



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



DEFORMACIÓN EN EL ENTORNO DEL VOLCÁN SABANCAYA Y CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE A PARTIR DEL MODELADO CON DATOS GNSS Y DInSAR DEL PERIODO 2014 - 2021

Informe Técnico N°016-2023/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Agosto, 2023

Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Edmundo Norabuena

Informe Anual

Deformación en el entorno del volcán Sabancaya y caracterización de la fuente a partir del modelado con datos GNSS y DInSAR del periodo 2014-2021

Autores

Katherine Vargas Alva
Juan Villegas Lanza
Riky Centeno Quico
John Cruz Igme

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**DEFORMACIÓN EN EL ENTORNO DEL VOLCÁN SABANCAYA Y
CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE A PARTIR DEL MODELADO
CON DATOS GNSS Y DINSAR DEL PERIODO 2014-2021**

(Región Arequipa)

Lima – Perú
Febrero, 2023

RESUMEN

En el sector norte del volcán Sabancaya (cerca al volcán Hualca Hualca) se viene registrando deformación positiva (inflación) sostenida desde el año 2014 detectado con técnicas GNSS y DInSAR. Esta inflación comienza previo al proceso eruptivo del volcán Sabancaya en noviembre de 2016. El análisis de las tasas de deformación, el nivel de actividad sísmica, el número de explosiones y la presencia de anomalías térmicas satelitales durante el periodo 2014 – 2021, ha permitido identificar siete fases bien diferenciadas: fase I (septiembre 2014 - 8 de diciembre 2015), se registró la mayor velocidad de deformación (4.1 cm/año en el punto de monitoreo N2) asociada a la presión ejercida por el ascenso de magma, previo al inicio del proceso eruptivo. En la fase II (9 de diciembre 2015 - 6 de noviembre 2016) se registró una velocidad de deformación de 1.6 cm/año (en punto N2). Durante las fases III (7 de noviembre 2016 – 29 de enero 2018) y VII (16 de febrero 2021 – 7 de diciembre 2021) se registraron tasas de deformación mayores a 2 cm/año (en punto N2), asociados a un mayor número de explosiones y sismos debido a movimiento de fluidos (sismos LP). Estos eventos habrían ocurrido en respuesta a una mayor presión en el sistema magmático a profundidades entre 8 y 9 km bajo el nivel del mar - b. n. m.

En contraste, durante la fase V (23 de diciembre 2019 – 14 de agosto 2020), se registró la menor tasa de inflación (1 cm/año en punto N2); asimismo en las fases IV (30 de enero 2018 – 22 de diciembre 2019) y VI (15 de agosto 2020 – 15 de febrero 2021), las tasas de deformación alcanzaron los 1.6 cm/año (en punto N2), lo cual se traduce en la relajación del sistema magmático, debido a menor presión del magma ubicado a profundidades entre 12 y 13 km b. n. m., evidenciado en superficie por el descenso en el número de explosiones, menor registro de sismos de tipo LP y anomalías térmicas.

Según los resultados del modelamiento, existe una fuerte influencia de la fuente generadora de la deformación positiva registrada al norte del volcán Sabancaya y los sismos tectónicos detectados en la zona. Estos resultados sugieren que la transferencia de tensión estática desde la fuente de inflación habría sido lo suficientemente importante como para promover la ocurrencia de sismos de magnitud mayor a M5 asociado al movimiento de las fallas activas presentes en el entorno.

INDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Contexto geológico-estructural

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

2.1.- Método GNSS

2.2.- Método DInSAR

2.3.- Sismicidad

3.- RESULTADOS

3.1.- Fases de actividad definidas para análisis

3.2.- Vectores de deformación - GNSS

3.3.- Velocidades de deformación - DINSAR

3.4.- Series de tiempo DInSAR

3.5.- Modelamiento de la fuente de deformación

4.- DISCUSIÓN

4.1.- Fases y características de la deformación

4.2.- Procesos de deformación debidos al ascenso de magma

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya se ubica en el sur del Perú, entre los distritos de Maca y Lluta, en la provincia de Caylloma, región Arequipa, a 70 km al NO de la ciudad de Arequipa. El Sabancaya es un volcán relativamente joven edificado los últimos 8000 años (Samaniego et al., 2016). Este volcán está emplazado entre dos volcanes considerados inactivos: al norte el volcán Hualca Hualca y al sur el volcán Ampato (Figura 1).

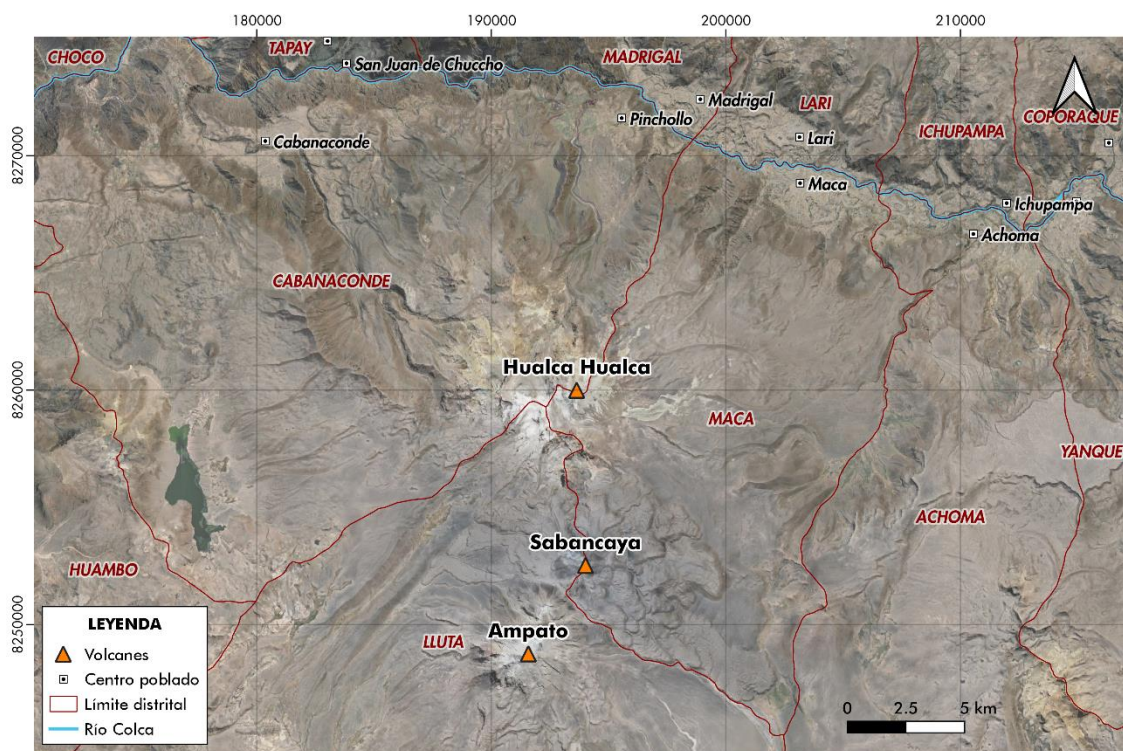


Figura 1.- Mapa de ubicación del volcán Sabancaya y poblados aledaños.

Desde la década de los años noventa hasta la actualidad, se han realizado diversos estudios de deformación volcánica y tectónica en el entorno del volcán Sabancaya (Huamán, 1995; Mering et al. 1996), principalmente mediante el empleo de técnicas DInSAR y posteriormente con equipos GNSS. Pritchard y Simons (2002), realizaron el análisis de interferogramas de los años 1992-1996, con el cual evidenciaron una deformación del sector NE del volcán Hualca Hualca, la cual habría estado asociada al proceso eruptivo 1990-1998 del volcán Sabancaya y a la

actividad tectónica registrada en la zona. Posteriormente, Gonzáles et al. (2009), a través del análisis de imágenes de radar de los años 2002-2003, detectaron una deformación al NO del volcán Sabancaya asociada a la actividad de fallas normales denominadas Solarpampa y Trigal, con posible influencia volcánica. Estudios más recientes, como Delgado et al. (2018), efectuado a través de imágenes de radar de los años 2015-2017, mostraron que la mayor deformación asociada a un levantamiento ocurre al norte del volcán Sabancaya. McQueen et al. (2020) realizaron el modelamiento de la deformación en el entorno del volcán Sabancaya a partir de datos DInSAR de los años 1992-2019, obteniendo una fuente de tipo esfera centrada a 7 km al NO del Sabancaya, a una profundidad de 13-14 km y una tasa de cambio de volumen de 0.04 a 0.05 km³/año. Asimismo, Cruz (2019), mediante la técnica GNSS, calculó una inflación del sector norte del Sabancaya en la línea base SBMI-SBMU con una tasa máxima de 33.43 mm/año. Vargas et al. (2020) a partir de datos DInSAR y GNSS cuantificaron un levantamiento de 33 mm/año del sector norte del volcán Sabancaya con cambios en la velocidad que correlacionaron con la ocurrencia de enjambres sísmicos en el año 2019, ligados al ascenso de magma. De igual modo, Boixart et al. (2020), combinando el empleo de las técnicas GNSS e DInSAR para el periodo 2015-2019, muestran que la inflación detectada al NO del Sabancaya estaría asociada con la intrusión de un cuerpo de magma ubicado entre 12 y 15 km por debajo del volcán Hualca Hualca.

En este estudio se analizan datos GNSS y DInSAR con la finalidad de cuantificar las tasas de deformación ocurrida en el entorno del volcán Sabancaya para el periodo 2014-2021 y posteriormente modelar y conocer las características de la fuente magmática profunda que las genera. A partir de estos resultados y la correlación con otros parámetros de monitoreo volcánico, tales como el incremento en el número de sismos y de las explosiones, se definen periodos de variación en el comportamiento dinámico del volcán Sabancaya que permitirán conocer la evolución de la fuente a lo largo del tiempo.

1.1.- Contexto geológico-estructural

El volcán Sabancaya hace parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS). Dicho complejo se ha edificado al sur de un estratovolcán inactivo y erosionado: el Hualca Hualca (6280 metros sobre el nivel del mar -m s.n.m.), de edad Pleistocénica. El volcán Ampato (6280 m s.n.m.) está construido al extremo sur del CVAS. El volcán Nevado Sabancaya es el volcán más joven y activo del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS). Los estudios geológicos muestran que el volcán Sabancaya se ha edificado en tres etapas durante el Holoceno (Rivera et al., 2016, Samaniego et al., 2016):

- **Sabancaya I:** constituido por flujos de lava andesíticos y dacíticos que sobreyacen a los flujos de lava del volcán Ampato (Figura 2, Samaniego et al., 2016).
- **Sabancaya II:** compuesto por flujos de lava andesíticos y dacíticos que sobreyacen a las lavas de la unidad "Sabancaya I". La fresca morfología de los domos y coladas de lava en bloques de este volcán sugieren su emplazamiento en una etapa muy reciente, probablemente en el Holoceno. Existe un domo de lava (5976 m s. n. m.) de forma simétrica cubierta con una delgada capa de ceniza que aflora al sur del Sabancaya, de composición andesítica (Delgado, 2012).
- **Sabancaya III:** compuesto de flujos de lava andesíticas y dacíticas que forman la parte superior del cono noreste del Sabancaya. En esta etapa también se emplazaron al menos cinco niveles de caídas de ceniza localizados en los sectores E y O del Sabancaya. Asimismo, se emplazaron los depósitos de ceniza que conforman el cono de ceniza, ligados a erupciones recientes del volcán.

Características estructurales: en inmediaciones del volcán Sabancaya y, en general, en el valle del Colca, se distinguen varios sistemas de fallas y

fracturas recientes de dimensiones y rumbos variados (Figura 2), con direcciones E-O, NO-SE y NE-SO. Los principales sistemas de falla son Trigal y Solarpampa (sistema de fallas normales Huambo-Cabanaconde), ubicados en la margen izquierda del río Colca, próximos a la localidad de Cabanaconde. Además, se encuentra la falla normal Ichupampa, ubicada al norte de la localidad de Achoma y, por último, el lineamiento Sepina que inicia en el sector noreste del Sabancaya, cruza el cañón del río Colca y atraviesa los pueblos de Achoma, Yanque, Ichupampa y Coporaque (Sébrier et al., 1985; Huamán et al., 1993; Mering et al., 1996).

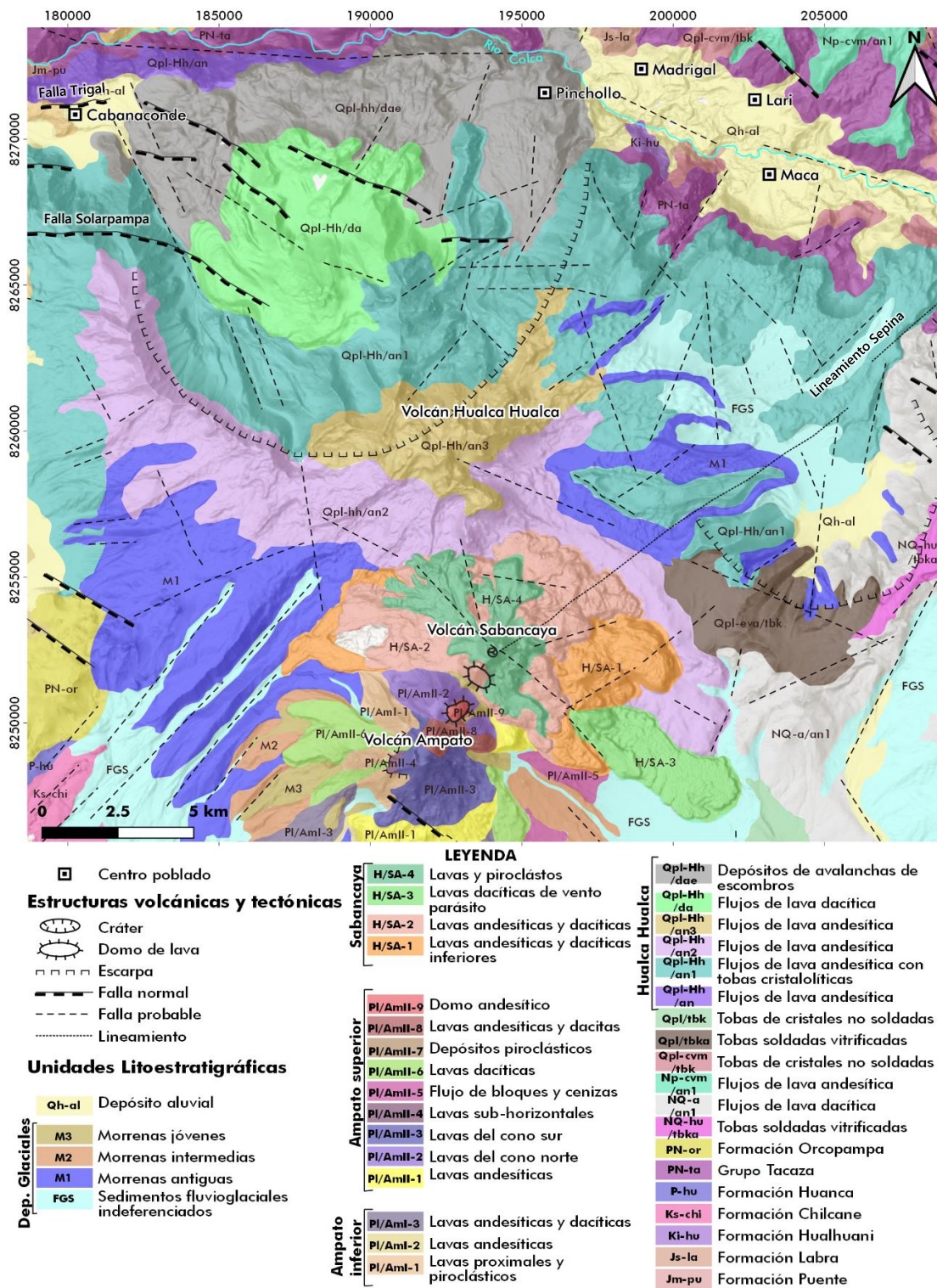


Figura 2.- Mapa geológico - estructural del volcán Sabancaya y alrededores (modificado de Samaniego et al., 2016 y del cuadrángulo 32s Chivay, INGEMMET).

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

Para el análisis de la deformación del volcán Sabancaya se han empleado dos métodos geodésicos: GNSS y DInSAR, que permiten alcanzar precisiones milimétricas y centimétricas, respectivamente. Por tal motivo, se han definido puntos de análisis estratégicos con ambos métodos (Figura 3).

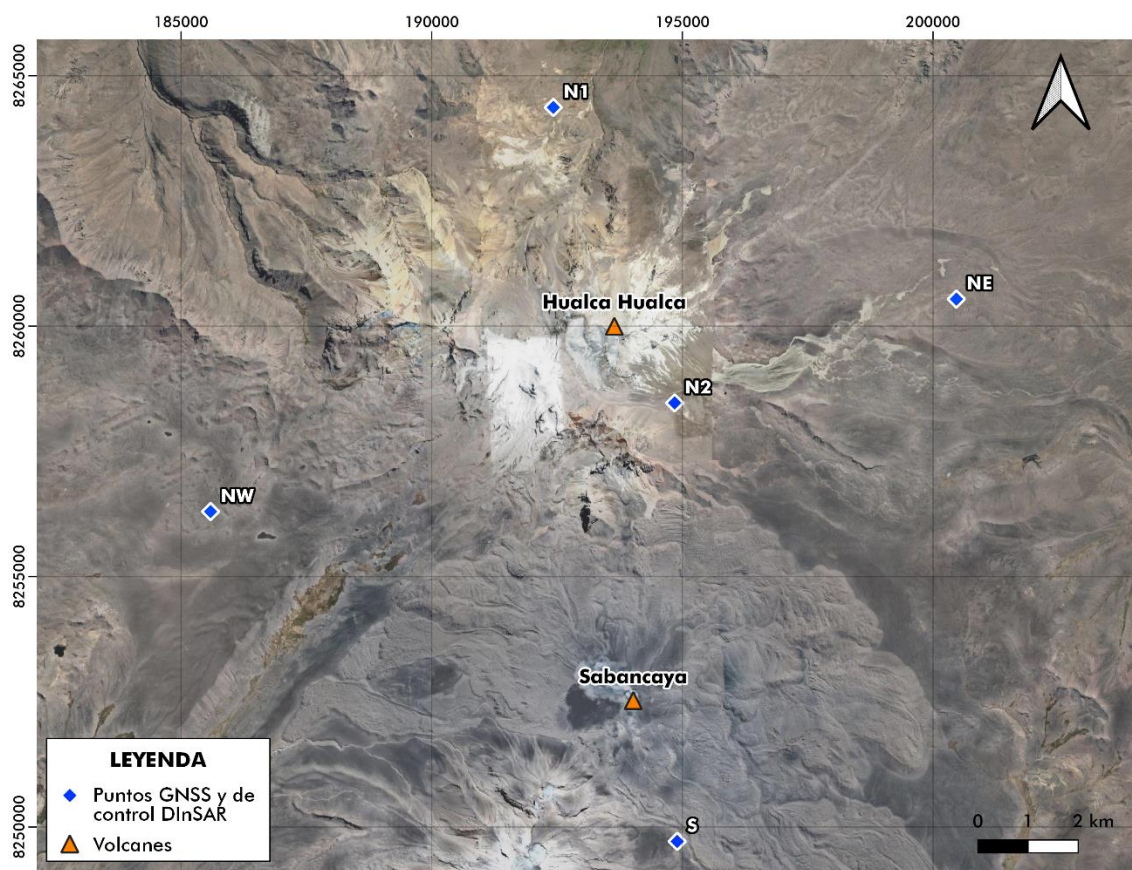


Figura 3.- Ubicación de puntos de control GNSS y puntos considerados para el análisis de series de tiempo DInSAR.

2.1.- Método GNSS

Datos GNSS: Los puntos de control GNSS se ubican en los cuatro puntos cardinales del volcán Hualca Hualca (Fig. 3) y en un punto central. Esta última sería la zona donde se registra la mayor deformación que ocurre en inmediaciones del volcán Sabancaya (Pritchard y Simons, 2002; MacQueen et al., 2020; Boixart et al., 2020). Los datos han sido adquiridos en diferentes periodos, detallados a continuación:

- El punto de control **N1** se sitúa al norte del volcán Hualca Hualca, en inmediaciones del géiser de Pinchollo (a 11.9 km al norte del cráter del Sabancaya). En este punto se registraron datos entre diciembre de 2020 a noviembre de 2021 (6 días de datos medidos en campañas).
- El punto de control **N2** se sitúa en el flanco sureste del volcán Hualca Hualca (a 6 km al norte del cráter del Sabancaya). En este punto se registraron datos entre diciembre de 2018 a diciembre de 2021 (más de 700 días de datos).
- El punto de control **NE** se ubica en el sector noreste del volcán Sabancaya (a 10.2 km de distancia del cráter). Se registraron datos entre diciembre de 2020 y noviembre de 2021 (4 días de datos medidos en campañas).
- El punto de control **NW** se ubica en el sector noroeste del Sabancaya (a 9.2 km de distancia del cráter), con datos registrados entre diciembre de 2019 a noviembre de 2021 (15 días de datos medidos en campañas).
- El punto de control **S** se sitúa en el flanco sureste del Sabancaya (a 3 km del cráter). Se registraron datos durante diciembre de 2019 a abril de 2021 (más de 400 días de datos).

Procesamiento de datos GNSS: Para el procesamiento de datos del sistema GNSS se ha utilizado el software GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2018), utilizando las efemérides precisas del Servicio GNSS Internacional (IGS). Para la definición del marco de referencia se han empleado 2 estaciones GNSS ubicadas en Arequipa y 17 estaciones distribuidas en Sudamérica, las cuales pertenecen a la Red Global IGS (Figura 4, círculos celestes, Johnston et al., 2019). Asimismo, se ha tomado información de 30 estaciones de la Red GNSS de la Universidad de Chile, ubicadas a distancias de hasta 800 km del volcán Sabancaya (Figura 4, círculos amarillos) e información de 3 estaciones la red del Sistema de Referencia Geocéntrico

para Las Américas (SIRGAS) de Brasil, localizadas hasta a 1000 km de los volcanes peruanos (Figura 4, círculos rosados). Luego de diversas pruebas, se escogieron 26 sitios para llevar a cabo el proceso de estabilización. Este procedimiento se hizo con el propósito de hacer una adecuada filtración de la deformación tectónica para analizar específicamente la deformación volcánica (Battaglia y Floyd, 2019).

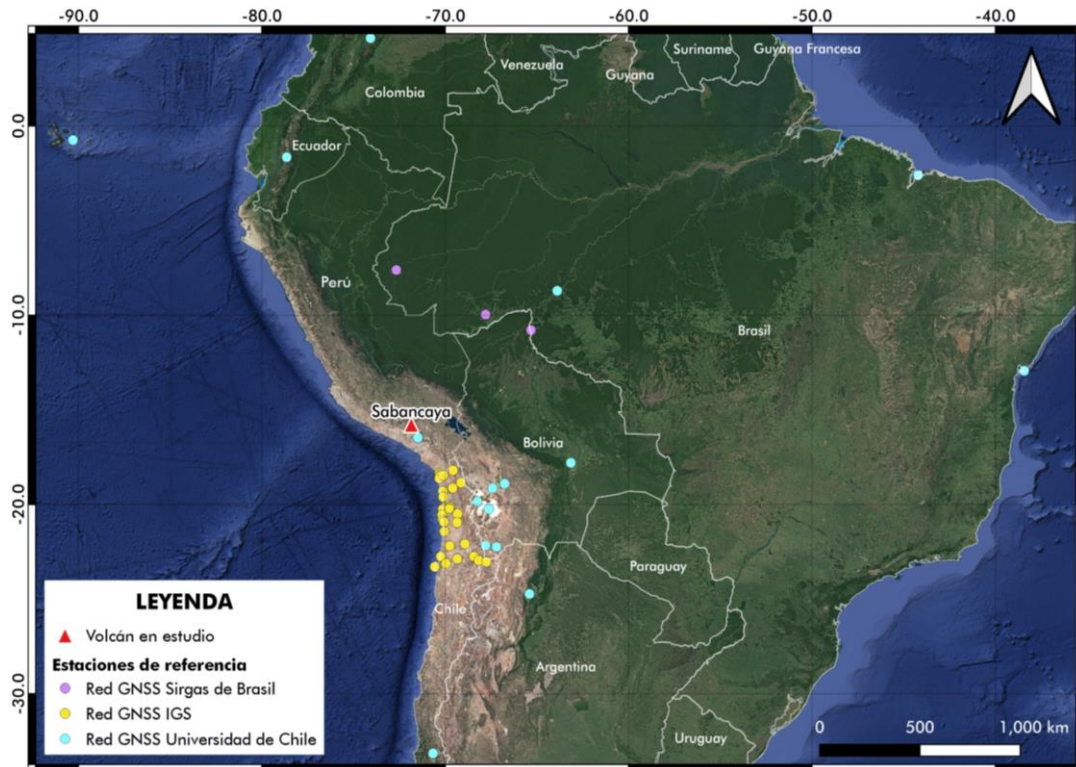


Figura 4.- Mapa de las estaciones GNSS utilizadas como referencia para filtrar la deformación detectada en inmediaciones del volcán Sabancaya (triángulo rojo).

2.2.- Método DInSAR

Datos de imágenes de radar: Para analizar y cuantificar la deformación superficial detectada en el entorno del volcán Sabancaya se emplearon imágenes de radar Sentinel-1A y B, las cuales son recolectadas por los satélites de observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA, <https://scihub.copernicus.eu>). Los satélites poseen un radar de apertura sintética en la banda C (5,405 GHz), cuya longitud de onda es de ~ 5.6 cm. Las imágenes son de acceso libre y disponible con una periodicidad de 12 a

24 días, siendo posible utilizar las imágenes en órbita ascendente del satélite o en órbita descendente. Para el análisis de la evolución temporal de la deformación, se ha realizado la descarga de 161 imágenes Sentinel-1 en órbita ascendente y 177 en órbita descendente, que comprenden el periodo de octubre de 2014 (fecha a partir del cual se cuenta con disponibilidad de imágenes de radar), hasta diciembre de 2021.

Procesamiento de datos DINSAR: La técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (InSAR), a diferencia de otras técnicas que dependen de la medición en diversos puntos, produce un mapa espacial de la deformación del suelo en línea de vista del satélite (LOS). El procesamiento se basa en la comparación de dos imágenes SAR (una máster y una esclava), con el objeto de identificar y cuantificar la deformación de la superficie del suelo. Para el procesamiento se ha empleado el software libre ISCE, el cual está basado en Python, cuyos algoritmos se han adaptado para asumir un enfoque de ruta de referencia común para todas las imágenes adquiridas desde órbitas cercanas, simplificando y sistematizando la geometría para el análisis de series temporales (Rosen et al., 2012, Figura 5).

Las series de tiempo se realizaron mediante la elaboración de varios interferogramas, filtrando aquellos con la mejor coherencia para reducir el ruido. Además, como estrategia de ahorro de gasto computacional, se ha elaborado series independientes, es decir para cada fase de estudio (Figura 6), de tal manera que se obtenga un mapa de velocidad individual.

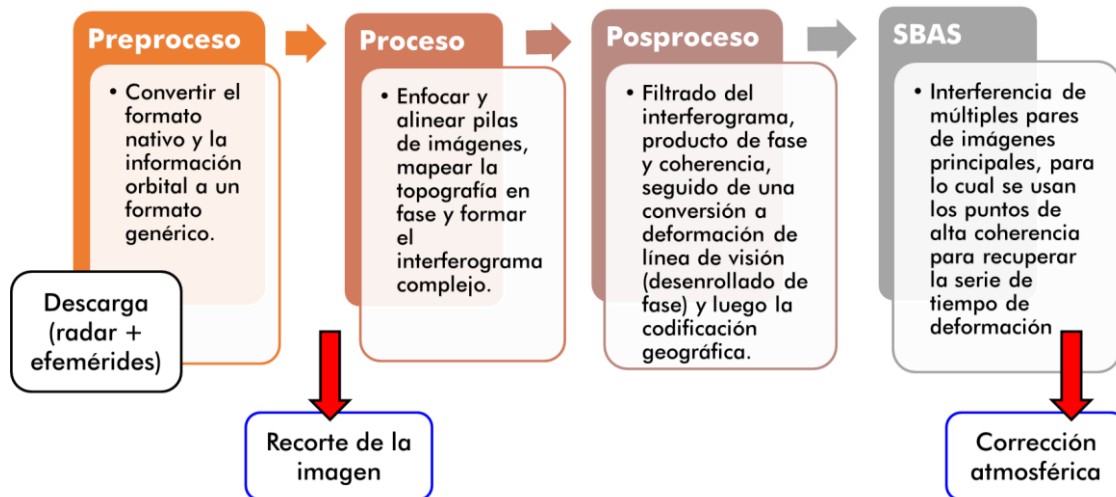


Figura 5.- Secuencia para el procesamiento de imágenes de radar y posterior obtención de series de tiempo a través del método DInSAR.

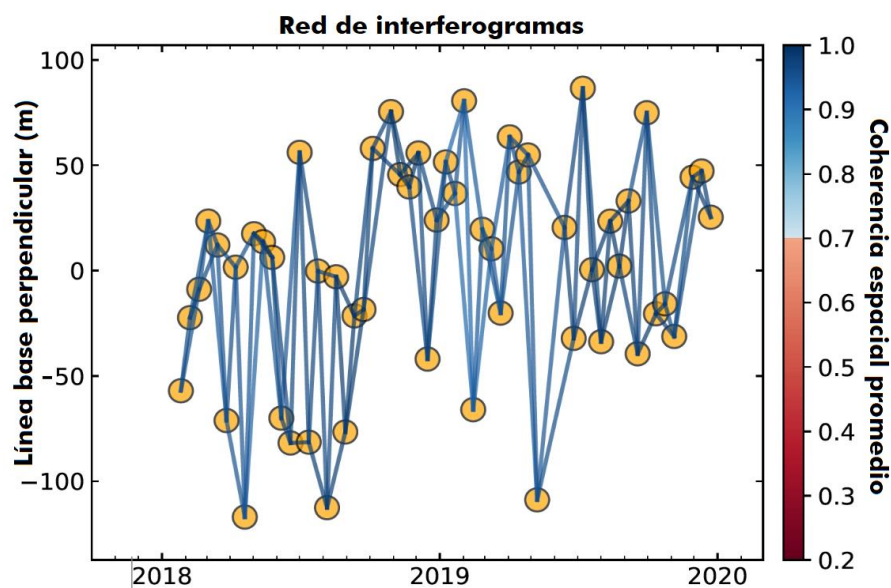


Figura 6.- Red de interferogramas para la elaboración de la serie de tiempo de la fase

V.

Modelamiento de datos DInSAR: Para determinar e interpretar la deformación detectada en inmediaciones del volcán Sabancaya en este estudio se empleó el software de código abierto DMODELS (Battaglia et al., 2013), que utiliza los modelos más comunes para interpretar medidas de deformación que ocurren cerca de fallas y volcanes activos. Esta herramienta está enfocada en los modelos analíticos de deformación de la corteza, verificados con modelos numéricos.

2.3.- Sismicidad

Luego de casi 15 años de calma, en febrero de 2013, el volcán Sabancaya empezó a registrar un incremento en las emisiones de gases y sismicidad, por tal motivo el IGP instaló en ese mismo mes, una red de monitoreo sísmico en tiempo real, la cual ha sido reforzada desde el año 2016 con la instalación adicional de 4 modernos sensores sísmicos que permiten mejorar el análisis de la actividad sismo-volcánica del Sabancaya (Del Carpio et al., 2019). La red de monitoreo sísmico opera en la actualidad para la vigilancia del volcán Sabancaya, cuyos resultados son presentados a través de informes técnicos y boletines vulcanológicos semanales emitidos por el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

3.- RESULTADOS

3.1.- Fases de actividad definidas para análisis

El IGP dispone de una base de datos de sismos desde antes y durante el actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya, a diferencia de los datos GNSS que están disponibles desde fines de 2018 y los datos de DInSAR (Sentinel-1) que se tiene disponibilidad desde 2014. Por tal motivo, se ha clasificado las fases de actividad principalmente según los cambios en el incremento o disminución del número de eventos sísmo-volcánicos (Figura 7) para luego ser comparados con los datos de deformación.

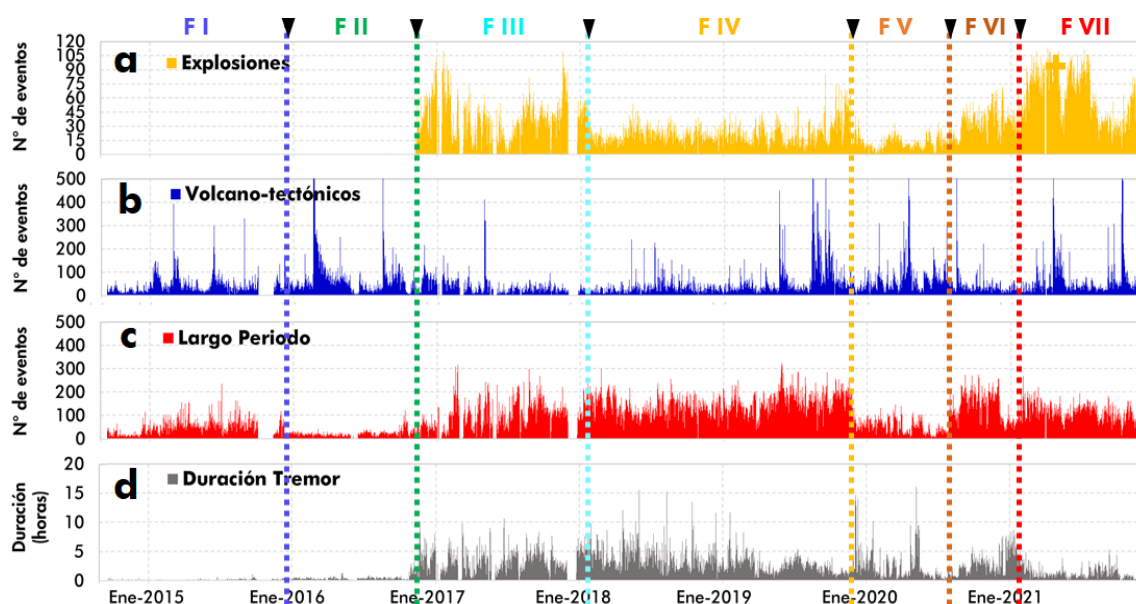


Figura 7.- Eventos sísmicos registrados en el entorno del volcán Sabancaya por la red de monitoreo del CENVUL-IGP utilizados para la definición de fases de estudio. F I a F VII, corresponden a la Fase I a Fase FVII.

Los periodos definidos para cada fase de estudio se presentan a continuación:

- **Fase I:** 18 de septiembre de 2014 al 8 de diciembre de 2015. Se registró un promedio de 42 sismos de tipo Volcano-Tectónica (VT) por día (Figura 7b), 50 sismos tipo Largo Periodo (LP) por día (Figura 7c) y ninguna explosión (Figura 7a).

- **Fase II:** 9 de diciembre de 2015 al 6 de noviembre de 2016. Esta fase resalta por la disminución abrupta de sismos de tipo LP con la ocurrencia promedio de 22 sismos/día (Figura 7c), incremento del promedio de sismos de tipo VT a 69 sismos por día (Figura 7b), incremento de la duración de tremor (Figura 7d) y ninguna explosión (Figura 7a).
- **Fase III:** 7 de noviembre de 2016 al 29 de enero de 2018. Esta fase se inicia el proceso eruptivo, con un registro promedio de 41 explosiones/día (Figura 7a), 30 sismos VT/día (Figura 7b), incremento en el número de sismos LP, con la ocurrencia de 109 eventos/día (Figura 7c) e incremento de duración de tremor (Figura 7d).
- **Fase IV:** 30 de enero de 2018 al 22 de diciembre de 2019. Se registró una disminución significativa del número de explosiones con respecto a la fase anterior, con una tasa de 23 explosiones/día (Figura 7a). Asimismo, se registraron 54 sismos de tipo VT/día (Figura 7b), un incremento de sismos LP con un promedio de 146 eventos/día (Figura 7c) y es la fase con mayor duración de tremor (Figura 7d).
- **Fase V:** 23 de diciembre de 2019 al 14 de agosto de 2020. Esta fase se caracteriza por la disminución abrupta del número de explosiones con la ocurrencia promedio de 13 eventos/día (Figura 7a). Asimismo, se detectó una disminución significativa de sismos de tipo LP, con una tasa promedio de 56 eventos/día (Figura 7c) y la ocurrencia promedio de 76 sismos VT/día (Figura 7b).
- **Fase VI:** 15 de agosto de 2020 al 15 de febrero de 2021. Se detectó un incremento en el número de explosiones con un promedio de 39 explosiones/día (Figura 7a), 41 sismos VT/día (Figura 7b) y un incremento de sismos LP, con 143 eventos/día (Figura 7c).

- **Fase VII:** 16 de febrero de 2021 al 7 de diciembre de 2021. Se registró un incremento significativo en el número de explosiones con un promedio de 65 explosiones/día (Figura 7a), 73 sismos VT/día (Figura 7b), disminución en el número de eventos LP, con 115 eventos/día (Figura 7c) y el registro de menos horas de tremor (Figura 7d).

3.2.- Vectores de deformación -GNSS

Se calculó la velocidad de deformación de los cinco puntos de control GNSS, cuyos resultados son presentados a continuación:

- **Punto N1:** Entre el periodo de diciembre de 2020 a noviembre de 2021 se ha observado cambios abruptos en la tendencia de la deformación superficial. Por este motivo se ha calculado los desplazamientos para la primera y segunda campaña de campo (noviembre 2019 y abril de 2021) obteniendo valores en las componentes horizontales de -0.8 ± 0.6 cm en la dirección oeste, de 1.9 ± 0.4 cm en la dirección norte (Figura 8, vector color negro) y de 0.9 ± 1.5 cm en la componente vertical (Figura 8, vector naranja). Los desplazamientos comparando los datos de la segunda y tercera campaña de campo (abril y noviembre 2021) fueron de -0.4 ± 0.3 cm en la dirección oeste, de $+15.4 \pm 0.5$ cm en la dirección norte y de -22.0 ± 1.3 cm en la componente vertical (Figura 11c).
- **Punto N2:** Entre diciembre de 2018 y diciembre de 2021 presentó una velocidad de deformación de 3.8 ± 0.3 cm/año en la componente vertical. Sin embargo, en las componentes horizontales se registraron diferentes tendencias a lo largo del tiempo. Entre diciembre de 2018 y febrero de 2021, se calculó una velocidad de deformación positiva de 0.5 ± 0.1 cm/año en dirección este (Figura 8, vector morado). Desde febrero hasta diciembre de 2021 (transición fase VI a fase VII), se observa una

tendencia negativa con una velocidad de -0.9 ± 0.1 cm/año en dirección oeste. Después del 8 de octubre de 2021, se registró una deformación negativa de la componente norte de ~ 2.2 cm (hacia el sur, Figura 8, vector verde), la cual ocurre durante el enjambre de sismos detectados cerca de la localidad de Pinchollo.

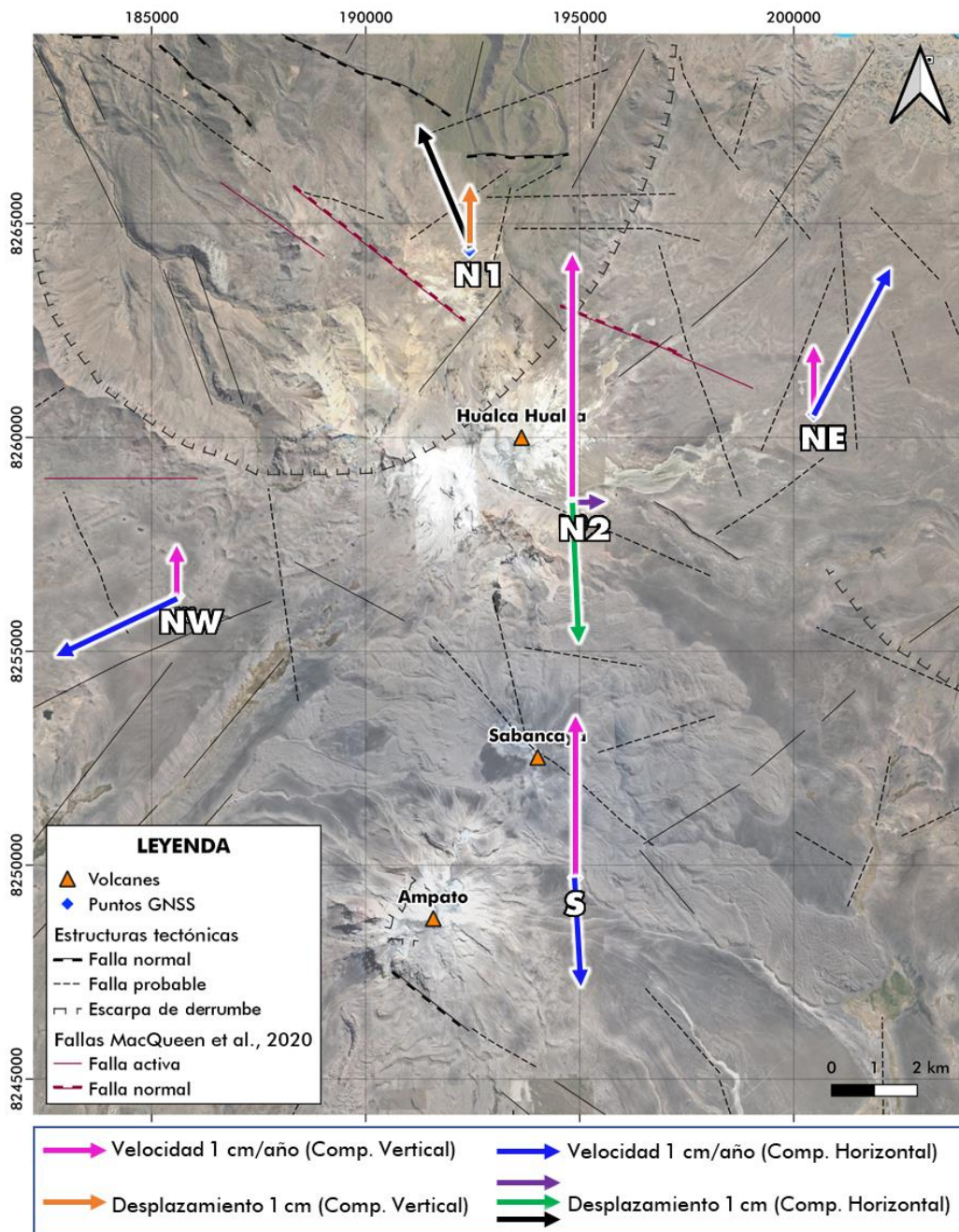


Figura 8.- Mapa de vectores de deformación de los puntos GNSS obtenidos en el entorno del volcán Sabancaya. Estructuras tectónicas obtenidas del cuadrángulo 32-s de Chivay.

- **Punto NE:** Entre diciembre de 2020 y noviembre de 2021 presentó una velocidad de deformación de 1.0 ± 0.8 cm/año en la componente vertical y en las componentes horizontales de 1.2 ± 0.5 cm/año en la dirección este, y de 2.3 ± 0.5 cm/año en la dirección norte (Figura 8).
- **Punto NW:** Entre diciembre de 2019 a noviembre de 2021 presentó una velocidad de deformación de 0.8 ± 0.4 cm/año en la componente vertical y en las componentes horizontales de -1.9 ± 0.3 cm/año en la dirección oeste y de -0.9 ± 0.3 cm/año en la dirección sur (Figura 8).
- **Punto S:** Entre diciembre de 2019 a abril de 2021 dicho punto de control presentó una velocidad de deformación de 2.5 ± 0.4 cm/año en la componente vertical y en las componentes horizontales de 0.1 ± 0.1 cm/año en la dirección este, y de -1.7 ± 0.1 cm/año en la dirección sur (Figura 8).

3.3.- Velocidades de deformación - DINSAR

Las velocidades de deformación máximas registradas en la zona del volcán Sabancaya, varían entre 3 y 5 cm/año, alcanzando los valores más altos en el sector norte de dicho volcán (cercano al volcán Hualca Hualca, Figuras 9 y 10). Debido a la adquisición del satélite de manera oblicua, la deformación se observa más cercana a la órbita en la cual fue adquirida, es decir que en órbita ascendente es observada en el sector noroeste del Sabancaya y en órbita descendente se observa al noreste de dicho volcán.

A continuación, se detallan las velocidades de deformación registradas en cada una de las fases descritas anteriormente.

- **Fase I** (octubre de 2014 - diciembre de 2015): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 9a) se construyó a partir de 12 imágenes de radar y 26 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de deformación de ~ 4.5 cm/año. Por otro

lado, el mapa en órbita descendente (Figura 9b), se generó a partir de 14 imágenes y 25 interferogramas, obteniendo como resultado velocidades máximas de ~ 4 cm/año.

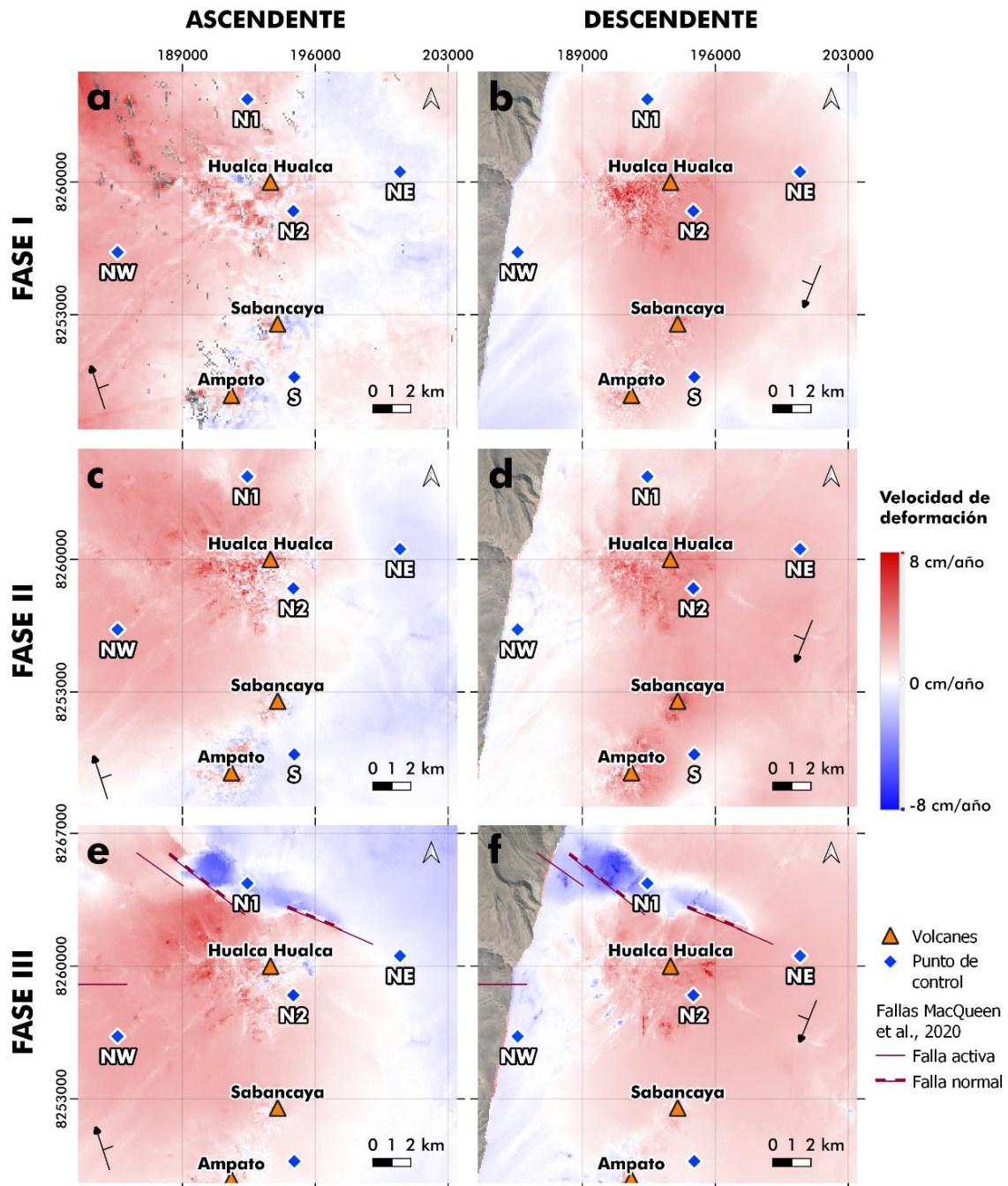


Figura 9.- Mapa de velocidades de deformación en el entorno del volcán Sabancaya, para cada fase de estudio obtenidas en órbita ascendente y descendente: fase 1 (a y b), fase 2 (c y d) y fase 3 (e y f).

- **Fase II** (diciembre de 2015 - noviembre de 2016): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 9c) se construyó a partir de 13 imágenes de radar y 23 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de deformación de ~ 3.5 cm/año. El mapa en órbita descendente (Figura 9d), se obtuvo a partir de 15 imágenes y 27 interferogramas, resultando velocidades máximas de ~ 4 cm/año.

- **Fase III** (noviembre de 2016 - enero de 2018): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 9e) se construyó a partir de 27 imágenes y 52 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de deformación de ~ 5 cm/año. Por otro lado, el mapa en órbita descendente (Figura 9f), se generó a partir de 33 imágenes de radar y 65 interferogramas, resultando un mapa de velocidades con valores máximos de ~ 4.5 cm/año. Asimismo, se observa el desplazamiento de fallas normales, las cuales se activaron en enero de 2017 (sismo principal de M5.0) y abril de 2017 (sismo principal de M5.2) descritas por MacQueen et al., 2020 (fallas de color granate en Figuras 9e y 9f, con dirección preferencial NO-SE). El hundimiento de los bloques noreste de las fallas, alcanzan velocidades máximas de aproximadamente 6 cm/año.

- **Fase IV** (enero de 2018 – diciembre de 2019): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 10a) se construyó con 56 imágenes y 107 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de deformación de ~ 4.5 cm/año. El mapa de velocidades en órbita descendente (Figura 10b), se obtuvo a partir de 57 imágenes y 111 interferogramas, resultando un mapa de velocidades con valores máximos de ~ 3.5 cm/año.

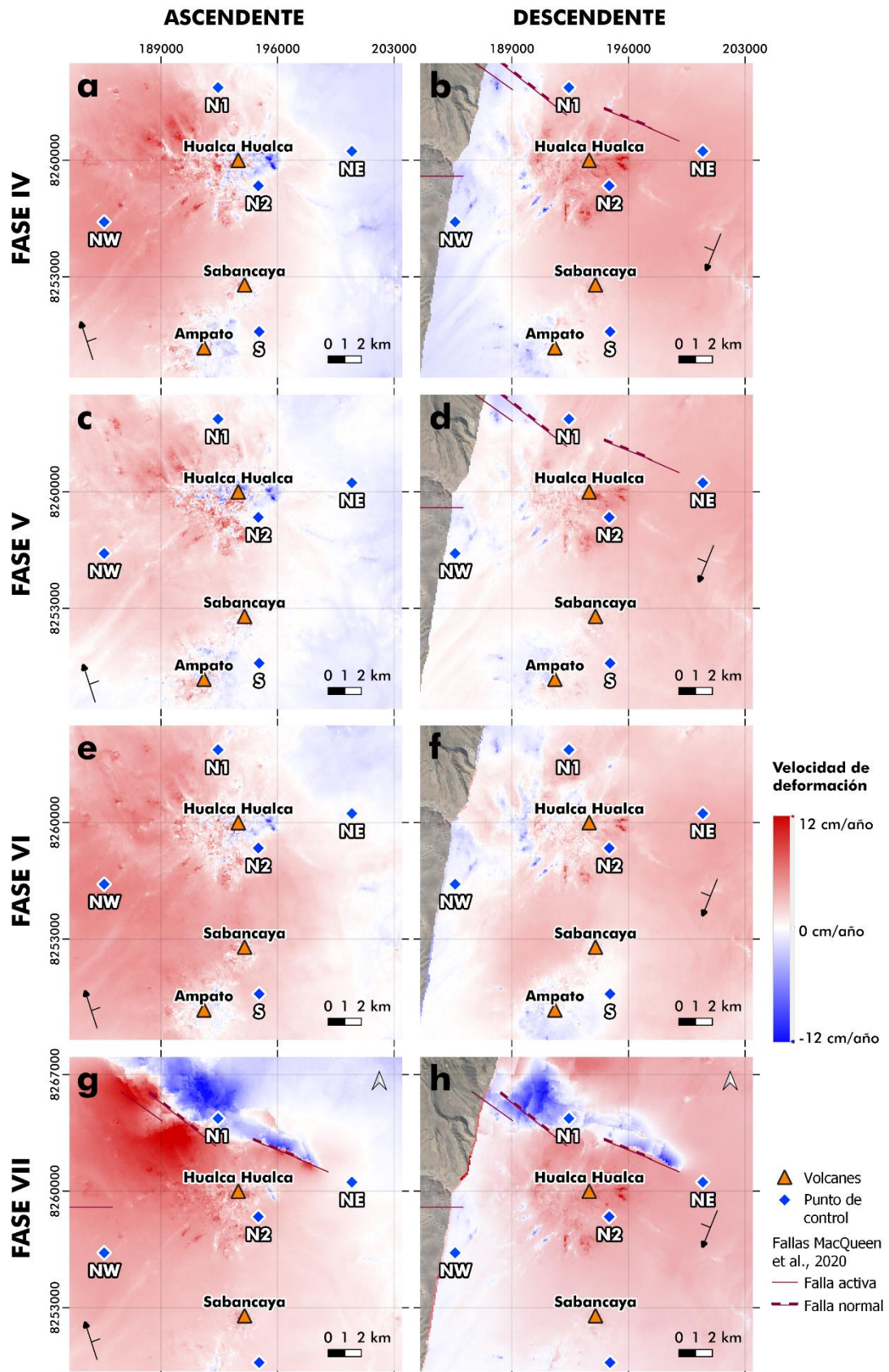


Figura 10.- Mapa de velocidades de deformación en el entorno del volcán Sabancaya, para cada fase de estudio en órbita ascendente y descendente: fase 4 (a y b), fase 5 (c y d), fase 6 (e y f) y fase 7 (g y h)

- **Fase V** (diciembre de 2019 – agosto de 2020): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 10c) se construyó con 19 imágenes de radar y 35 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de ~ 3 cm/año. Asimismo, el mapa de velocidades en órbita descendente (Figura 10d), se obtuvo a partir de 21 imágenes y 39 interferogramas, resultando velocidades máximas de ~ 3 cm/año.
- **Fase VI** (agosto de 2020 – febrero de 2021): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 10e) se construyó con 17 imágenes y 29 interferogramas, obteniendo velocidades máximas de ~ 5 cm/año. El mapa de velocidades en órbita descendente (Figura 10f), también se obtuvo a partir de 17 imágenes y 31 interferogramas, resultando un mapa de velocidades con valores máximos de ~ 4 cm/año.
- **Fase VII** (febrero de 2021 – diciembre de 2021): El mapa de velocidades en órbita ascendente (Figura 10g) se construyó con 23 imágenes de radar y 43 interferogramas, obteniendo velocidades positivas máximas de ~ 12 cm/año (la cual es principalmente debido al desplazamiento del bloque suroeste de la falla, solo observado en esta órbita). Asimismo, el mapa de velocidades en órbita descendente (Figura 10h), se obtuvo a partir de 25 imágenes y 47 interferogramas, resultando velocidades positivas máximas de 4 cm/año. En esta fase se observa la peculiaridad de velocidades superiores, posiblemente debido al desplazamiento de fallas que generaron una crisis sísmica que terminó con la ocurrencia de un sismo de magnitud M5.5 (Tavera et al., 2021). Asimismo, cabe mencionar que la velocidad de deformación negativa cuantificada en ~ 12 cm/año, observada en ambas órbitas del satélite (Figuras 10g y 10h, zona azul) es interpretada como un hundimiento de los bloques noreste de las fallas.

Adicionalmente, se realizó un análisis específico de la deformación generada por fallas ubicadas al norte del volcán Sabancaya (fase VII), para lo cual se elaboraron interferogramas con diferencia temporal de 24 días (imágenes del 18 de octubre de 2020 y 13 de octubre de 2021 en órbita ascendente; e imágenes del 17 de octubre de 2020 y 12 de octubre de 2021 en órbita descendente), que son presentados en la Figura 11.

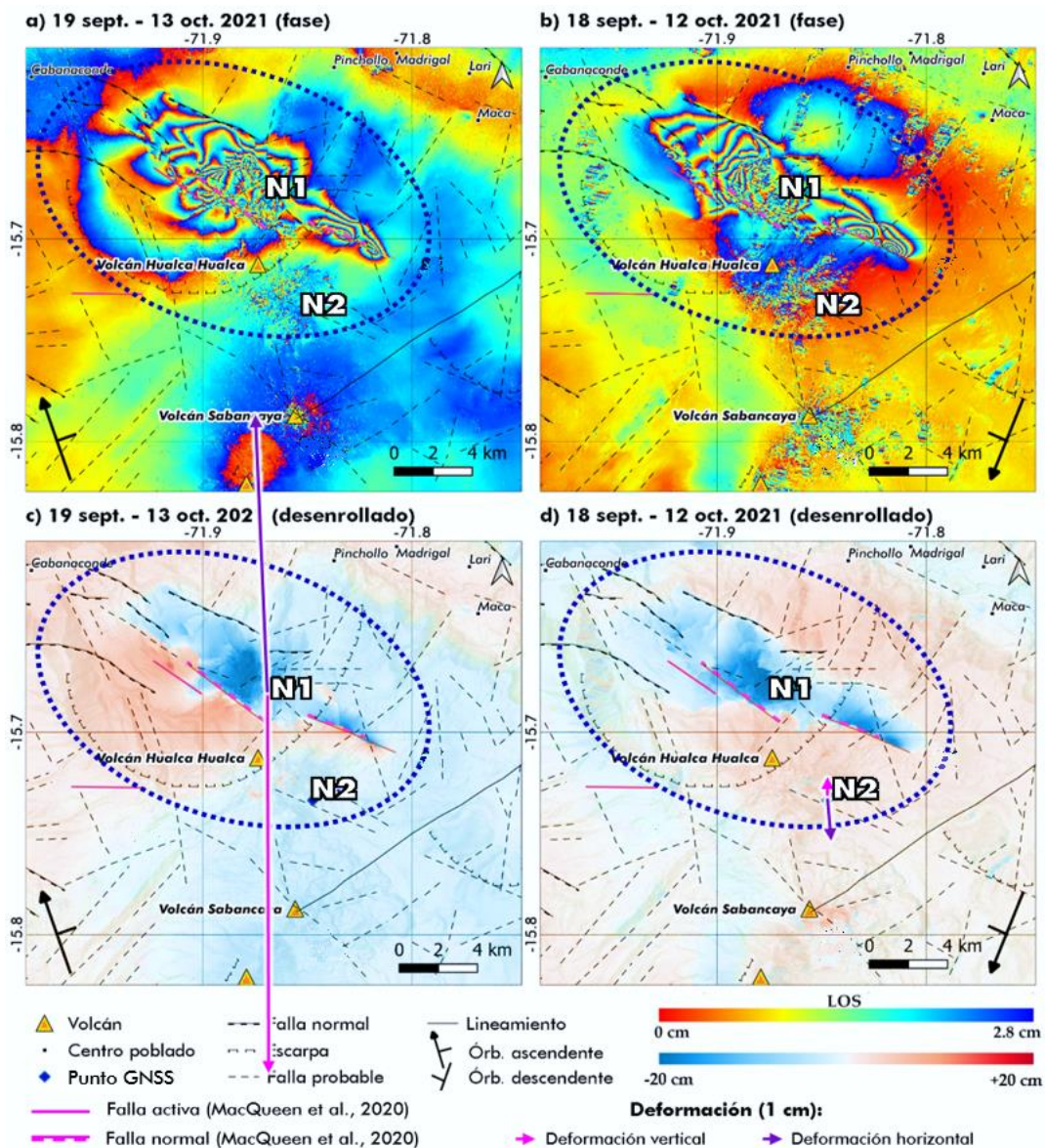


Figura 11.- a) Interferograma obtenidas a través de imágenes de radar en órbita ascendente de octubre de 2020 y octubre 2021, b) Interferograma con imágenes del mismo periodo en órbita descendente, c) y d) desenrollado de fase de interferogramas a y b respectivamente. Los vectores de color rosado y morado indican la deformación vertical y horizontal registrada en los puntos de control GNSS N1 y N2 en el mismo periodo de los interferogramas.

La zona de análisis (zona en elipse con líneas discontinuas azules en Figura 11) es cuantificada con valores de hasta 20 cm en la dirección de vista del satélite (LOS) en los bloques localizados al noreste de las fallas (hundimiento mostrado de color azul en Figuras 11c y 11d), lo cual es coherente con la deformación negativa en la componente vertical de aproximadamente 22 cm registrada entre abril y noviembre de 2021 en el punto GNSS N1 (vector rosado en Figura 11c) y una deformación hacia el nor-noroeste de ~ 15 cm (vector morado en Figura 11c). Esta deformación podría estar asociada al enjambre sísmico registrado al suroeste de la localidad de Pinchollo, que inició el 8 de octubre con un sismo principal de M5.5. Por otro lado, en los bloques ubicados al suroeste de las fallas, se trataría de desplazamientos horizontales (distinto color en la pasada ascendente y descendente del satélite), con valores máximos de ~ 5 cm en LOS. En el punto GNSS N2 (Puma et al., 2021), para el mismo periodo de los interferogramas (septiembre a octubre de 2021) se calculó una inflación de ~ 1.0 cm (vector rosado en figura 11d) y una deformación hacia el sureste de ~ 2.2 cm (vector morado en Figura 11d).

3.4.- Series de tiempo DInSAR

Para validar los resultados obtenidos con DInSAR, se realizó la proyección de los datos GNSS en el punto N2 en línea de vista del satélite (LOS), es decir, se realizó el cálculo de las tres direcciones (vertical, este y norte) como un solo vector (dirección de vista del suelo al satélite) comparado con la serie de tiempo DInSAR obtenida para el mismo punto N2 (Figura 2). Se observa buena correlación entre ambos datos con una consistente tendencia positiva (inflación).

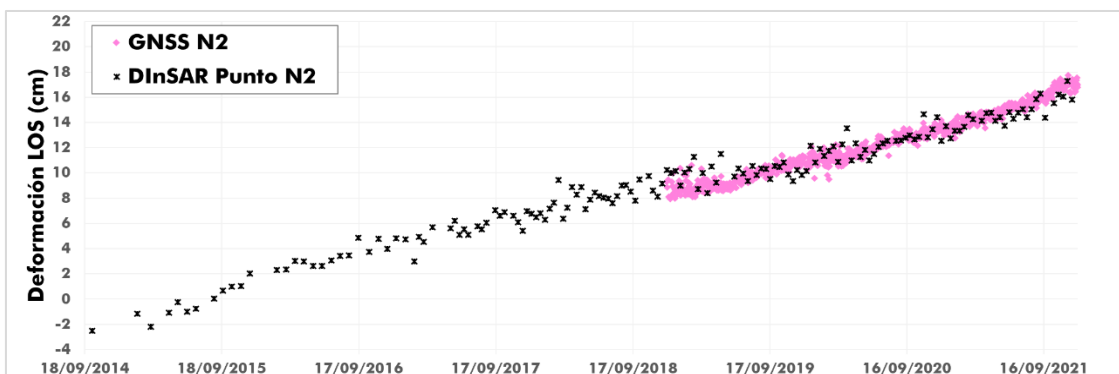


Figura 12.- Comparación de series de tiempo de deformación en la línea de vista del satélite (LOS) para datos GNSS (puntos rosados) y DInSAR (x negras) para el mismo punto N2 en órbita ascendente.

A continuación, se describen los resultados obtenidos en los cinco puntos DInSAR analizados:

- **Punto N1** (Figura 13a y 13b): Este punto ubicado por la zona de Pinchollo, muestra una deformación con tendencia positiva a lo largo de las siete fases de estudio. Resaltan dos saltos negativos (alejamiento en la línea de vista del satélite - LOS) en ambas órbitas del satélite durante las fases III y VII, posiblemente asociados a hundimiento por desplazamiento de fallas. Desde el inicio al final del periodo de estudio, se registró un desplazamiento en la línea de vista del satélite (LOS) de aproximadamente 8 cm en órbita ascendente y 5 cm en órbita descendente.
- **Punto N2** (Figura 13c y 13d): Ubicado en el volcán Hualca Hualca, presenta una deformación con tendencia positiva constante, registrando un desplazamiento en LOS de aproximadamente 20 cm en órbita ascendente y 23 cm en órbita descendente desde el inicio al final del periodo de análisis (setiembre 2014 – diciembre 2021).

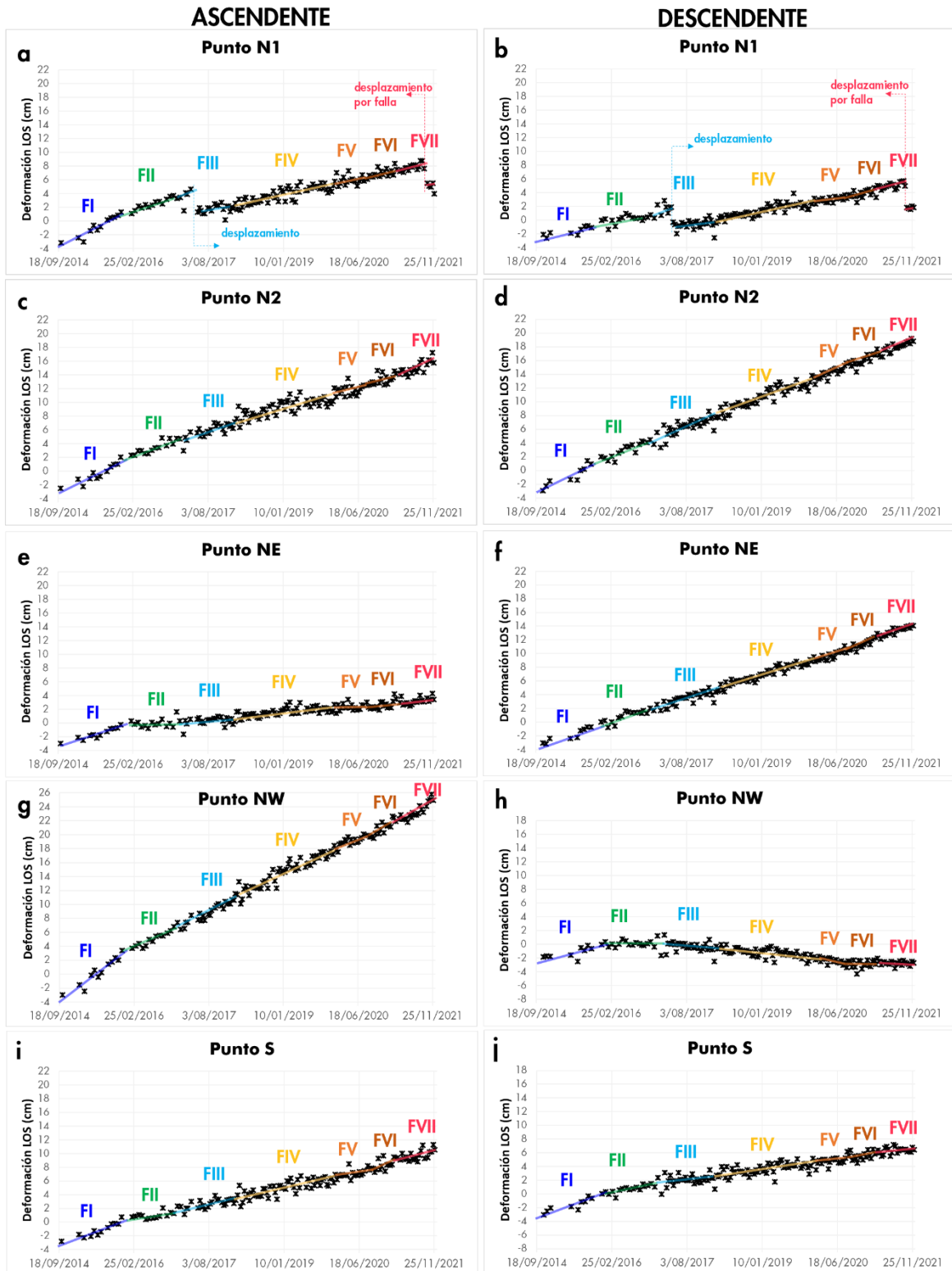


Figura 13.- Series de tiempo de la deformación en línea de vista del satélite (LOS) en órbita ascendente y descendente de los puntos de control GNSS: N1 (a y b), N2 (c y d), NE (e y f), NW (g y h) y S (i y j).

- **Punto NE** (Figura 13e y 13f): Este punto de control ubicado al noreste del volcán Sabancaya, también muestra una deformación con tendencia positiva. Desde el inicio al final del periodo de estudio (setiembre 2014 – diciembre 2021), se registró un desplazamiento en la línea de vista del satélite (LOS) de aproximadamente 7 cm en órbita ascendente y 18 cm en órbita descendente. Es claro que el mayor desplazamiento en órbita descendente se debe a que en esta órbita, el satélite capta las imágenes desde el este, y por la oblicuidad, los valores máximos de deformación se ubican en este sector (Figuras 9 y 10, descendente).
- **Punto NW** (Figura 13g y 13h): Ubicado en el sector noroeste del Sabancaya, presenta una tendencia de deformación positiva constante en órbita ascendente, registrando el mayor desplazamiento en LOS de aproximadamente 30 cm. Por otro lado, se registró un desplazamiento mínimo en órbita descendente de unos -0.5 cm desde el inicio al final del periodo de estudio. Este punto muestra valores máximos en órbita ascendente, también debido a la oblicuidad de adquisición de datos del satélite desde el sector oeste (Figuras 9 y 10, ascendente).
- **Punto S** (Figura 13i y 13j): Este punto de control ubicado en el flanco sureste del volcán Sabancaya, también muestra una tendencia de deformación positiva. Desde el inicio al final del periodo de estudio, se registró un desplazamiento en la línea de vista del satélite (LOS) de aproximadamente 14 cm en la órbita ascendente y 10 cm en órbita descendente.

3.5.- Modelamiento de la fuente de deformación

Se ha realizado el modelamiento para las siete fases del periodo de estudio con el software DMODELS (Battaglia et al., 2013) utilizando el módulo de ambas órbitas integradas (ascendente y descendente).

Para el modelamiento de las fuentes generadoras de la deformación positiva que se observan en ambas órbitas del satélite (inflación) en inmediaciones del volcán Sabancaya se consideraron una esfera y un esferoide, basados en los modelos de McTigue (1987) y Yang et al., (1988), respectivamente. Con ambas fuentes asumidas, la ubicación proyectada hacia la superficie se aproxima bien hacia los alrededores del volcán Hualca Hualca (norte del volcán Sabancaya, Figura 14c). El mejor ajuste ha sido obtenido considerando como fuente una esfera, lo cual se ve reflejado en el residual de los datos originales y el modelo (Figura 14a, zona blanca), así como en la proximidad de la ubicación de la fuente en las siete fases de análisis (Figura 14c, círculos granates). Por otro lado, se obtuvo un mayor error modelando como fuente un esferoide, siendo evidente que el residual no representa un buen ajuste (Figura 14b, zona azul), así como la dispersión de la ubicación de la fuente en cada fase (Figura 14c, óvalos morados). Las profundidades obtenidas con el modelamiento varían entre 8 a 13 km bajo el nivel del mar - b. n. m. (entre 13 a 18 km bajo la superficie), radio variable entre 0.6 a 1.5 km. Las tasas de cambio de volumen varían entre $15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ y $63 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

Asimismo, se realizó el modelamiento matemático del desplazamiento de fallas basados en el modelo de Okada (Okada,1985 & 1992) para las fases III (Figura 15) y VII del periodo de estudio. El modelo obtenido se ajusta mejor a la actividad de fallas normales, sin embargo, el mecanismo parece ser más complejo, o quizá corresponda a la suma de varias rupturas, ya que el residual demuestra que el modelo no reproduce óptimamente la falla. Las profundidades obtenidas sugieren que una ruptura de esta magnitud es producida por fallas ubicadas a menos de 4 km debajo de la superficie. La profundidad calculada con DInSAR es comúnmente más superficial que la del catálogo sísmico, debido a que la ruptura de la corteza terrestre que genera terremotos tiende a propagarse hacia arriba en la capa sismogénica (Weston et al., 2011).

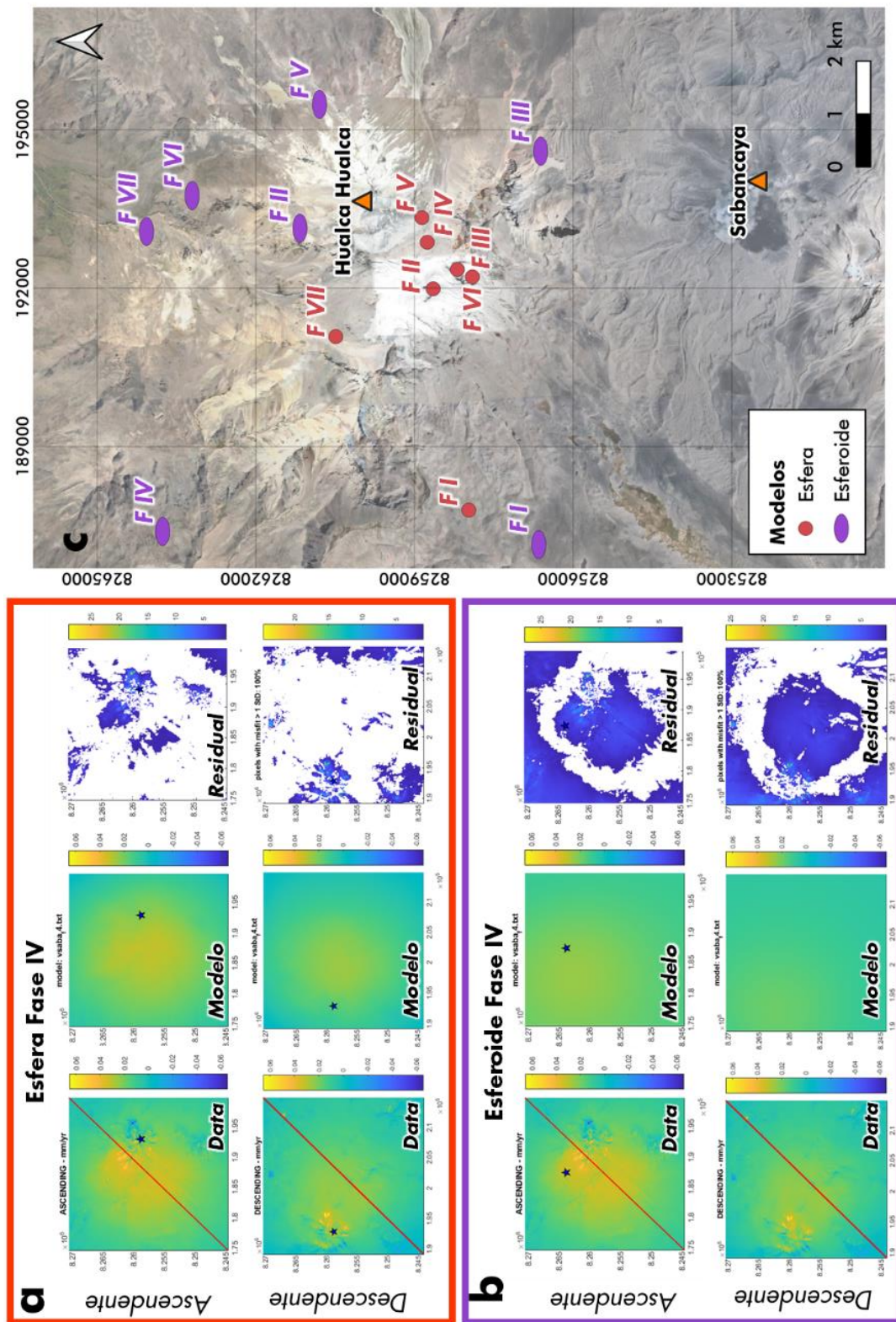


Figura 14.- Modelamiento matemático de la deformación detectada en inmediaciones del volcán Sabancaya: a) fuente esfera - fase IV, b) fuente esferoide - fase IV, c) ubicación de fuente para cada fase de estudio y d) fuente falla normal – fase III

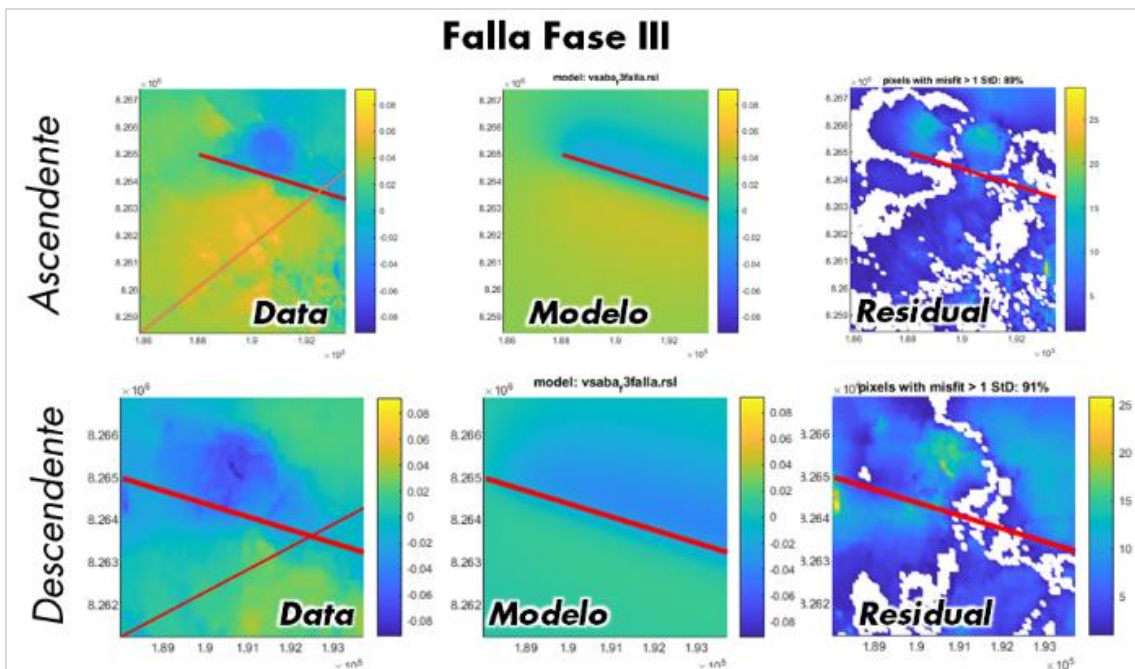


Figura 15.- Modelamiento matemático de la deformación detectada en inmediaciones del volcán Sabancaya (fase III) considerando como fuente una falla normal

4.- DISCUSIÓN

El análisis de la evolución del proceso eruptivo de un volcán es más completo si se consideran diversas técnicas de monitoreo volcánico. En este estudio se ha realizado el análisis de la deformación detectada en inmediaciones del volcán Sabancaya del periodo septiembre de 2014 a diciembre de 2021, en la cual además se han distinguido siete fases de actividad, considerando principalmente el incremento o disminución del número de eventos sismo-volcánicos, así como las variaciones en la velocidad de deformación obtenida con las técnicas GNSS e DINSAR. Adicionalmente, se ha incluido información de anomalías térmicas detectadas en la cima del Sabancaya con datos de MIROVA (Middle InfraRed Observation of Volcanic Activity) que es un sistema de detección automático de puntos calientes en volcanes basado en el análisis de datos del espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada - MODIS (Coppola et al., 2016, datos hasta 2021 cortesía de Diego Coppola).

Cabe señalar que durante los años 1999 a 2012, cuando el volcán Sabancaya no se encontraba en actividad eruptiva, se detectó un número mínimo de sismos en el entorno de dicho volcán (Catálogo sísmico IGP, <https://ultimosismo.igp.gob.pe/descargar-datos-sismicos>), esto es considerando los sismos de magnitud mayor a M4.5 (Figura 15a) y una profundidad menor a 30 km (Figura 15b). Posteriormente, a partir del mes de enero del año 2013 la sismicidad se incrementa considerablemente.

4.1.- Fases y características de la deformación

La correlación de datos de sismicidad, deformación y anomalías térmicas detectadas en el volcán Sabancaya entre enero de 2015 y diciembre de 2021 es presentada en la Figura 16. La evolución espacio-temporal de la ubicación aproximada de la fuente generadora de la deformación y la localización de la sismicidad (principalmente tectónica,

filtradas por error menor a 1.5 km) para cada fase estudiada es mostrada en perfiles S-N en la Figura 17, incluyendo un esquema de la cámara magmática somera del volcán Sabancaya, fuente hipotética delimitada a partir de anomalías obtenidas a partir de velocidades de ondas P y S - V_p/V_s (Machacca et al., 2020).

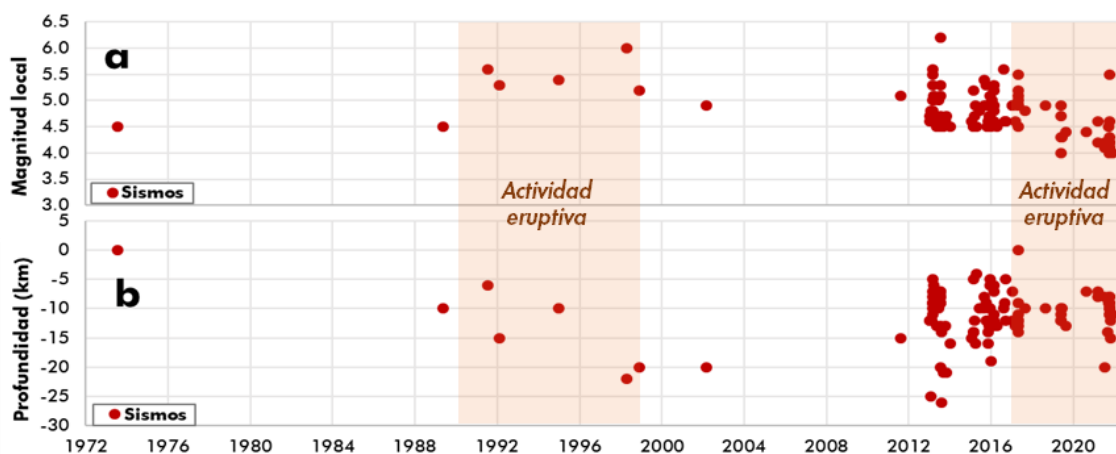


Figura 15.- Sismicidad detectada en el entorno del volcán Sabancaya durante los años 1972 a 2021: a) magnitud local y b) profundidad (Fuente: Catálogo sísmico del IGP).

Para la interpretación de las tasas de deformación, se ha utilizado principalmente como referencia el punto de control GNSS N2 (Figura 16f), debido a que se ubica al NO del volcán Sabancaya, aproximadamente sobre la fuente de deformación profunda resultante de los modelamientos.

Previo al proceso eruptivo, durante la **fase I** (octubre de 2014 - diciembre de 2015) se registró la ocurrencia de sismos de tipo volcano-tectónicos VT (Figura 16b) y Largo Periodo LP (Figura 16c), así como la mayor velocidad de deformación registrada en comparación de las fases posteriores, con 4.1 cm/año en el punto N2 (Figuras 16e y 16f). El modelamiento de la fuente de deformación la ubica aproximadamente a 10 km b. n. m., con un radio de 0.9 km y la sismicidad se localiza por encima de los 4 km b. n. m. (Figura 17a).

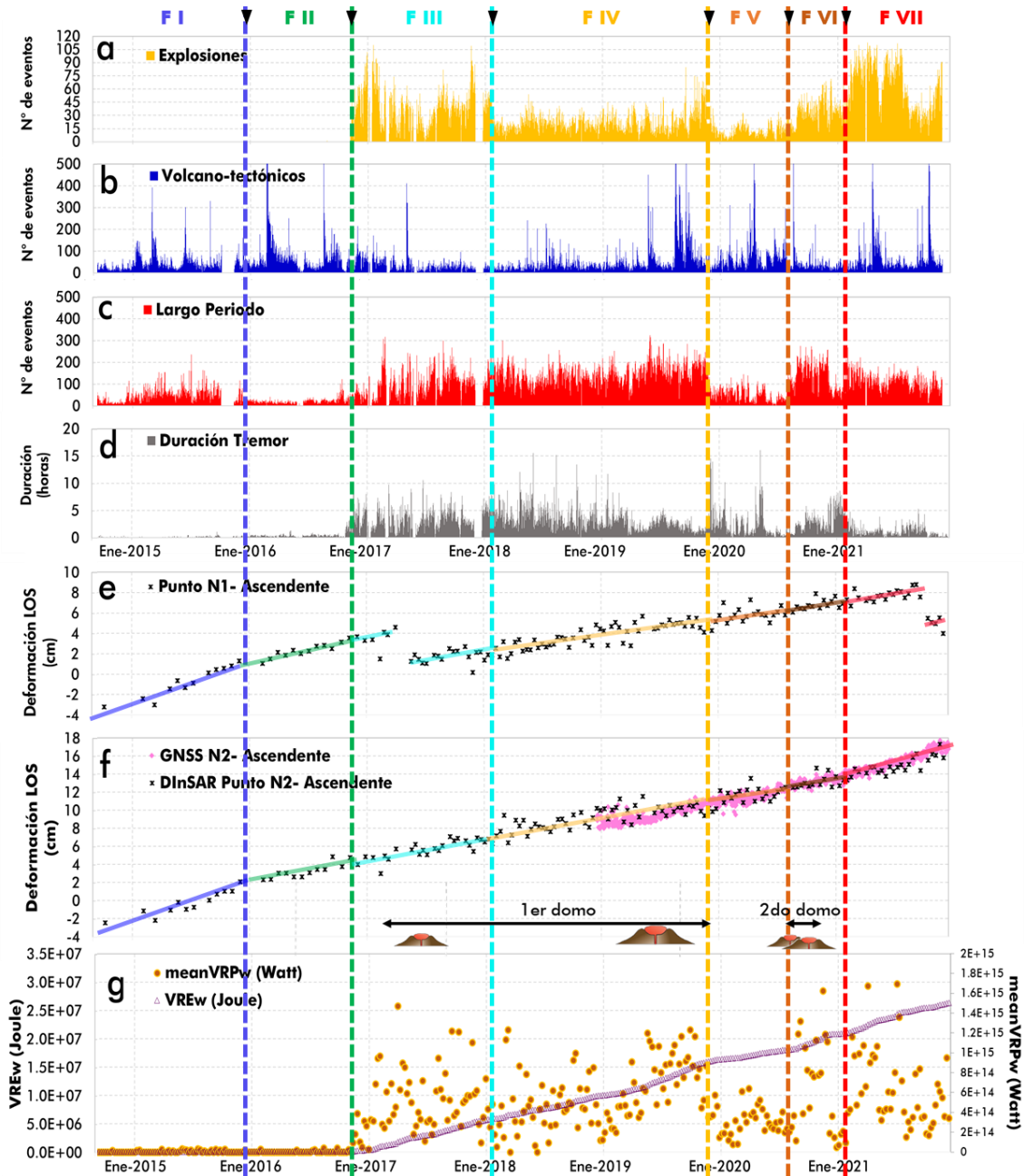


Figura 16.- Correlación entre la sismicidad, deformación y anomalías térmicas registradas en el volcán Sabancaya durante el periodo 2014-2021: a) Explosiones, b) sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT), c) sismos de tipo Largo-Periodo, d) duración de tremor, e) deformación registrada en el punto de control DInSAR N1 en órbita ascendente, f) deformación registrada en el punto GNSS y DInSAR N2 en órbita ascendente y g) anomalías térmicas registradas por el sistema MIROVA (VREw en eje izquierdo y VRPw en eje derecho).

Durante la **fase II** (noviembre de 2016 - enero de 2018) se registró la ocurrencia de sismos de tipo VT (Figura 16b) y una disminución notable de los sismos de tipo LP (Figura 16c), la deformación positiva continúa con menor velocidad (1.6 cm/año) en el punto N2 (Figuras 16e y 16f). La ubicación de la fuente de deformación profunda a partir del modelamiento es a ~8 km b. n. m., con un radio de 0.6 km y la sismicidad se localiza por encima de los 6 km b. n. m. (Figura 17b).

En la **fase III** (enero de 2018 - diciembre de 2019) se detectó la ocurrencia de explosiones y tremores (Figura 16a y 16d), disminuyendo el número de sismos de tipo VT (Figura 16b), pero incrementa el número de sismos de tipo LP (Figura 16c) ligado al ascenso de fluidos volcánicos. La deformación positiva continúa con mayor velocidad que la fase anterior con 2.2 cm/año en el punto N2 (Figura 16f), sin embargo, es notorio el desplazamiento negativo en el punto N1 (Figura 16e), posiblemente asociado con el movimiento de fallas. Asimismo, durante dicha fase se registraron anomalías térmicas con valores máximos de la Potencia Radiativa Volcánica – VRP de 0.5 a 25.7 MW (Figura 16g). La ubicación de la fuente de deformación según el modelamiento está a ~8 km b. n. m., la cual tiene un radio de 1 km y la sismicidad se ubica principalmente por encima de los 4 km b. n. m. (Figura 17c).

En la **fase IV** (diciembre de 2019 - agosto de 2020) se distingue una ligera disminución en el número de explosiones respecto a la fase anterior (Figura 16a). Así mismo se detecta una disminución en el número de sismos de tipo VT (Figura 16b), pero incrementa el número de sismos de tipo LP (Figura 16c). Por su parte, la deformación positiva continúa con menor velocidad que la fase anterior con 1.6 cm/año en el punto de control GNSS N2 (Figura 16f). La presencia de anomalías térmicas con valores de VRP de 0 a 22.2 MW son constantes (Figura 16g). La ubicación de la fuente de deformación a partir del modelamiento está a ~12 km b. n. m., con un radio de 0.7 km y la sismicidad se localiza hasta los 14 km b. n. m. (Figura 17d).

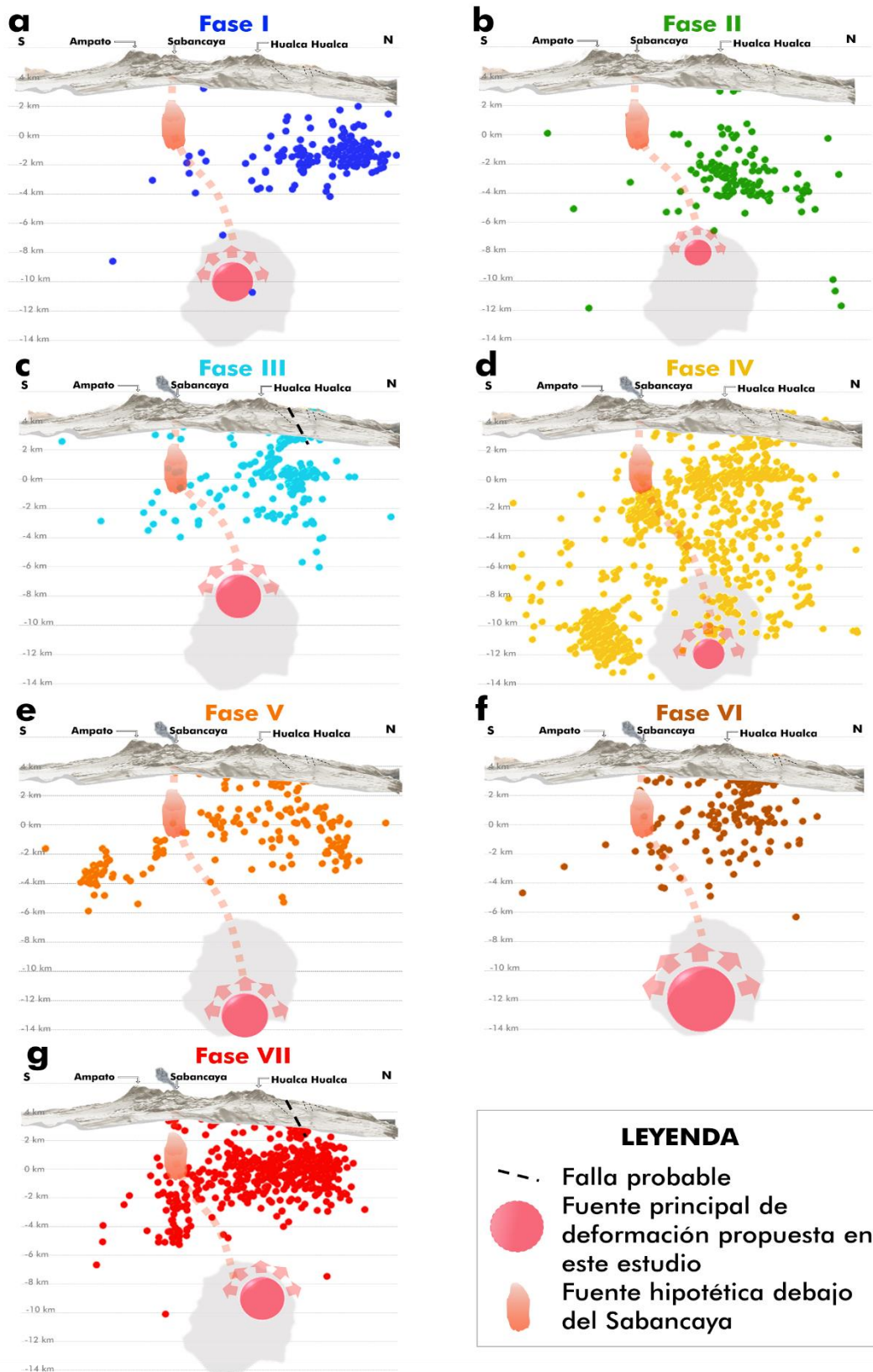


Figura 17.- Ubicación de las probables fuentes de deformación calculadas mediante modelamiento de datos DInSAR, comparadas con la sismicidad para las fases: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V, f) VI y g) VII. La ubicación de la fuente hipotética se plantea según el estudio de Machacca et al., 2020.

Durante la **fase V** (diciembre de 2019 - agosto de 2020) se registra un descenso en el número de explosiones respecto a las demás fases estudiadas (Figura 16a), así como una considerable disminución en el número de sismos de tipo VT y LP (Figuras 16b y 16c). Asimismo, se registró una menor velocidad de deformación positiva con 1.0 cm/año en el punto N2 (Figura 16f) y anomalías térmicas con valores bajos de VRP (1.4 a 11.2 MW) (Figura 16g). La ubicación de la fuente de deformación según el modelamiento está a ~13 km b. n. m. (la más profunda de las 7 fases), con un radio de 1 km y la sismicidad se ubica principalmente por encima de los 4 km b. n. m. (Figura 17c).

La **fase VI** (agosto de 2020 - febrero de 2021) tiene ciertas similitudes con la fase IV: ambas fases registran un número similar de explosiones moderadas (Figura 16a), pero un máximo número de sismos de tipo LP (Figura 16c). Además, registran similar velocidad de deformación de 1.7 cm/año (Figura 16f) y anomalías térmicas con valores bajos y altos de VRP acumulado (Figura 16g). La fuente de deformación según el modelamiento se ubica a unos 12 km b. n. m., con un radio de 1.5 km (el más profundo de las 7 fases) y la sismicidad se localiza por encima de los 4 km b. n. m. (Figura 17f). Además, durante ambas fases, se registró el crecimiento y destrucción de domos de lava desarrollado en el sector norte de la superficie del cráter del volcán (Cruz et al., 2019; Puma et al., 2020).

En la **fase VII** (febrero de 2021 - diciembre de 2021) el comportamiento es similar al observado durante la fase III: ambas fases registran el mayor número de explosiones (Figura 16a), así como un número moderado de sismos de tipo LP (Figura 16c). Además, se registra un desplazamiento en superficie debido al movimiento de fallas activas de mecanismo normal (Figura 16e). También se distingue una similar velocidad de deformación de 2.7 cm/año (Figura 16f) y anomalías térmicas con similares de valores de VRP acumulado (Figura 16g). La fuente de deformación según el modelamiento se ubica a unos 9 km b. n. m., con un

radio de 1.0 km y la sismicidad se localiza por encima de los 6 km b. n. m. (Figura 17g).

4.2.- Procesos de deformación debidos al ascenso de magma

Las características de las fases determinadas en este estudio sugieren que inicialmente la presión del magma en ascenso a la superficie fue mayor, por ello el registro de mayor velocidad de deformación durante la fase I (4.1 cm/año en punto de control N2). Las tasas de velocidades de deformación mayores a 2 cm/año (en punto N2) ocurren durante las fases III y VII, periodos durante los cuales se detectaron un incremento significativo en el número de explosiones y moderado número de sismos ligados al movimiento de fluidos (sismos LP). Esto podría explicarse porque hay mayor presión en el sistema magmático que genera una liberación de la energía acumulada, lo cual también se relaciona con la sismicidad ligada a la actividad de las fallas detectadas al norte del Sabancaya, que generan deformación en superficie. Cabe mencionar que la fuente generadora de la deformación positiva para las fases III y VII se ubicaría entre 8 y 9 km b. n. m., siendo más superficial que las otras fases de estudio.

Lo opuesto ocurre cuando se detecta un menor número de explosiones y sismos de tipo LP (fase V), en ese contexto el sistema se relaja porque hay menor presión ligado al ascenso del magma, lo cual repercute en una menor tasa de inflación (1 cm/año en punto N2), por consiguiente, las anomalías térmicas son mínimas y se registra menor número de sismos ligados a la actividad de fallas.

Si bien la sismicidad detectada en áreas aledañas al volcán Sabancaya es de origen tectónico, a través del modelamiento se observan ciertos cambios de volumen de la fuente magmática o cámara magmática más profunda, la cual genera la deformación positiva (inflación) al norte del Sabancaya detectadas con técnicas GNSS y DInSAR. Si la fuente es más

superficial y de mayor tamaño, desde luego ligada a un mayor aporte de magma, este en su ascenso a la superficie encuentra zonas plásticas con debilidad (fallas), siendo la transferencia de tensión estática desde la fuente de inflación la suficientemente importante para promover los sismos de magnitud mayor a M5.0 (MacQueen et al., 2020) que generaron deformación en superficie asociado al desplazamiento de fallas normales. Incluso es evidente en el punto de control N1 (Figura 16e) que la inflación es constante, a pesar del hundimiento observado durante las fases III y VII por el desplazamiento de fallas.

Se estima que mientras continúe registrándose una deformación (inflación) en el entorno del volcán Sabancaya, continuará el ascenso del magma a la superficie que da lugar al actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya. En un tiempo no determinado, si la fuente profunda debajo del Hualca Hualca no recibiera más aporte de magma, no se registrará más deformación superficial en la zona, este sería un indicador de que el proceso eruptivo del volcán Sabancaya estaría llegando a su fin, que no es el caso a la fecha.

Para caracterizar de manera más precisa, la geometría y estado de la fuente profunda, se requiere datos de otro tipo de técnicas geofísicas, como por ejemplo el método magnetotelúrico (MT) y/o método gravimétrico con una densa red de observaciones (Vajda, 2016; Mohamed et al., 2022).

CONCLUSIONES

- En el sector norte del volcán Sabancaya (cerca al volcán Hualca Hualca) en el periodo de septiembre de 2014 a diciembre de 2021 se observa una zona de deformación positiva (inflación) registrada con técnicas GNSS y DInSAR, con velocidades de deformación máximas que varían entre 3 y 5 cm/año.
- Según las variaciones de incremento o disminución de eventos sísmicos y el número de explosiones se ha dividido el periodo de análisis (desde septiembre de 2014 a diciembre de 2021) en siete fases. Si bien los cambios en las tasas de deformación son sutiles, coinciden con variaciones detectadas a nivel superficial en el entorno del volcán Sabancaya.
- Durante la fase I se registró la mayor tasa de velocidad de deformación (4.1 cm/año en el punto N2), asociada probablemente a una importante fuente magmática que ejerció una presión necesaria para que el magma ascendiera a la superficie, previo al inicio del proceso eruptivo. Durante las fases III y VII se registraron tasas de deformación mayores a 2 cm/año (en el punto N2), fecha en la que se detecta un incremento significativo del número de explosiones y moderado número de sismos LP ligados al movimiento de fluidos. Esto se asociaría a una mayor presión del magma (a profundidades entre 8 y 9 km b. n. m.) desencadenando una liberación de la energía acumulada, lo cual también se relaciona con la sismicidad de las fallas del norte del Sabancaya, que generan deformación en superficie debido a la transferencia de tensión estática desde la fuente de inflación.
- En la fase V se registró la menor tasa de deformación (inflación) del periodo de análisis (1 cm/año en punto N2), con un menor registro de explosiones y sismos de tipo LP. Asimismo, durante las fases IV y VI, se registró tasas de deformación de 1.6 cm/año (en punto N2) y

explosiones moderadas. Esto se traduce como la relajación del sistema magmático debido a menor presión (a profundidades entre 12 y 13 km b. n. m.), por consiguiente, las anomalías térmicas son mínimas.

- Mientras continúe registrándose una deformación (inflación) en el entorno del volcán Sabancaya, continuará el ascenso del magma a la superficie generando erupciones explosivas.

BIBLIOGRAFÍA

- Battaglia, M. & Cervelli, P. & Murray, J. (2013). DMODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 254. 1–4. 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.018.
- Battaglia, M.& Floyd, M. (2019) *Volcano Monitoring using the Global Navigational Satellite System: a training manual on GNSS data processing using GAMIT/GLOBK 10.70 and data from the January 2006 Augustine Volcano precursory unrest and eruption*. Servicio Geológico de los Estados Unidos. Libro en preparación.
- Boixart, G.; Cruz, L.F.; Miranda Cruz, R.; Euillades, P.A.; Euillades, L.D.; Battaglia, M. (2020) *Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation*. *Remote Sens.*, 12, 1852.
- Coppola D, Laiolo M, Cigolini C, Donne DD, Ripepe M (2016) *Enhanced volcanic hot-spot detection using Modis IR data results from the Mirova system*. Geological Society, London, Special Publications 426:181–205. <https://doi.org/10.1144/sp426.5>
- Cruz, J.; Vargas, K., Rivera, M. (2019). *Identificación de cambios morfológicos en el cráter del volcán Sabancaya mediante sobrevuelo de drones*. Instituto Geofísico del Perú.
- Cruz, L. (2019) *Adquisición y procesamiento de datos geodésicos satelitales GNSS para determinar la deformación cortical asociada a peligros geológicos*. Informe técnico N° A6996, INGEMMET.
- 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.

- Delgado, R. (2012). Estudio Geológico Petrográfico y Geoquímico del Complejo Volcánico Ampato – Sabancaya. Universidad Nacional de San Agustín, Tesis Ingeniero, 146 p.
- González 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.
- Herring, T., King, R., Floyd, M. & McClusky, S. (2018). Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
- Huamán, D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 138 p.
- Huamán, D.; Chorowicz, J.; Deffontaines, B.; Guillande, R. & Rudant, J.P. (1993). Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale : la région du Colca (Andes du Sud Pérou). Bulletin Société Géologique de France, 164(6): 807-818.
- Johnston, G., Riddell, A., Hausler, G. (2017). The International GNSS Service. Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1
- Machacca et al., (2020). Estudio de la estructura interna del volcán Sabancaya a partir de 8 años de información sísmica. Artículo elaborado para el reporte técnico especial "Investigación y monitoreo de volcanes en el sur del Perú en 2020".

- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte, I., Miranda, R. (2020) Volcano-Tectonic Interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, Magmatic Inflation, Moderate Earthquakes, and Fault Creep. *JGR- Solid Earth*.
- 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
- Mering, C., Huamán, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B. & Guillande, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259 (1-3): 153-169.
- Mohamed, A., Al Deep, M., Abdelrahman, K., Abdelrady, A. (2022). Geometry of the Magma Chamber and Curie Point Depth Beneath Hawaii Island: Inferences from Magnetic and Gravity Data. *Frontiers in Earth Science*. 10. 847984. 10.3389/feart.2022.847984.
- 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.
- 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.
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82, 1018–1040.
- 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.

- Puma, N., Rivera, M., Tavera, H., Centeno, R., Machacca, R., Vargas, K., Lazarte, I., Velarde, L. & Del Carpio, J. (2020). Evaluación geofísica del comportamiento dinámico del volcán Sabancaya (febrero-noviembre de 2020). Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú, 40 p.
- Puma, N., Centeno, R., Vargas, K., Lazarte, I., Torres, J., Rivera, M., Del Carpio, J. (2021). Evaluación de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya a partir de datos geofísicos y observaciones de campo (Abril – noviembre, 2021). Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú, 40 p.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R. & Manrique, N. (2016). Geología y Evaluación de Peligros del Complejo Volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa). INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 61, 122 p.
- Rosen, P. A., Gurrola, E., Sacco, G.F., Zebker, H. (2012). The InSAR Scientific Computing Environment. Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 730-733. (<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6217174>)
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. (2016) - The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 323, p. 110-128
- Sébrier, M.; Mercier, J.; Mégard, F.; Laubacher, G.; Carey- Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics*, 7, 895-928.
- Tavera, H., Centeno, E., (2021). Sismo de Cabanaconde – Pinchollo del 8 de octubre, 2021 (m5.5) (Región Arequipa). Informe Técnico N°026-2021/IGP Ciencias de la Tierra Sólida.
- Vajda, P. (2016). Recent developments and trends in Volcano Gravimetry (chapter): 81–103, doi 10.5772/63420, Open Access Book: NÉMETH Károly (ed.), Updates in Volcanology – From Volcano Modelling to

Volcano Geology, INTECH, eISBN 978-953-51-2623-2, ISBN 978-953-51-2622-5.

Vargas, K., Cruz, J. & Villegas, J. (2020) Informe Técnico: Monitoreo de la deformación volcánica con GNSS en los volcanes activos del Perú. IGP/CENVUL-UBI/IV 2020-0002. Instituto Geofísico del Perú.

Weston, J., A. M. G. Ferreira, and G. J. Funning (2011), Global compilation of interferometric synthetic aperture radar earthquake source models: 1. Comparisons with seismic catalogs, *J. Geophys. Res.*, 116, B08408, doi:10.1029/2010JB008131.

Yang, X.-M., Davis, P.M., Dieterich, J.H., 1988. Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing. *Journal of Geophysical Research* 93, 4249–4257.

