



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Deformación de la corteza asociada con sismicidad en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri

Katherine Andrea Vargas Alva <sup>1</sup>, Juan Carlos Villegas Lanza <sup>2</sup><sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú, [kvargas@igp.gob.pe](mailto:kvargas@igp.gob.pe)<sup>2</sup> Instituto Geofísico del Perú, [jvillegas@igp.gob.pe](mailto:jvillegas@igp.gob.pe)

### RESUMEN

En julio de 2020 se detectó una deformación de la corteza superficial mediante la técnica de interferometría diferencial (DInSAR) ubicada a aproximadamente 7.5 km al sureste del volcán Purupuruni y 17.5 km al noroeste del volcán Casiri. Esta deformación se correlaciona con la ocurrencia de sismos de magnitud  $M > 4$  detectados el 25 y 26 de julio de 2020, cuyo mecanismo de ruptura corresponde a una falla normal oblicua con desplazamiento horizontal dextral. Posteriormente, en agosto de 2020 se registró una deformación en el área del domo sur del volcán Purupuruni, asociado a una sismicidad de baja magnitud ( $< M3$ ), cuyo patrón indicaría que se trata de dos fallas de rumbo con desplazamiento dextral. En abril y mayo de 2021, se detectó un importante número de sismos de magnitud  $M > 3.5$ , observándose patrones asociados a hundimientos, localizados en los domos norte del volcán Purupuruni y a 10 km al sur de este volcán. Este estudio documenta la reactivación del sistema de fallas en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri, con poca o ninguna actividad histórica, probablemente de origen tectónico, relacionado con la geodinámica de los Andes, aunque no se descarta una posible contribución de procesos volcánicos a mayor profundidad.

**Palabras clave:** deformación de la corteza, falla Pacollo, radar interferométrico de apertura sintética, Complejo de domos Purupuruni, Nevado Casiri.

### ABSTRACT

In July 2020, a surface deformation of the crust was detected using the differential interferometry technique (DInSAR) located approximately 7.5 km southeast of the Purupuruni volcano and 17.5 km northwest of the Casiri volcano. This deformation correlates with the occurrence of earthquakes of  $M > 4$  detected on July 25 and 26, 2020, whose rupture mechanism corresponds to a normal oblique fault with horizontal dextral displacement. Subsequently, in August 2020, a deformation was recorded in the area of the south dome of the Purupuruni volcano, associated with a low magnitude seismicity ( $< M3$ ), the pattern of which would indicate that there are two strike-slip faults with dextral displacement. In April and May 2021, a significant number of earthquakes of  $M > 3.5$  were detected, observing patterns associated with subsidence, located in the north domes of the Purupuruni volcano and 10 km south of this volcano. This study documents the unrest of the fault complex in the surroundings of the Purupuruni and Casiri volcanoes, with little or no historical activity, probably of tectonic origin, related to the geodynamics of the Andes, although a possible contribution from deeper volcanic processes is not ruled out.

**Keywords:** crustal deformation, Pacollo fault, interferometric synthetic aperture radar, Purupuruni dome complex, Nevado Casiri.

### INTRODUCCIÓN

El complejo de domos Purupuruni y el volcán Ca-

siri están ubicados en el sur de Perú cerca de la frontera con Chile. Ambos volcanes pertenecen a la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes y son monitoreados in situ por el IGP con equipos sísmicos instalados en los alrededores. En este estudio, se aplica la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) haciendo uso de imágenes satelitales Sentinel-1 en órbitas ascendentes y descendentes para estudiar la deformación superficial en el entorno de los volcanes Casiri y Purupuruni, ambos con actividad registrada durante el Holoceno (Bromley et al., 2019). La falla más importante que atraviesa este ambiente volcánico es Pacollo, de tipo normal, que nace en el domo sur del Purupuruni. Esta falla tiene una distancia de 6.5 km, rumbo N 5° O y por la inclinación del escarpe, se asume que es una falla gravitacional de alto ángulo (Mendivil, 1965; Cruz et al., 2019, 2020).

## METODOLOGÍA Y DATOS

Para analizar y cuantificar la deformación de la

superficie se utilizaron imágenes de radar Sentinel-1A y 1B, que son captadas por los satélites de observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA). Los satélites tienen un radar de apertura sintética en banda C (5.405 GHz), cuya longitud de onda es de  $\sim 5.6$  cm. Las imágenes son de libre acceso y disponibilidad cada 6 días, siendo posible utilizarlas en órbita ascendente como descendente del satélite. La técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR), a diferencia de otras técnicas que se basan en la medición en varios puntos, produce un mapa espacial de la deformación del suelo (Bamler et al., 1998). El procesamiento se basa en la comparación de dos imágenes SAR (una maestra y una esclava), con el fin de identificar y cuantificar la deformación de la superficie para lo cual se compararon pares independientes de imágenes con diferencia temporal de 12 días (Figuras 1b-1i) y también se elaboraron series de tiempo aplicando la técnica SBAS a partir de 1326 interferogramas en órbita ascendente y 1378 en órbita descendente.

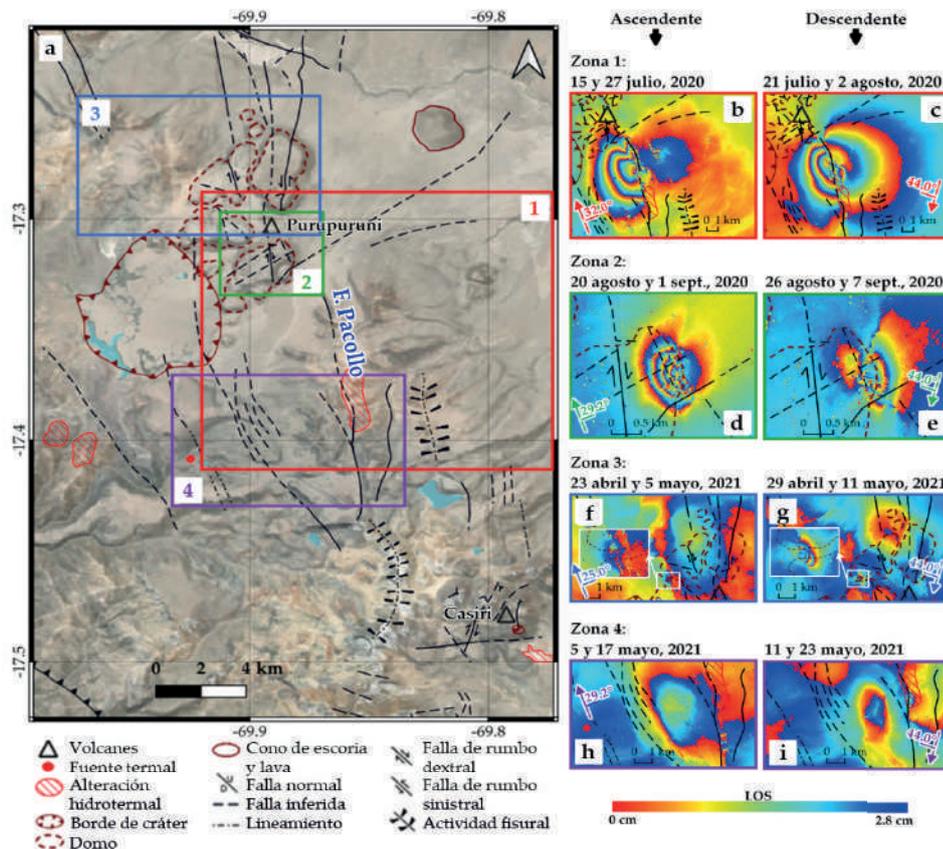


Figura 1. a) Cuatro zonas de deformación registradas en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri, mostrando las complejas estructuras volcánicas y tectónicas que conforman el entorno de ambos volcanes (Bromley et al., 2019; Díaz et al., 2000): (b-c) Interferogramas en órbita ascendente y descendente para Zona 1, (d-e) Zona 2, (f-g) Zona 3, (h-i) y Zona 4. Las fechas de las imágenes utilizadas para cada interferograma son mostradas en la figura.

## RESULTADOS

Entre los años 2020 y 2021 se han identificado cuatro procesos de deformación (Figura 1b):

(1) En julio de 2020 centrada a ~5 km al sureste de la falla Pacollo, con hundimiento del bloque oeste de ~12 cm en línea de vista del satélite (LOS) y deformación horizontal en dirección sureste del bloque este de ~6 cm (Figura 1b-c).

(2) En agosto de 2020 localizada en el sector este del domo sur del Purupuruni, asociado al desplazamiento de dos fallas de rumbo, con desplazamiento dextral del norte con dirección NE-SO cuyo bloque oeste se aleja ~11 cm en órbita ascendente, y la del sur con dirección NO-SE (posible prolongación de la falla Pacollo) con un acercamiento del bloque este de ~6 cm en órbita descendente (Figura 1d-e).

(3) En abril de 2021 ubicada entre los domos del norte del Purupuruni que corresponde a un hundimiento de ~2.5 cm (Figura 1f-g). Al suroeste de este hundimiento, también se observa una “pequeña zona” de deformación que ocupa un área de 1 km<sup>2</sup>, que correspondería al desplazamiento de dos fallas de rumbo con desplazamiento sinistral (ampliación en recuadro de borde blanco en Figura 1f-g), la del norte con dirección NE-SO con acercamiento de ~1 cm órbita ascendente y, la del sur con dirección NO-SE con alejamiento de ~4 cm en órbita descendente.

(4) En mayo de 2021 centrada a unos 10 km al sur del volcán Purupuruni y a ~15 km al noroeste del volcán Casiri, la cual también corresponde a un hundimiento de ~ 2.5 cm (Figura 1h-i).

En las zonas 3 y 4, con deformación asociada a un hundimiento, existe incertidumbre debido a que la fase interferométrica no completa un ciclo (escala de azul a rojo), pero se observa en varios interferogramas con distinta diferencia temporal entre imágenes y en ambas órbitas satelitales.

## ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD

La deformación registrada en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri, está ligada a la sismicidad que ocurre en la zona, por tal motivo, en los mapas de deformación con diferencia temporal de dos años (junio de 2019 y mayo de 2021, Figura 2a-b), se ha incluido la sismicidad del año 2020 de magnitud local mayor a 2.9, la cual fue obtenida de Velarde et al. (2020), y del año 2021 los sismos

de magnitud mayor a 3.5 publicada por el Centro Sismológico Nacional del IGP. Por otro lado, en la base de datos del Global Centroid Moment Tensor (Dziewonski et al., 1981) se tiene los mecanismos focales de los sismos ocurridos el 25 (Figura 2a, indicado con flecha roja) y 26 de julio de 2020 (Figura 2b, señalado con flecha roja), siendo ambos de tipo normal (Cruz et al., 2020) con ejes de tensión E-O y de presión N-S. Estos sismos superficiales intraplaca evidencian la posible reactivación de la falla Pacollo, cuyo bloque oeste habría soportado un hundimiento. Además, presenta una gran componente de desgarre, lo que indica un proceso de desplazamiento horizontal con posible dirección sureste (de rumbo), tratándose de deformación oblicua, es decir, hundimiento (en mayor proporción) y desplazamiento horizontal dextral (mínimo).

La sismicidad sigue el alineamiento de la falla Pacollo y las profundidades varían entre 9 y 19 km bajo la superficie (Figuras 2c y d). En abril de 2021, algunos mecanismos (Antayhua et al., 2021, Figura 2a, indicado con una flecha de color morado), estarían asociados a una falla de rumbo, la cual podría asociarse a la zona de deformación registrada en la zona 3 (Figura 1g-h). Las tres fallas de rumbo cartografiadas en los domos Purupuruni (Bromley et al., 2019), validarían las deformaciones de agosto de 2020 y abril de 2021 en el entorno del complejo de domos Purupuruni. Además, se observa una deformación positiva que abarca los volcanes Purupuruni y Casiri, tanto en órbita ascendente como en descendente (acercamiento en LOS, zona roja en Figuras 2a-b), la cual ocupa un área de aproximadamente 36 km de largo y 25 km de ancho. Esta información se podría correlacionar con el progresivo incremento y migración de la sismicidad hacia el Sur-Este en dirección del volcán Casiri, desde febrero de 2021 (Antayhua et al., 2021) y la cual podría estar relacionada con una actividad pre-eruptiva, sin embargo, dado que ambos volcanes no han presentado actividad reciente, y en la actualidad no registran actividad volcánica alguna, como emisión de fumarolas, deformación de ambos volcanes, sismos de tipo LP, etc., no se podría afirmar tal hipótesis.

## CONCLUSIONES

La deformación detectada mediante la técnica de interferometría diferencial de radar asociada a la crisis sísmica detectada en julio de 2020, puede ser interpretada como un hundimiento del bloque

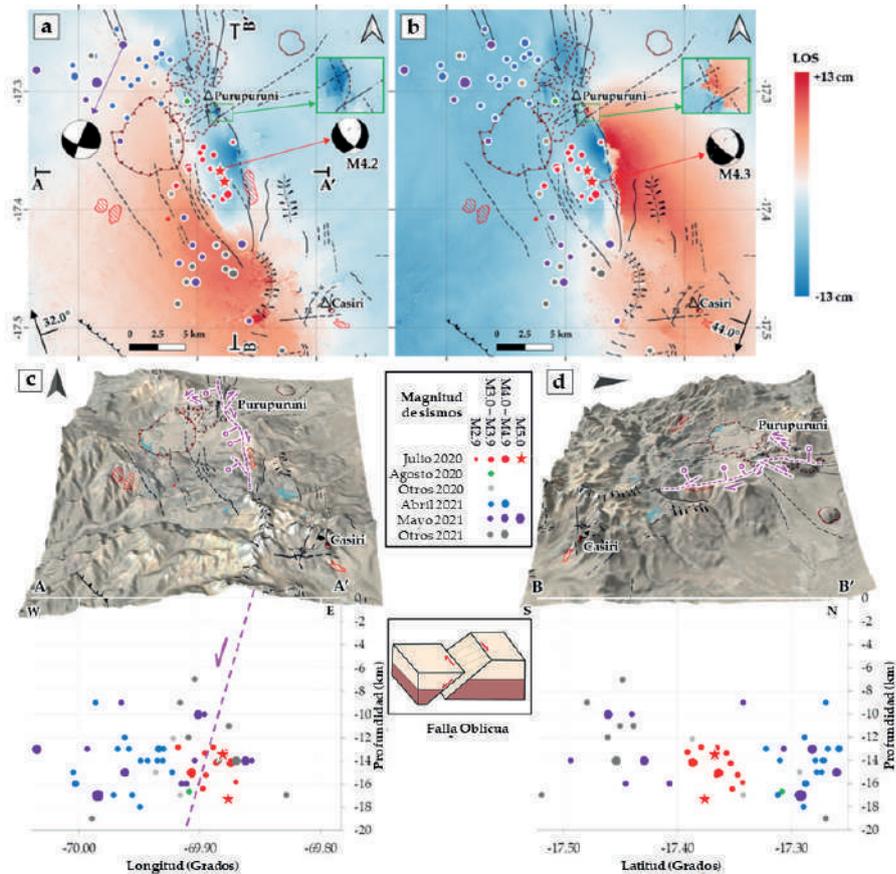


Figura 2. a) Desenrollado del interferograma en órbita ascendente con imágenes de radar del 15 junio de 2019 al 23 mayo de 2021, b) en órbita descendente con imágenes del 9 junio de 2019 al 17 mayo de 2021; c-d) visualización 3D y perfil de sismos en profundidad A-A' (W-E) y B-B' (S-N), respectivamente. Los sismos son representados con círculos, con el tamaño y color variable según la magnitud y ocurrencia de los mismos respectivamente. Los círculos de color gris claro representan los sismos que ocurrieron en el año 2020, pero en una fecha distinta a los periodos específicos de análisis de deformación (julio y agosto de 2020). El mismo principio se aplica con los círculos gris oscuro registrados en 2021.

oeste de la falla Pacollo, que superaría los 10 cm. Por otro lado, el desplazamiento del bloque este de la falla Pacollo, presenta desplazamientos horizontales de ~6 cm, probablemente en dirección sur-sureste, coherente con los mecanismos focales de una falla normal oblicua con desplazamiento horizontal dextral. Posterior a la crisis sísmica de julio 2020 se continuó observando deformación superficial de la corteza. En el mes de agosto de 2020, se registró una zona de deformación en el domo sur del volcán Purupuruni, cuyo patrón indicaría que se trató del desplazamiento de dos fallas de rumbo con desplazamiento dextral, la primera ubicada al norte de dirección NE-SO cuyo bloque este se desplaza en dirección noreste, y la segunda al sur con dirección NO-SE (posible prolongación de la falla Pacollo), que presenta un patrón muy similar al ocurrido en julio de 2020, con un desplazamiento del bloque este hacia el sureste. Asi-

mismo, en abril y mayo de 2021, se ha registrado patrones asociados a un hundimiento (asociados al desplazamiento negativo del bloque oeste de la falla Pacollo), localizados en los domos norte del volcán Purupuruni y a 10 km al sur de este volcán, respectivamente. En abril de 2021 también se observó una zona de deformación que comprende un área de ~1 km<sup>2</sup> donde existirían dos fallas de rumbo con desplazamiento sinistral. Además, el análisis de interferogramas con diferencia temporal de dos años, muestra una deformación positiva del sector sur del complejo volcánico Purupuruni hasta el sur del volcán Casiri, lo cual podría asociarse a una posible contribución de procesos volcánicos a mayor profundidad.

#### AGRADECIMIENTOS:

Agradecemos al Dr. Maurizio Battaglia por su

contribución en el modelamiento de los datos y al equipo de sismología del Instituto Geofísico del Perú por proporcionar la estadística de la sismicidad y localización sísmica del área de estudio de los sismos de magnitud mayor a 2.9 del año 2020.

**Contribuciones técnicas y científicas:** Este estudio ha permitido documentar actividad tectónica reciente, en zona de fallas que no han presentado actividad en los últimos años. Esta investigación permite tener una mejor comprensión de lo que sucede en el entorno de los volcanes Casiri y Purupuruni y es usada como material de apoyo en la gestión del riesgo volcánico en el Perú y para la adopción de estrategias y medidas de prevención en beneficio de la población vulnerable.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Antayhua, Y., Velarde, L., Vargas, K., Tavera, H., Villegas, J. (2021) Actividad sísmica en el entorno de la falla Pacollo y volcanes Purupuruni - Casiri (2020 – 2021). Distrito de Tarata – Región Tacna. Informe técnico n° 010- 2021/IGP. repositorio IGP: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4944>.

Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 14, R1–R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>.

Bromley G., Thouret J.C., Schimmelpfennig I., Mariño J., Valdivia D., Rademaker K., Vivanco S., ASTER Team Aumaitre G., Bourles D., Keddadouche K. (2019). In situ cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>14</sup>C and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW. Peru. *Bulletin of Volcanology*, 2019; 81:64. <https://doi.org/10.1007/500445-019-1325-6>.

Cruz, V., Pajuelo, D., Velarde, Y., Flores, R., & Yupa, G. (2019). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico en la zona de Paucarani, región Tacna. IN-GEMMET. IN-GEMMET, Boletín serie B: Geología Económica, 63, 209p. 4 mapas

Cruz, V.; Flores, R. & Velarde, Y. (2020). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, región Tacna, IN-GEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 69, 315p., 4mapas.

Díaz, G., Montoya, A. & Milla, D. (2000). Mapa Geológico del cuadrángulo de Maure. Escala 1/50,000. Versión digital. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Universidad Nacional de Ingeniería.

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou & J. H. Woodhouse (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852. doi:10.1029/JB086iB04p02825

Mendivil, S. (1965) Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y). Comisión Carta

Geológica Nacional, Boletín, 10, 99 p., 2 mapas.

Velarde L., Tavera H., Vargas K., Villegas J.C. (2020). Análisis de la crisis sísmica ocurrida en julio de 2020 en el distrito de Tarata (región Tacna). Informe técnico n° 003- 2020/IGP. repositorio IGP: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4832>