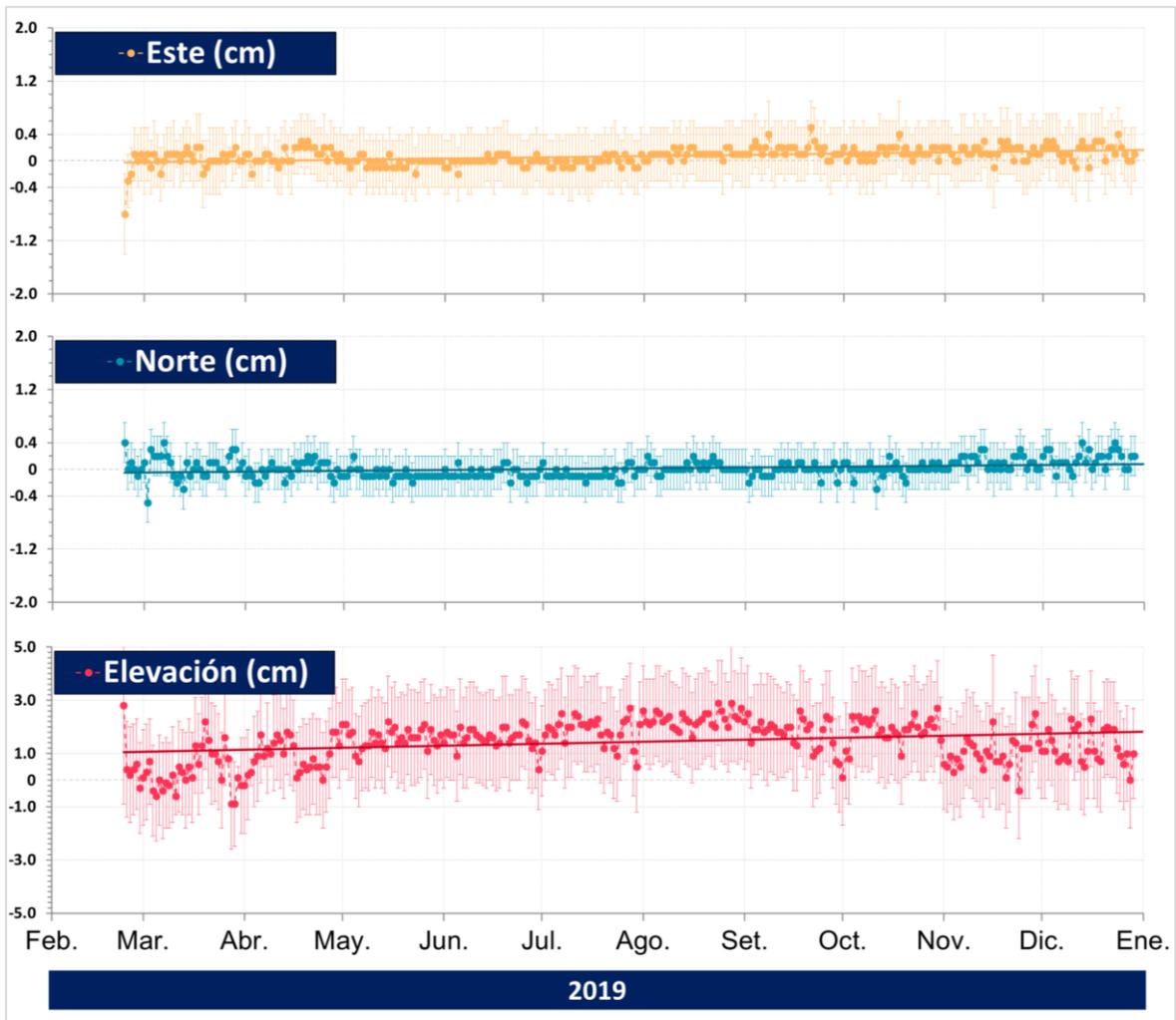
La red sísmica permanente para el monitoreo del volcán Ubinas opera a partir de 2006. En 2019 se han instalado tres estaciones geodésicas GNSS para el monitoreo de la deformación, con receptores *Trimble Net R9* y antenas *Choke Ring* protegidas con domo modelo SCIGN. La estación GNSS **UB01** (Figura 14, izquierda) fue instalada el 23 de febrero en el flanco suroeste del volcán Ubinas, cuya antena se ubica a ~6 m de la estación sísmica UB4. Debido a la crisis suscitada por el proceso eruptivo del volcán, iniciado en junio de 2019, las dos estaciones restantes fueron adicionadas a la red de monitoreo de manera temporal. La estación **UB02** opera desde el 25 de julio (Figura 14, superior derecha), ubicada en el sector sur, con la antena instalada a unos 20 m de la estación sísmica UB6. La estación GNSS **UB03** (Figura 14, inferior derecha) fue instalada en la localidad de Ubinas el 26 de julio de 2019.



**Figura 14.-** Estaciones GNSS UB01, UB02 y UB03 ubicadas en los sectores suroeste, sur y sureste del volcán Ubinas, respectivamente.

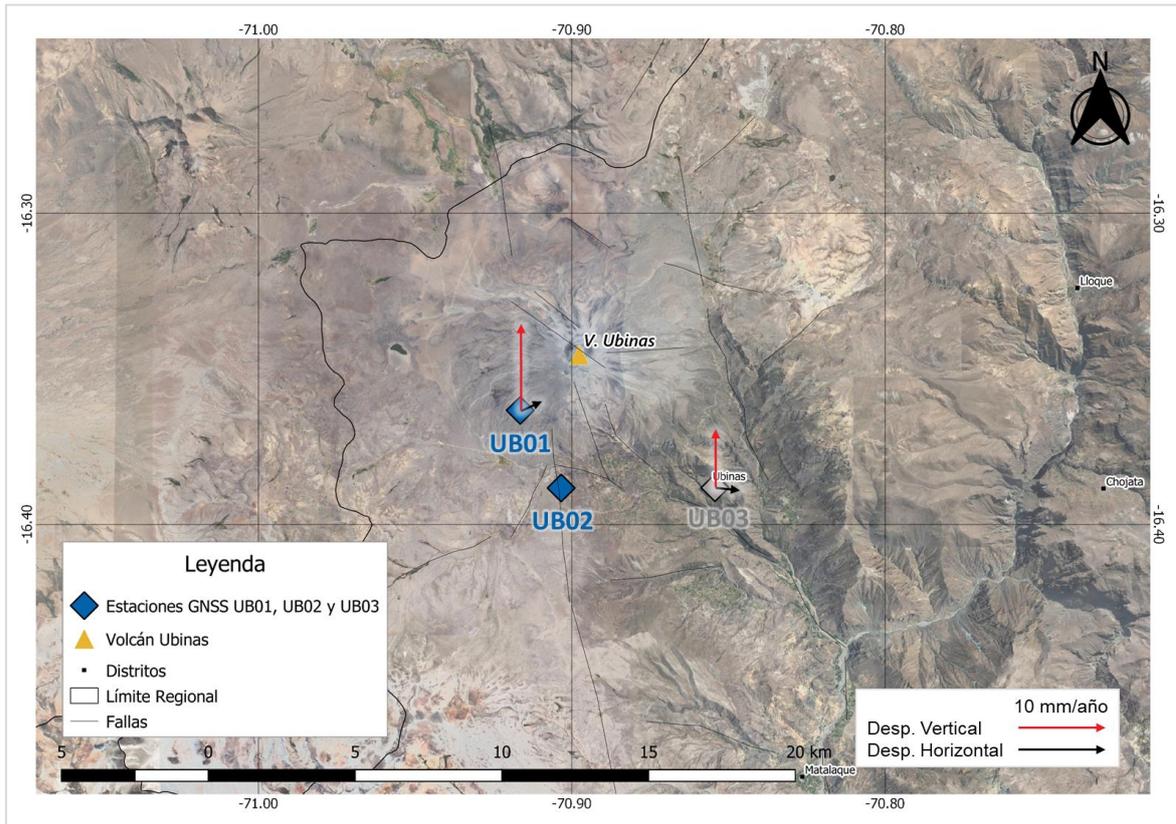
#### **2.4.2. Resultados**

Las series de tiempo de la estación GNSS **UB01**, obtenidas con el software TBC utilizando la estación de referencia AREG, ubicada 62.6 km de distancia, son mostradas en la Figura 15. Los resultados evidencian que en los 10 meses que lleva instalado el equipo (310 días de datos) hubo un desplazamiento de +2.2 mm en el este, +1.0 mm en el norte y de 9.0 mm en la componente vertical (elevación).



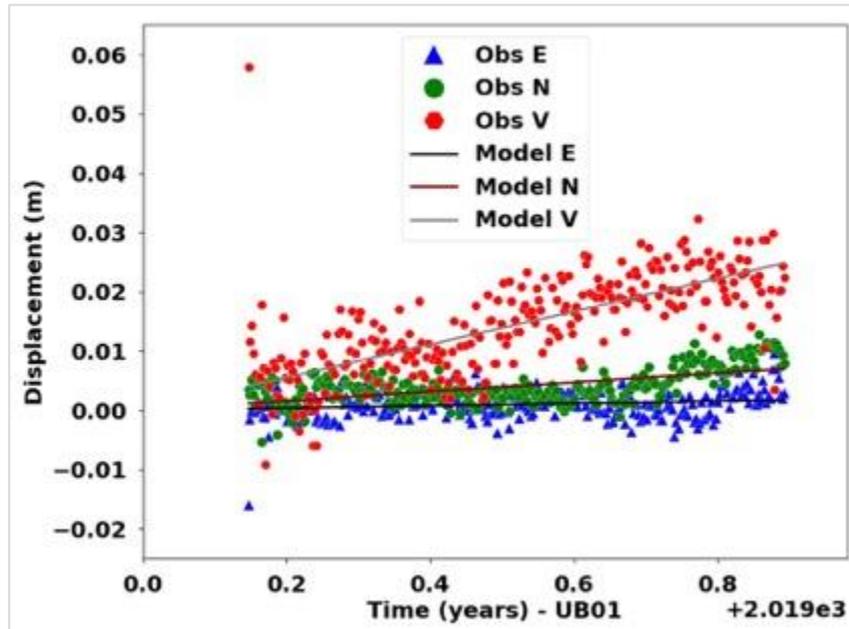
**Figura 15.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente UB01 instalada por el IGP para el monitoreo del volcán Ubinas procesadas con TBC.

Para el cálculo de la velocidad de la estación UB01 se ha interpolado la línea de tendencia a un año; las velocidades obtenidas en cada componente son las siguientes: una velocidad de desplazamiento positivo de 2.4 mm/año hacia el este, desplazamiento positivo de 1.1 mm/año en la componente norte y un levantamiento de 10 mm/año en la componente vertical (elevación). El vector resultante en la componente horizontal es de 2.6 mm/año en dirección noreste (Figura 16).

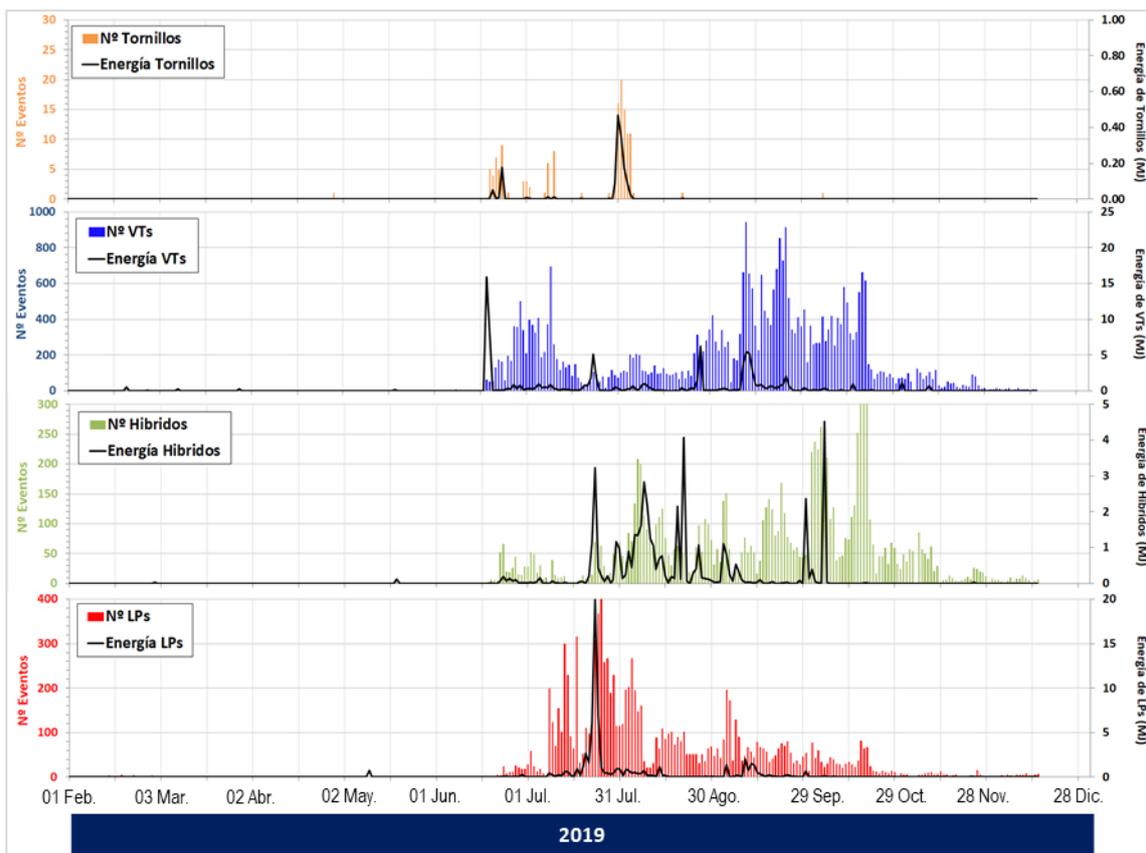


**Figura 16.-** Velocidad calculada para las estaciones UB01 y UB03, localizadas en el flanco suroeste del volcán y localidad de Ubinas, respectivamente.

También se realizó el procesamiento de los datos de la estación GNSS UB01 con el software *GipsyX*. Los resultados preliminares (Figura 17) muestran un levantamiento de aproximadamente 20 mm en la componente vertical en casi 9 meses. Al igual que lo observado en el volcán Sabancaya, la aceleración es más evidente a partir de mayo de 2019, posiblemente ligado al inicio del proceso eruptivo 2019 del volcán Ubinas (Figura 18) ya que el incremento brusco de la sismicidad se inicia en la segunda quincena de junio de 2019, con la posterior ocurrencia de importantes explosiones, cuya altura de la columna de cenizas y gases superó los 5000 m sobre la cima del volcán. La sismicidad cesa considerablemente a inicios de noviembre, observándose en las series de tiempo con los dos tipos de procesamiento una desaceleración en la componente vertical (mostrado como elevación en la Figura 15 y como Obs V en la Figura 17).

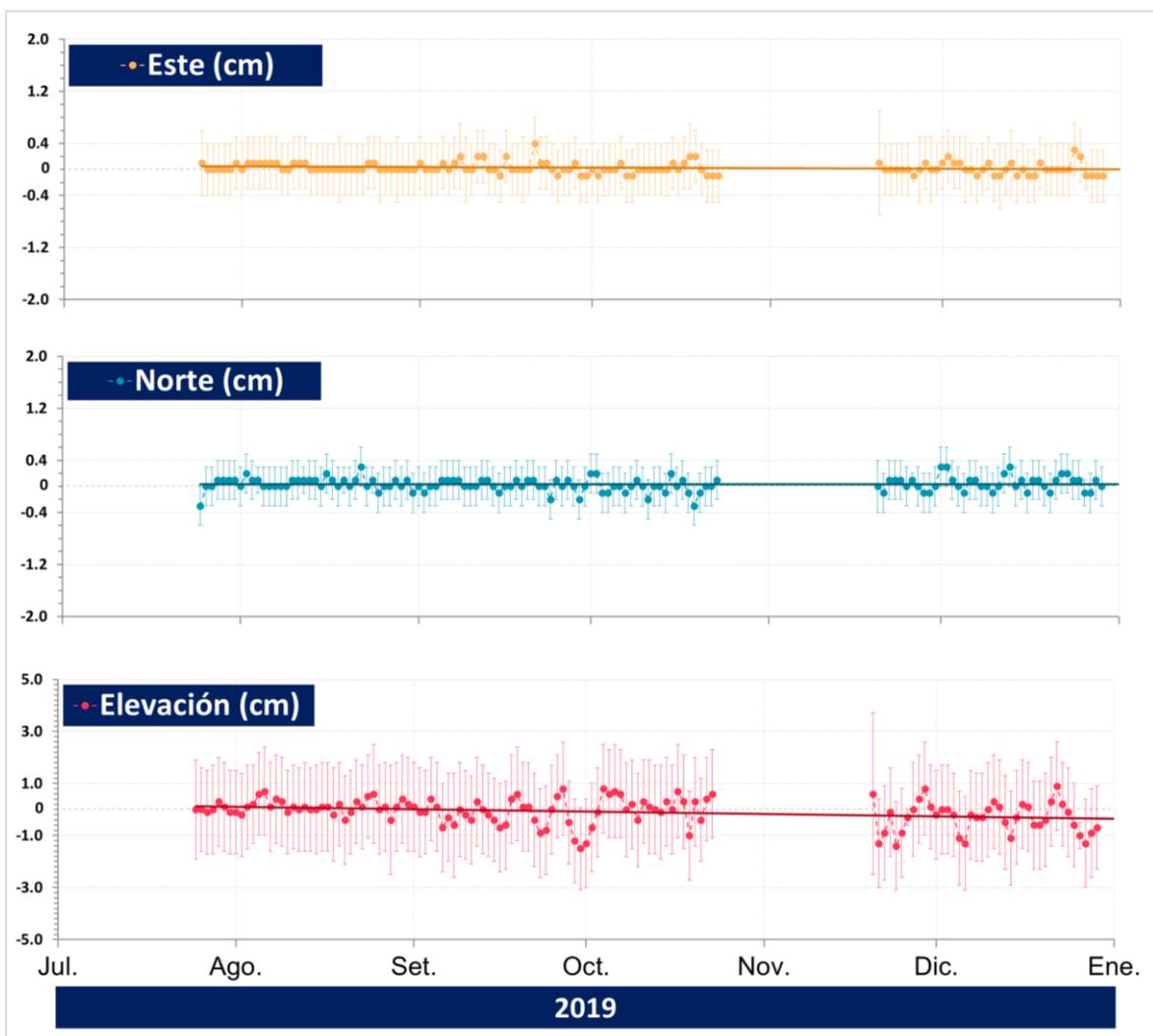


**Figura 17.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente UB01 procesadas con el software GipsyX.



**Figura 18.-** Sismicidad registrada en el volcán Ubina desde febrero a diciembre de 2019. La actividad de eventos de tipo Tornillo (presurización de fluidos), Volcano-Tectónico (de ruptura), Híbrido (ascenso de magma a la superficie) y Largo Periodo (movimiento de fluidos) muestran un incremento a partir de la segunda quincena de junio.

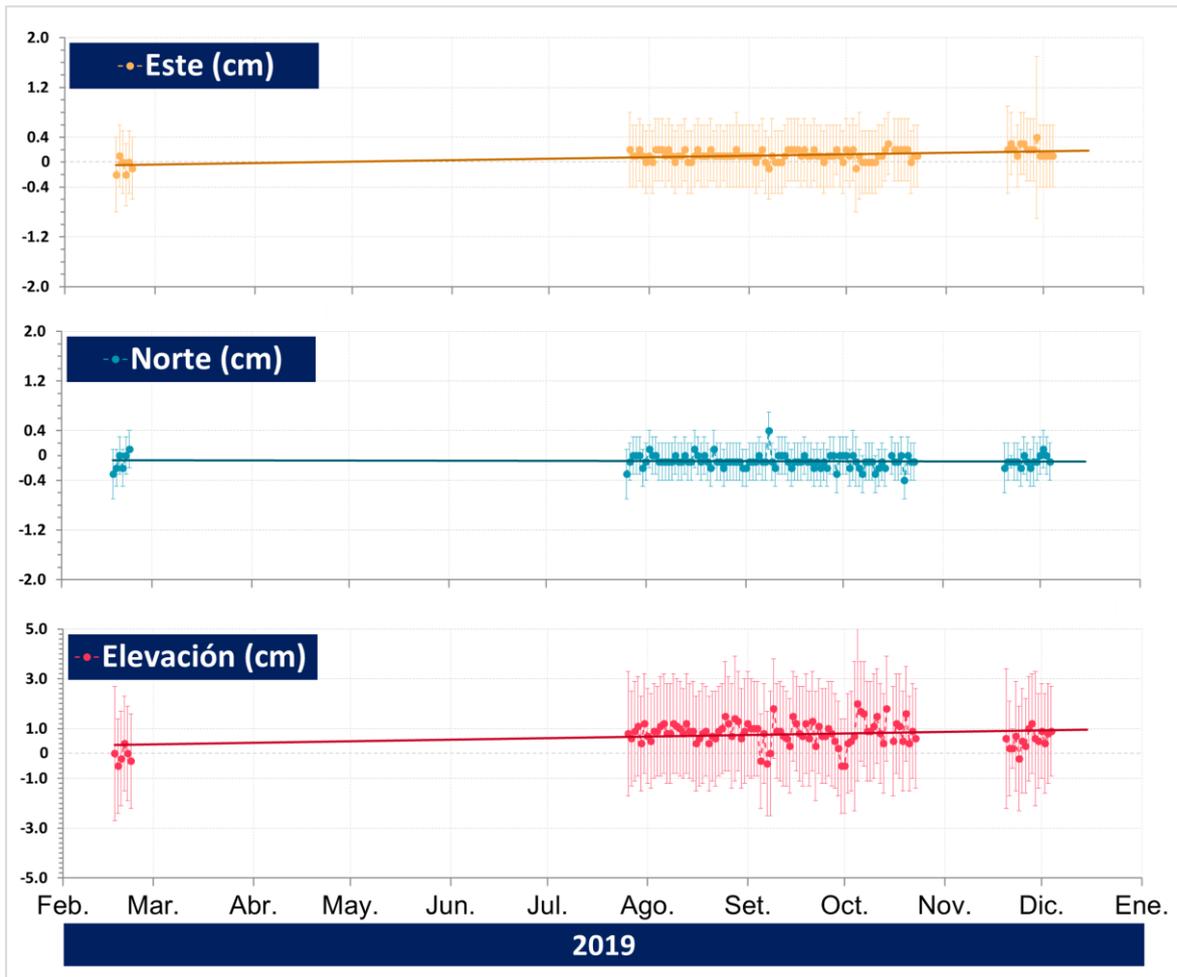
La serie de tiempo GNSS para la estación **UB02** evidencia una deformación mínima en todas las componentes hasta diciembre de 2019. La estación de referencia AREG se ubica a 63.5 km. Es así que, según la línea de tendencia, se tiene un desplazamiento negativo en la componente este de 0.5 mm; en la componente norte, de 0.0 mm y, en la componente vertical, un desplazamiento negativo de 6.0 mm (Figura 19), lo cual se encuentra dentro del margen de error. No se presentan vectores de desplazamiento de la estación UB02 debido a que solamente se cuentan con 5 meses de datos.



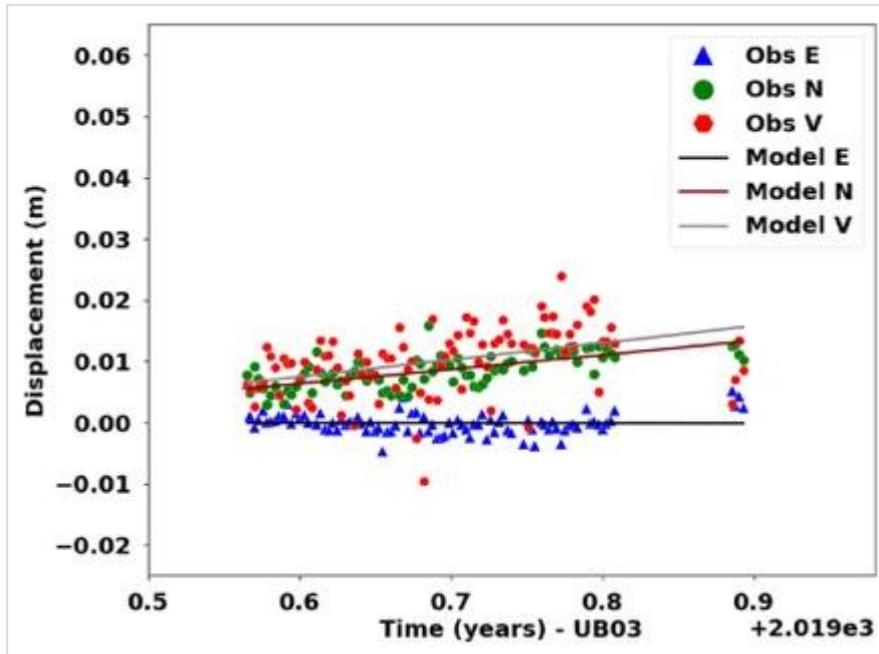
**Figura 19.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente UB02 instalada por el IGP para el monitoreo del volcán Ubinas procesadas con TBC.

De igual manera, para la estación GNSS **UB03** se procesaron datos de manera independiente con los softwares TBC (Figura 20) y *GipsyX* (Figura 21). Las series de tiempo evidencian una ligera deformación en todas las componentes

durante los 5 meses (110 días) que se instaló el equipo. Cabe mencionar que en el mes de febrero de 2019 se tomaron medidas temporales de este punto durante 6 días (mostrado en la Figura 20).



**Figura 20.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente UB03 instalada por el IGP para el monitoreo del volcán Ubinas procesadas con TBC.

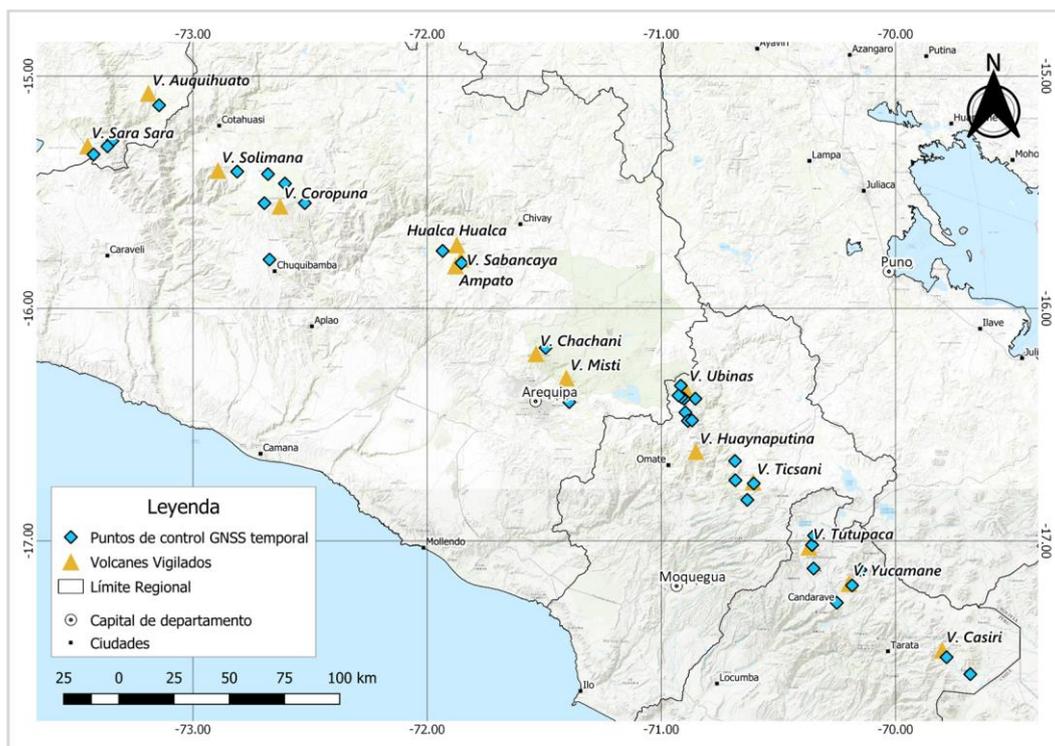


**Figura 21.-** Series de tiempo GNSS de la estación permanente UB03 procesadas con el software GipsyX.

Se calculó una velocidad de desplazamiento de +2.8 mm/año hacia el este y de -0.3 mm hacia el norte, con un vector resultante en la componente horizontal de 2.8 mm/año en dirección sureste (Figura 16). En la componente vertical se estima un levantamiento de 6.7 mm/año. Es así que, según la línea de tendencia, los desplazamientos son menores a 7.0 mm en todas las componentes, lo cual todavía se encuentra dentro del margen de error.

### CAPÍTULO III: IMPLEMENTACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICOS TEMPORALES EN LOS VOLCANES ACTIVOS DEL PERÚ

Para mejorar la cobertura espacial de monitoreo y la red de deformación de volcanes, el IGP ha iniciado la implementación de la red geodésica de puntos de control temporales en los volcanes activos del Perú para el estudio y seguimiento de la deformación. A la fecha, se han instalado y medido 34 puntos de control distribuidos en 12 volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano. Cabe mencionar que en muchos de estos volcanes es la primera vez que se inicia la instalación y monitoreo con instrumentos GNSS para el análisis de la deformación. Con la implementación de la red de puntos de control se establecen puntos de referencia fijos y líneas de base de referencia que, con posteriores medidas, permitirán evaluar el comportamiento y la evolución de la deformación de los volcanes activos del sur del Perú. La distribución espacial de los puntos de control geodésicos GNSS temporales es presentada en la Figura 22.



**Figura 22.-** Puntos de control GNSS temporales instalados por el IGP en los volcanes Cerro Auquihuato, Sara Sara, Coropuna, Sabancaya, Chachani, Misti, Huaynaputina, Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamane y Casiri.

### 3.1. METODOLOGÍA

#### 3.1.1. Monumentación e instalación

Para la instalación de un punto de control geodésico es necesario ubicar un afloramiento rocoso o construir un monumento de concreto, de tal manera que se asegure la estabilidad temporal del punto. El CENVUL utiliza marcadores de acero que son usados para ser posicionados como puntos geodésicos de referencia que van incrustados en las superficies rocosas (Figura 23A). Sobre estas se coloca una barra de acero que sirve de soporte para la antena GNSS, la cual debe estar correctamente nivelada (Figura 23B y 23C). La antena GNSS debe estar orientada hacia el norte (Figura 23D). Luego, se procede a realizar las conexiones necesarias y configurar el receptor para habilitar la adquisición de datos (Figura 23E). La adquisición de datos recomendada es de mínimo 48 horas UTC a una tasa de registro de 30 segundos (Villegas Lanza et al., 2016).



**Figura 23.-** Instalación de puntos de control geodésicos: A) taladrar la roca, B) marcador nivelado, C) secado del pegamento, D) antena apuntando al norte, E) configuración del equipo.

### 3.1.2. Ubicación de puntos de control geodésico

La ubicación de los puntos de control geodésico temporal ha sido evaluada tras la evaluación de estudios de sismicidad, deformación GNSS, resultados de InSAR, información geológica y accesibilidad.

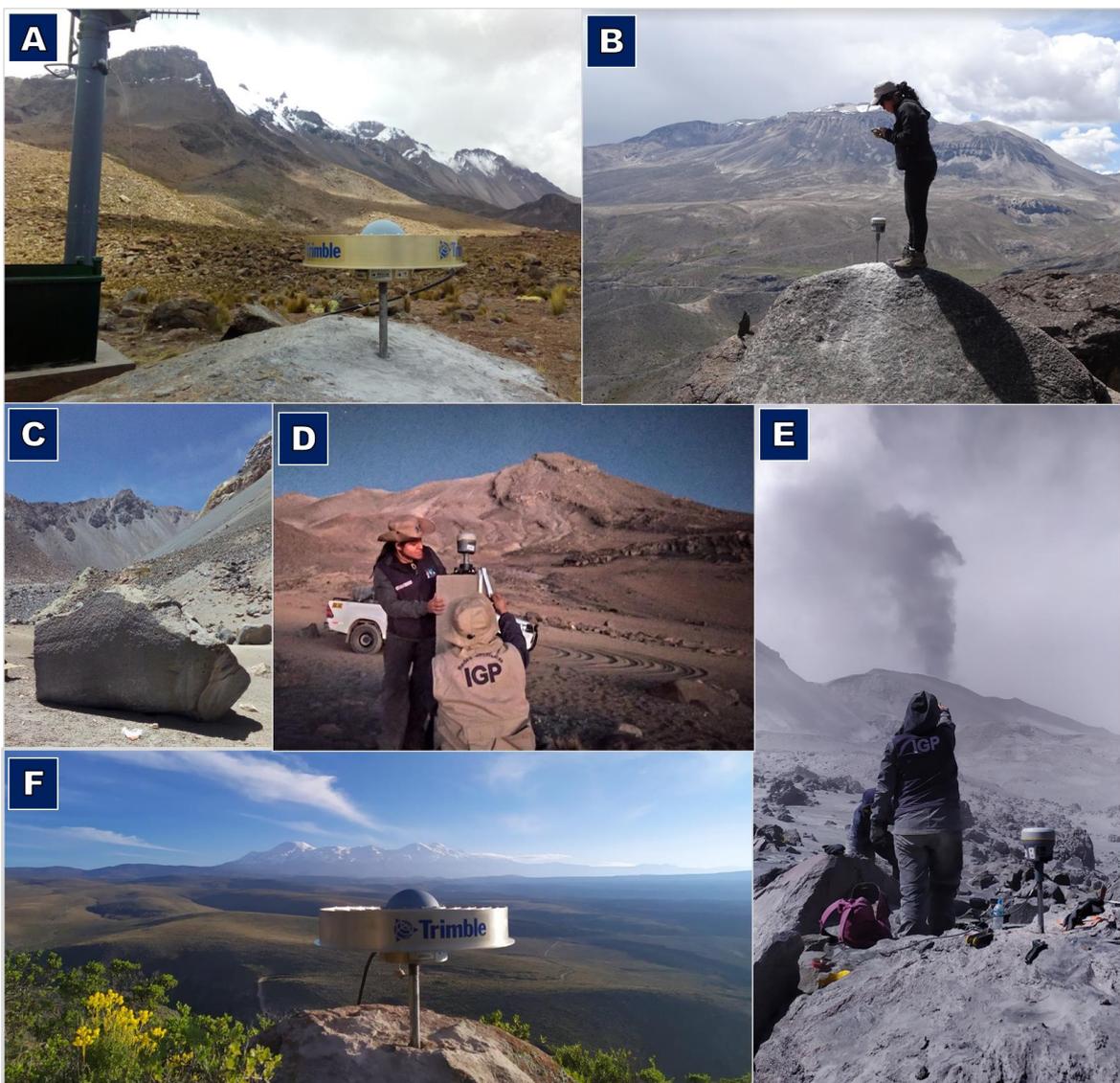
En la Tabla 1 se detalla la ubicación (longitud, latitud y altura), fecha de monumentación (perforación e instalación de los marcadores de acero) y periodos de mediciones de los 34 puntos de control geodésicos instalados por el CENVUL desde noviembre de 2018 hasta diciembre de 2019. Dicha información se ha ordenado según la ubicación de los volcanes de norte a sur. Cabe mencionar que las fechas de mediciones están expresadas en Días del Año (*DOY, Day-Of-Year*). La nomenclatura de cada punto está expresada por códigos de 04 dígitos: los 02 primeros representan el nombre del volcán y los 02 restantes corresponden a los dígitos BA (si es un punto base) o a números correlativos (si son puntos de medida). Esta nomenclatura será utilizada en todo el informe.

NOMBRE	VOLCÁN	LONG.	LAT.	ALTURA	MONUM.	MEDICIONES (DOY)
AU01	Auquihuato	-73.145	-15.128	4589.6	6/03/2019	337 (2019)
SSBA	Sara Sara	-73.344	-15.278	2555.9	5/03/2019	064-066 (2019)
						336-337 (2019)
SS01	Sara Sara	-73.424	-15.337	4663.1	4/03/2019	063-067 (2019)
						335 (2019)
SS02		-73.362	-15.305	3276.2	7/03/2019	336 (2019)
COBA		-72.673	-15.789	3866.0	21/04/2019	111-113 y 155-116 (2019)
						339-341 (2019)
CO01		-72.695	-15.547	5295.4	22/04/2019	112-116 (2019)
CO02	Coropuna	-72.680	-15.422	4425.9	25/04/2019	115-116 (2019)
						339 (2019)
CO03		-72.811	-15.411	4638.1	25/04/2019	115-116 (2019)
CO04		-72.522	-15.546	5030.2	29/11/2019	333 (2019)
						340 (2019)

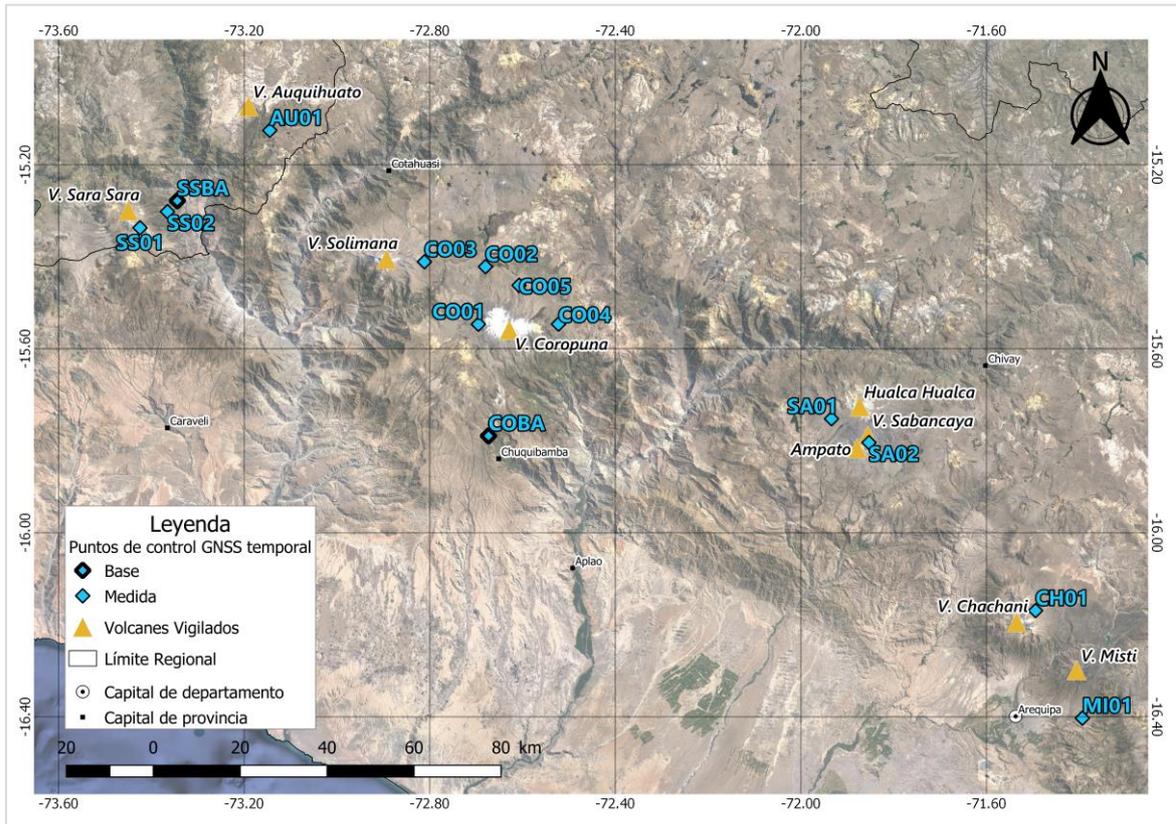
CO05		-72.607	-15.462	4839.9	6/12/2019	340 (2019)
SA01	Sabancaya	-71.934	-15.752	4976.9	15/12/2019	349-352 (2019)
SA02		-71.853	-15.804	5450.7	16/12/2019	350-353 (2019)
CH01	Chachani	-71.494	-16.169	4910.4	27/11/2019	331 (2019)
MI01	Misti	-71.393	-16.403	2996.9	7/05/2019	127-128 (2019)
HUBA		-70.897	-16.447	4575.8	15/02/2018	046-054 (2019)
HU01	Huaynaputina	-70.887	-16.483	4456.5	15/02/2019	046-047 (2019)
HU02		-70.869	-16.481	4201.6	17/02/2019	048-050 (2019)
UN01	Ubinas	-70.854	-16.388	3411.9	17/02/2019	048-053 (2019) 207-338 (2019)
UN02		-70.903	-16.388	4447.9	23/02/2019	206 (2019) -actualidad
UN03		-70.917	-16.332	4870.5	26/07/2019	207 (2019)
UN04		-70.914	-16.382	4408.9	29/08/2019	241 (2019)
UN05		-70.927	-16.374	4450.7	30/08/2019	242 (2019)
TIBA	Ticsani	-70.684	-16.739	3530.2	5/04/2019	095-098 (2019)
TI01		-70.605	-16.753	5163.1	5/04/2019	095-099 (2019)
TI02		-70.685	-16.656	4626.9	6/04/2019	096 (2019)
TI03		-70.633	-16.823	4426.9	8/04/2019	098 (2019)
TUBA	Tutupaca	-70.251	-17.266	3511.1	17/11/2018	321-327 (2018) 316-319 (2019)
TU01		-70.350	-17.119	4467.0	17/11/2018	321-323 (2018)
TU02		-70.356	-17.017	5194.6	19/11/2018	323-327 (2018) 316-318 (2019)
TU03		-70.348	-16.977	5038.2	20/11/2018	324-327 (2018) 097 y 099 (2019)
YU01		Yucamane	-70.150	-17.124	4476.0	14/11/2019
YU02	-70.185		-17.192	4695.5	15/11/2019	319 (2019)
CABA	Casiri	-69.680	-17.573	4372.0	11/04/2019	101-102 (2019)
CA01		-69.782	-17.500	4778.3	11/04/2019	101-102 (2019)

**Tabla 1.-** Información de los 34 puntos de control geodésico instalados por el CENVUL para el monitoreo de deformación de 12 volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano.

Para los volcanes **Sara Sara** y **Cerro Auquihuato**, debido a la proximidad existente entre ambos macizos otro (40 km), se ha considerado una misma estación base de referencia ubicada en la localidad de Pausa (**SSBA**, Figura 25). La instalación de los puntos de control se realizó en marzo de 2019 con la medición de un punto ubicado en el flanco sureste del volcán Sara Sara (**SS01**, Figura 24A). Posteriormente, en el mes de diciembre se procedió con la medición de los puntos ubicados en el sector este del Sara Sara (**SS02**) y al sureste del Cerro Auquihuato (**AU01**).



**Figura 24.-** Puntos de control GNSS instalados por el IGP para el monitoreo de deformación de volcanes: A) Punto SS01 en el flanco este del volcán Sara Sara, B) Punto T103 en el sector suroeste del volcán Ticsani, C) Punto TU02 en el cráter del volcán Tutupaca, D) Punto UN03 en el flanco noroeste del volcán Ubinas, E) Punto SA02 en el flanco sureste del volcán Sabancaya y F) Punto COBA, base para corrección de puntos GNSS del Coropuna.



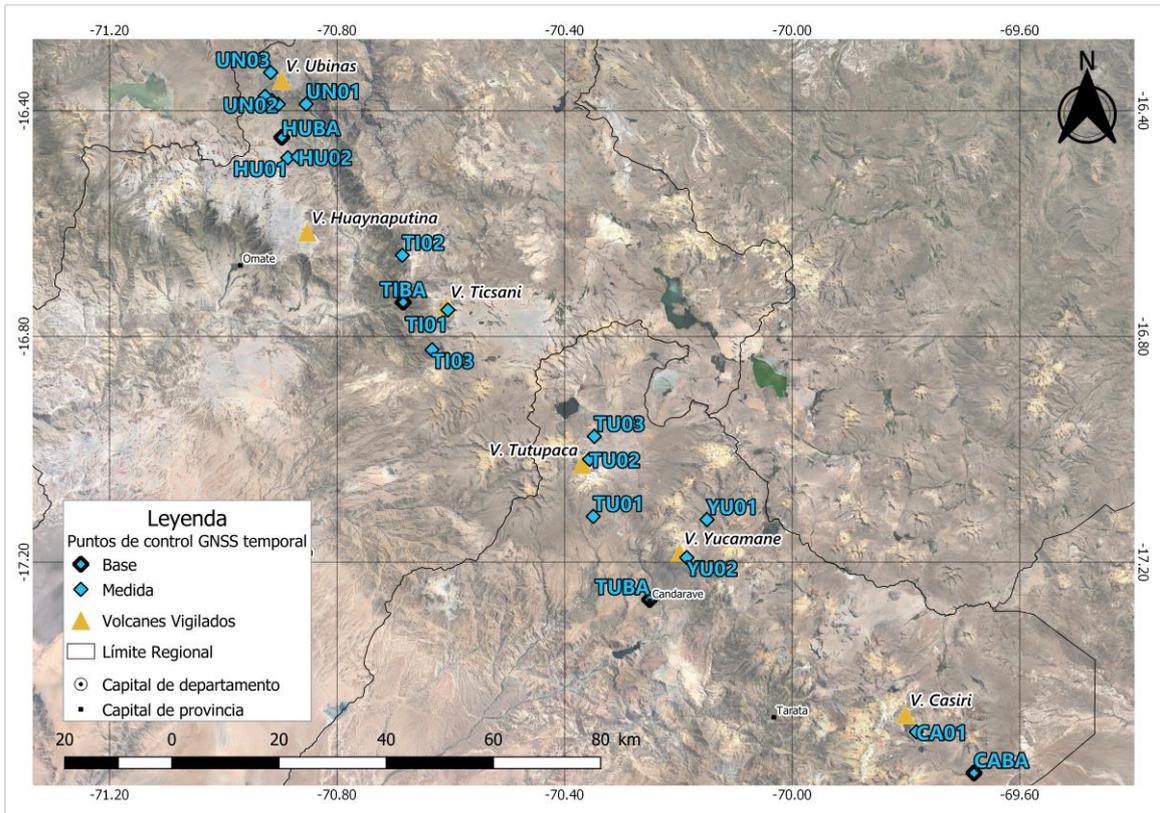
**Figura 25.-** Ubicación de puntos de control GNSS temporal en los volcanes Sara Sara, Cerro Auquihuato, Coropuna, Sabancaya, Chachani y Misti.

En el caso del volcán **Coropuna**, la instalación de puntos de control se inició en abril de 2019 con un punto de control base ubicado próximo a la localidad de Chuquibamba (**COBA**, Figuras 24F y 25). El primer punto de control geodésico se ubica en el flanco oeste del volcán Coropuna (**CO01**). Posteriormente, se instaló un punto de control al norte (**CO02**) y al noroeste del Coropuna (**CO03**). En diciembre, se instalaron dos puntos adicionales en el flanco este y norte del Coropuna (**CO04** y **CO05**, respectivamente). En esta segunda campaña también se midió el punto CO02.

En el volcán **Sabancaya**, la instalación de los puntos de control geodésico es reciente (diciembre de 2019). Los días 15 y 16 de diciembre de 2019 se instalaron puntos en el sector oeste (**SA01**, Figura 25, zona de deformación localizada según estudios con método InSAR) y en el flanco sureste del volcán Sabancaya (**SA02**, ubicado a 1.9 km del cráter del Sabancaya, Figura 24E).

Para los volcanes **Chachani** y **Misti** (distanciados a ~18 km) se utiliza la misma estación base AREQ ubicada en el distrito de Characato (Arequipa), con la que se corrigen las estaciones permanentes. El punto de control geodésico **MS01** (Figura 25) se ubica al sur del volcán Misti, en el distrito de Chiguata, instalado en mayo de 2019. Por otro lado, el punto para el monitoreo de deformación del volcán Chachani (**CH01**) fue instalado en su flanco norte y medido en noviembre.

En los volcanes **Huaynaputina** y **Ubinas** (separados por una distancia de ~30 km) se instaló entre el 15 al 23 de febrero de 2019 el punto de control geodésico base **HUBA** (Figura 26), ubicado en la carretera camino a Matalaque. Se instalaron dos puntos de control geodésicos temporales ubicados al norte del volcán Huaynaputina (**HU01** y **HU02**). Además, se instaló un punto de control geodésico al sureste del volcán Ubinas (**UN01**), en la localidad del mismo nombre, donde meses después se instaló la estación GNSS temporal UB03. Asimismo, se instaló otra estación GNSS bajo la misma modalidad en el punto **UN02**, al sur del volcán Ubinas. En esa misma fecha, se midió el punto **UN03** (Figura 24D), ubicado en el flanco noroeste del volcán. Un mes después se midieron dos puntos adicionales (**UN04** y **UN05**), ubicados en el sector suroeste del macizo.



**Figura 26.-** Ubicación de puntos de control GNSS temporales en los volcanes Ubina (al norte), Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane y Casiri (al sur).

Para el monitoreo de deformación del volcán **Ticsani**, durante una campaña realizada en abril de 2019 se ha instalado una base ubicada en la localidad de Calacoa (**TIBA**, Figura 26) y se midieron tres puntos para este volcán. El punto de control geodésico **TI01** se ubica en un monumento de concreto, sobre uno de los domos del volcán Ticsani. Por su parte, el punto **TI02** se localiza en el sector noroeste del volcán; el punto **TI03** (Figura 24B), al sur del Ticsani.

Los puntos de control GNSS en el volcán **Tutupaca** se instalaron entre el 15 y 23 de noviembre de 2018. La base **TUBA** (Figura 26) se ubica en la localidad de Candarave, la cual sirve también para las correcciones de los puntos de control geodésico del volcán Yucamane (ubicado a ~25 km del volcán Tutupaca). El punto de control geodésico **TU01** (Figura 26) se ubica entre los volcanes Tutupaca y Yucamane. En el cráter del volcán Tutupaca se ubica el punto GNSS **TU02** (Figura 24C), el cual fue nuevamente medido en noviembre de 2019. Al norte de este volcán, se ubica el punto **TU03** (Figura 26), que fue medido por segunda vez en abril de 2019. Durante la segunda medición del

punto TU02, en el mes de noviembre, también se monumentaron e instalaron los puntos **YU01** y **YU02**, ubicados en el sector noreste y flanco este del volcán Yucamane, respectivamente.

Por último, para el monitoreo temporal de deformación del volcán **Casiri** se ha instalado una base en el sector Tambo-Alto Perú (**CABA**, Figura 26). El punto de medición se ubica en el sector sur de dicho volcán (**CA01**). Estos puntos se instalaron también durante la campaña del volcán Ticsani, en abril de 2019.

### **3.1.3. Procesamiento**

El procesamiento de datos GNSS temporales se ha realizado con el software licenciado *Trimble Business Center* (TBC), con lo cual se obtuvo soluciones para cada periodo de análisis que representan el desplazamiento calculado en las componentes este, norte y vertical. Para la medición de los puntos de control geodésicos en volcanes, se requiere contar con un punto de control base de referencia respecto al cual se realizarán las correcciones de línea de base. Este punto debe ubicarse a menos de 50 km de distancia de los puntos de medida. Primero, se realiza el procesamiento del punto de control geodésico base empleando la estación AREG del IGS como referencia. Con esta coordenada corregida, se utiliza este punto base como referencia para corregir los puntos de control geodésicos que se ubican próximos a los volcanes.

## **3.2. RESULTADOS PRELIMINARES**

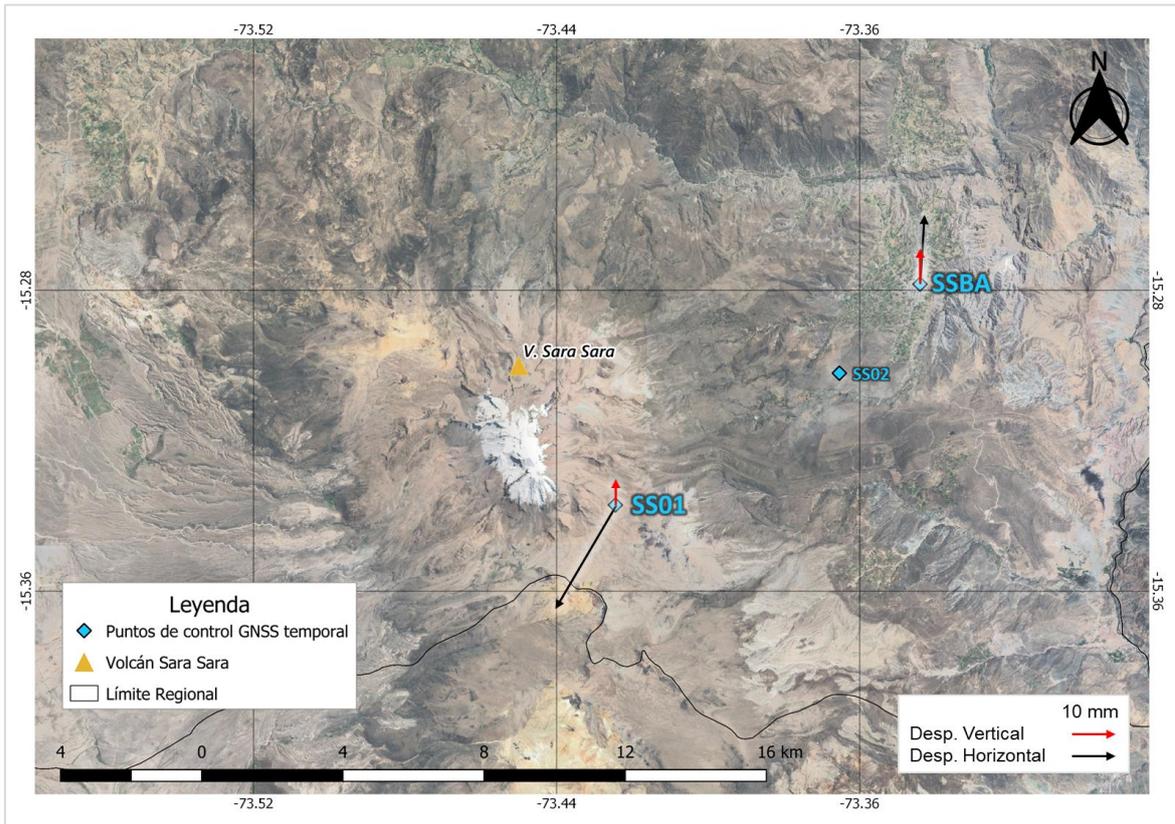
Para el cálculo de desplazamiento de los puntos de control GNSS temporales se necesita al menos dos mediciones del mismo punto en dos periodos de tiempo distintos. Solo en tres volcanes se ha realizado este procedimiento. La Tabla 2 muestra el desplazamiento calculado para cada componente (este, norte y vertical) expresado en milímetros para siete puntos de control geodésicos temporales, ubicados en los volcanes Sara Sara, Coropuna y Tutupaca.

**Tabla 2.-** Desplazamientos calculados para las estaciones GNSS permanentes de los volcanes Misti, Sabancaya, Ubinas, Sara Sara, Coropuna y Tutupaca.

NOMBRE	VOLCÁN	ESTE (mm)	NORTE (mm)	ELEVACIÓN (mm)	PERIODO
SSBA	Sara Sara	+1.3	+15.7	+7.8	9 meses
SS01		-14.0	-23.7	+6.0	9 meses
COBA	Coropuna	-12.0	-16.0	-32.0	7.5 meses
CO02		-7.0	+33.0	+41.0	7.5 meses
TUBA	Tutupaca	-10.0	-27.0	-5.0	1 año
TU02		+8.0	+10.0	+12.0	1 año
TU03		-6.0	-2.0	+5.0	4.6 meses

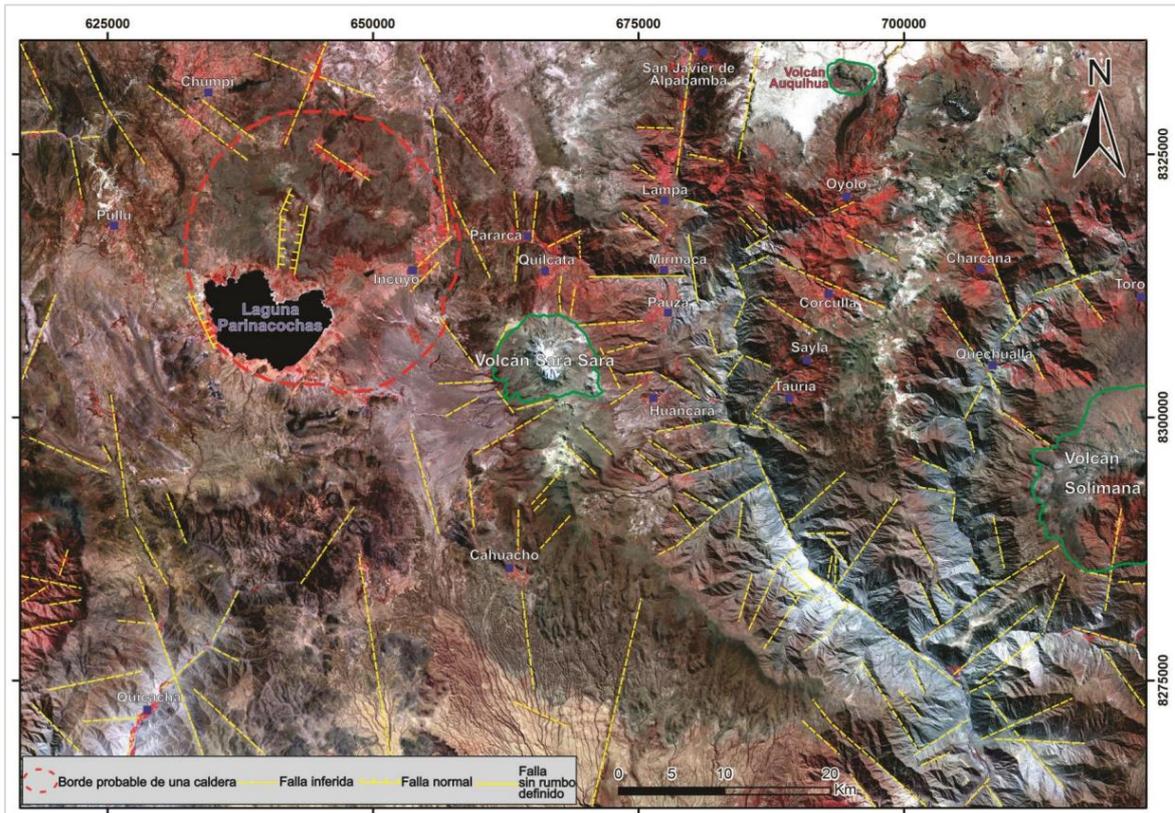
### 3.2.1. Volcán Sara Sara

Se realizó la primera medición GNSS en marzo de 2019 y, posteriormente, en el mes de noviembre del mismo año. Los datos del punto base SSBA han sido procesados utilizando la estación AREG ubicada en Arequipa, a una distancia aproximada de 238 km. El desplazamiento calculado en el punto **SSBA** es de 15.8 mm al noreste en la componente horizontal, con un levantamiento de 8 mm en la componente vertical en los 9 meses que transcurrió entre la primera y segunda medición (Figura 25). Por otro lado, el punto **SS01** ha sido corregido utilizando el punto SSBA como referencia en la primera medición, el cual se encuentra a ~11 km de distancia. El vector de desplazamiento horizontal es de 28 mm hacia el suroeste y un levantamiento de 6 mm en la vertical (Figura 25).



**Figura 25.-** Desplazamientos de los puntos SSBA y SS01 instalados para el monitoreo de deformación del volcán Sara Sara. Los vectores han sido calculados a partir de datos GNSS adquiridos en las campañas de marzo y diciembre de 2019.

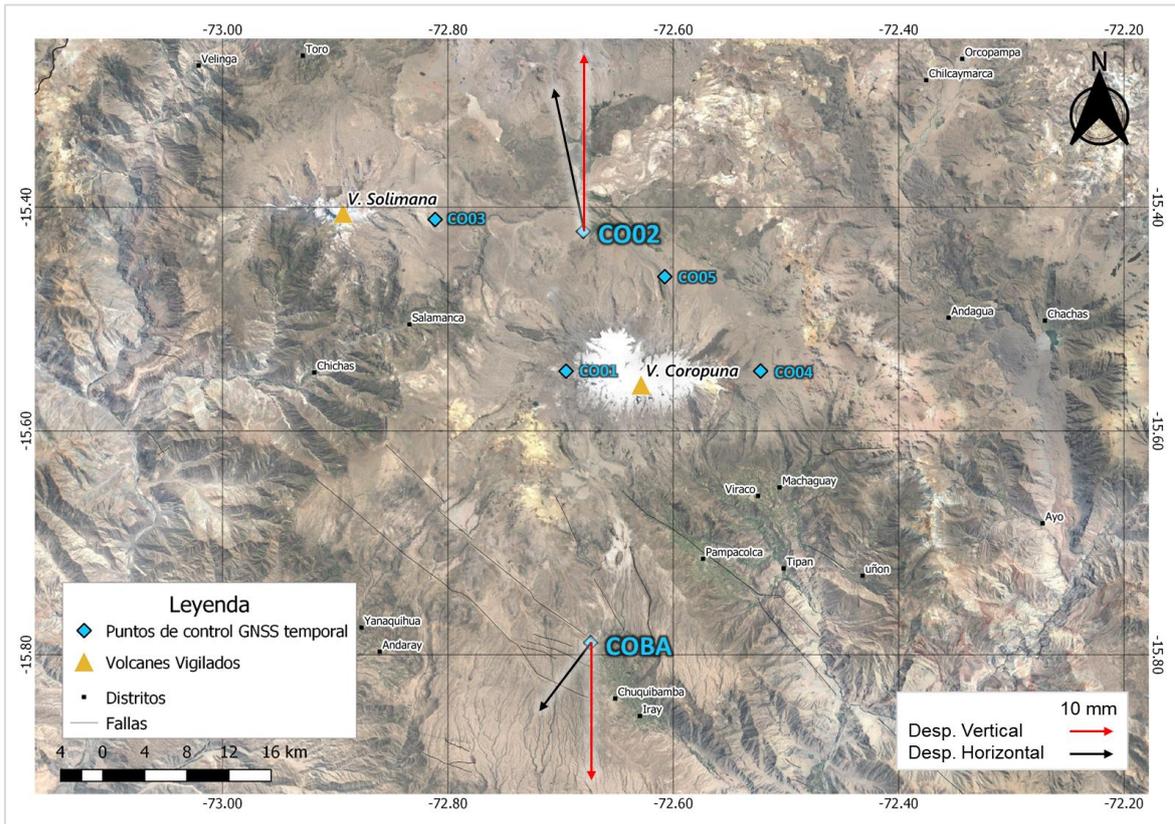
Se atribuyen estos desplazamientos a movimientos tectónicos locales, ya que, según Rivera et al., (2018), en los alrededores del volcán Sara Sara existe un sistema de fallas de dirección noroeste-sureste, el cual es el de mayor longitud en la zona y forma parte del sistema de fallamiento de dirección andina. Por otro lado, existe un sistema de fallas en dirección noreste-suroeste, observado al sur, oeste, noroeste y noreste del volcán Sara Sara (Figura 26) que marca la red de drenaje existente alrededor de dicho volcán. Además, se distinguen varios lineamientos y escarpes que pueden corresponder a fallas. Para un mejor entendimiento de la dinámica de estas fallas se deben establecer más puntos de medición GNSS.



**Figura 26.-** Imagen Aster 2006 en donde se han resaltado las estructuras volcánicas y tectónicas aledañas al volcán Sara Sara (Rivera et al., 2018).

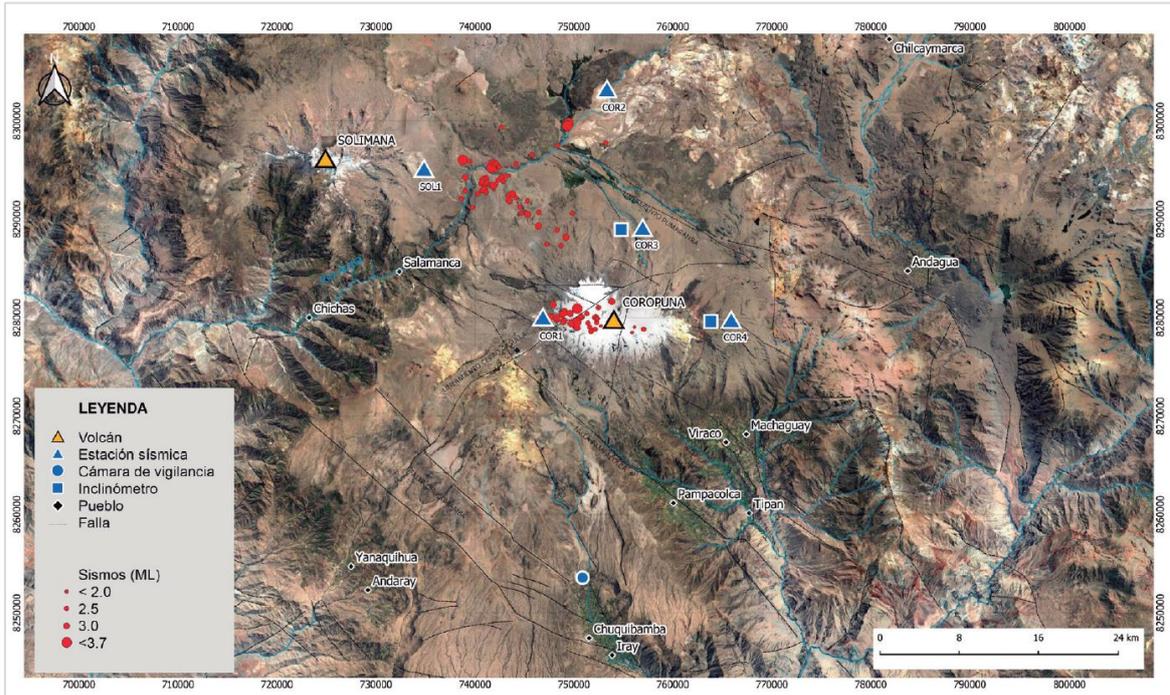
### **3.2.2. Volcán Coropuna**

Se realizaron campañas de mediciones GNSS en los meses de abril y diciembre de 2019. De igual manera, la base COBA ha sido procesada utilizando la estación AREG, ubicada a una distancia aproximada de 147 km. El desplazamiento calculado en el punto **COBA**, durante los siete meses transcurridos entre las mediciones efectuadas, es de 20 mm en dirección suroeste en la componente horizontal y un hundimiento de 32 mm (Figura 27). Este desplazamiento puede asociarse a la existencia en la zona de fallas en dirección noroeste-sureste (fallamiento en dirección andina) (Figuras 27 y 28). El punto **CO02** ha sido corregido utilizando el punto COBA como base, ubicado a ~40 km de distancia. El vector de desplazamiento horizontal es de 34 mm hacia el noroeste y un levantamiento de 41 mm en la vertical (Figura 27).



**Figura 27.-** Desplazamientos de los puntos COBA y CO02 instalados para el monitoreo de la deformación del volcán Coropuna. Los vectores han sido calculados a partir de datos GNSS adquiridos en las campañas de abril y diciembre de 2019.

Este desplazamiento aparentemente se relacionaría a la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico (producto del fracturamiento de rocas al interior del volcán), con magnitudes menores a M.3.7. Estos eventos se distribuyeron en dos zonas sísmicas; el punto de control geodésico **CO02** fue ubicado cerca del foco localizado al noroeste del complejo volcánico, cuya distribución en profundidad es  $\sim 15$  km (Figura 28). Los niveles de actividad sísmica del Coropuna fueron bajos en 2019, por lo que no existen indicios que hagan prever el desarrollo de una erupción en el corto o mediano plazo (IGP, 2019).

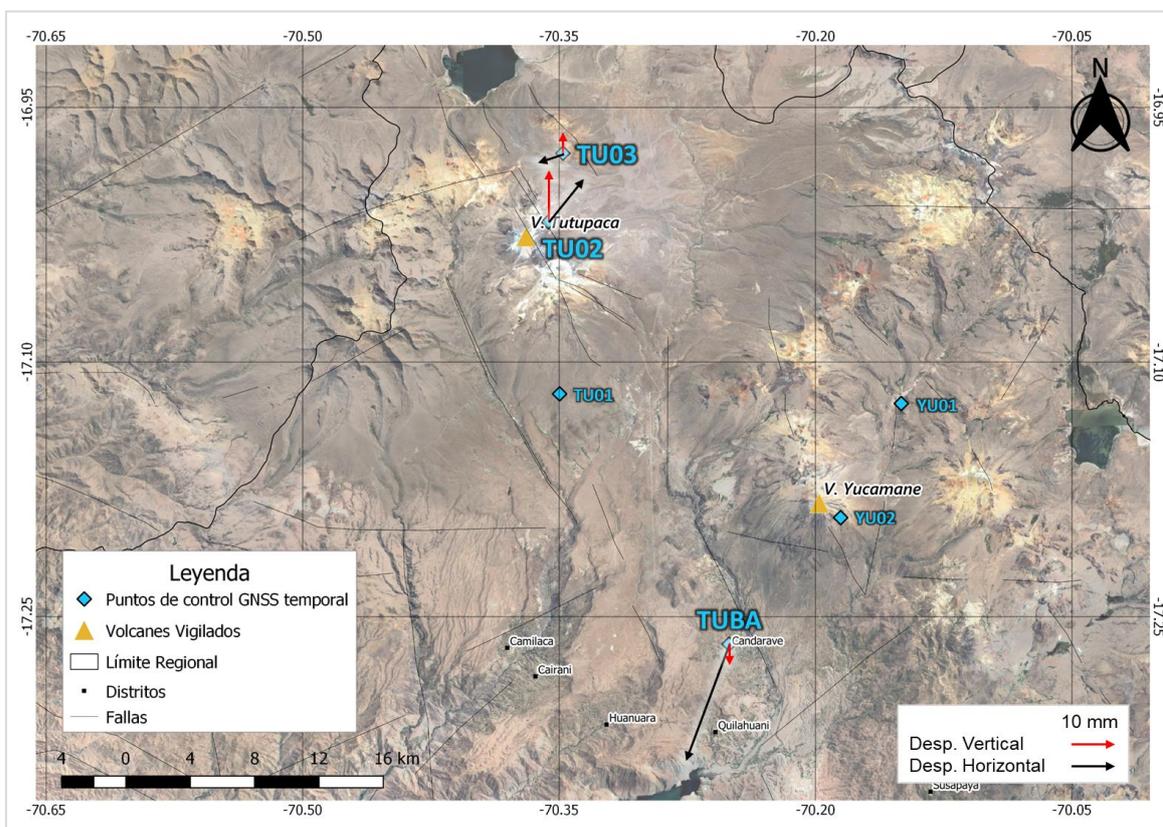


**Figura 28.-** Mapa de distribución de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) registrados en el volcán Coropuna durante el periodo enero-septiembre de 2019. Los sismos fueron localizados en dos grupos: el primero, a menos de 6 km al oeste del volcán; el segundo, a 18 km al noroeste (IGP, 2019).

### 3.2.3. Volcán Tutupaca

Se realizaron mediciones GNSS temporal en los meses de noviembre de 2018, abril y noviembre de 2019. La estación **TUBA** fue la base de los otros puntos de control, la cual fue corregida con la estación AREG ubicada en Arequipa. Ambas estaciones están separadas por una distancia aproximada de 160 km, valor medido en noviembre de 2018 y noviembre de 2019. El desplazamiento calculado en el punto **TUBA** es de 29 mm en dirección suroeste en la componente horizontal y registra un hundimiento de 5 mm en la componente vertical en el año transcurrido (Figura 29). Este desplazamiento está asociado a una reptación lenta de la localidad de Candarave, con un desplazamiento de casi 3 cm/año. El punto **TU02** ha sido corregido con la base **TUBA**, ubicado a 30 km de distancia aproximadamente. Este punto (TU02) ha sido medido al igual que la base en noviembre de 2018 y noviembre de 2019, donde se ha calculado un desplazamiento horizontal de 13 mm en dirección noreste y un levantamiento de 12 mm en la vertical (Figura 29). El punto **TU03** ha sido corregido solo durante la primera medición utilizando el punto **TUBA** como

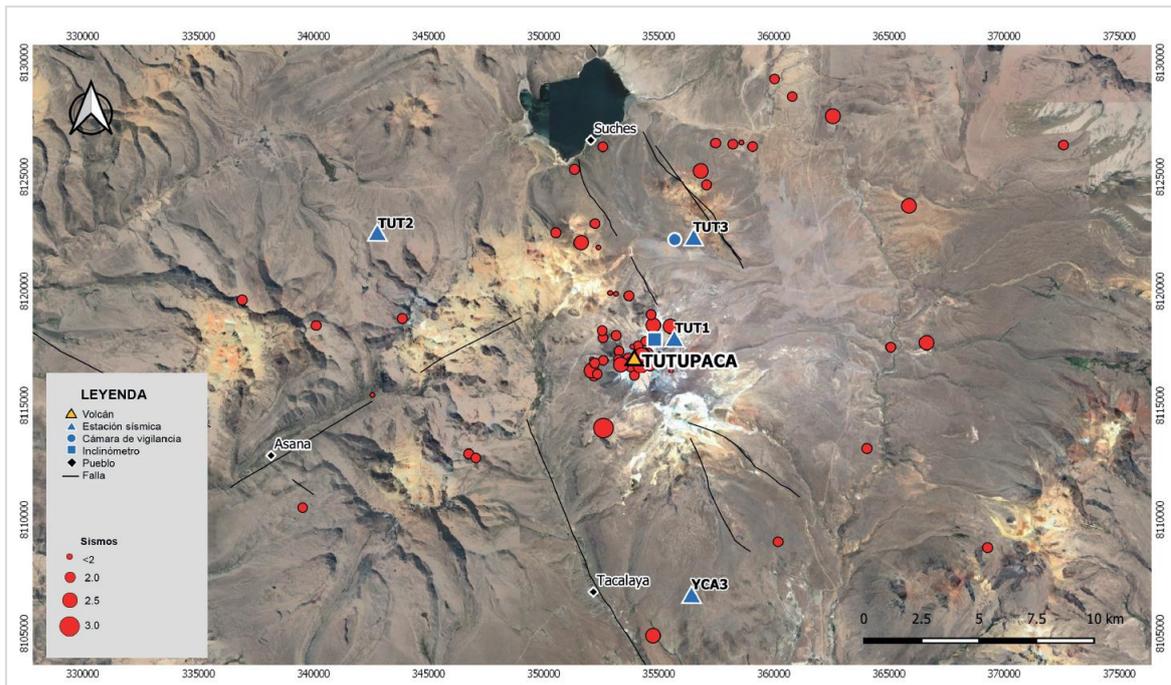
base, separados por una distancia de ~34 km. El vector de desplazamiento horizontal es de 6 mm hacia el norte y un levantamiento de 5 mm en la vertical (Figura 29).



**Figura 29.-** Desplazamientos de los puntos TUBA, TU02 y TU03 instalados para el monitoreo de deformación del volcán Tutupaca. Los vectores han sido calculados a partir de datos GNSS adquiridos en las campañas de noviembre de 2018, abril y noviembre de 2019.

Los desplazamientos de los puntos de control geodésicos **TU02** y **TU03** probablemente están asociados a la actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico, relacionada al fracturamiento de rocas al interior del volcán Tutupaca (Figura 30). La ocurrencia de esta sismicidad, por lo general, se da en forma de pequeños enjambres sísmicos. Entre mayo y noviembre de 2019, se observaron 5 enjambres con un número de entre 49 a 156 sismos por enjambre (IGP, 2019). La distribución espacial de la sismicidad muestra que los eventos se concentraron próximos al Tutupaca, es decir, más cercanos al punto TU02, el cual presenta el mayor desplazamiento. La explicación de que los desplazamientos horizontales de ambos puntos sean opuestos puede

asociarse al fallamiento en dirección noroeste-sureste que existen en los alrededores. En la actualidad, no se han observado indicios asociados a un posible proceso eruptivo del volcán Tutupaca; no obstante, el IGP, en su compromiso con la gestión del riesgo de desastres y la alerta temprana de erupciones, monitorea este y los otros volcanes activos del Perú y proporciona información periódica a las autoridades y a la población involucrada.



**Figura 30.-** Distribución espacial de sismos de tipo Volcano-Tectónico ligados al fracturamiento de rocas en el volcán Tutupaca, registrados en el periodo mayo-noviembre de 2019. La sismicidad se agrupó, principalmente, próxima al complejo volcánico (IGP, 2019).

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

- El estudio y monitoreo de la deformación con GNSS en los volcanes activos del Perú permite identificar, determinar y cuantificar patrones de deformación que ocurren antes, durante y después de un proceso eruptivo. Esta información es de gran utilidad no solo para investigar los procesos internos y las características de la fuente interna del volcán, sino también, junto con la información de otros parámetros geofísicos, identificar indicadores de un proceso eruptivo inminente, a fin de brindar un pronóstico adecuado que sirva como una alerta oportuna para salvaguardar a la población expuesta. Estas acciones han quedado demostradas durante los procesos eruptivos de los volcanes Sabancaya (2016-actualidad) y Ubinas (2019-actualidad).
- Las series de tiempo obtenidas con GNSS permanentes han demostrado una buena correlación con la información sísmica. En la estación GNSS MS01, instalada para el monitoreo de deformación del Misti, se ha calculado una velocidad de desplazamiento de 1.9 mm/año en dirección suroeste en la componente horizontal y velocidad positiva de 0.1 mm/año en la componente vertical (elevación). Estos resultados se correlacionan con la baja actividad sísmica del Misti registrada por las redes de monitoreo del IGP, la cual no muestra ningún incremento significativo durante el periodo analizado.
- Para el caso de la estación SB01 instalada en el volcán Sabancaya, se ha registrado una velocidad de desplazamiento de 5.1 mm/año en dirección sureste y un levantamiento de 33 mm/año en la componente vertical (elevación). El cambio en la aceleración del proceso inflacionario del sector norte del volcán Sabancaya se correlaciona con la actividad sísmica evidenciada por la ocurrencia de enjambres sísmicos ligado al arribo de intrusiones magmáticas. La inflación se acentúa con los enjambres registrados en mayo (M4.1), agosto (M3.5) y el último en septiembre de 2019 (M3.7).
- En el volcán Ubinas, se instalaron 3 equipos GNSS para la interpretación de la dinámica del volcán durante el proceso eruptivo iniciado en junio de 2019. La estación UB01 ha registrado una velocidad de desplazamiento de 2.6 mm/año en dirección noreste y un levantamiento de 10 mm/año en la componente vertical

(elevación). La aceleración es más evidente a partir de mayo de 2019, posiblemente ligada al inicio del nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas, ya que el incremento de la sismicidad se inicia en la primera quincena de junio de 2019. Posteriormente, la sismicidad cesa considerablemente a inicios de noviembre. En las series de tiempo obtenidas con dos softwares distintos, se observa una desaceleración en la componente vertical. Las series de tiempo GNSS de la estación UB03 evidencian una velocidad de desplazamiento en la componente horizontal de 2.8 mm/año en dirección sureste y en la componente vertical se estima un levantamiento de 6.0 mm/año.

- Desde noviembre de 2018 a la fecha, se han instalado 34 puntos de control GNSS para el monitoreo de la deformación de 12 volcanes peruanos, de los cuales 07 puntos, distribuidos en los volcanes Sara Sara, Coropuna y Tutupaca, han sido medidos en dos oportunidades. Los vectores de desplazamiento para el punto de control geodésico ubicado en el flanco sureste del volcán Sara Sara muestran una dirección de desplazamiento horizontal de 28 mm hacia el suroeste y desplazamiento positivo en la componente vertical de 6 mm, lo que sugiere levantamiento. Los vectores del punto de control geodésico, ubicado en el sector norte del volcán Coropuna, muestran un desplazamiento de 34 mm hacia el noroeste y un desplazamiento positivo de 41 mm en la vertical (levantamiento). Por último, en el volcán Tutupaca se midieron dos puntos de control, ubicados en el cráter del volcán y en el sector norte. En el primero se registró un desplazamiento horizontal de 13 mm en dirección noreste y un levantamiento de 12 mm en la vertical. En el punto ubicado en el sector norte se ha registrado un desplazamiento horizontal de 6 mm hacia el norte y un levantamiento de 5 mm en la vertical. Los resultados obtenidos son preliminares y son asociados a la actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico, debido a procesos de fracturamiento de rocas al interior del volcán y a fallas locales. Aún se necesitan más medidas para establecer una tendencia más clara, ya que todavía se encuentran dentro del margen de error. Las pequeñas tasas de deformación se correlacionan con la actividad sísmica que se encuentra en niveles normales.

## RECOMENDACIONES

- El parámetro de la deformación volcánica obtenido a partir de datos GNSS debe ser correlacionado con otros métodos de monitoreo (sísmica, visual, geoquímica, sensores remotos) para un mejor entendimiento de la dinámica de los volcanes, contribuyendo en la elaboración de pronósticos certeros de erupciones volcánicas.
- Ha quedado demostrado que los volcanes se deforman previo, durante y después de un proceso eruptivo, como el caso de los volcanes Sabancaya y Ubinas. Por tal motivo, autoridades y población deben mantenerse informadas en todo momento sobre la actividad de los volcanes mediante los reportes emitidos por el IGP: (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>).

## BIBLIOGRAFÍA

- Battaglia, M., Alpala, J., Alpala, R., Angarita, M., Arcos, D., Eullades, L., Eullades, P., Muller, C. & Narvaez, L. (2019). Monitoring volcanic deformation. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2019. 9-May-19 doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10902-9.
- Del Carpio J., Tavera H., (2019). Evaluación del proceso eruptivo del volcán Ubinas de julio 2019. Informe Técnico IGP.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Puma, Nino., Cruz, J., Torres, J., Vargas, K., Lazarte, I., Machacca, R., Concha, J. (2019) Evaluación geofísica del comportamiento dinámico actual del volcán Sabancaya, periodo enero-octubre de 2019. Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú, 35 p.
- Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M., Alcott, A., Moruzzi, S., Styler, A., Jay, J., Aron, F., Coppola, D. y Lundgren, P. (2018) Monitoreo de volcanes peruanos desde el espacio con sensores termales e InSAR. Foro Internacional: Los volcanes y su impacto, Arequipa, Perú, 5 p.
- Dzurisin, D. (2007). Volcano deformation: Geodetic monitoring techniques. Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences. Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK.
- Foulger, G.R., Bilham, R., Morgan, J. and Einarsson, P. (1987) The Iceland geodetic field campaign 1986, Eos, vol. 68, pp. 1801-1818.
- Gonzales K., Froger J. L., Audin L., Macedo O., (2009). Ejemplos de Deformación producto de la Tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar – InSAR. Bol. Soc. Geol. Perú 103, p. 109-124.
- Gonzales, K., Froger, J., Rivera, M., & Audin, L. (2006). Deformación co-sísmica producida por el sismo Mb=5.4 del 01 de octubre de 2005 (Carumas-Moquegua), detectada por interferometría radar - InSAR. In XIII Congreso peruano de Geología. Vol, 2005, pp. 488-489.
- Instituto Geofísico del Perú (2019). Investigación y Monitoreo de Volcanes Activos en el Sur del Perú. Reporte Técnico Especial, Perú, 63 p.

- Janssen, V. (2007) Volcano deformation monitoring using GPS, *Journal of Spatial Science*, 52:1, 41-54, DOI: 10.1080/14498596.2007.9635099
- Jay, J., Delgado, F., Torres, J., Pritchard, M., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002-2014. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2780-2788.
- Jay, J., Pritchard, M., Aron, F., Delgado, F., Macedo, O., & Aguilar, V. (2013). Volcano-tectonic interactions at Sabancaya and other Peruvian volcanoes revealed by InSAR and seismicity. American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts V51E-2735.
- Morales A. M., Amelung F., Mothes P. (2016), Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 2869–2883, doi:10.1002/2016GC006393.
- Nishi, K., Ono, H. and Mori, H. (1999) Global Positioning System measurements of ground deformation caused by magma intrusion and lava discharge: The 1990-1995 eruption at Unzendake volcano, Kyushu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 89, pp. 23-34.
- Pritchard, M. (2003). Recent crustal deformation in west-central South America. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, California Institute of Technology, Pasadena, California, 237 p.
- 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.
- Puma, N. & Del Carpio, J. (2019) Evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya: situación actual a partir de observaciones de campo (diciembre, 2019). Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú, 14 p.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J.L., Manrique, N., Samaniego, P. & Vela, J. (2018). Geología y Evaluación de peligros del Volcán Sara Sara (Ayacucho). Informe Técnico Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo, Perú, 128 p.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Mariño, J., Berolatti, R., Fuentes, J. (2010). Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 198(1-2): 19-34.

- Rivera, M.; Thouret, J.-C.; Samaniego P.; Le Pennec J.-L. (2014) - The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis, magma recharge and plumbing system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 270; 122-141.
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño J., Van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chedeville C., Liorzou, C., Fidel L., Malnati, J., (2015) - The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bull. Volcanol.*, 77:51-69.
- Shepherd, J.B., Herd, R.A., Jackson, P. and Watts, R. (1998) Ground deformation measurements at the Soufriere Hills volcano, Montserrat: II: Rapid static GPS measurements June 1996 – June 1997, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 25, no. 18, pp. 3413-3416.
- Sigmundsson, F., Einarsson, P. and Bilham, R. (1992) Magma chamber deflation recorded by the Global Positioning System: The Hekla 1991 eruption, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 19, no. 14, pp. 1483-1486.
- Thouret, J.C.; Dávila, J., Eissen, J.P. (1999) - Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.
- Villegas-Lanza, J. C., et al (2016), Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation, *J. Geophys. Res.*, 121, 7371–7394, doi:10.1002/2016JB013080.