



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



**ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN EL ENTORNO DE LOS VOLCANES
SARA SARA Y CERRO AUQUIHUATO A PARTIR DE SERIES DE TIEMPO DInSAR
(Periodo 2014 - 2023)**

Informe Técnico N°040-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú
Noviembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Análisis de la deformación en el entorno de los volcanes Sara Sara y Cerro Auqui huato a partir de series de tiempo DInSAR (periodo 2014 - 2023)

Autores

Katherine Vargas Alva
Juan Villegas Lanza
Erick Soto Castellones

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

**ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN EL ENTORNO DE LOS
VOLCANES SARA SARA Y CERRO AUQUIHUATO A PARTIR DE
SERIES DE TIEMPO DINSAR
(PERIODO 2014-2023)**

(Región Ayacucho)

Arequipa – Perú
Noviembre, 2024

RESUMEN

Se analiza la deformación que ocurre en los alrededores de los volcanes Sara Sara y Cerro Auqui huato, utilizando la técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) para el periodo 2014 a 2023. En el caso del volcán Sara Sara, en su flanco oeste y sobre el cono volcánico, se ha observado el levantamiento de la superficie que supera los 8 cm, posiblemente asociado a la acumulación de hielo y nieve. En el flanco noroeste, se han registrado desplazamientos opuestos, con un acercamiento de 15 cm en órbita ascendente y un alejamiento de 30 cm en órbita descendente, probablemente vinculados al desplazamiento lateral del flanco oeste del volcán Sara Sara, como resultado de la dinámica superficial, en especial, el movimiento de rocas originado por el derretimiento de la nieve en las laderas del flanco oeste del volcán. La ausencia de variaciones significativas en la sismicidad, respalda la hipótesis de que las deformaciones registradas no tienen origen en la dinámica interna del volcán.

En el volcán Cerro Auqui huato, se han identificado cuatro zonas de deformación. 1) En el punto AUSE (sector sureste) se registró un alejamiento de 17 cm en órbita ascendente y un acercamiento de 7 cm en órbita descendente, indicando un desplazamiento lateral hacia el este, en dirección al río Huaccmi Mayoc. 2) En el punto AUSO (sector noroeste), se observó un alejamiento en ambas órbitas, con un máximo de 17 cm en órbita descendente, sugiriendo un posible hundimiento en esa área. 3) El punto AU MORALES (7 km al sureste del volcán) presenta la mayor deformación, superando los 30 cm, con acercamiento en órbita ascendente y alejamiento en descendente, interpretado como un desplazamiento lateral hacia el oeste, en dirección al río Huaccmi Mayoc. Inspecciones en campo han revelado grietas de 5 cm de ancho en esta zona, evidenciando su inestabilidad. 4) En el punto POMACOCKA (a 18 km al suroeste del volcán), se observa un alejamiento de 6 cm en órbita ascendente y un acercamiento de 17 cm en órbita descendente, indicando un desplazamiento lateral hacia el este, en dirección a la quebrada Alfahuaycco.

Los resultados obtenidos, han permitido identificar áreas de deformación que estarían asociados a procesos superficiales y no a la actividad volcánica, lo cual coincide con la información recopilada a través de la técnica GNSS, el análisis de la sismicidad, y la inclinometría que se encuentran dentro de los parámetros normales.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Contexto geológico-estructural

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

- 2.1.- DInSAR
- 2.2.- Datos GNSS
- 2.3.- Datos de sismicidad
- 2.4.- Datos de inclinometría

3.- RESULTADOS

- 3.1.- Series de tiempo DINSAR
- 3.2.- Series de tiempo GNSS

4.- DISCUSIONES

- 4.1.- Volcán Sara Sara
- 4.2.- Volcán Cerro Auqui huato

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

Los volcanes Sara Sara y Cerro Auqui huato pertenecen a la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA), que comprende entre los 15° y 27.5° de Latitud Sur. En la ZVCA, los volcanes se ubican en el Altiplano-Puna (sobre los 4000 m de altitud, Reyes-Hardy et al., 2022) y, por lo tanto, las cumbres de ambos volcanes superan los 5000 m s.n.m.

El Sara Sara, es un volcán emplazado entre las provincias de Parinacochas y Paucar del Sara Sara (región Ayacucho), abarcando los distritos de Puyusca, Sara Sara y Pausa (Figura 1), que ha presentado actividad explosiva intermitente desde hace menos de 2 millones de años (Macedo et al., 2016). Este macizo presenta una cobertura de nieve y hielo en su cumbre, principalmente en el sector oeste, con una superficie aproximada de 5 km² según imágenes satelitales del año 2023.

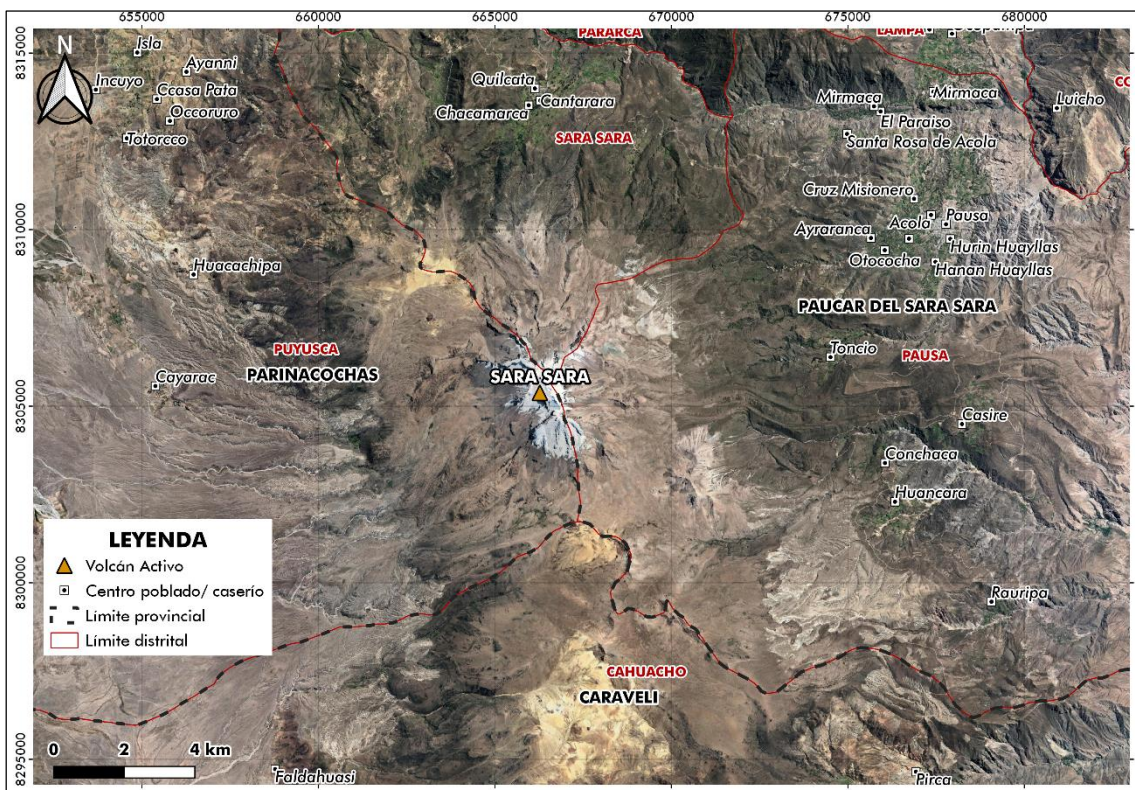


Figura 1.- Mapa de ubicación del volcán Sara Sara y poblados aledaños.

Por su parte, el volcán Cerro Auqui huato (región Ayacucho), es un cono de escoria de 380 m de altura, ubicado a aproximadamente 30 km al NE del volcán Sara Sara, entre los distritos de Colta y Oyolo en la provincia de Paucar del Sara Sara (Figura 2). Su edad corresponde probablemente al Pleistoceno – Holoceno. Las imágenes satelitales muestran un flujo de lava joven con estructuras de leveés y cuerdas de lava. El flujo de lava se extiende hasta 9 km al sur del volcán (Macedo et al., 2016).



Figura 2.- Mapa de ubicación del volcán Cerro Auqui huato y poblados aledaños.

1.1. Antecedentes

Morche y Núñez (1998) realizaron el análisis del riesgo geológico asociado al volcán Sara Sara con el objetivo de identificar las zonas de mayor riesgo ante una eventual erupción volcánica. El distrito más densamente poblado en la zona de influencia del volcán Sara Sara es Pausa, con alrededor de 3400 habitantes, ubicado en la margen oriental y a aproximadamente 12

km de la cumbre del volcán. Los poblados de Incuyo, Pausa, Lampa, Pararca, Quilcata, Marcabamba, y numerosos caseríos, situados en un radio de 25-30 km alrededor del volcán donde viven alrededor de 8000 habitantes están expuestas a un riesgo potencial en caso de una erupción del volcán. En caso de una reactivación, se prevé que ocurran erupciones plinianas que generarían depósitos de caída de pómez y cenizas, así como flujos piroclásticos, seguidos de erupciones efusivas con flujos lávicos de tipo andesítico. Además, se anticipa la formación de lahares, ya sea por el contacto del hielo de las cumbres con el material expulsado durante la erupción o por el desplazamiento de los flujos piroclásticos a través de las quebradas que actualmente contienen agua.

Cueva (2016) realizó el estudio detallado del volcán Sara Sara, abordando aspectos geológicos, petrográficos y geoquímicos. Este enfoque multidisciplinario ofrece una visión completa de la actividad volcánica, siendo crucial para evaluar riesgos y planificar medidas preventivas en la región.

Morales et al. (2016), mediante la comparación de imágenes InSAR ALOS adquiridas entre los años 2007-2011, detectaron tasas sostenidas de deformación de hasta 1.8 cm/año, en un área localizada a 7 km al SE de dicho volcán. Según los autores, la deformación por su proximidad al volcán Cerro Auqui huato sugiere que 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. El modelo matemático con mejor ajuste para simular la fuente generadora de deformación, es un sill ubicado a 1 km de profundidad debajo de la superficie.

Macedo et al. (2016), categorizaron al volcán Sara Sara como de riesgo volcánico relativamente moderado; mientras que, el volcán Cerro Auqui huato se encuentra en la categoría de volcanes de nivel bajo, siendo considerado el de menor riesgo de los volcanes peruanos.

Rivera et al. (2020) elaboraron el mapa de peligros del volcán Sara Sara, describiendo cinco tipos principales de peligro: 1) peligros por caídas de tefras; 2) peligros por emplazamiento de flujos y oleadas piroclásticas; 3) por flujos de barro o lahares; 4) por avalanchas de escombros; y 5) por flujos de lava. Con base en la historia eruptiva del volcán, proponen cuatro escenarios futuros en caso de una eventual reactivación del volcán Sara Sara, desde el más posible al menos posible. Estos son: 1) emisión de flujos de lava; 2) erupción explosiva tipo vulcaniana (IEV 1-2, IEV = Índice de Explosividad Volcánica); 3) erupción explosiva de tipo subpliniana o pliniana (IEV 3-5); y 4) crecimiento y colapso de domos, asociados al colapso del flanco, que puede generar, a su vez, depósitos de flujos piroclásticos y avalanchas de escombros que podrían afectar a más de 20 000 personas que habitan en un radio de 20 km del volcán.

Vargas et al. (2020) a partir de datos GNSS obtenidos a través de campañas de campo en el volcán Sara, cuantificaron un ligero levantamiento de 6 mm en la componente vertical (dentro del rango de error) entre marzo y noviembre de 2019, asociado a desplazamientos de la tectónica local.

Del Carpio et al. (2022), categorizaron al volcán Sara Sara como de nivel de peligrosidad volcánica moderada; mientras que, el volcán Cerro Auqui huato se encuentra en la categoría de volcanes de nivel muy bajo.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las zonas de deformación en el entorno de los volcanes Auqui huato y Sara Sara mediante el procesamiento de imágenes SAR y series de tiempo para el periodo 2014 - 2023. De esta manera se tendrá una línea base de deformación para ambos volcanes, que sirva de referencia para prever futuros procesos eruptivos. El estudio ha sido complementado con medidas GNSS temporales, datos de inclinómetros y sismicidad.

1.2. Contexto geológico-estructural

El substrato del volcán Sara Sara (Figura 3) está constituido por una gruesa secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico (Formación Chocolate, Formación Hualhuani), cubierta por rocas de las formaciones del Oligo-Mio-Plioceno (formaciones Tacaza, Huaylillas, Alpabamba y Barroso).

Por otro lado, según Cueva et al. (2016), la actividad del volcán Sara Sara es dividido en cuatro etapas: 1) Sara Sara I – Basal (efusivo) etapa en la cual se emplazaron flujos de lavas en su base y un depósito de avalancha de escombros, ubicado al NE del volcán. 2) Sara Sara II – Intermedio Inferior (explosivo) durante el cual se emplazaron hasta 10 depósitos de flujos piroclásticos en los sectores NE, O y SO del volcán. 3) Sara Sara III – Intermedio Superior (explosivo) que consta de una secuencia de hasta 6 depósitos de caídas de tefras en el sector SE – SO, cuyas erupciones probablemente tuvieron un Índice de Explosividad Volcánica de hasta 4-5. 4) el Sara Sara IV – Reciente (efusivo), con flujos de lava al Este del volcán.

En cuanto al contexto estructural, en inmediaciones del volcán Sara Sara, existe una serie de lineamientos de rumbo NO-SE, como, por ejemplo, los ubicados en el sector oeste del volcán Sara Sara, que marca el límite de los cerros y la altiplanicie. Asimismo, al NE del volcán Sara Sara, existe una falla normal que separa ignimbritas de la Formación Alpabamba del Mioceno, con depósitos piroclásticos del volcán Sara Sara (Rivera et al., 2020).

El volcán Cerro Auqui huato (Figura 4), corresponde a un cono de lava andesítica y escorias, el cual presenta al pie de su flanco suroeste una colada lávica de más de 13 km de largo, con un ancho menor de 1 km y una dirección promedio norte-sur siguiendo el cauce de la quebrada Umasi, ubicada al norte del pueblo de Oyolo. Remanentes de esta colada se observan en la

margen izquierda del río Oyolo (Mataya y en el poblado de San José de Ushua). Según Pecho (1983) se puede contar hasta 6 etapas efusivas, siendo la última la que forma el cono volcánico con más de 200 m de altura que ha rellenado el conducto de efusión y originando un domo lava concéntrico que resalta en las pampas del Auqui huato (depósitos eluviales). Los lineamientos más importantes son Huancarama, Auqui huato, Andamarca, Oyolo, Cruz Pata, Puca Ccasa, Pirca y Sara Sara con rumbos generales noroeste – sureste (Martínez & Cervantes, 2003).

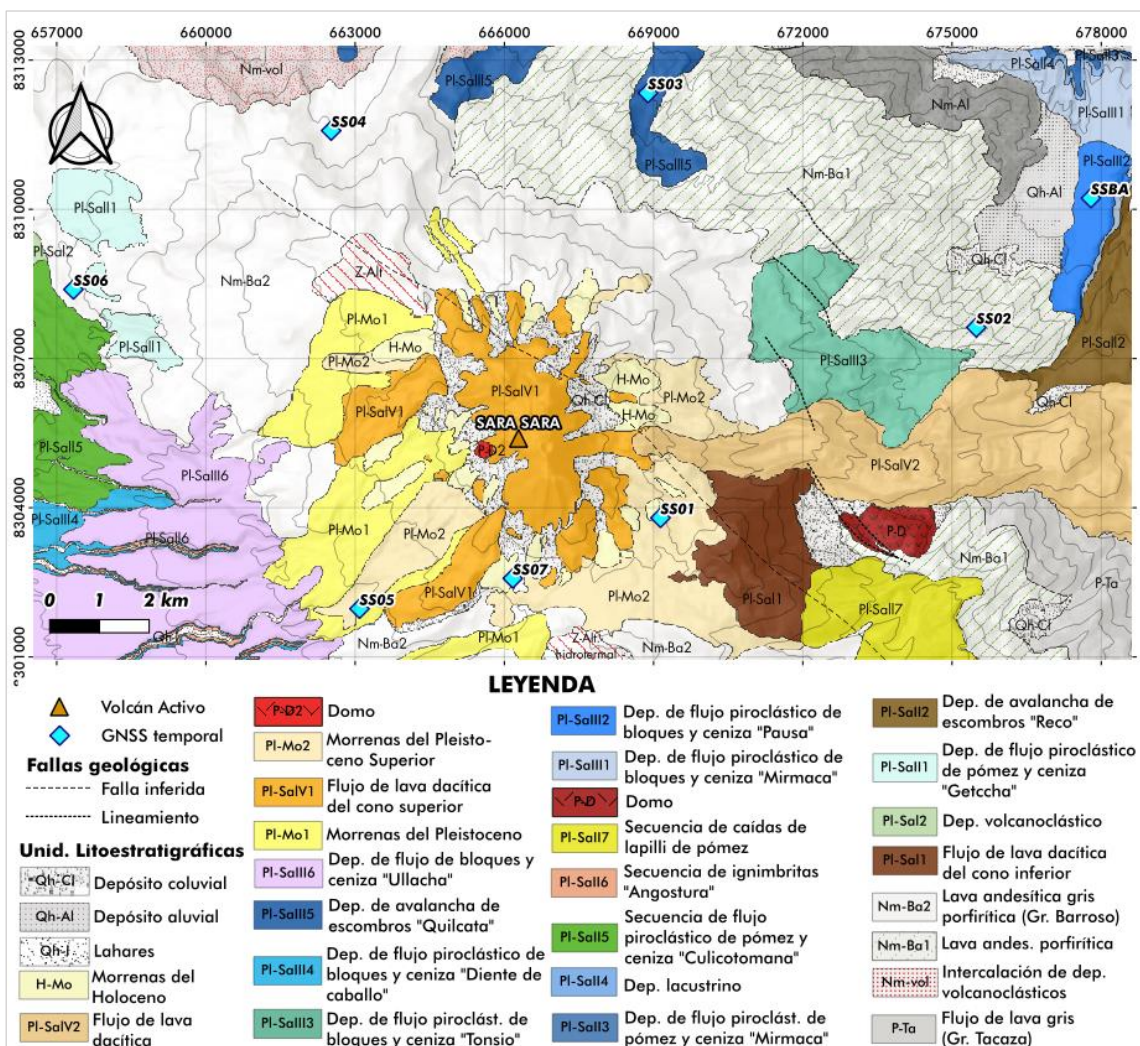


Figura 3.- Mapa geológico-estructural del volcán Sara Sara (Rivera et al., 2020).

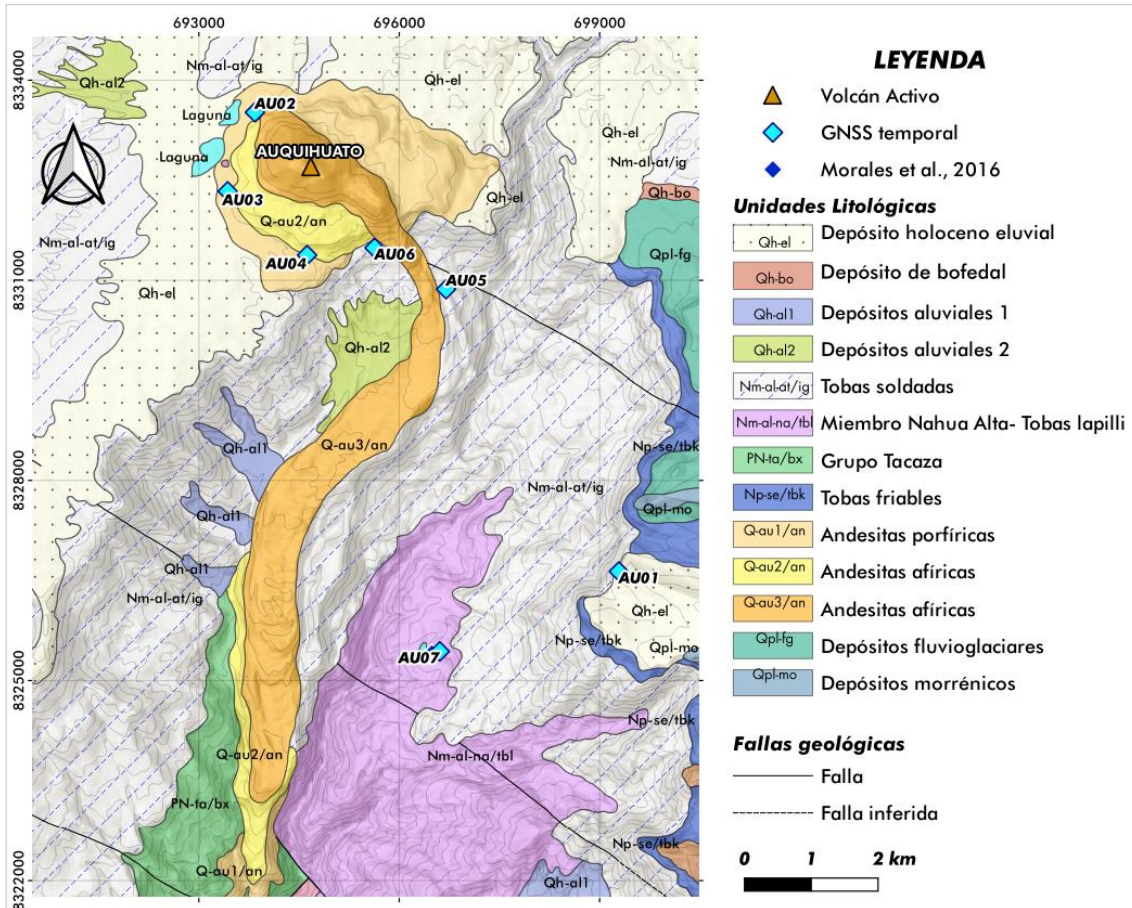


Figura 4.- Mapa geológico-estructural del volcán Cerro Auqui huato (cuadrángulos de Pausa 31-p1, 31-p2 y Coracora 31o).

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

2.1.- DInSAR

Datos DInSAR: Para analizar y cuantificar la deformación superficial detectada en el entorno de los volcanes Sara Sara y Auqui huato se emplearon imágenes de radar Sentinel-1A y B, las cuales fueron 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 disponibles con una periodicidad de 12 a 24 días, siendo posible utilizar las imágenes en órbita ascendente del satélite o en órbita descendente. Para el procesamiento de la serie de tiempo, se ha realizado la descarga y procesamiento de 445 imágenes Sentinel-1, 201 en órbita ascendente y 244 en descendente, las cuales comprenden el periodo de octubre de 2014 (fecha a partir del cual se cuenta con disponibilidad de imágenes de radar de la zona), hasta julio de 2023.

Procesamiento de datos DInSAR: A diferencia de otras técnicas que dependen de mediciones puntuales, la interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) genera un mapa espacial de la deformación del suelo en la línea de vista del satélite (LOS). El procedimiento implica la comparación de dos imágenes SAR (una máster y una esclava) para identificar y cuantificar la deformación superficial. En este estudio, se utilizó el software libre ISCE, basado en Python, cuyos algoritmos se adaptaron para seguir un enfoque de ruta de referencia común para todas las imágenes adquiridas desde órbitas cercanas. Esto simplifica y sistematiza la geometría para el análisis de series temporales (Rosen et al., 2012). La creación de series de tiempo involucró la generación de varios interferogramas, con un filtrado que prioriza la coherencia para reducir el ruido, como se ilustra en la Figura 5.

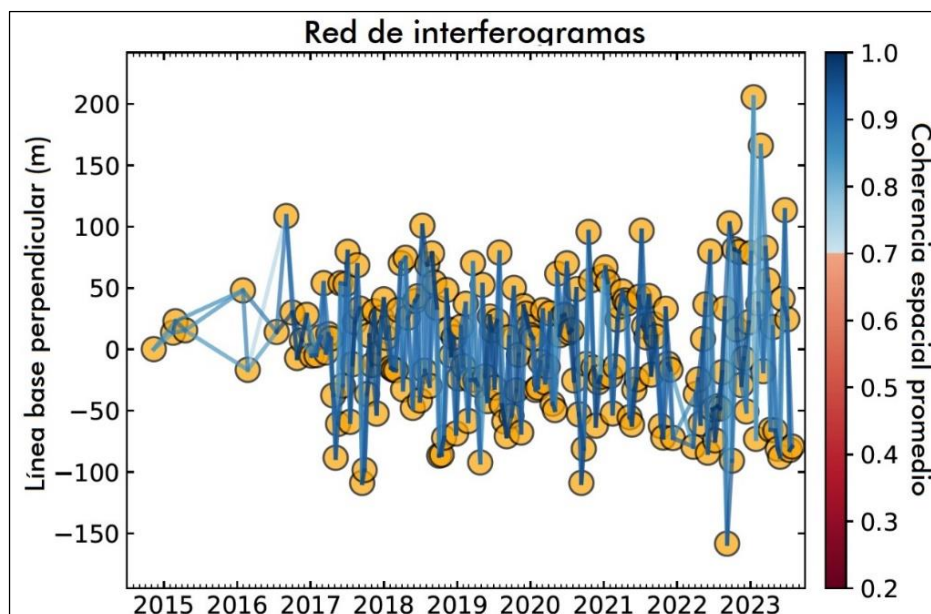


Figura 5.- Red de interferogramas para la elaboración de series de tiempo para el periodo 2014 a 2023 en órbita descendente.

2.2.- Datos GNSS

En el volcán Sara Sara, se ha realizado la medición en marzo y diciembre de 2019 en los puntos de control GNSS SS01 y SSBA, ubicados en el flanco sureste del volcán y en la municipalidad de Pausa, respectivamente. En diciembre de 2019 se realizó una medida en el punto de control SS02, localizado en el sector este del Sara Sara. Entre octubre y noviembre de 2022, se sumaron cuatro puntos de control GNSS a la red de monitoreo del volcán Sara Sara: SS03 (sector noreste), SS04 y SS06 (sector noroeste) y SS05 (flanco suroeste). En 2023, se realizó la instalación y medición del nuevo punto de control SS07, en el flanco sur del Sara Sara (Figura 6).

En el volcán Cerro Auqui huato, se realizó en agosto de 2019, una primera medida del punto de control GNSS AU01, localizado al sureste del volcán, cercano a la zona de deformación descrita por Morales et al. (2016). En octubre de 2022 se realizó la instalación de cinco nuevos puntos de control GNSS para el monitoreo del volcán Cerro Auqui huato: AU02 (flanco noroeste), AU03 (flanco oeste), AU04 (flanco sur), AU05 (flujo sur) y AU06 (flanco sureste). Finalmente, en el año 2023, se realizó la instalación de un

punto adicional AU07 en la zona de deformación descrita por Morales et al. (2016), mostrado en la Figura 7.



Figura 6.- Ubicación de medidas temporales con equipo GNSS en los alrededores del volcán Sara Sara y puntos adicionales DInSAR.

Procesamiento de datos GNSS: Para el procesamiento de datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) se ha utilizado el software GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2018), empleando las efemérides precisas del Servicio GNSS Internacional (IGS).

2.3.- Datos de sismicidad

Para este estudio se cuenta con datos de dos sismómetros que vienen operando desde julio de 2019. Dichos sismómetros están ubicados en el volcán Sara Sara (ubicación de los puntos de control GNSS SS01 y SS02) y uno

ubicado en el volcán Cerro Auqui huato (ubicación del punto de control GNSS AU01).

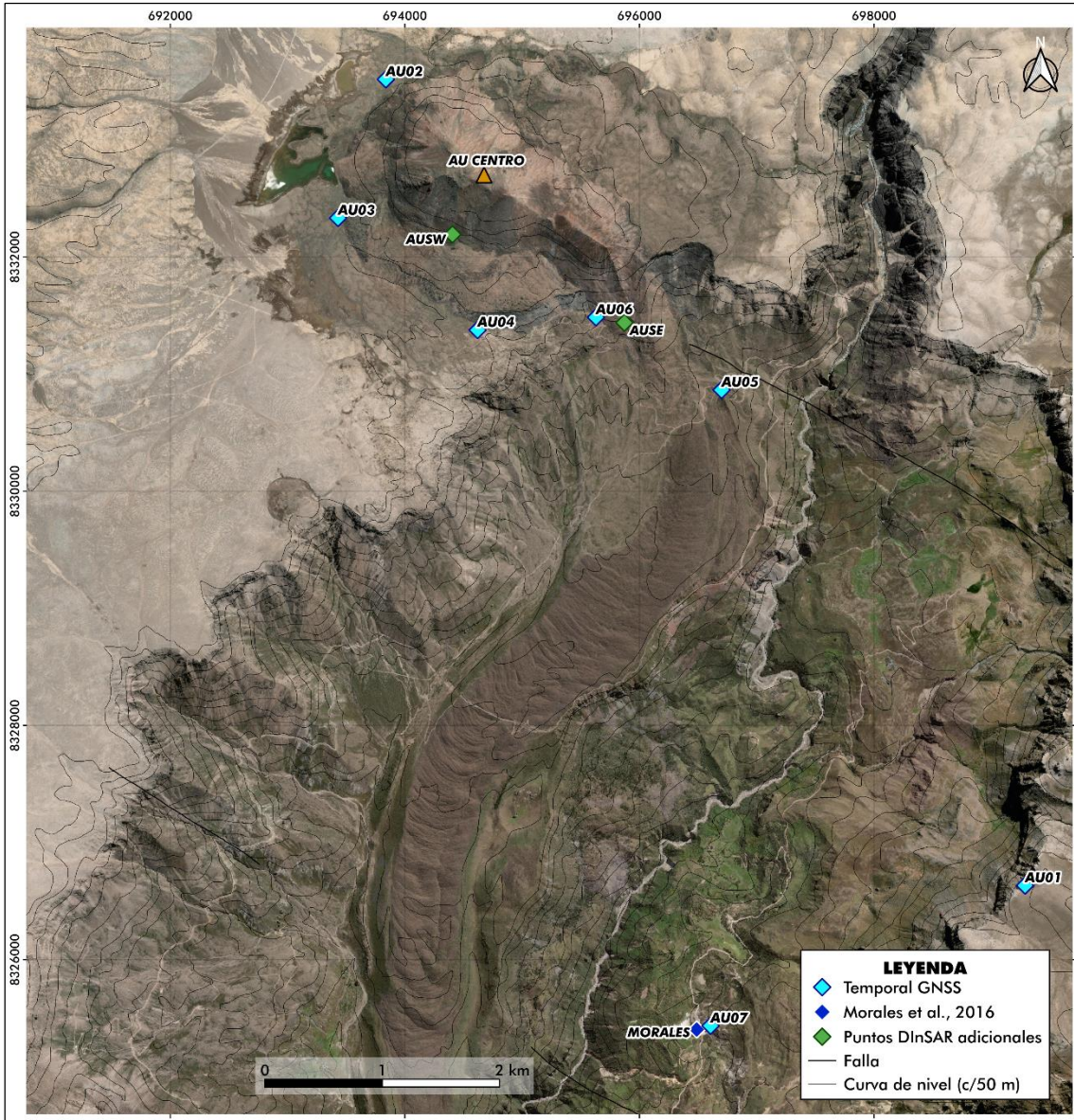


Figura 7.- Ubicación de medidas temporales con equipo GNSS en los alrededores del volcán Cerro Auqui huato y puntos adicionales DInSAR.

Sismicidad del periodo 2019 al 2023 en el volcán Sara Sara: En la zona del volcán Sara Sara se viene detectando sismos de tipo Volcano – Tectónicos (VT), así como sismos Volcano – Tectónicos distales (VTD) y de Largo Periodo, tal como se observa en la Figura 8. Dicha actividad es mínima, con un promedio de un sismo por día. Los días 16 de octubre de

2020, 26 de marzo de 2021, 26 de noviembre de 2022 y 18 de mayo de 2023, se registraron más de 10 sismos Volcano - Tectónicos (VTs) por día. Asimismo, los días 9 de enero de 2022 y 4 de agosto de 2023 se registró más de 10 sismos Volcano-Tectónicos distales (VTDs) diariamente. Los sismos identificados tienen magnitudes menores a M2.9. La ocurrencia de eventos Largo Periodo (LPs) es ínfima, con solo 32 sismos registrados entre los años 2020 y 2023. Lo cual muestra que la actividad dinámica del volcán Sara Sara es mínima.

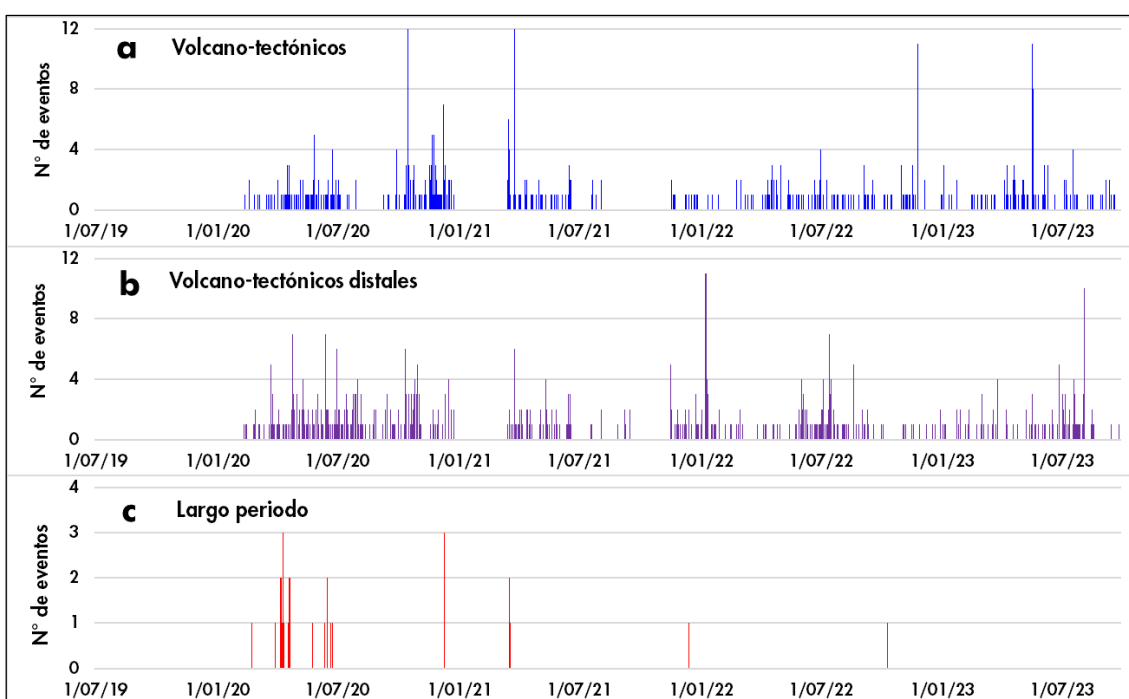


Figura 8.- Sismicidad del periodo 2020 al 2023 en el volcán Sara Sara: a) Sismos VTs, b) VTDs y c) LPs.

Sismicidad del periodo 2020 al 2023 en el volcán Cerro Auqui huato:

En la zona del volcán Cerro Auqui huato también se vienen detectando sismos de tipo Volcano – Tectónicos (VT), así como sismos Volcano – Tectónicos distales (VTD) y de Largo Periodo (LP), tal como se observa en la Figura 9. La actividad sísmica es baja, en promedio se detecta 2 sismos por día. El 17 de abril de 2023, se registró un máximo de 23 sismos Volcano - Tectónicos (VTs) próximos al volcán Cerro Auqui huato. Por otro lado, el 24 de diciembre de 2022 se registró un máximo de 46 sismos Volcano - Tectónicos distales (VTDs). Los sismos identificados tienen magnitudes

menores a M2.5. Los eventos tipo Largo Periodo (LPs) son esporádicos, con mayor ocurrencia entre octubre y diciembre de 2020.

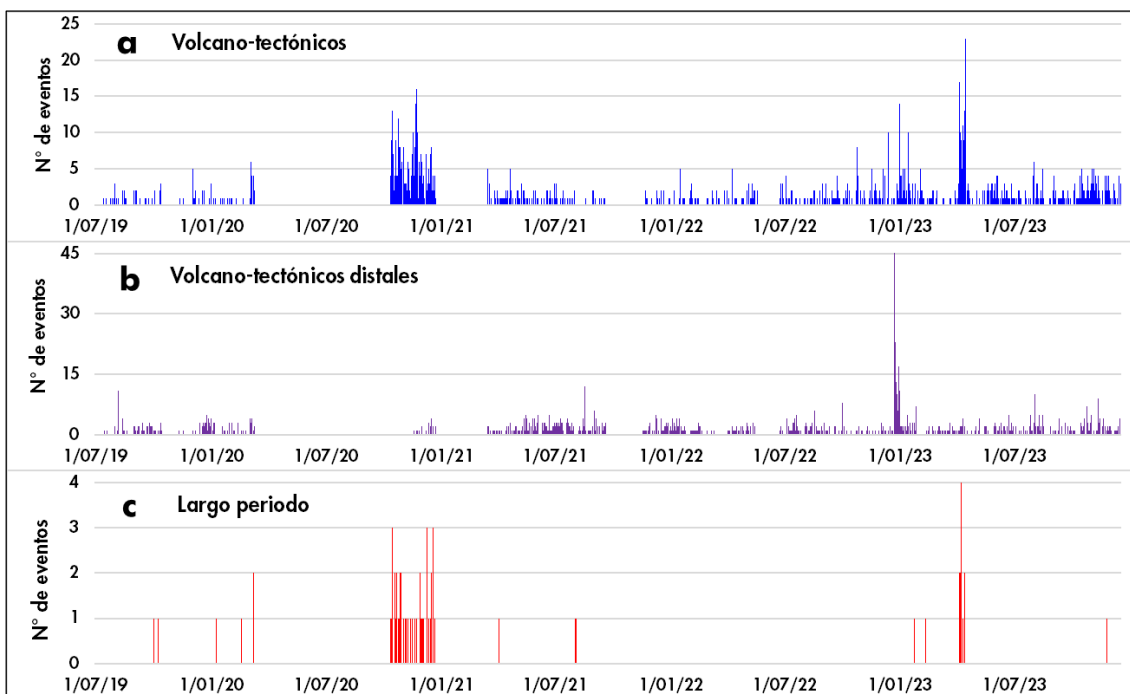


Figura 9.- Sismicidad del periodo 2020 al 2023 en el volcán Cerro Auqui huato: a) Sísmos VTs, b) VTDs y c) LPs.

2.4 Datos de inclinometría

Se cuenta con un inclinómetro instalado en el flanco sureste del volcán Sara Sara (punto de control GNSS SS01) que viene operando desde diciembre de 2019 para el monitoreo de la deformación del volcán Sara Sara. Los datos obtenidos muestran que las componentes Este y Norte han presentado variaciones en la inclinación, principalmente entre septiembre de 2022 y septiembre de 2023 (Figura 10).

Asimismo, el IGP ha instalado en noviembre de 2019 un inclinómetro permanente para el monitoreo de la deformación del volcán Cerro Auqui huato (Figura 11), en la ubicación del punto de control GNSS AU01 (sector sureste). Los datos procesados muestran que la componente Norte ha presentado mayor variación que la componente Este, con mayores cambios en la inclinación entre octubre de 2020 y marzo de 2022.

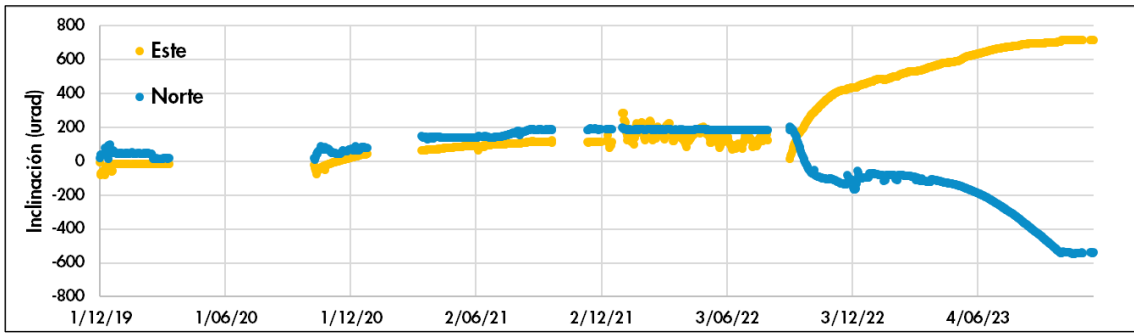


Figura 10.- Datos de inclinómetro del volcán Sara Sara.

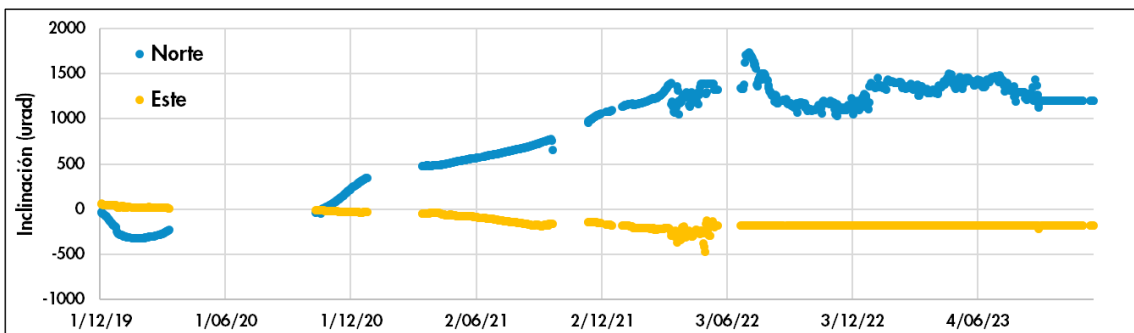


Figura 11.- Datos de inclinómetro del volcán Cerro Auqui huato.

3.- RESULTADOS

3.1.- Series de tiempo DINSAR

Con base al tratamiento y procesamiento de múltiples interferogramas, se elaboró series de tiempo, lo cual permitió realizar la evaluación de la deformación, en la ubicación de todos los puntos de control GNSS (rombos celestes en Figuras 12, 13, 15 y 16), así como en la cima de los volcanes Sara Sara y Auqui huato (triángulos naranjas). Asimismo, según los resultados obtenidos con DInSAR, se han analizado puntos adicionales donde se ha registrado deformación (rombos verdes en Figuras 12, 13, 15 y 16). La velocidad y los desplazamientos han sido calculados en línea de vista del satélite (LOS).

Volcán Sara Sara: En la ubicación de los puntos de control GNSS SSBA, SS01, SS02, SS03, SS04, SS05, SS06 (rombos celestes en Figuras 12 y 13) no se observa anomalías de deformación significativas. Las velocidades de deformación son mínimas, variando entre -0.20 cm/año a 0.15 cm/año, en ambas órbitas (Tabla 1 y Figura 14).

Tabla 1.- Velocidades de deformación DInSAR para los puntos de análisis en el volcán Sara Sara (cm/año) en órbitas ascendente y descendente.

Punto de control	Velocidad LOS Ascendente (cm/año)	Velocidad LOS Descendente (cm/año)
SS CENTRO	1.24 +/- 0.06	0.83 +/- 0.03
SSBA	0.03 +/- 0.05	-0.09 +/- 0.03
SS01	-0.05 +/- 0.04	0.14 +/- 0.02
SS02	-0.08 +/- 0.03	-0.16 +/- 0.02
SS03	-0.18 +/- 0.03	-0.18 +/- 0.02
SS04	-0.14 +/- 0.02	-0.19 +/- 0.01
SS05	0.01 +/- 0.03	-0.09 +/- 0.02
SS06	-0.02 +/- 0.02	-0.19 +/- 0.01
SSNW	2.29 +/- 0.04	-4.54 +/- 0.05
SSW	1.42 +/- 0.05	1.51 +/- 0.05

En el punto SS Centro (Sara Sara Centro, triángulo naranja en Figuras 12 y 13) la velocidad de desplazamiento alcanza 1.24 cm/año en órbita

ascendente y 0.83 cm/año en órbita descendente (Tabla 1). El desplazamiento general en este punto, entre los años 2014 a 2023 supera los 10 cm en orbita ascendente y los 6 cm en orbita descendente (Figura 14). La deformación se inicia aproximadamente desde abril de 2017 hasta agosto de 2021, posterior a ello la deformación es mínima (Figura 14). Al observarse una deformación positiva en ambas órbitas (acercamiento en LOS), se presume que se trate de un levantamiento del suelo.

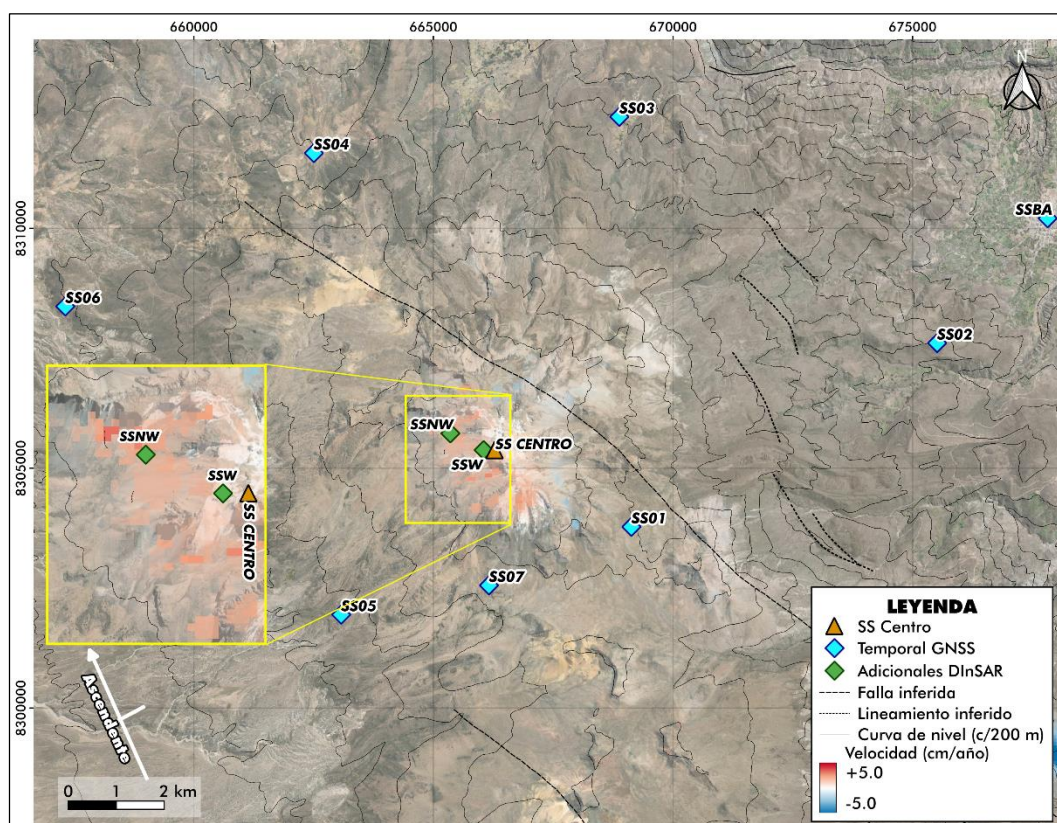


Figura 12.- Mapa de velocidades de deformación obtenidas con el método DInSAR en órbita ascendente para la zona del volcán Sara Sara para el periodo 2014 al 2023.

Asimismo, en la zona cercana a la cumbre del volcán Sara Sara (Figuras 12, 13 y 14) se han identificado dos zonas de deformación, representados con rombos verdes (SSNW y SSW).

En el punto SSNW (Sara Sara noroeste), la velocidad de deformación alcanzada es de 2.29 cm/año en órbita ascendente y de -4.54 cm/año en orbita descendente (Tabla 1). El desplazamiento negativo registrado en

órbita descendente (alejamiento en LOS) supera los 30 cm (Figura 14), lo cual se inició en marzo de 2017 y fue constante hasta junio de 2023 (Figura 14). Por otro lado, en órbita ascendente, se registró un desplazamiento positivo acumulado (acercamiento en LOS) de aproximadamente 15 cm, con mayor velocidad entre julio de 2016 y diciembre de 2021. Debido a que la deformación es opuesta en ambas órbitas (positivo en ascendente y negativo en descendente) se presume que se trate de un desplazamiento lateral en dirección oeste.

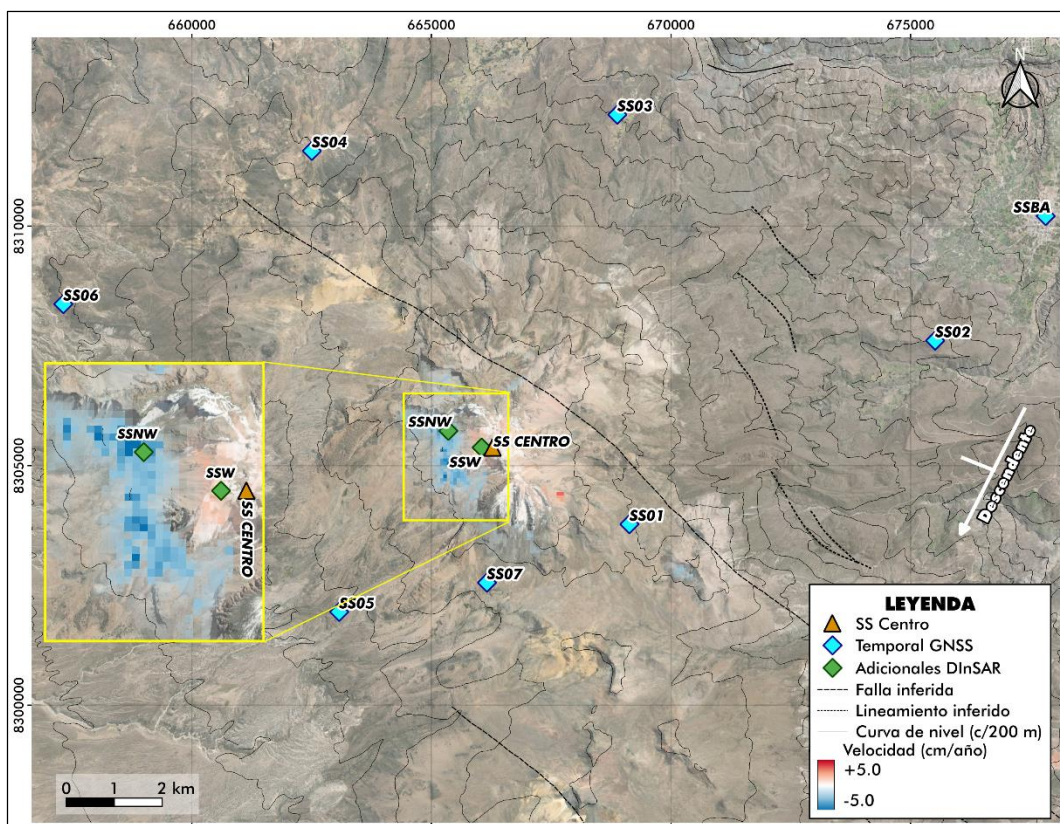


Figura 13.- Mapa de velocidades de deformación obtenidas con el método DInSAR en órbita descendente para la zona del volcán Sara Sara para el periodo 2014 al 2023.

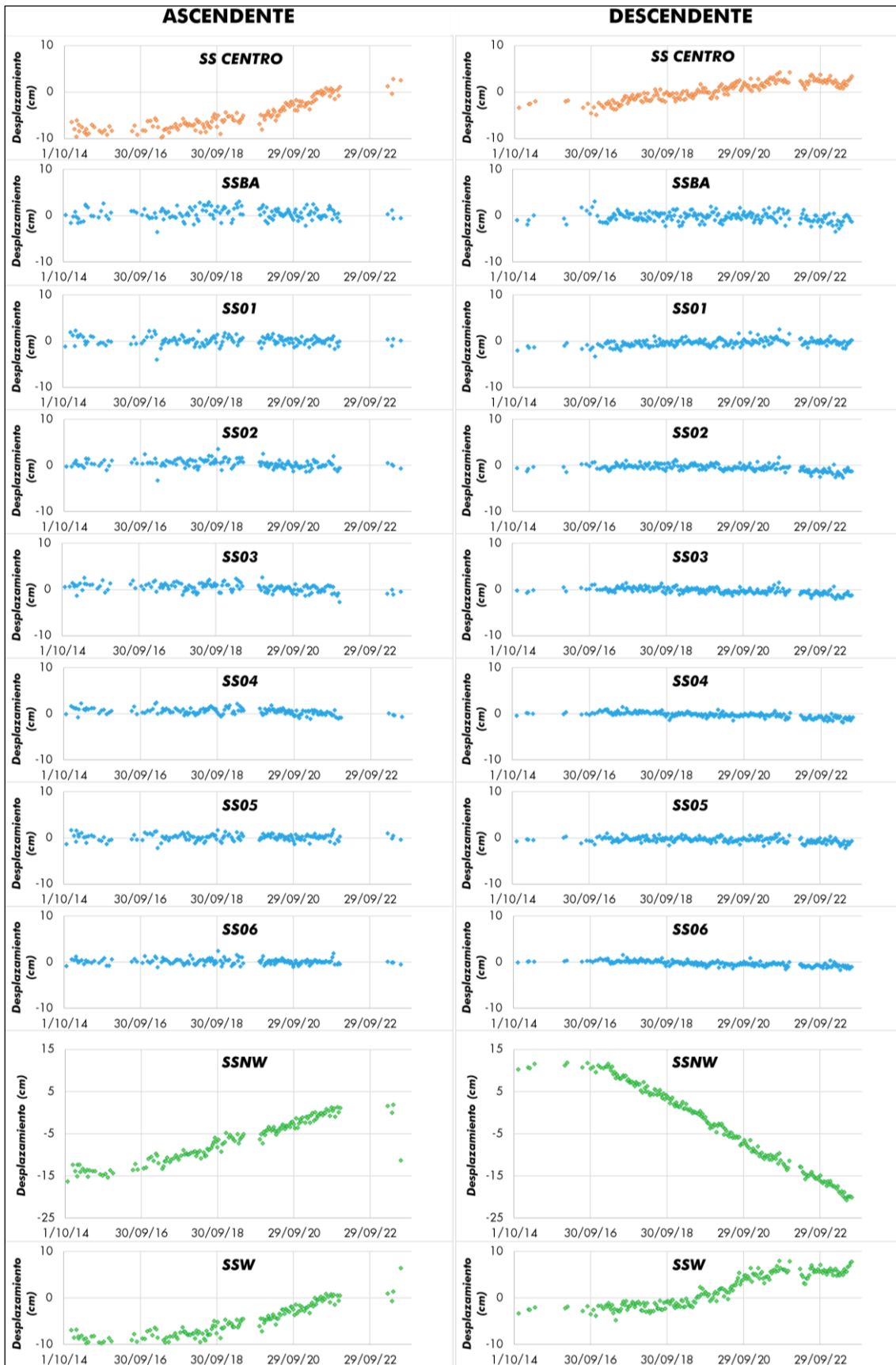


Figura 14.- Series de tiempo DInSAR para los puntos de análisis en el volcán Sara Sara, tanto en órbita ascendente como descendente.

Finalmente, en el punto SSW (Sara Sara oeste) se registró una velocidad de deformación positiva (acercamiento en LOS) en ambas órbitas del satélite, con 1.42 cm/ año en orbita ascendente y 1.51 cm/año en orbita descendente (Tabla 1). El desplazamiento general en este punto es de aproximadamente 8 cm entre 2014 y 2023 (Figura 14), siendo más evidente entre marzo de 2018 y septiembre de 2021 en órbita ascendente, y entre marzo de 2019 y agosto de 2021 en órbita descendente (Figura 14). La deformación positiva en ambas órbitas, podría asociarse a un levantamiento del suelo.

Volcán Cerro Auqui huato: En la ubicación de los puntos de control GNSS (rombos celestes en Figuras 15 y 16) y en la cumbre del mencionado volcán (AU centro, triángulo naranja en Figuras 15 y 16) no se observa deformación significativa. Las velocidades de desplazamiento varían entre -0.25 cm/año a 0.08 cm/año en ambas órbitas del satélite, respectivamente (Tabla 2 y Figuras 15 y 16).

Tabla 2.- Velocidades DInSAR para los puntos de análisis en el volcán Cerro Auqui huato (cm/año).

Punto de control	Velocidad Ascendente (cm/año)	Velocidad Descendente (cm/año)
AU CENTRO	-0.05 +/- 0.03	-0.19 +/- 0.02
AU01	-0.13 +/- 0.03	-0.24 +/- 0.02
AU02	-0.25 +/- 0.03	0.13 +/- 0.02
AU03	0.06 +/- 0.03	-0.02 +/- 0.02
AU04	-0.20 +/- 0.03	-0.07 +/- 0.02
AU05	-0.14 +/- 0.03	0.08 +/- 0.01
AU06	-1.23 +/- 0.03	-0.13 +/- 0.01
AU MORALES	3.90 +/- 0.11	-4.85 +/- 0.09
AUSW	-1.01 +/- 0.03	-2.56 +/- 0.03
AUSE	-2.04 +/- 0.04	0.82 +/- 0.02
POMACOA	-0.60 +/- 0.06	2.34 +/- 0.05

Según los resultados obtenidos, resalta la deformación a 7 km al sureste del volcán Cerro Auqui huato descrita por Morales et al. (2016), que en aquel estudio presentaba una tasa positiva de +1.8 cm/año (acercamiento

en LOS) en órbita ascendente. Sin embargo, en el periodo de estudio, la deformación en el punto AU Morales es de un alejamiento del satélite en órbita descendente, con velocidad negativa de -4.85 cm/año (Tabla 2) y cuyo desplazamiento general en este punto supera los 34 cm entre 2014 y 2023 (Figura 17). Por otro lado, en órbita ascendente, se registró una tasa positiva de 3.90 cm/año, lo que representa un desplazamiento acumulado de 30 cm en el periodo de análisis. La deformación inicia aproximadamente en enero de 2017 y ha presentado periodos de velocidad variable hasta julio de 2023 (Figura 17). Debido a que la deformación es opuesta en ambas órbitas (positivo en ascendente y negativo en descendente) se podría interpretar como un posible desplazamiento lateral de la zona en dirección oeste.

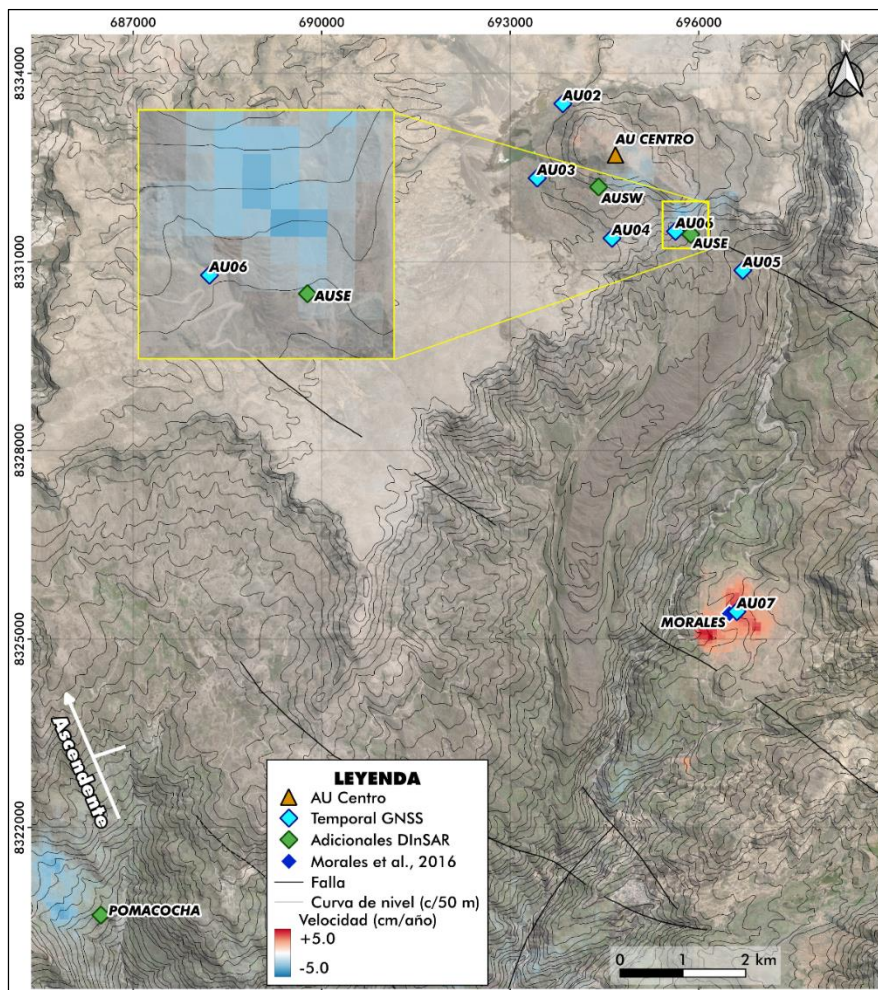


Figura 15.- Mapa de velocidades registradas con el método DInSAR obtenidas en órbita ascendente para la zona del volcán Cerro Auqui huato para el periodo 2014 al 2023.

Por otro lado, se observa una deformación en dos puntos próximos al edificio volcánico del Auqui huato. En el punto AUSW (Auqui huato suroeste) la velocidad negativa (alejamiento en LOS) es de -1.01 cm/año en ascendente y de -2.56 cm/año en descendente (Tabla 2). El desplazamiento negativo general en este punto, es de alrededor de 9 cm en ascendente y es constante durante el periodo de estudio, mientras que, en descendente, supera los 17 cm con inicio en febrero de 2017 y constante hasta julio de 2023 (Figura 17). Debido a la deformación negativa registrada en ambas órbitas, se presume que se trata de un hundimiento del suelo.

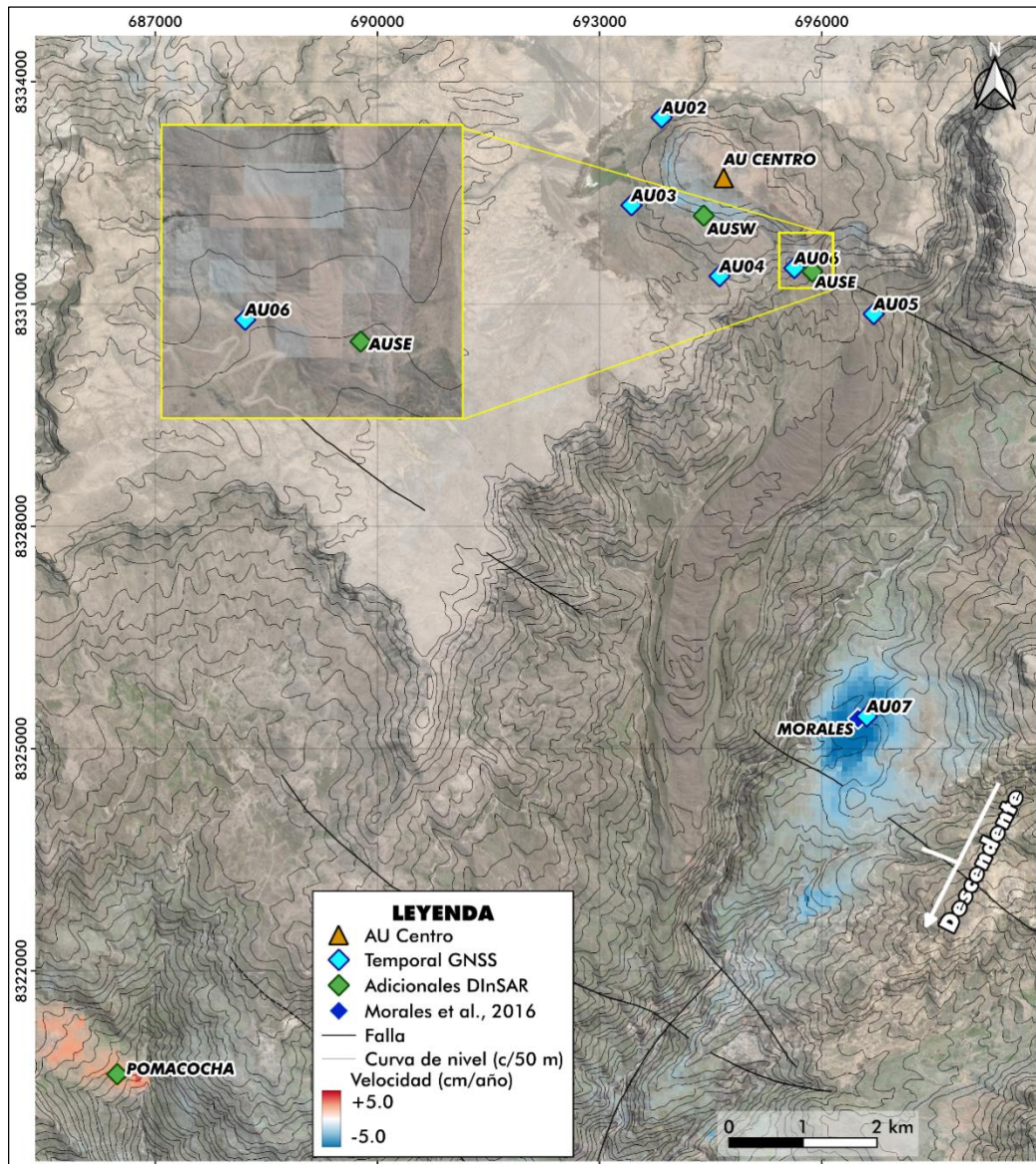


Figura 16.- Mapa de velocidades registradas con el método DInSAR obtenidas en órbita descendente para la zona del volcán Cerro Auqui huato para el periodo 2014 al 2023.

En el punto AUSE (Auqui huato sureste) la tasa en órbita ascendente es negativa con -2.04 cm/año, mientras que en descendente es positiva con 0.82 cm/año (Tabla 2). El desplazamiento general en este punto es de alrededor de 17 cm en órbita ascendente, casi constante desde diciembre de 2014 a diciembre de 2021. Por otro lado, en órbita descendente, el desplazamiento es de 7 cm entre 2014 y 2023 y es casi constante durante todo el periodo de estudio (Figura 17). Dado que la deformación es opuesta en ambas órbitas (negativo en ascendente y positivo en descendente) se podría interpretar como un posible desplazamiento lateral del punto o la zona en dirección este.

Finalmente, en el punto Pomacocha (ubicado a aproximadamente 18 km al suroeste del volcán) la velocidad es similar al punto AUSE. En órbita ascendente, se registró un desplazamiento negativo de -0.60 cm/año, mientras que en órbita descendente la tasa es positiva con 2.34 cm/año (Tabla 2). El desplazamiento general en este punto supera los 6 cm entre noviembre de 2019 y diciembre de 2021, en órbita ascendente. El desplazamiento alcanzado en órbita descendente es de 17 cm y es constante desde diciembre de 2016 hasta julio de 2023 (Figura 17). Se presume que esta deformación podría tratarse de un desplazamiento lateral en dirección este.

3.2.- Series de tiempo GNSS

Para el volcán Sara Sara, los resultados obtenidos con datos GNSS medidos por campañas, son mostrados en la Figura 18. Al igual que lo registrado con la técnica DInSAR, el desplazamiento en los puntos GNSS SSBA, SS01, SS02, SS03, SS04, SS05, SS06 y SS07 (rombos celestes en Figuras 12, 13 y 14) son mínimos.

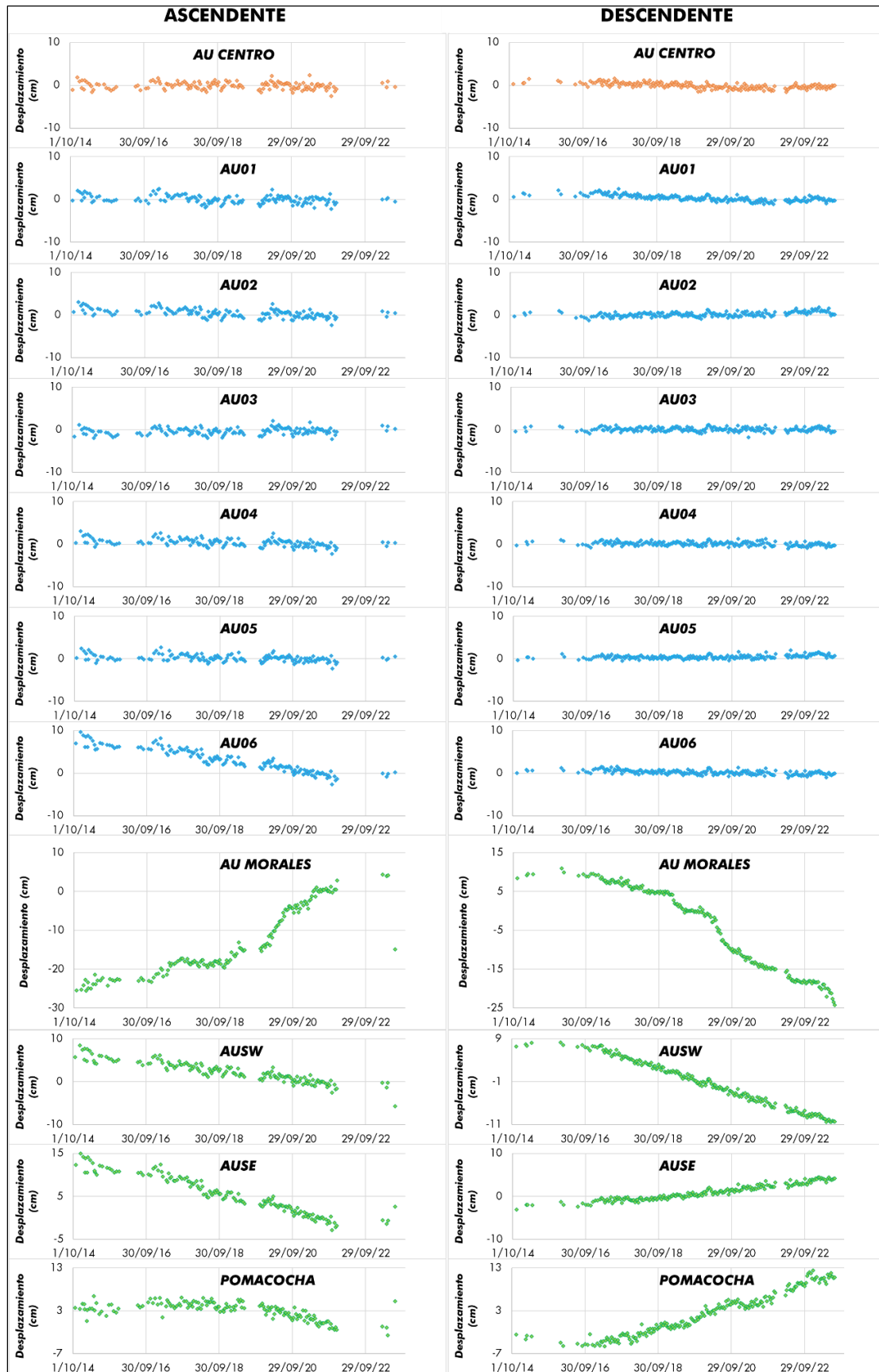


Figura 17.- Series de tiempo de desplazamiento obtenido con el método DInSAR para los puntos de análisis en el volcán Cerro Auquihuato (órbita descendente y ascendente).

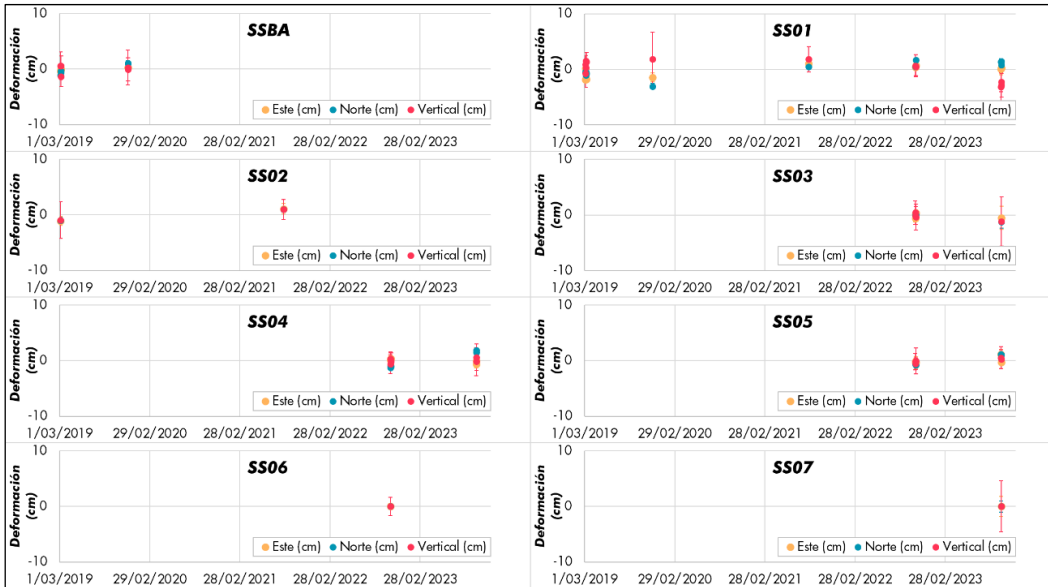


Figura 18.- Series de tiempo de medidas de deformación empleando la técnica GNSS para los puntos temporales en el volcán Sara Sara.

Los resultados obtenidos empleando la técnica GNSS en el volcán Cerro Auqui huato (Figura 19), muestra resultados similares a los obtenidos con la técnica DInSAR. En efecto, se registró desplazamientos mínimos en los puntos AU01, AU02, AU03, AU04 y AU05, mientras que se observa un ligero desplazamiento negativo en la componente vertical del punto AU06, de aproximadamente 1.5 cm, observado en la tendencia general en órbita ascendente del punto AU06 en DInSAR (Figura 17).

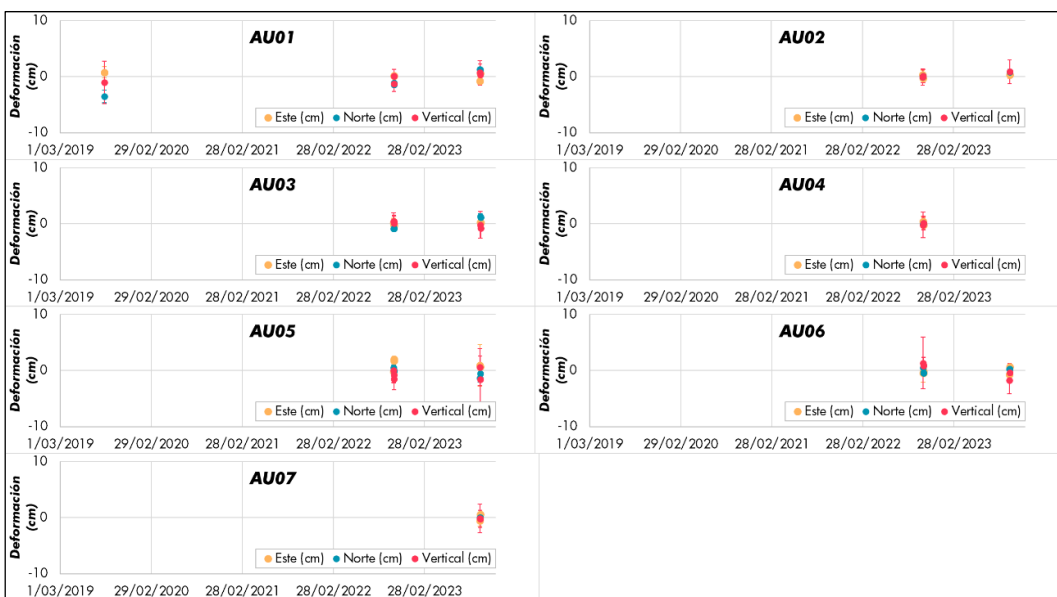


Figura 19.- Series de tiempo de medidas de deformación empleando la técnica GNSS para los puntos temporales en el volcán Cerro Auqui huato.

4. DISCUSIONES

Las medidas de deformación obtenidos en los volcanes Sara Sara y Cerro Auqui huato empleando las técnicas DInSAR y GNSS, han permitido identificar zonas puntuales de desplazamiento que, según el análisis y patrón de la deformación, es muy probable que no estén asociados a la dinámica interna de ambos volcanes. Dado que las dos zonas de estudio muestran diferentes medidas de deformación, se presentan discusiones para ambos volcanes de manera independiente.

4.1. Volcán Sara Sara

El análisis de deformación en el volcán Sara Sara en los puntos de control SSBA (municipalidad de Pausa), SS01 (flanco sureste), SS02 (sector este), SS03 (sector noreste), SS04 (sector noroeste), SS05 (flanco suroeste) y SS06 (sector noroeste), muestra desplazamientos mínimos en las series de tiempo obtenidas a partir de la técnica DInSAR (Figura 14) y GNSS (Figura 18).

En la Figura 20 se observa la correlación de todos los métodos presentados en el estudio, para el análisis de la deformación. En el punto de control GNSS SS01 (flanco sureste), punto que ha sido medido más veces desde el año 2019 (Figura 20c) no se observa deformación significativa, estos resultados se correlacionan con los datos DInSAR en el punto SS01 en órbita ascendente (Figura 20a) y descendente (Figura 20b), pero que no guarda concordancia con el registro del inclinómetro ubicado en la misma zona (Figura 20e) y que se presume solo se trataría de un efecto del instrumento. Los datos muestran que el punto no registra deformación asociada a la actividad interna del volcán ya que la sismicidad es mínima y constante en el tiempo, tanto en el entorno cercano al volcán Sara Sara (Volcano – Tectónicos, Figura 20d) como en el distal (Volcano – Tectónicos distales, Figura 20 h). Por otro lado, en el flanco este del volcán Sara Sara, en gran parte del año se observa muy poca presencia de nieve (Figura 21, recuadro celeste), lo que

explicaría que tampoco se registra deformación asociada a procesos superficiales.

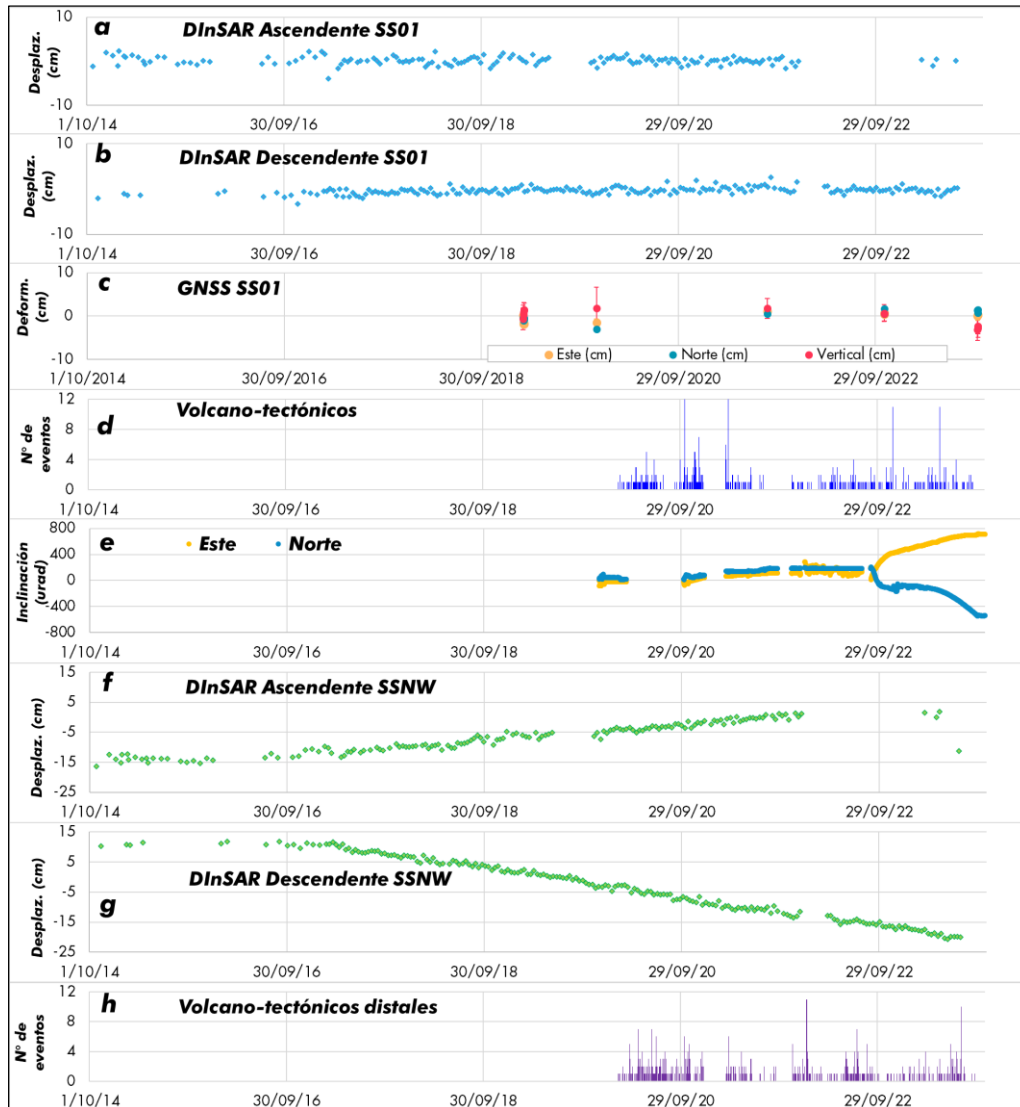


Figura 20.- Correlación de datos geofísicos registrados en el volcán Sara Sara en el periodo octubre 2014 a diciembre de 2023: a), b), f) y g) DInSAR, c) GNSS, d) y h) sismicidad, e) inclinometría.

En relación al punto SSW, se registró deformación positiva en ambas órbitas del satélite (Figura 14) que supera los 8 cm en el periodo de estudio, interpretado como un levantamiento de la superficie. Este proceso también fue observado en el punto DInSAR cercano SS Centro en Figura 14. Sin embargo, al tratarse de una deformación puntual en la cima del volcán, se presume que estaría asociado a la acumulación de hielo y nieve, cuyo análisis es limitado para imágenes de radar de banda C, utilizadas en este estudio.

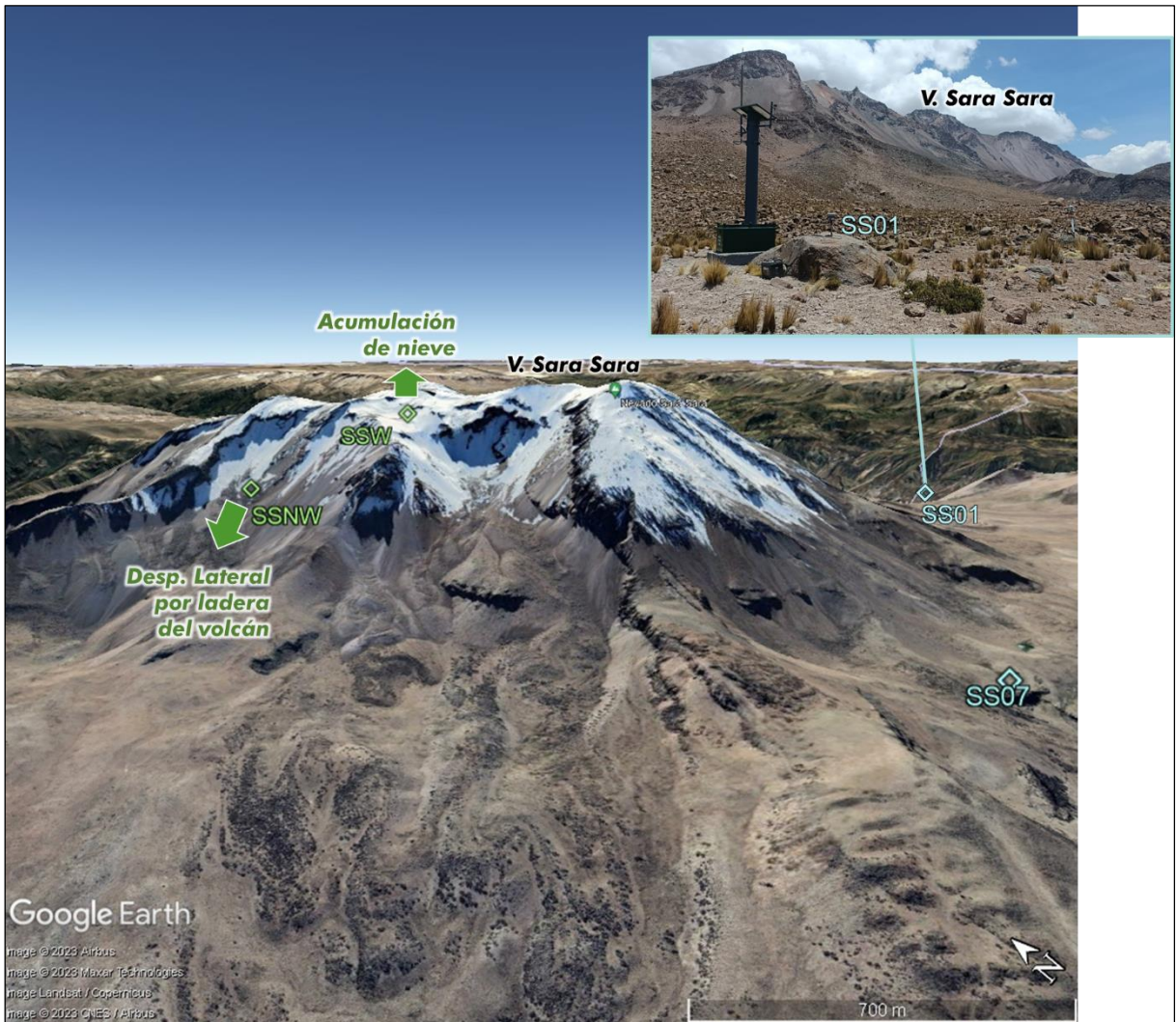


Figura 21.- Puntos medidos en volcán Sara Sara observado desde flanco sureste. En recuadro celeste se presenta una vista de la estación sísmica y GNSS en el punto SS01.

Finalmente, en el punto de control SSNW (ubicado en el flanco noroeste del volcán), se registraron desplazamientos opuestos, con acercamiento al satélite de 15 cm en órbita ascendente (Figura 20f) y alejamiento de 30 cm en órbita descendente (Figura 20g). Se presume que este comportamiento estaría asociado a un desplazamiento lateral, debido a que es registrado en el flanco oeste del edificio volcánico del Sara Sara. El desplazamiento es positivo en vista ascendente ya que la imagen es adquirida de manera oblicua desde el sector oeste, mientras que es negativo en órbita descendente, ya que es adquirido desde el sector este del volcán. Por tal motivo, este desplazamiento

está acorde al sentido de la ladera y se trataría de un proceso superficial como movimiento (o caída) de rocas, posiblemente originada por endurecimiento y derretimiento de la nieve, que ocupa un área considerable en el flanco oeste del volcán Sara Sara (Figura 21). En el periodo de identificación de la deformación, no se observa variaciones significativas respecto a la actividad sísmica detectada en áreas aledañas al volcán (por ejemplo, sismos Volcano-Tectónicos, VTs en Figura 20d) o en su entorno (sismos Volcano-Tectónicos distales, VTDs en Figura 20h), lo cual refuerza la hipótesis de que las deformaciones registradas, no tienen origen en la dinámica interna del volcán, el cual aparentemente está en un estado de reposo.

4.2.- Volcán Cerro Auqui huato

En el volcán Cerro Auqui huato, el punto GNSS AU01 (ubicado a 7 km al sureste del volcán) ha sido medido en más ocasiones durante los últimos años, y no se ha registrado deformación significativa (Figura 22c), acorde a lo observado con la técnica DInSAR (Figuras 22a y 22b). En relación a la sismicidad, es necesario mencionar que durante el incremento de sismos de tipo VT detectadas en áreas cercanas al volcán Cerro Auqui huato, durante octubre y diciembre de 2020 (Figura 22d), se observó una variación positiva de más de 1000 urad (microradianes) en la componente norte del inclinómetro (que se ubica en la misma zona del punto AU01), la cual permaneció hasta marzo de 2022 (Figura 22e). Esta deformación positiva es similar a lo observado en la órbita ascendente del punto AU Morales (Figura 22f).

Sin embargo, debido a las variaciones mínimas en el inclinómetro durante el incremento de sismos VT (abril de 2023 en Figura 22d) y VTDs (diciembre de 2022 en Figura 22h) en el entorno del volcán Cerro Auqui huato, se descartaría que esta variación esté ligada a procesos relacionados a la dinámica interna del volcán o a un proceso de reactivación volcánica.

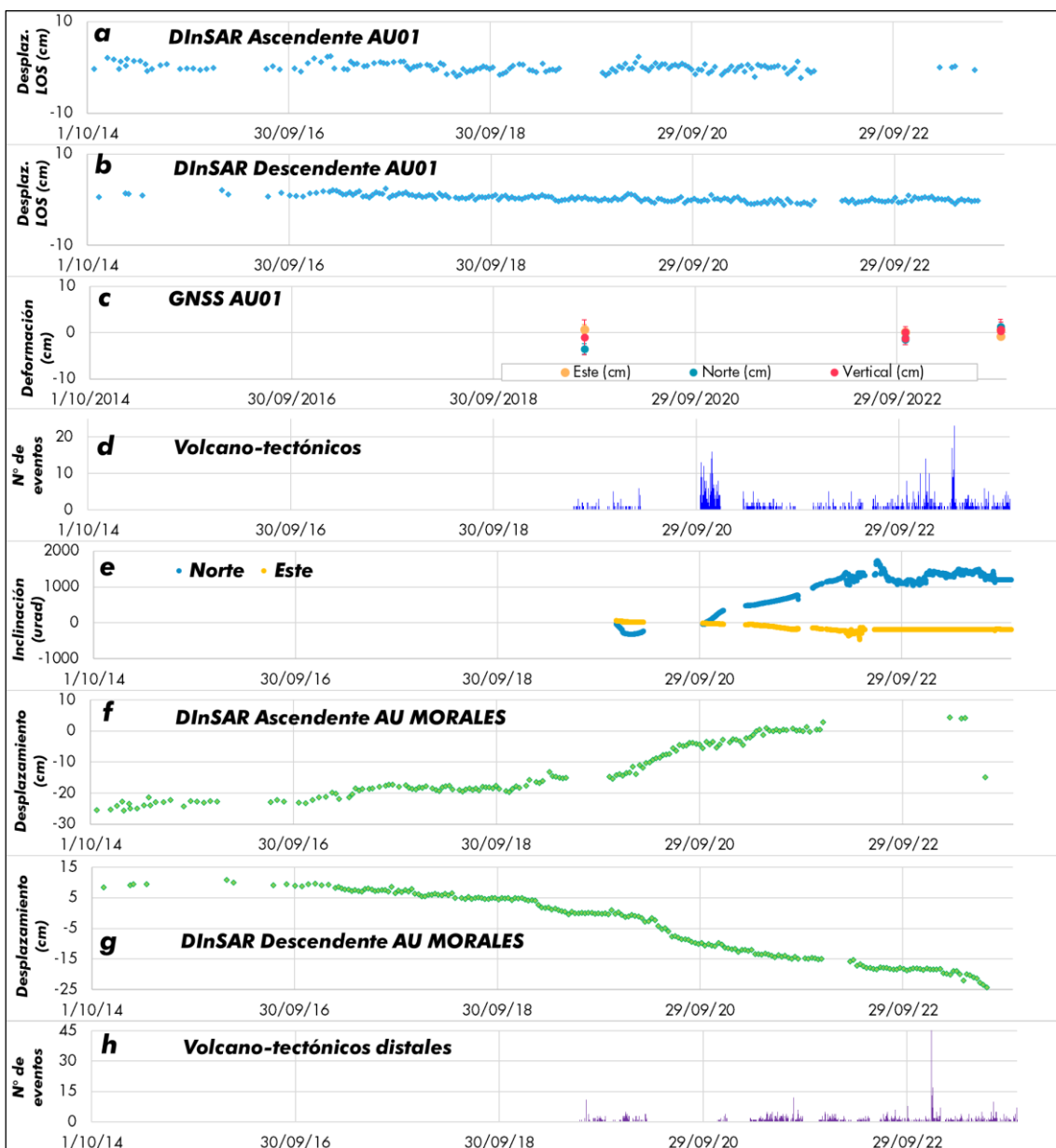


Figura 22.- Correlación de datos geofísicos registrados en el volcán Cerro Auqui huato: a), b), f) y g) DInSAR, c) GNSS, d) y h) sismicidad, e) inclinometría.

En el punto AUSE (sector sureste, Figuras 17 y 23a) se registró un alejamiento de 17 cm en órbita ascendente y un acercamiento de 7 cm en órbita descendente, lo que se presume se trata de un desplazamiento lateral de la zona en dirección este, hacia el río Huaccmi Mayoc (Figura 23a, sentido de la ladera), es decir, se trataría de un posible deslizamiento del terreno. Por otro lado, en el punto AUSW (sector suroeste del volcán), se registró un alejamiento en ambas órbitas del satélite, lo que se interpretaría como un posible hundimiento de esta zona (Figura 23a).

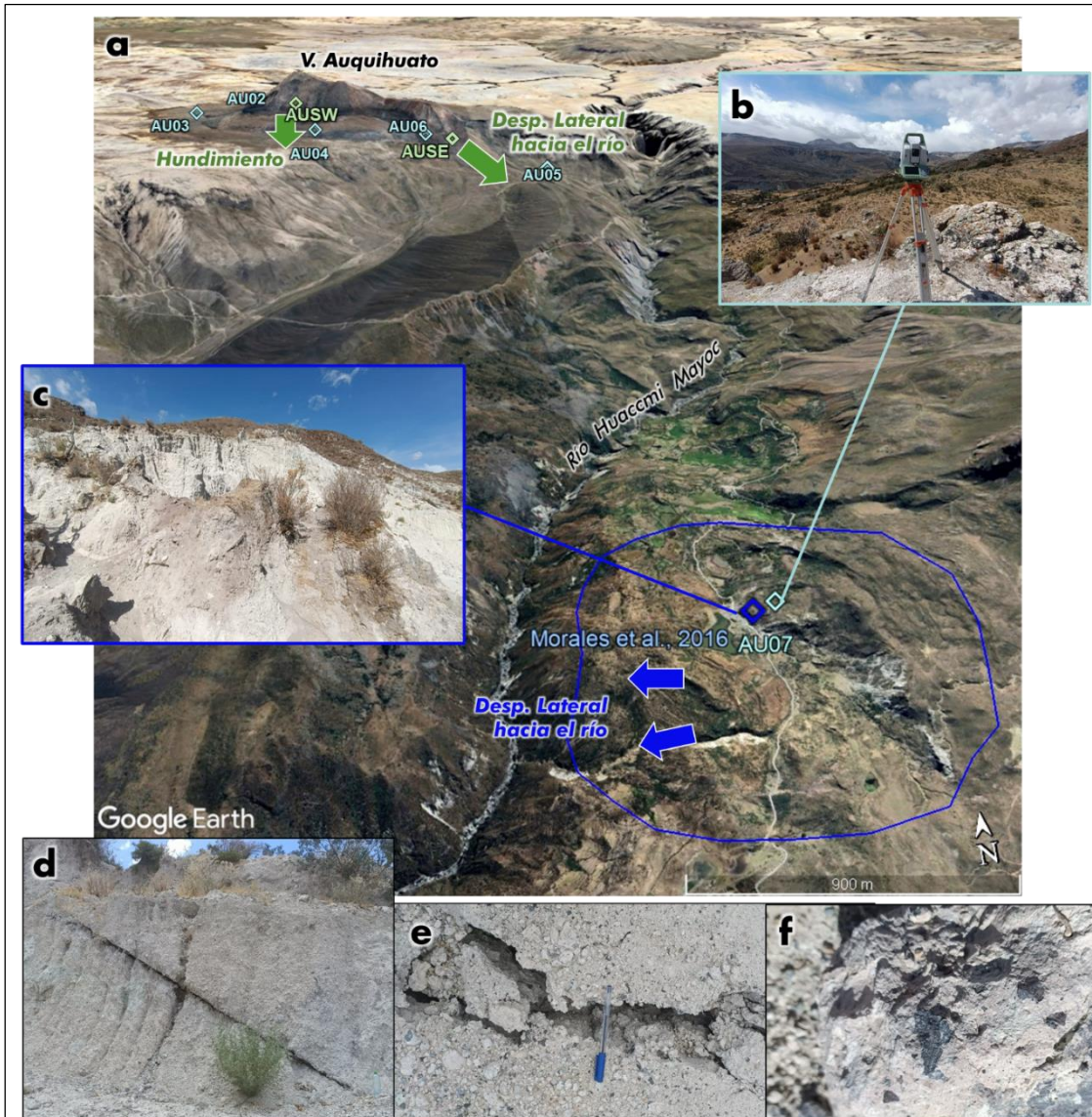


Figura 23.- Zona de deformación descrita por Morales et al. 2016: a) y b) Vista del volcán Cerro Auqui huato y zona de deformación, c) Vista general de la zona, d) y e) grietas, f) acercamiento de muestra de toba lapilli.

El punto AU MORALES (7 km al sureste del volcán, rombo azul en Figura 23a) es el que ha presentado mayor deformación de todos los puntos analizados (superando los 30 cm). En este punto también se ha obtenido desplazamientos opuestos, en este caso, un acercamiento en órbita ascendente (Figura 22f) y un alejamiento en descendente (Figura 22g), lo que se interpreta como un posible desplazamiento lateral en dirección oeste, hacia el río Huacmi Mayoc (Figura 23a), es decir, viene ocurriendo un deslizamiento o movimiento lento del terreno en dirección a la quebrada principal.

La zona consiste de tobas (Figura 23f) o depósitos de flujos piroclásticos consolidados de coloración gris clara (Figura 23c), en la cual se observan algunas grietas de aproximadamente 5 cm de ancho (Figuras 23d y 23e). La medición temporal del punto GNSS AU07 realizada en octubre de 2023 (Figuras 19 y 23a), será de mucha utilidad para el seguimiento del movimiento superficial que se viene registrando con la zona de deformación descrita por Morales et al. (2016).

Finalmente, en el punto POMACOCKA, ubicado a aproximadamente a 18 km al suroeste del volcán Cerro Auqui huato, se observa 6 cm de alejamiento en ascendente y 17 cm de acercamiento en descendente, por lo que estaría asociado a un desplazamiento lateral del terreno en sentido este, en dirección a la quebrada Alfahuaycco, es decir, un posible deslizamiento del terreno (Figura 24). La localidad de Pomacocha se ubica dentro de la zona de deformación (Figura 24, recuadro amarillo) por lo cual se recomienda su evaluación ya que en esta área habitan más de 50 habitantes.

Las cuatro zonas de deformación registradas en los alrededores del volcán Cerro Auqui huato, se presume están ligadas a procesos superficiales, es decir procesos de remoción en masa, ya que la dirección de desplazamiento es hacia la quebrada cercana (puntos AUSE, AU Morales y Pomacocha), descartando que las zonas de deformación sean asociadas a la actividad interna del volcán, ya que no hay evidencia de inflación (acercamiento en ambas órbitas del satélite) ni sismicidad asociada a ascenso de magma. Considerando la velocidad registrada de los desplazamientos laterales, podrían tratarse de reptación del suelo o deslizamiento, para lo cual se recomienda evaluación continua y monitoreo con otros métodos geofísicos.

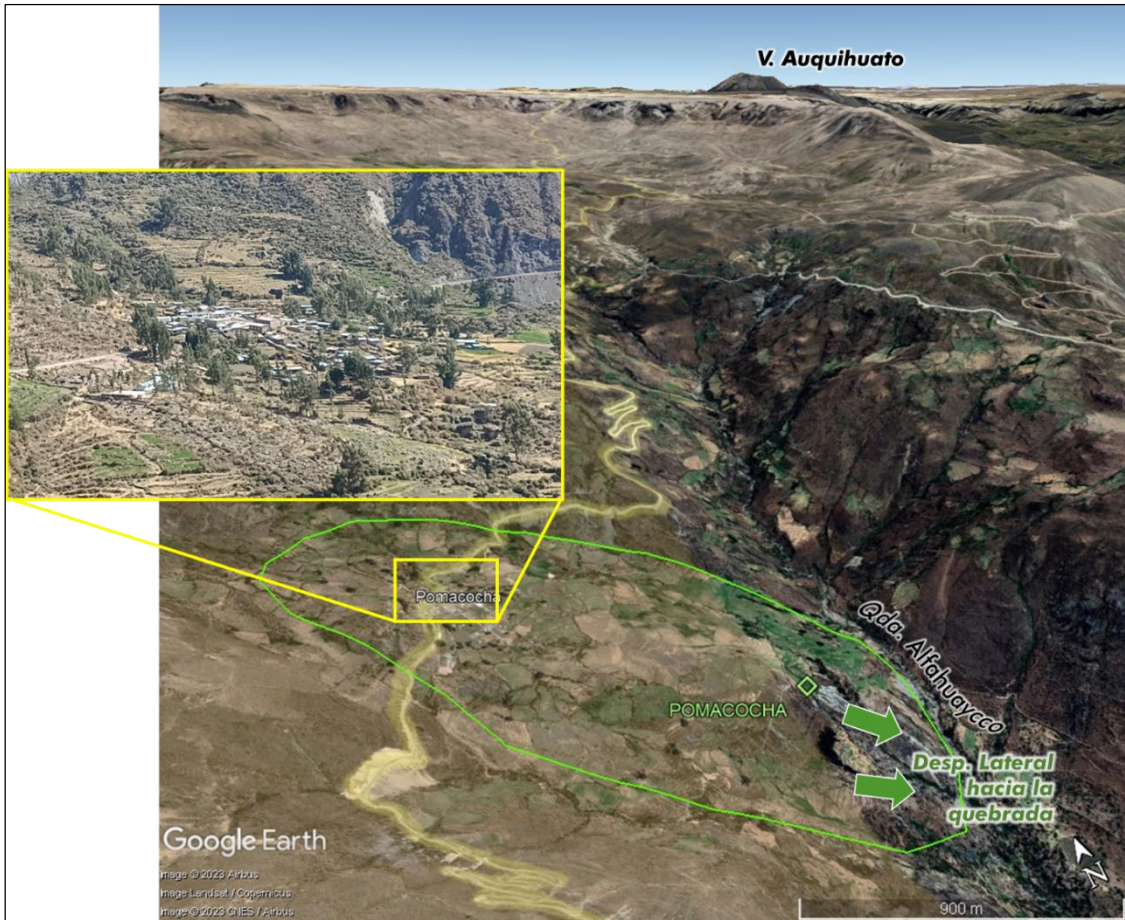


Figura 24.- Imagen satelital de punto Pomacocha y de fondo el volcán Cerro Auqui huato. En recuadro amarillo, fotografía de la localidad de Pomacocha.

CONCLUSIONES

- Se ha realizado el análisis de la deformación en los volcanes Sara Sara y Cerro Auqui huato para el periodo 2014 a 2023, aplicando la técnica DInSAR. Los resultados han permitido reconocer zonas puntuales de desplazamiento que, por los patrones de deformación observados, es muy probable que no estén relacionadas con la actividad volcánica interna, acorde con los datos registrados con técnica GNSS, análisis de la sismicidad e inclinometría.

- En el volcán Sara Sara se han registrado 3 puntos con deformación significativa, todos ubicados próximos al cono volcánico: En los puntos SSW (flanco oeste) y SS Centro (cono volcánico), se observa un levantamiento de la superficie (que supera los 8 cm), posiblemente asociado a la acumulación de hielo y nieve en periodos de lluvia. En el punto de control SSNW (flanco suroeste), se registraron desplazamientos opuestos, con acercamiento de 15 cm en órbita ascendente y alejamiento de 30 cm en órbita descendente, asociados probablemente a un desplazamiento lateral en el flanco oeste del volcán Sara Sara, vinculado a un movimiento de rocas, posiblemente causado por el endurecimiento y derretimiento de la nieve en el área oeste del volcán. No se observan variaciones significativas en la sismicidad cercana al volcán, respaldando la hipótesis de que las deformaciones registradas no tienen origen en la dinámica interna del volcán.

- En el volcán Cerro Auqui huato, se ha determinado 4 zonas de deformación: 1) punto AUSE (sector sureste), se registró un alejamiento de 17 cm en órbita ascendente y un acercamiento de 7 cm en órbita descendente, indicando un desplazamiento lateral hacia el este, en dirección al río Huacmi Mayoc. 2) punto AUSW (sector suroeste), se

observó un alejamiento en ambas órbitas (con un máximo de 17 cm en descendente), sugiriendo un posible hundimiento en esa zona. 3) punto AU MORALES (7 km al sureste del volcán) presenta la mayor deformación, superando los 30 cm, con acercamiento en órbita ascendente y alejamiento en descendente, interpretado como un desplazamiento lateral de la zona hacia el oeste, en dirección al río Huaccmi Mayoc. Asimismo, inspecciones en campo han evidenciado grietas de 5 cm de ancho en esta zona. 4) punto POMACocha (18 km al suroeste del volcán), se observa un alejamiento de 6 cm en órbita ascendente y un acercamiento de 17 cm en órbita descendente, indicando un desplazamiento lateral hacia el sector este, en dirección a la quebrada Alfahuaycco. Las zonas de deformación estarían relacionadas a reptación del suelo o deslizamiento, descartándose su vinculación a la actividad interna del volcán, ya que no hay evidencia de inflación (levantamiento del suelo) ni sismicidad asociada a ascenso de magma. Por tal motivo, se recomienda una evaluación continua de las áreas de deformación identificadas, así como el monitoreo mediante otros métodos geofísicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Cueva, K. (2016) – Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del volcán Sara Sara (Ayacucho). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 137 p.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). Evaluación del Peligro Volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres. Informe Técnico N°029-2022/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>.
- Herring, T., King, R., Floyd, M. & McClusky, S. (2018). Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
- Macedo, O., Taípe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., y otros. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú (IGP)--Instituto Geofísico UNSA--Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Arequipa - Perú., mayo 2016, 75 p.
- Martínez, W. y Cervantes, J. (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Pausa(31-p) escala 1:100000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Morales Rivera, 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.
- Morche, W. & Núñez, S. (1998) - Estudio del riesgo geológico del volcán Sara Sara. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 21, 65 p.
- Pecho, V. (1983). Geología de los Cuadrángulos de Pausa y Caravelí Hojas: 31 -p y 32 -p. BOLETIN No. 37 Serie A. Carta Geológica Nacional. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Reyes-Hardy, M., Di Maio, L., Domínguez, L., Frischknecht, C., Biass, S., Freitas Guimarães, L., Nieto-Torres, A., Elissondo, M., Figueroa, M., Amigo, A., García, S. y Bonadonna, C. (2022). Mapa Regional y Ranking de Riesgos Volcánicos de la Zona Volcánica Central de los Andes. Libro de resúmenes IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos.

Rivera, M.; Cueva, K.; Le, J.; Vela, J.; Samaniego, P.; Manrique, N. Soncco, Y. (2020) - Geología y Evaluación de Peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). INGEMMET, Boletín, Serie C Geodinámica e Ingeniería Geológica 78 154 p., 2 mapas.

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>).

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. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4782>

