



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Instituto
Geofísico
del Perú

DEFORMACIÓN SUPERFICIAL Y SECUENCIA SÍSMICA EN EL ENTORNO DE LOS VOLCANES PURUPURUNI Y CASIRI (Región Tacna)

Informe Técnico N°026-2022/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Agosto, 2022

Instituto Geofísico del Perú

Presidente ejecutivo: Hernando Tavera

Director científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Deformación superficial y secuencia sísmica en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri (Región Tacna)

Autores

Katherine Vargas

Juan Villegas

Marco Rivera

Hernando Tavera

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo

Teléfono: 51-1-3172300

**DEFORMACIÓN SUPERFICIAL Y SECUENCIA SÍSMICA EN EL
ENTORNO DE LOS VOLCANES PURUPURUNI Y CASIRI
(Región Tacna)**

Lima – Perú
Agosto, 2022

RESUMEN

Desde mayo de 2020 hasta fines de 2021, en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri se ocurrieron episodios de enjambres de sismicidad superficial con magnitudes menores a M5.0. Las interferogramas de apertura sintética SAR y la cuantificación del desplazamiento de la superficie con series de tiempo DInSAR muestran que en julio del 2020 se produjo el hundimiento de hasta 11 cm del lado oeste de la falla Pacollo y un desplazamiento horizontal en dirección SSE de aproximadamente 5 cm. Este patrón de deformación es coherente con los mecanismos focales obtenidos para los sismos de mayor magnitud. Ambos sugieren la reactivación de la falla Pacollo. En agosto de 2022, se registró la deformación del domo sur del volcán Purupuruni, donde el bloque oeste de la falla Pacollo se aleja del satélite ~11 cm en órbita ascendente (dirección noreste) y el lado este se acerca ~6 cm en órbita descendente (dirección sur), indicando el desplazamiento lateral de falla de rumbo sinistral. Luego, en abril y mayo de 2021 el análisis de imágenes DInSAR muestra patrones de hundimiento menores a 3 cm en los domos norte del Purupuruni y en un área a 10 km al sur de dicho volcán. Finalmente, el análisis de las series de tiempo DInSAR para el periodo mayo de 2019 a mayo de 2021 muestra, la deformación en un área de ~36 x 25 km abarcando el sector sur del volcán Purupuruni hasta el sur del volcán Casiri, coherente con las observaciones GNSS de abril a noviembre del 2021. La deformación observada en el área del volcán Purupuruni está asociada a la reactivación de la falla Pacollo en el entorno de los volcanes Casiri y Purupuruni.

INDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Contexto geológico-estructural

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

2.1.- Método DInSAR

2.2.- Mediciones geodésicas

2.3.- Modelamiento de la fuente de deformación

3.- RESULTADOS

3.1.- Volcán Purupuruni y Casiri

3.2.- Variación temporal de la deformación

3.3.- Deformación superficial – GNSS temporales

3.4.- Modelamiento de la fuente de deformación

4.- DISCUSIÓN

4.1.- Deformación y sismicidad

4.2.- Evolución temporal de la deformación

4.3.- Deformación DInSAR y GNSS

CONCLUSIONES

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

Los volcanes Purupuruni y Casiri se ubican en la región Tacna próximos a la frontera con Chile, a aproximadamente 25 km al noreste y este de la localidad de Tarata (Figura 1), siendo parte del Área de Conservación Regional Vilacota Maure. Ambos volcanes activos pertenecen a la denominada Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes y su dinámica está relacionada por la convergencia de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

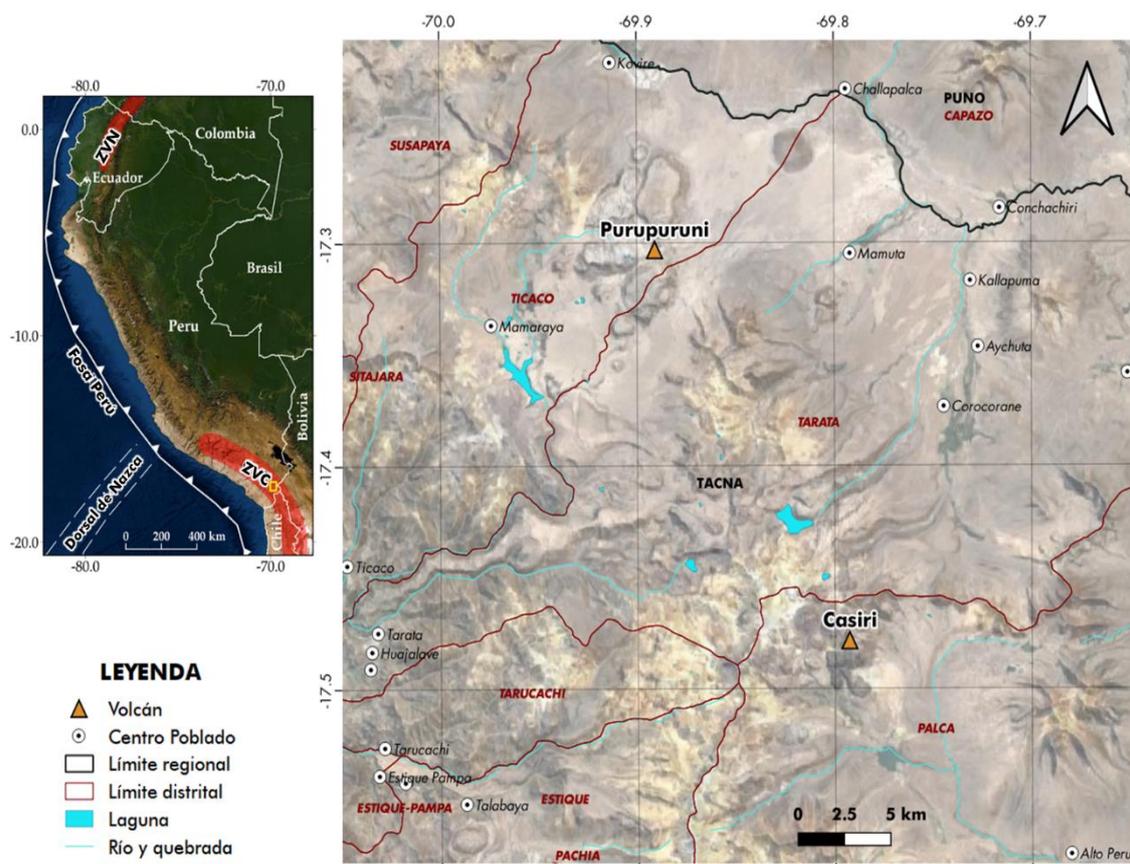


Figura 1.- Mapa de ubicación de los volcanes Purupuruni y Casiri y poblados aledaños. En el recuadro superior izquierdo, la zona de estudio señalado en un cuadro amarillo, ubicado al sur del Perú, que corresponde al sector norte de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

Durante los días 25 y 26 de julio de 2020, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) reportó la ocurrencia de 7 sismos con magnitudes entre M3.6 y M4.1, y con epicentros ubicados entre 15 y 17 km al NE del distrito de Tarata (Tacna), y a 9 km al suroeste del volcán Purupuruni. Asimismo, se

registraron señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP), probablemente asociadas a la actividad hidrotermal del volcán Purupuruni (Velarde et al., 2020). Durante el año 2021, la actividad sísmica presentó magnitudes entre M3.6 y M5.0, con migración de la sismicidad de sur a norte. El análisis de los mecanismos focales para sismos de mayor magnitud, indican un proceso de deformación de tipo extensional; es decir, de tipo normal, sugiriendo la reactivación temporal de la falla Pacollo y lineamientos menores, circundantes a los volcanes Purupuruni y Casiri (Antayhua et al., 2021).

La deformación superficial en volcanes es uno de los parámetros más importantes a considerar en el monitoreo y vigilancia para el pronóstico de erupciones. Detectar el ascenso y migración del magma y su propagación en la superficie de la Tierra es crucial para el pronóstico de erupciones y evaluación de riesgos (Battaglia et al., 2019). La deformación y/o desplazamientos superficiales asociados a esos procesos, generalmente son del orden de milímetros a centímetros, por lo cual, son medidos y cuantificados con instrumentos de alta precisión, como GPS, inclinómetros o técnicas satelitales DInSAR, etc.

En este estudio se aplica la técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) y el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) para analizar la deformación de la corteza superficial en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri. Es decir, mediante la construcción de interferogramas y series temporales DInSAR y elaboración modelos de la fuente de deformación a partir de los desplazamientos, y su correlación con la sismicidad suscitada en los años 2020 y 2021.

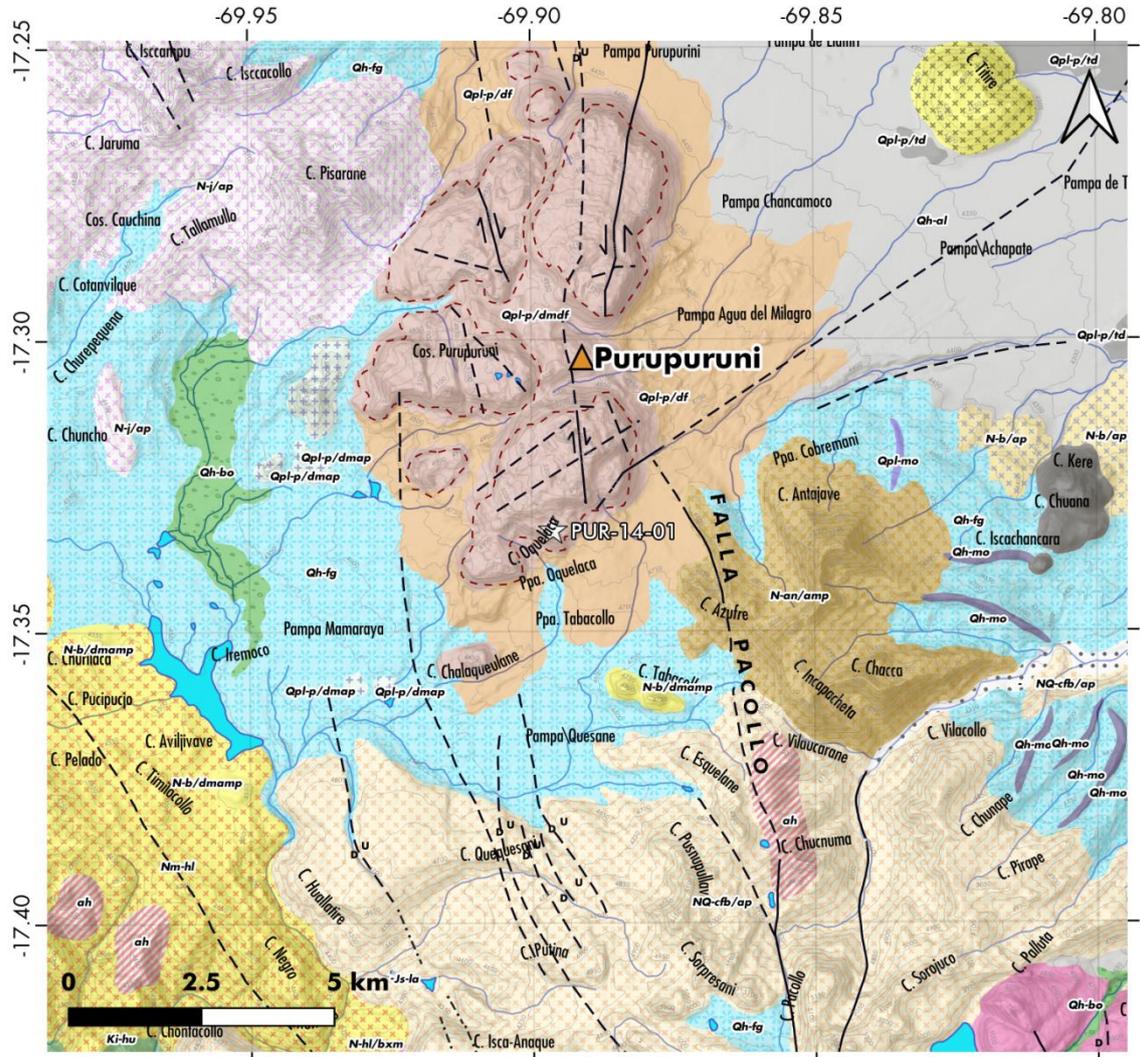
1.1.- Contexto geológico-estructural

La sismicidad y deformación cortical se desarrolló entre los volcanes Purupuruni y Casiri, siendo sus características las siguientes:

Volcán Purupuruni: El volcán Purupuruni es un complejo volcánico constituido por siete domos de lava de composición dacítica (66 wt. % SiO_2) y domos coladas (domos de lava aplanados y alargados) que se encuentran situados en el sector NE de una gran depresión (probable antigua caldera) rodeada de volcanes extintos del Pleistoceno (Figura 2). Los domos del Purupuruni se extienden en dirección NNE con la excepción del domo medio, orientado en dirección E-O y alturas de hasta 300 m por encima de la altiplanicie. Los domos de lava cubren radios que varían entre 700 y 1000 metros, estando presentes de formas aisladas e intactas por la erosión. En la base de los domos se distinguen la presencia de acumulaciones de ceniza retrabajada de color gris claro.

Según Mendivil (1965), la edad radiométrica del volcán Purupuruni es de alrededor de 0.1 Ma, y el hecho de su emplazamiento en valles de origen glaciar, labrados en rocas del volcánico Barroso indica que el límite inferior de su edad no debe ser más antiguo que el Pleistoceno (OIEA, 1990). Por su parte, Bromley et al. (2019) realizó la datación de una muestra de roca del domo sur por el método cosmogénico ^{36}Cl arrojando una edad de 5.3 ± 1.1 ka (Figura 2, estrella blanca, muestra PUR-14-01), sugiriendo que su emplazamiento ocurrió en el Holoceno. Respecto al contexto estructural, los domos de lava son atravesados por tres poblaciones de fallas de rumbo $\text{N}05^\circ \text{E}$, $\text{N}85^\circ \text{E}$ y $\text{N}175^\circ \text{E}$. La falla strike-slip más reciente de rumbo $\text{N}05^\circ \text{E}$ atraviesa el domo colada más voluminoso (Bromley et al., 2019).

Volcán Casiri: El volcán Casiri corresponde a un estratovolcán constituido por flujos de lava de composición andesítica (60 – 61 wt % SiO_2) y en cuya cima presenta una caldera en forma de herradura, en medio del cual se halla un domo de lava reciente de 250 m de diámetro y ~100 m de alto. Este domo, de morfología fresca se caracteriza por presentar crestas radiales. El Casiri yace al sureste de una cadena de volcanes más antiguos de edad Pleistocena (Figura 3), orientados en dirección $\text{N}105^\circ$, y de 5 km de largo.



LEYENDA



Figura 2.- Estructuras, edificios y depósitos existentes en inmediaciones del volcán Purupuruni (Modificado de Díaz et al., 2000 y Bromley et al., 2019).

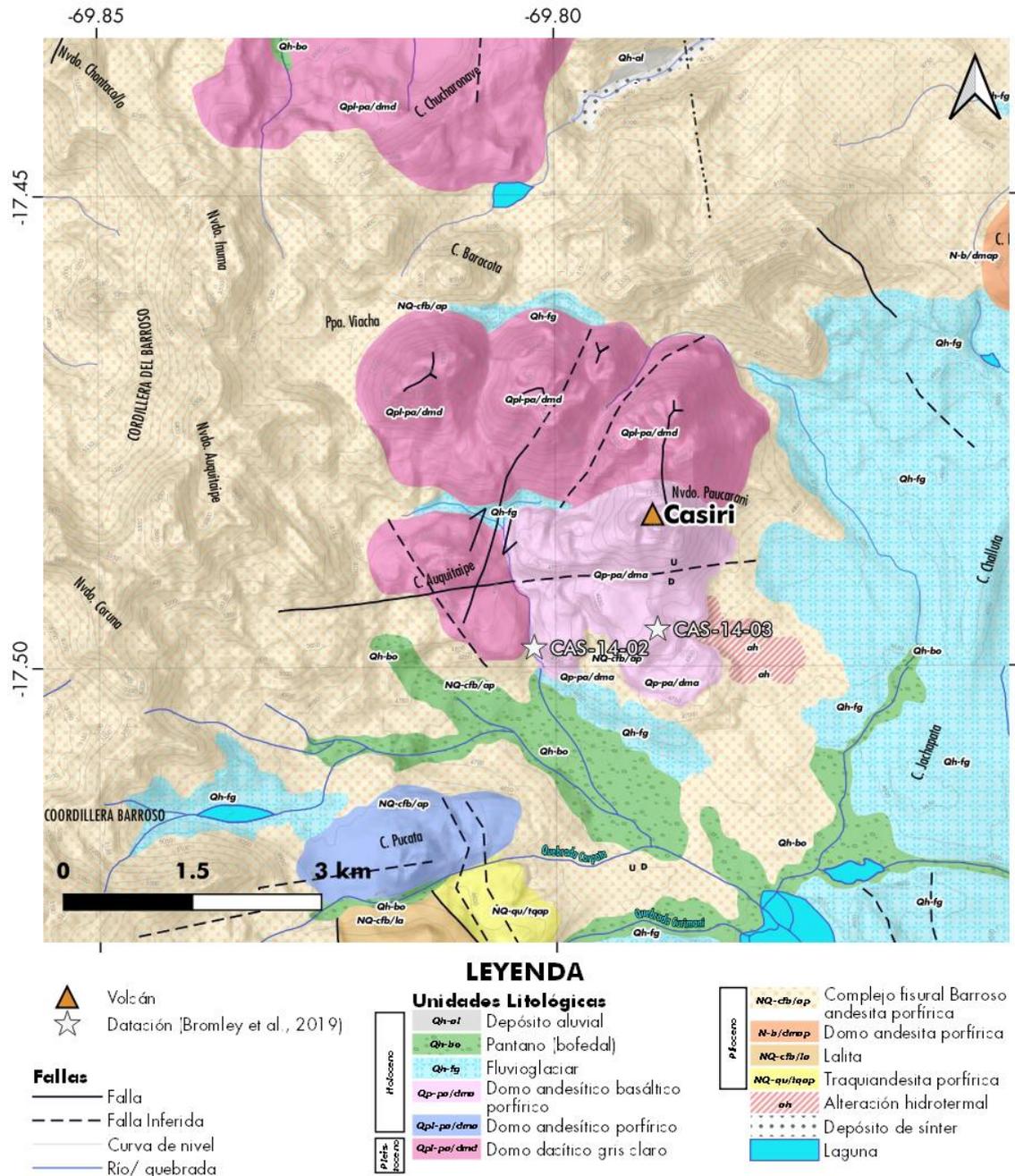


Figura 3.- Estructuras, edificios y depósitos del Nevado Casiri y alrededores (Modificado de Díaz et al., 2000 y Bromley et al., 2019).

Al pie del flanco SO del Casiri se distinguen dos amplias coladas de lava bien preservadas de 50 a 100 m de altura que descienden de la cima (~5260 m s.n.m.) y alcanzan distancias de hasta 2 km en dirección oeste y sur. Las lavas forman una serie de lóbulos de flujo superpuestos de hasta 500 m de ancho y 50 m de altura, y cubren un área de ~3 km². El flujo de lava que se prolonga más al oeste termina sobre los 4730 m.s.n.m.; mientras que, el flujo que se prolonga más al sur alcanza 2 km de largo. Este último es estratigráficamente más antiguo y se emplazó en un nivel ligeramente más alto, 4760 m s.n.m. Dos lavas que fluyeron hacia el sur fueron datadas con el método cosmogénico ³⁶Cl arrojando edades de 2.6 ± 0.4 ka y 6.0 ± 0.9 ka (Bromley et al., 2019), ver estrellas blancas (CAS-14-02 y CAS-14-03) en la Figura 3. Es decir, estas lavas corresponden al Holoceno o post-glacial (De Silva et al., 1991). Los tramos más bajos de los flujos de lava del sur están cubiertos por cenizas retrabajadas.

Asimismo, al pie del flanco sur del volcán Casiri se distingue la presencia de una gruesa capa de depósitos piroclásticos probablemente ligada a la actividad explosiva de este volcán producida en el Holoceno. El volcán Casiri ocupa un bajo estructural — probablemente un graben — limitado por fallas N150°E (Bromley et al., 2019).

Fallas activas: En las inmediaciones de los conos volcánicos del Barroso y Purupuruni, las fallas tectónicas son de corta extensión y de tipo tensional, siendo la más importante la falla Pacollo, de tipo normal y ubicada en la naciente del río Chaquiri, entre los cerros Pacollo y Sorpresani (Figura 2). Esta falla de rumbo N 5° O tiene una longitud de ~6.5 km y a partir del Cerro Chucnuma cambia de rumbo a N 30° O hasta perderse debajo de los depósitos fluvioglaciares en la pampa de Tabacollo. La falla se caracteriza por presentar una escarpa pronunciada en el bloque oriental, que corta capas del volcánico Barroso. Tomando en cuenta la posición de los depósitos volcánicos y la inclinación de la escarpa, se infiere que se trata de una falla

normal de alto ángulo con muy poco desplazamiento vertical. Aparentemente el bloque occidental ha descendido con respecto al oriental.

Además de la falla Pacollo, existen otras de corta longitud y desplazamiento en los cerros Caracollo, Chillipiña, Purupuruni y Pallallamaco. Estas fallas presentan rumbos que varían entre N 5° y 12° O y planos de falla casi verticales. Asimismo, están presentes varios alineamientos orientados en dirección NNO-SSE y N-S, todos ubicados predominante entre el volcán Casiri y volcán Purupuruni, coincidiendo con la orientación de la falla Pacollo (Cruz et al., 2019; Cruz et al., 2020)

2.- DATOS Y METODOLOGÍA

Para el análisis y cuantificación de la deformación en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri se han empleado las técnicas de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) y el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).

2.1.- Método DInSAR

Datos de Imágenes de Radar: Se emplearon imágenes de radar Sentinel-1 recolectadas por los satélites de observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA). Los satélites poseen un radar de apertura sintética en 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 días, siendo posible utilizarlas tanto en órbita ascendente como en órbita descendente del satélite. Para el estudio, se emplearon 101 imágenes para el periodo del 16 de mayo de 2019 al 23 de mayo de 2021.

Procesamiento de imágenes: La técnica DInSAR, a diferencia de otras que dependen de la medición en diversos puntos, produce un mapa espacial de la deformación del suelo. El procesamiento se basa en la comparación de dos imágenes SAR tomadas a diferente tiempo. Es importante mencionar que, en órbita ascendente, de sur a norte, el satélite capta la imagen desde el sector oeste; mientras que, en órbita descendente, de norte a sur, el satélite capta la imagen desde el sector este. Para el procesamiento de los interferogramas y la identificación de las zonas de deformación se utilizó el software ISCE (Rosen et al., 2012). Para la elaboración de los interferogramas con resolución estándar utilizados para la obtención de series de tiempo se ha empleado el software GMTSAR (Sandwell et al., 2011) que se basa en 3 procesos principales:

- El preproceso basado en cada fuente de datos satelital SAR (Sentinel-1), convierte el formato nativo y la información orbital a un formato genérico.
- El proceso DInSAR para enfocar y alinear pilas de imágenes, así como mapear la topografía en fase y formar el interferograma complejo.
- El posproceso que consiste en un filtrado del interferograma, producto de fase y coherencia, seguido de una conversión a deformación de línea de visión (desenrollado de fase) y luego la codificación geográfica.

Para la obtención de series de tiempo DInSAR se utilizó la técnica Small Baseline Subsets (SBAS), la cual realiza la interferencia de múltiples pares de imágenes y la selección de puntos de alta coherencia para recuperar la serie de tiempo de deformación (Berardino et al., 2002). A través de esta técnica es posible detectar deformaciones milimétricas. En este estudio se construyeron pares interferométricos sin discriminar el intervalo de tiempo ni la línea base perpendicular, es decir, se procesó pares interferométricos combinando todas las imágenes disponibles, y de esta manera se elaboraron un total de 1378 interferogramas en órbita descendente, y 1326 en órbita ascendente.

Debido al gran número de interferogramas necesarios para la elaboración de la serie de tiempo y al costo computacional, se aplicó un algoritmo que recorta la imagen de radar luego del preproceso. De esta manera, se recortó la imagen enfocada en la zona de estudio, abarcando el 19% del área total de la imagen de radar

Finalmente, a las series de tiempo se ha aplicado la corrección atmosférica a fin de reducir el efecto de estratificación atmosférica que añade una componente estacional a los resultados e indica una falsa

deformación por la correlación fase-topografía, usual en ambientes volcánicos, debido a la abrupta diferencia topográfica. Para ello se utilizó el algoritmo desarrollado por Tymofyeyeva y Fialko (2015) implementado en el software GMTSAR.

2.2.- Mediciones geodésicas

En la zona de estudio se han realizado cuatro campañas de mediciones GNSS en puntos de control geodésicos instalados en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri (Figura 4). La primera medida se realizó en los puntos CA01 y CABA en abril de 2019, posteriormente se realizaron campañas temporales en los meses de abril (2da campaña), julio (3ra campaña) y noviembre de 2021 (4ta campaña) en las cuales se instalaron 10 puntos de control adicionales. En total se han realizado reiteraciones (más de dos medidas) en seis puntos en los alrededores del volcán Purupuruni y en seis puntos cercanos al volcán Casiri. Para el procesamiento de los datos se ha utilizado el software GAMIT/GLOBK v.10.71 (Herring et al., 2010).

2.3.- Modelamiento de la fuente de deformación

Los modelos de deformación en volcanes se basan en el principio de causa y efecto: a partir de un efecto observado (como la deformación de la superficie) se puede inferir una o más causas que generan dicha deformación; por ejemplo, la deformación causada por la intrusión de magma. El modelado considera información sobre cómo se deforman las rocas para lograr cuantificar la relación entre la causa y efecto (USGS, 2020). 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 cerca de fallas y volcanes activos. Esta herramienta está enfocada en los modelos analíticos de deformación de la corteza, verificados con modelos numéricos.

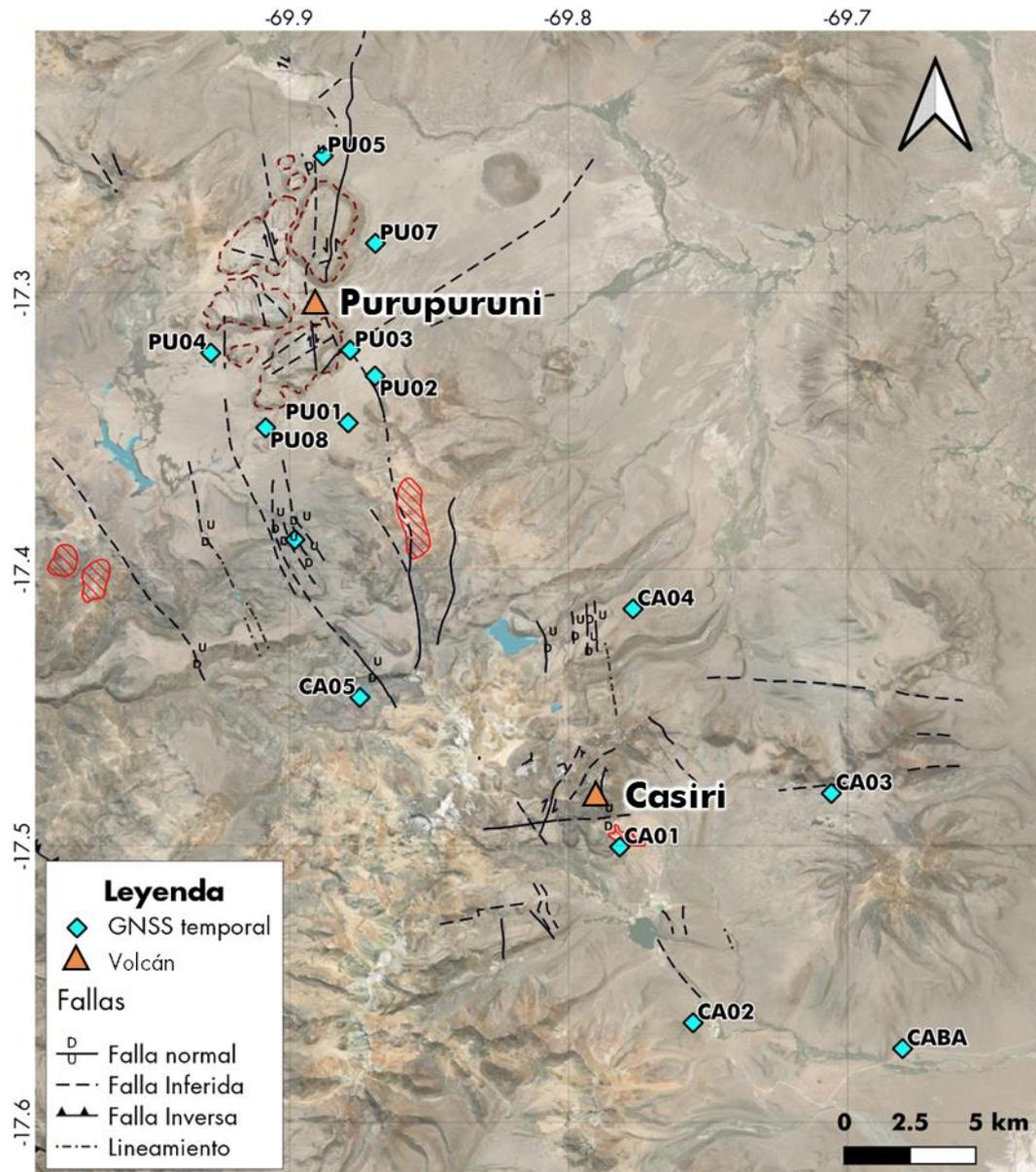


Figura 4.- Ubicación de los puntos de medición GNSS en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri.

3.- RESULTADOS

3.1.- Volcanes Purupuruni y Casiri

En el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri existen fallas activas que en los últimos 4 años habrían generado deformación en superficie. Entre los años 2020 y 2021 se han identificado cuatro zonas de deformación en el entorno de ambos volcanes (Figura 5) y los resultados obtenidos con el procesamiento de datos con la técnica DInSAR son descritos a continuación:

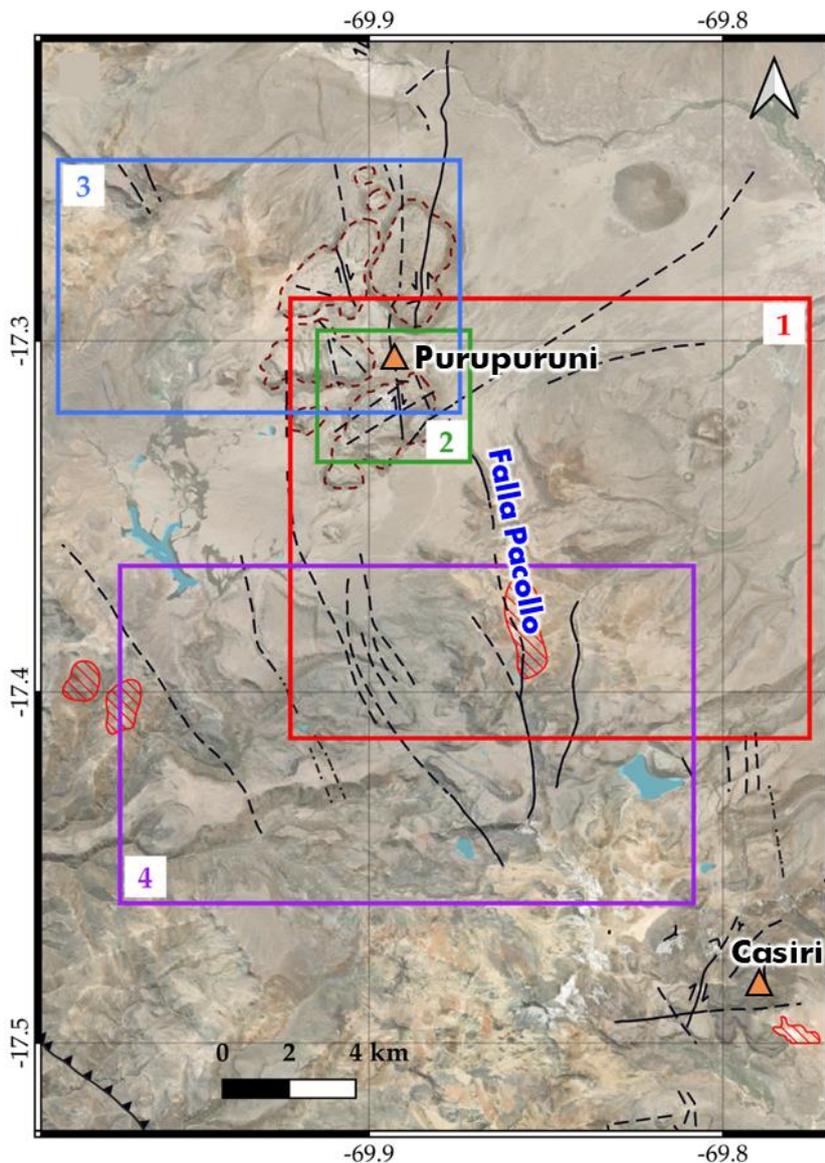


Figura 5.- a) Ubicación de las cuatro zonas de deformación registradas en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri: Zona 1, julio 2020; Zona 2, agosto 2020; Zona 3, abril 2021, y Zona 4, mayo 2021

Deformación superficial en julio 2020: En la segunda quincena de julio de 2020, en el área de estudio ocurrieron sismos con magnitudes $M < 5.0$ y epicentros ubicados al sur del complejo de domos Purupuruni, cerca de la falla Pacollo (Velarde et al., 2020), Figura 6e. El análisis con el método DInSAR permitió identificar la presencia de deformaciones en superficie con las siguientes características:

- a). En los interferogramas del 15 y 27 de julio de 2020 (Figura 6a) y del 21 de julio y 2 de agosto de 2020 (Figura 6c), ambos en órbita ascendente, se observa un alejamiento en línea de vista del satélite (LOS) del lado oeste de la falla Pacollo, con valores máximos de 11 cm. En los interferogramas de las mismas fechas, pero en órbita descendente (Figura 6b y 6d) también presentan un alejamiento en LOS de ~ 9 cm del lado oeste de la falla Pacollo. Los resultados obtenidos para ambas orbitas, es consistente y se puede observar el desarrollo de un desplazamiento vertical, es decir un hundimiento de dicho lado de la falla.
- b). El desplazamiento del lado este de la falla Pacollo, presenta un alejamiento en LOS de ~ 2 cm en la órbita ascendente (Figuras 6a y 6c); mientras que, un acercamiento en LOS con valores máximos de 5 cm en la órbita descendente (Figuras 6b y 6d). Estos desplazamientos opuestos indicarían que se trata de un desplazamiento horizontal cuyo sentido puede variar entre el este, sureste y sur, pero, considerando el rumbo de la falla Pacollo, se podría inferir que el desplazamiento del bloque este se produjo en dirección sur-sureste.

La sismicidad superficial ocurrida durante este periodo se alineo en dirección de la falla Pacollo (Velarde et al., 2020), siendo coherente con la deformación superficial observada.

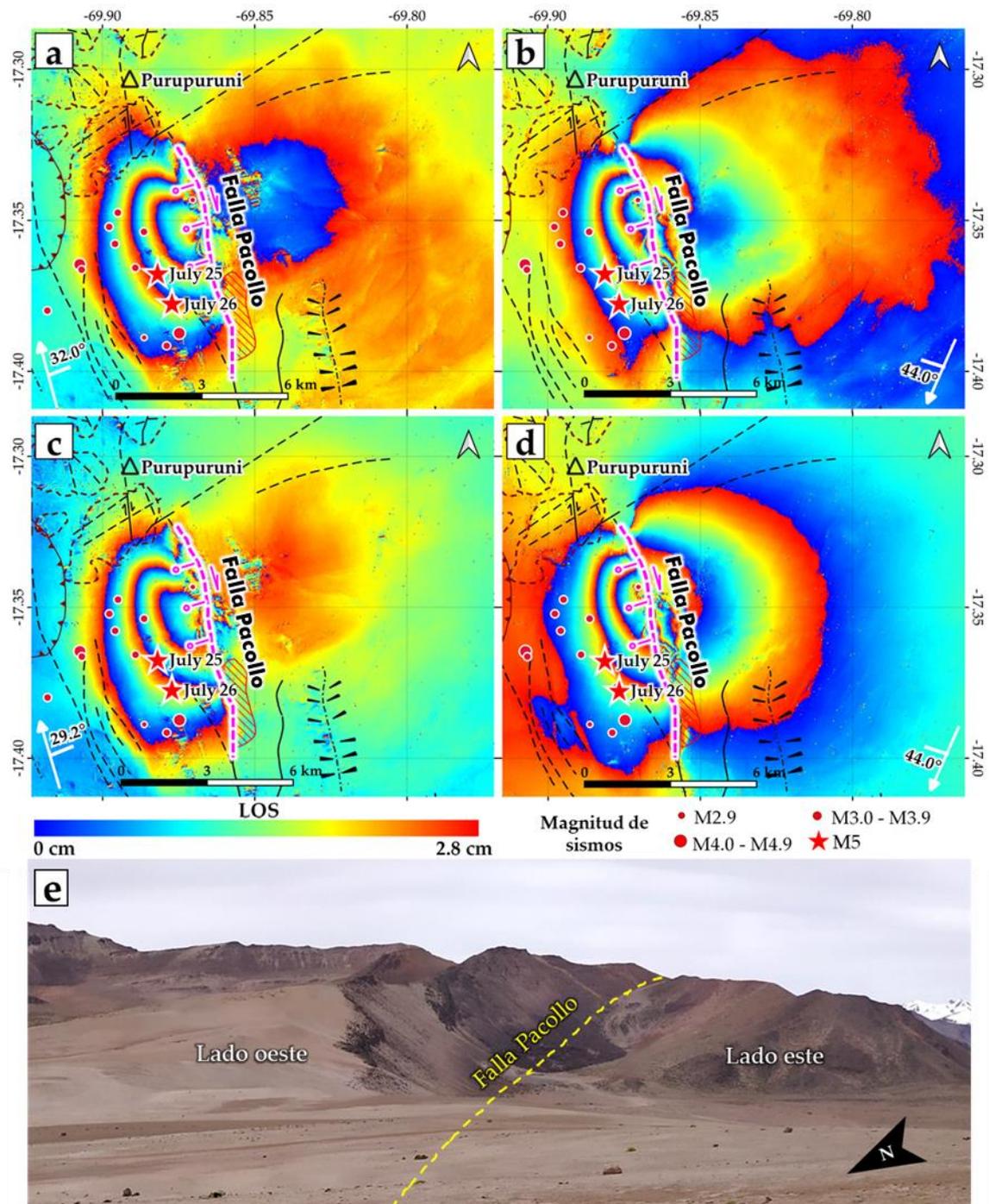


Figura 6.- Interferogramas obtenidos a través del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 para los días: a) 15 y 27 de julio 2020 en órbita ascendente y b) misma fecha en descendente; c) 21 de julio y 02 de agosto de 2020 en órbita ascendente, d) misma fecha en órbita descendente, e) fotografía del sector norte de la falla Pacollo tomada desde el domo sur del Purupuruni. Los sismos son representados con círculos de color rojo y aquellos de magnitud M5, con estrellas.

Deformación superficial en agosto de 2020: A fines de agosto e inicios de septiembre de 2020, la actividad sísmica fue continua (Antayhua et al., 2021) con magnitudes menores a M3.0 (Figura 7). En los interferogramas obtenidos para los días del 20 de agosto y 01 de septiembre de 2020 (Figura 7a) y del 26 de agosto y 07 de septiembre de 2020 (Figura 7c), ambos en órbita ascendente, se observa un alejamiento en LOS en el sector oeste, del orden de 11 cm; mientras que, el sector este presenta un alejamiento en LOS de ~3 cm. Por otro lado, los interferogramas para las mismas fechas, obtenidos en órbita descendente (Figuras 7b y 7d) muestran un acercamiento en LOS del orden de 2 cm en el sector oeste y, un acercamiento en LOS con valores máximos de 6 cm del sector este, lo que evidenciaría la presencia de una falla en dirección NE-SO (líneas discontinuas de color magenta en Figuras 7a-7d).

De acuerdo a la Figura 7, se infiere que la deformación superficial fue producida por una falla strike-slip cuyo lado oeste se aleja ~11 cm en órbita ascendente y el lado este se acerca ~6 cm en órbita descendente; es decir, se ha desarrollado un posible desplazamiento lateral de falla de rumbo sinistral (bloque oeste hacia el noreste y bloque este hacia el sur).

Deformación superficial en abril y mayo de 2021: El patrón de deformación observado entre el 23 de abril y 11 de mayo de 2021 se produjo en los domos ubicados al norte del volcán Purupuruni. En los interferogramas obtenidos se observa un alejamiento en la dirección LOS observado en ambas órbitas del satélite, lo cual se asocia a un hundimiento (Figura 8a-8d). También se observa que la fase interferométrica no completa un ciclo, por lo cual este hundimiento no supera los 2.8 cm.

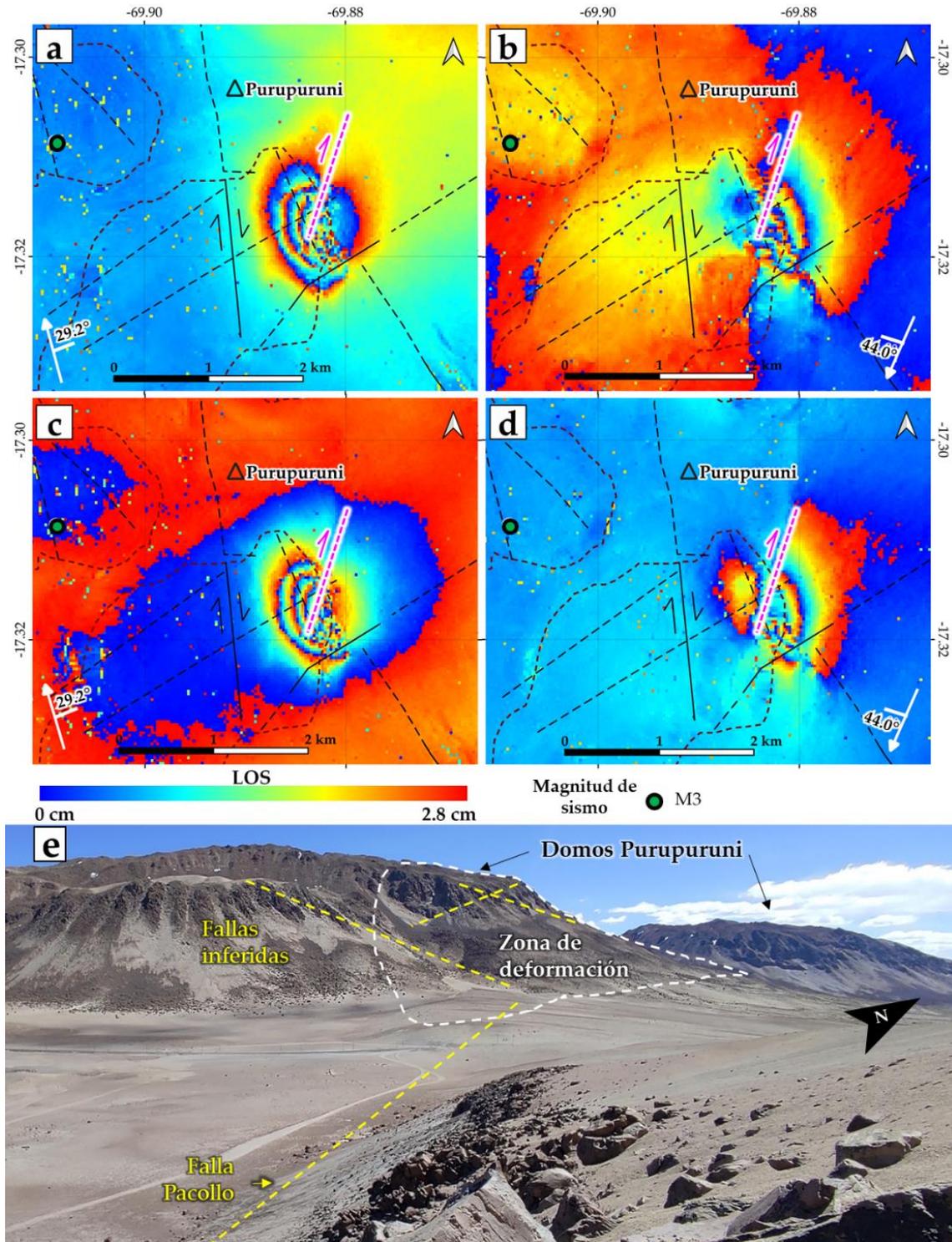


Figura 7.- Interferogramas obtenidos a partir del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 para los días: a) 20 de agosto y 01 de septiembre de 2020 en órbita ascendente y b) misma fecha en órbita descendente; c) 26 de agosto y 07 de septiembre de 2020 en órbita ascendente, d) misma fecha en órbita descendente. El epicentro del sismo del 22 de agosto de 2020 (M3.0) es representado como un círculo de color verde; e) fotografía de los domos Purupuruni captada desde la falla Pacollo. Las líneas discontinuas magenta corresponden al trazo de la falla que se infiere generó la deformación.

En la dirección suroeste de este hundimiento, se observa la presencia de una pequeña zona de deformación que ocupa alrededor de 1 km² (la zona se observa ampliada en las Figuras 8a-d en un recuadro de borde blanco) que describiría la existencia de una falla de tipo strike-slip (Figura 8) con acercamiento de ~1 cm del lado oeste en órbita ascendente y, un alejamiento de ~4 cm del lado este en órbita descendente (posible desplazamiento lateral del bloque oeste en dirección sur y bloque este en dirección norte).

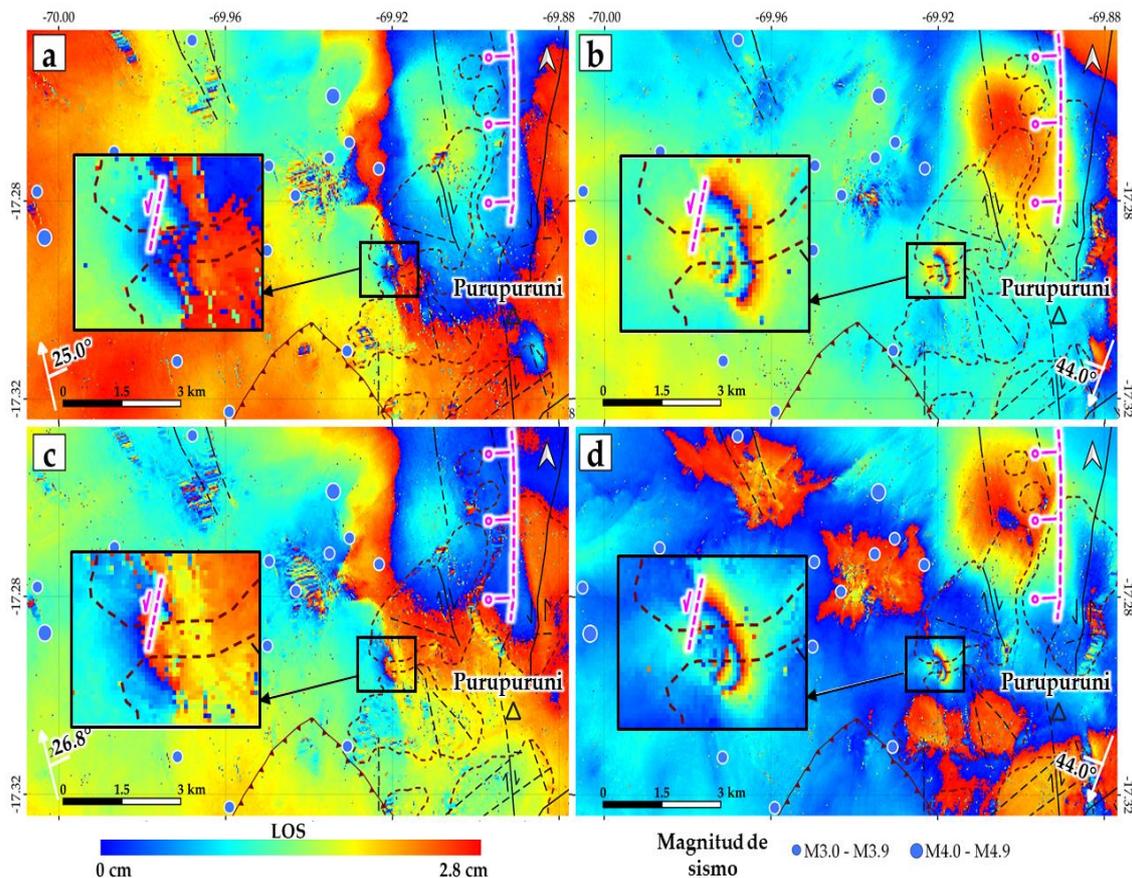


Figura 8.- Interferogramas elaborados a partir del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 para los días: a) 23 de abril y 05 de mayo de 2021 en órbita ascendente y b) misma fecha en órbita descendente, c) 29 de abril y 11 de mayo de 2021 en órbita ascendente, d) misma fecha en órbita descendente. Los sismos de magnitud $M > 3.0$ son mostrados como círculos de color azul. Las líneas discontinuas magenta corresponden al trazo de la falla que se infiere generó la deformación.

Deformación superficial en mayo de 2021: El patrón de deformación observado entre el 05 y 23 de mayo de 2021 se centra a aproximadamente 10 km al sur del volcán Purupuruni y a ~15 km al noroeste del volcán Casiri. En los interferogramas, se observa un patrón de deformación que también corresponde a un alejamiento en LOS observado en ambas órbitas del satélite (Figura 9a-9d), lo cual podría estar asociada a un hundimiento. De manera similar a la deformación superficial observada en abril de 2021, la fase interferométrica no completa un ciclo, por lo cual este hundimiento no supera los 2.8 cm.

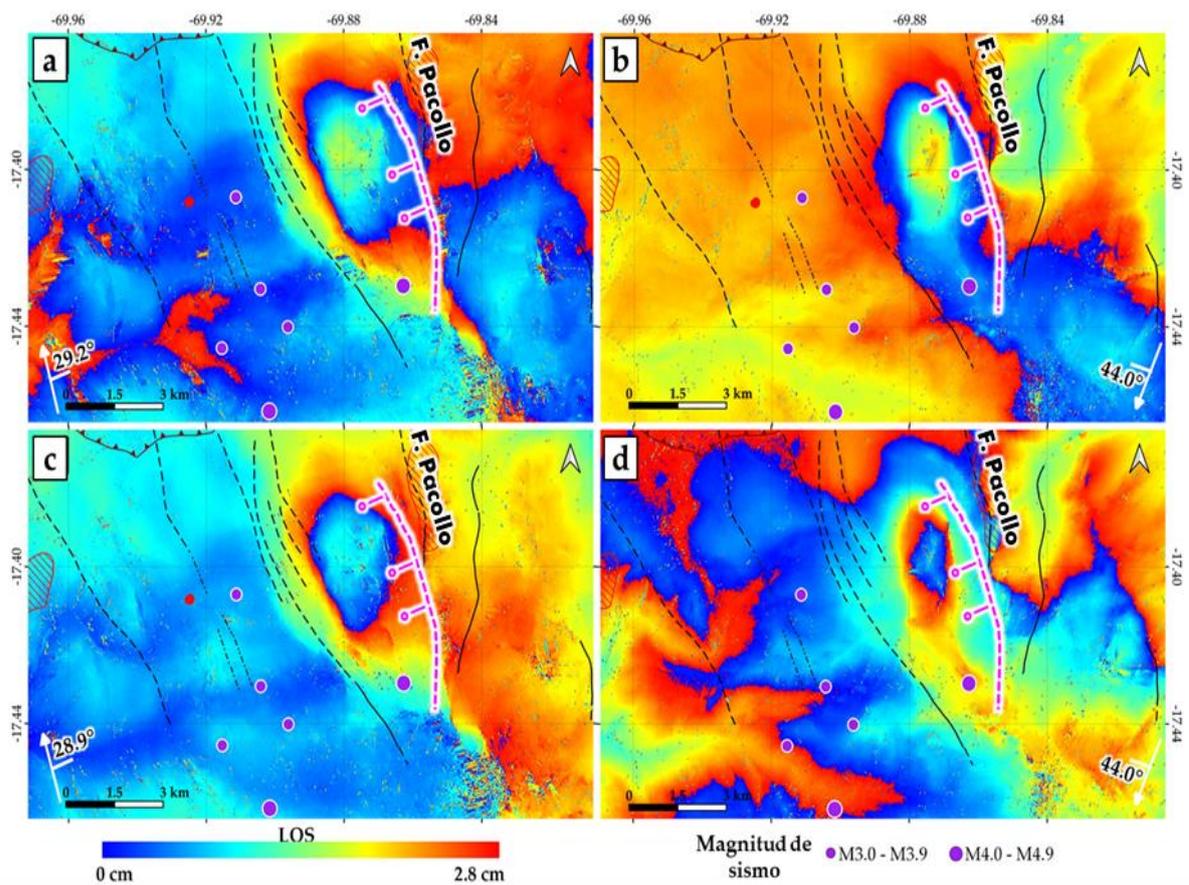


Figura 9.- Interferogramas elaborados a partir del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 para los días: a) 05 y 17 de mayo de 2021 en órbita ascendente y b) misma fecha en órbita descendente, c) 11 y 23 de mayo de 2021 en órbita ascendente, y d) misma fecha en órbita descendente. Los epicentros de sismos de magnitud local $M > 3.0$ son mostrados como círculos de color morado. Las líneas discontinuas magenta corresponden al trazo de la falla que se infiere generó la deformación

3.2.- Variación temporal de la deformación

Con la finalidad de evaluar la variación temporal de la deformación antes y después de la crisis sísmica ocurrida entre los años 2019 y 2021, así como determinar el desplazamiento co-sísmico de la falla Pacollo, se elaboraron series de tiempo DInSAR mediante el procesamiento de 1378 interferogramas en órbita descendente, y 1326 en órbita ascendente a partir de las imágenes Sentinel 1 correspondientes al periodo del 16 de mayo de 2019 al 23 de mayo de 2021. En este estudio se ha considerado el error atmosférico para evaluar su efecto en los interferogramas (GACOS, Yu et al., 2018), pudiéndose apreciar que este sigue el patrón de la topografía en su totalidad (Figura 10).

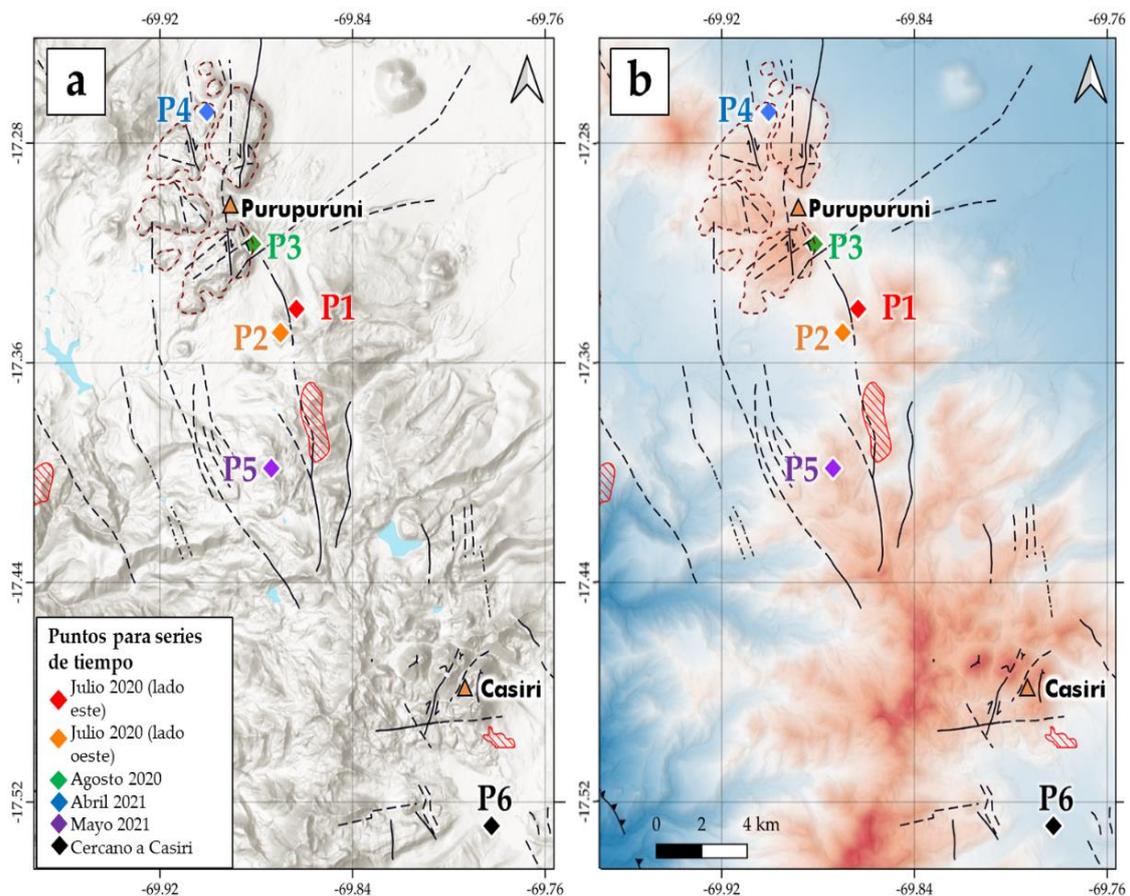


Figura 10.- a) Puntos elegidos para el análisis de series de tiempo de deformación en línea de vista del satélite (LOS), b) error atmosférico de la zona a partir de modelo GACOS.

Para el análisis temporal de la deformación se seleccionaron seis puntos ubicados en distintas zonas según se muestra en la Figura 10a: al este de la falla Pacollo (flecha roja P1, Fig. 11a), lado oeste de la falla Pacollo (flecha naranja P2, Fig. 11b), zona de deformación de agosto 2020 (rombo verde P3), zona de hundimiento en los domos norte del Purupuruni (flecha azul P4, Fig. 11c), zona de hundimiento registrada en mayo 2021 (flecha morada P5, Fig. 11b) y un punto ubicado a 6 km al sureste del volcán Casiri (rombo negro P6). Estratégicamente se ha ubicado el punto al sureste del volcán Casiri, más alejado de la zona de topografía elevada para analizar una posible “gran zona” de deformación positiva sobre un área de 36x25 km, desde el sur del Purupuruni hasta el sur del Casiri

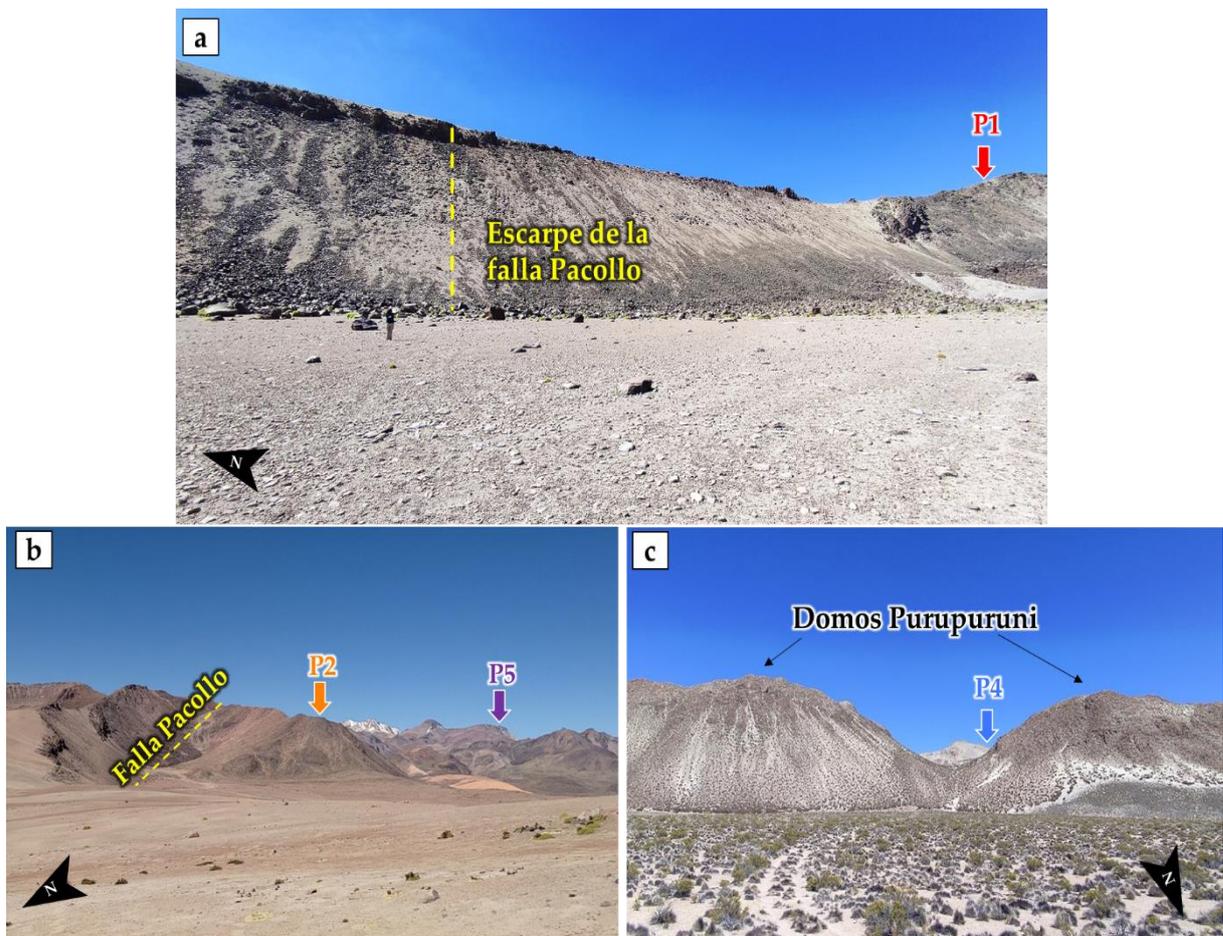


Figura 11.- a) Fotografía de la ubicación del punto P1 que muestra el escarpe de la falla Pacollo en la línea discontinua amarilla, con una altura aproximada de 100 m, b) los puntos P2 y P5 y, c) el punto P4.

Los resultados de la serie de tiempo obtenidos para cada punto de observación se muestran en la Figura 12 y su análisis se detalla a continuación:

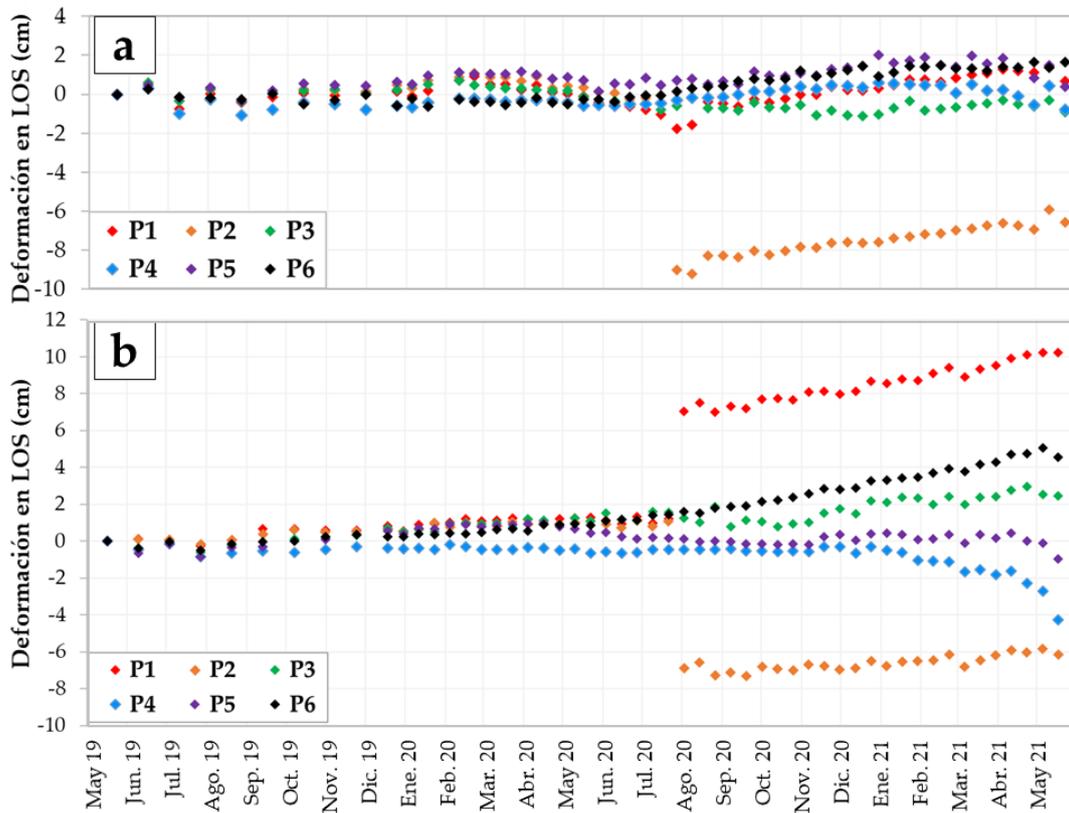


Figura 12.- a) series de tiempo de desplazamiento en LOS en la órbita ascendente, b) órbita descendente.

Deformación superficial en julio de 2020 (Puntos 1 y 2): Se aplicó la corrección atmosférica independientemente a los datos antes de la crisis (precrisis) y posterior a la misma (poscrisis), ver Figura 12. Los resultados muestran el alejamiento en LOS de ~ 8 cm del lado oeste en ambas órbitas poscrisis (punto P2, rombos naranjas), siendo interpretado como el hundimiento del bloque oeste. Por otro lado, se observa el acercamiento en LOS del orden de 5 cm poscrisis en el bloque este observado en órbita descendente (punto P1, rombos rojos); mientras que, en la órbita ascendente se observa un alejamiento en LOS, alrededor de 1 cm (punto P1, rombos rojos), lo que se interpreta como un desplazamiento lateral del bloque este en dirección sureste.

Deformación superficial en agosto de 2020 (Punto 3): Se aplicó la corrección atmosférica a todo el conjunto de datos. Durante la crisis de agosto de 2020 se observa un pequeño desplazamiento del orden de 1 cm (rombos verdes) para luego regresar a la tendencia habitual. Se observa una deformación constante positiva desde mayo de 2020 (P3- rombos verdes).

Deformaciones superficiales en abril y mayo de 2021 (Puntos 4 y 5): Ambos puntos presentan una tendencia constante, pero en ambas órbitas resalta el alejamiento en LOS (P4- rombos azules y P5- rombos morados) para ambas zonas y para el periodo entre abril y mayo (fechas en las que se registró hundimientos en ambas áreas).

Deformación superficial en Casiri entre mayo 2020 y mayo 2021 (Punto 6): Se aplicó la corrección atmosférica a todo el conjunto de datos. El punto ubicado al sur del volcán Casiri (Punto 6) presenta el mayor acercamiento en LOS en órbita descendente (levantamiento), alcanzando aproximadamente 5 cm entre mayo de 2020 y mayo de 2021 (Figura 12b).

3.3.- Deformación superficial - GNSS temporales

En las Figuras 13 y 14 se presentan los resultados obtenidos de las medidas GNSS temporales realizados en los alrededores de los volcanes Casiri y Purupuruni, siendo sus características los siguientes:

- a). En el punto CABA (Figura 13a), entre abril de 2019 y noviembre de 2021, se registró desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente $+2.2 \pm 0.2$ cm en dirección este, -2.3 ± 0.4 cm en dirección norte y -0.3 ± 1.0 cm en la componente vertical.
- b). El punto GNSS CA01 (Figura 13b), para el cual dispone de la mayor cantidad de datos medidos, registró desplazamientos en las componentes horizontales de $+4.5 \pm 0.2$ cm en dirección este y de -2.5 ± 0.3 cm en dirección sur. En la componente vertical se registra un desplazamiento positivo (inflación) de $+8.5 \pm 1.0$ cm.

- c). En el punto CA02 (Figura 13c), entre abril y noviembre de 2021, se calculó desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente -0.9 ± 0.2 cm en la dirección este, -1.8 ± 0.4 cm en la dirección norte y $+0.5 \pm 1.0$ cm en la componente vertical (levantamiento).
- d). En el punto CA03 (Figura 13d), entre abril y noviembre de 2021, se obtuvieron valores en las componentes horizontales de $+0.8 \pm 0.2$ cm en la dirección este, -1.1 ± 0.5 cm en la dirección norte y $+1.8 \pm 1.3$ cm en la componente vertical (levantamiento).

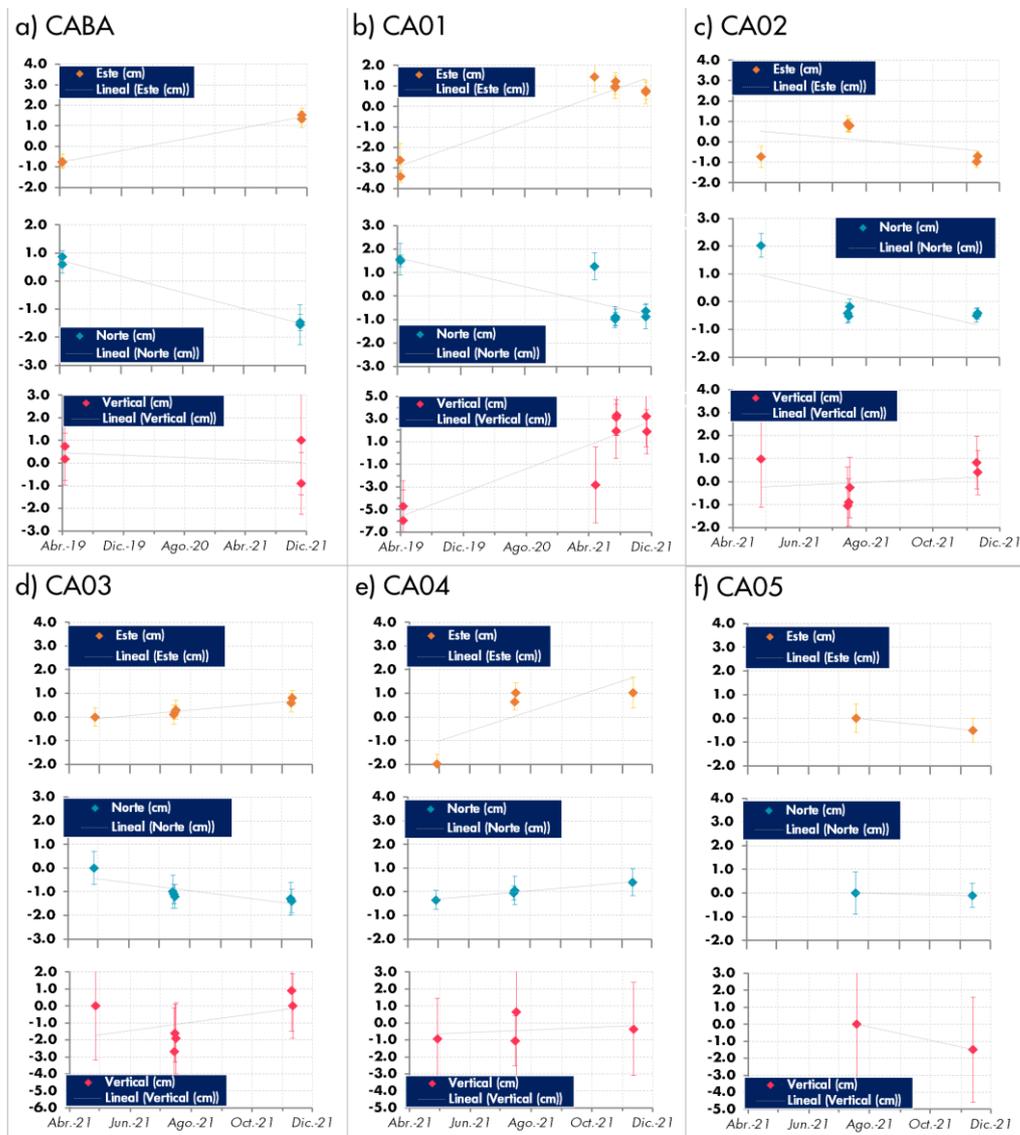


Figura 13.- Resultado de desplazamientos este, norte y vertical de los puntos GNSS temporales en los alrededores del volcán Casiri: a) CABA, b) CA01, c) CA02, d) CA03, e) CA04 y f) CA05.

- e). En el punto CA04 (Figura 13e) se registraron desplazamientos, en las componentes horizontales de aproximadamente $+2.6 \pm 0.3$ cm en la dirección este, $+0.7 \pm 0.5$ cm en la dirección norte y $+0.6 \pm 1.5$ cm en la componente vertical.
- f). En el punto CA05 (Figura 13f), en las campañas de julio y noviembre de 2021, se obtuvieron desplazamientos en las componentes horizontales de -0.5 ± 0.3 cm en la dirección este, -0.1 ± 0.6 cm en la dirección norte y -1.5 ± 2.5 cm en la componente vertical.
- g). En el punto PU01 (Figura 14a), entre abril y noviembre de 2021, se registraron desplazamientos en las componentes horizontales de 0.0 ± 0.2 cm en la dirección este, $+0.5 \pm 0.2$ cm en la dirección norte y $+2.0 \pm 1.0$ cm en la componente vertical (levantamiento).
- h). En el punto PU02 (Figura 14b), se calcularon desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente $+3.0 \pm 0.3$ cm en la dirección este, $+3.0 \pm 0.3$ cm en la dirección norte y $+3.2 \pm 1.2$ cm en la vertical (levantamiento).
- i). En el punto PU03 (Figura 14c), se calculó desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente $+1.4 \pm 0.3$ cm en la dirección este, $+1.2 \pm 0.4$ cm en la dirección norte y $+5.5 \pm 1.2$ cm en la componente vertical (levantamiento).
- j). En el punto PU04 (Figura 14d) se registró desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente $+0.9 \pm 0.3$ cm en la dirección este, $+0.2 \pm 0.3$ cm en la dirección norte y $+1.5 \pm 1.8$ cm en la componente vertical.
- k). En el punto PU05 (Figura 14e), entre julio y noviembre de 2021, se calculó desplazamientos en las componentes horizontales de aproximadamente 0.0 ± 0.2 cm en la dirección este, -0.8 ± 0.2 cm en la dirección norte y $+0.8 \pm 0.8$ cm en la vertical.

l). En el punto PU06 (Figura 15f), entre julio y noviembre de 2021, se tiene desplazamientos en las componentes horizontales de -2.7 ± 0.2 cm en dirección este, $+0.9 \pm 0.2$ cm en dirección norte y $+1.5 \pm 0.9$ cm en la componente vertical.

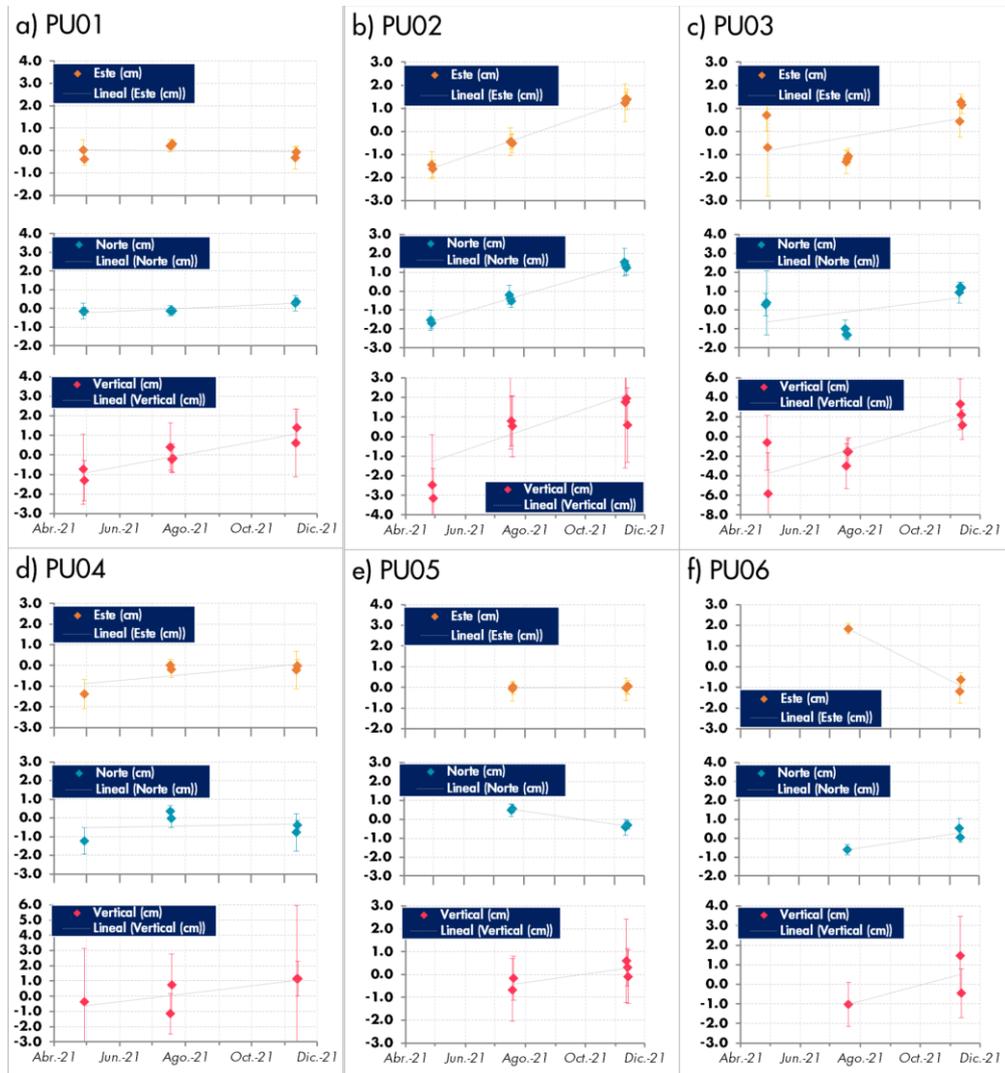


Figura 14.- Resultados de mediciones de puntos GNSS temporales en los alrededores del volcán Purupuruni: a) PU01, b) PU02, c) PU03, d) PU04, e) PU05 y f) PU06.

3.4.- Modelado de la fuente de deformación

Con base en los resultados de desplazamientos obtenidos con la técnica DInSAR, se aplicaron modelos matemáticos para aproximar la deformación causada por actividad de fallas (tectónica) y actividad volcánica (Battaglia et al., 2013). Para este objetivo, se seleccionó la zona de deformación principal (Figura 6), registrada en julio de 2020, y se realizaron

los modelamientos considerando dos tipos de falla, una de tipo normal (Figura 15a) y otra de tipo strike-slip de ruptura lateral (Figura 15b), obteniendo buzamientos de 55° y 82° , respectivamente. El mejor ajuste fue el obtenido con el modelo matemático de una falla normal, sugiriendo que el tope de la falla se ubica a 0.2 km de profundidad por debajo de la superficie; mientras que, la base se localiza a 3.8 km. La ubicación superficial de la falla explicaría la deformación de más de 10 cm registrada en superficie.

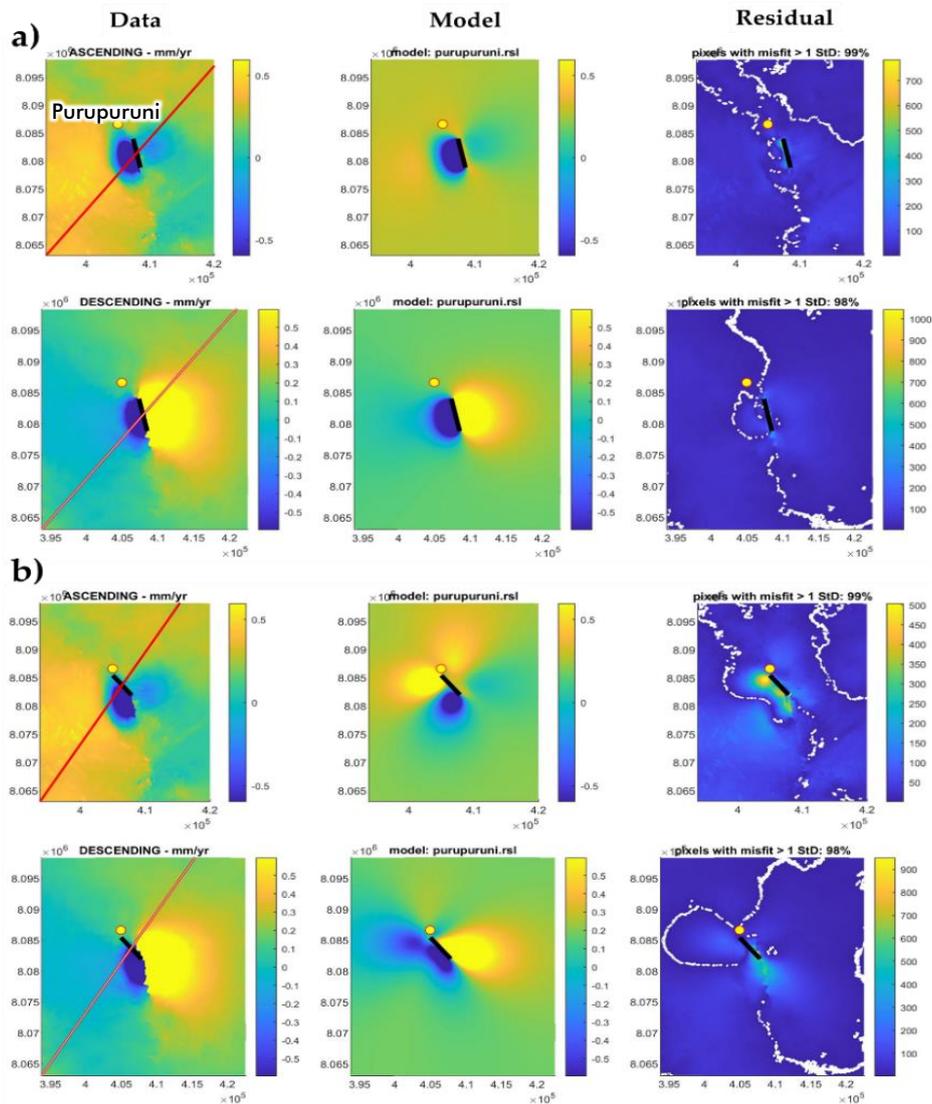


Figura 15.- Modelo de fuente del desplazamiento de la falla Pacollo obtenido con DInSAR mediante el software DMODELS: a) órbita ascendente y descendente con modelo de una falla normal, b) con modelo de falla strike-slip de ruptura lateral derecha. La primera columna son los datos DInSAR de resolución completa. La segunda columna es el resultado del modelado inverso y la tercera columna es el residuo entre los datos y el modelo. El círculo amarillo indica la ubicación del volcán Purupuruni y la línea negra representa la falla en superficie.

4.- DISCUSIÓN

4.1.- Deformación y sismicidad

La deformación superficial registrada en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri estaría ligada a la sismicidad registrada en 2019-2021. Para el análisis de la deformación con diferencia temporal de dos años (junio de 2019 y mayo de 2021, Figura 16), se ha correlacionado la sismicidad $M > 4.2$ ocurrida el año 2020 (Velarde et al. 2020) y para el año 2021, los sismos de $M_L > 3.5$ reportados por el Centro Sismológico Nacional (CENSIS) operado por el IGP.

El análisis de los mecanismos focales calculados por el gCMT muestran que los sismos ocurridos el 25 de julio (Figura 16c) y 26 de julio de 2020 (Figura 16d) corresponden a una ruptura de tipo falla normal con componente de desgarre dextral y ejes de tensión E-O y de presión N-S, sugiriendo que el lado oeste de la falla se habría hundido. Dada la profundidad superficial de estos eventos ($< 15\text{km}$) y su cercanía a la falla Pacollo se infiere su reactivación.

Los valores de desplazamiento que corresponden al alejamiento en la dirección LOS del lado oeste varían de 8.5 a 11.9 cm en ambas trayectorias del satélite; por lo tanto, podría tratarse de una deformación oblicua; es decir, hundimiento (en mayor proporción) y desplazamiento horizontal (mínimo). Por otro lado, los desplazamientos opuestos en el lado oeste en las órbitas ascendente y descendente son coherentes con el desplazamiento strike-slip que es menos perceptible en la pasada ascendente del satélite. Esto último es posible porque la dirección de la falla es casi igual a la trayectoria del satélite; mientras que, en la órbita descendente, el satélite capta esta deformación de manera casi perpendicular.

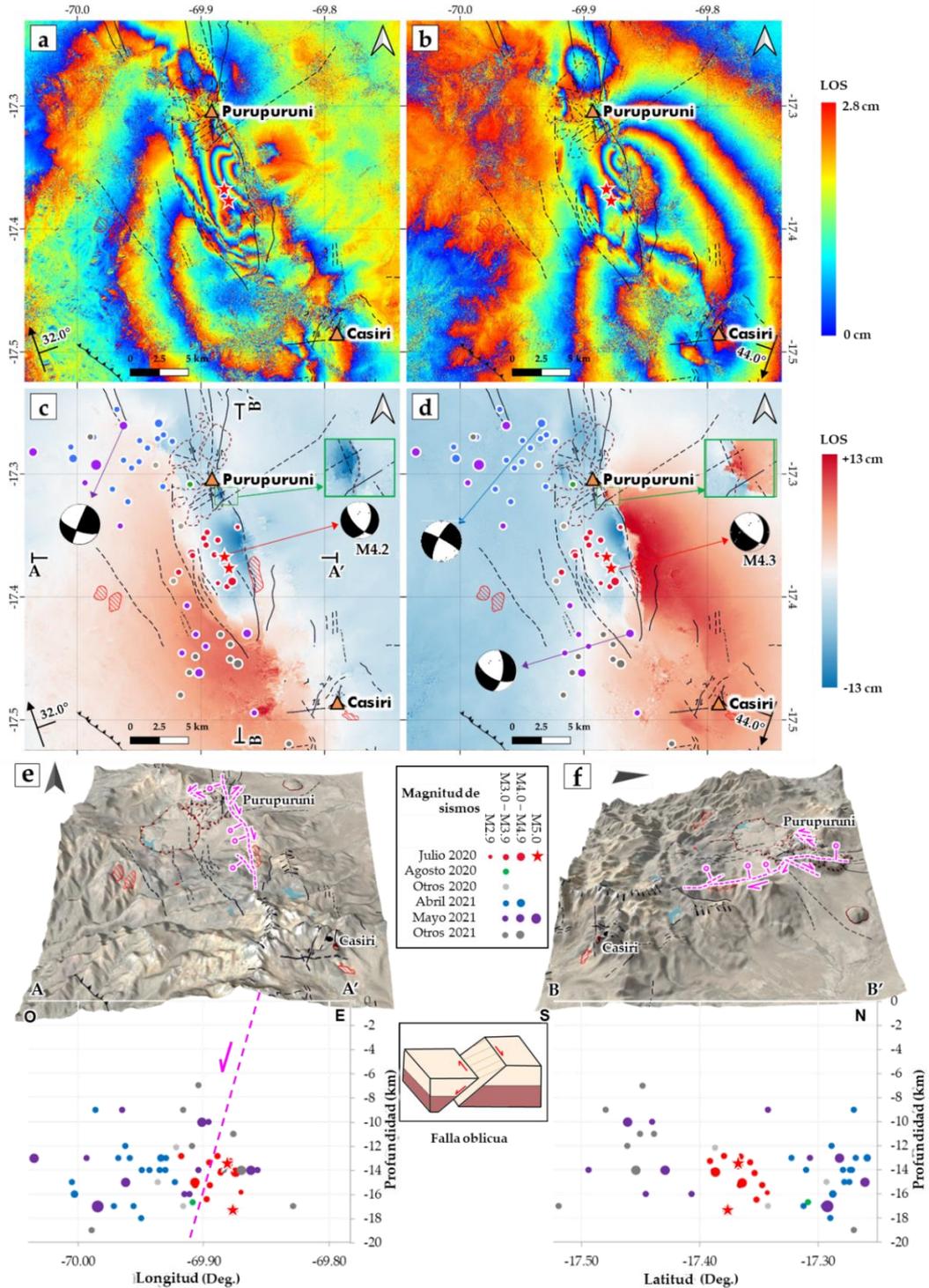


Figura 16.- Modelo esquemático del desplazamiento en superficie y profundidad en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri: a) Interferograma en órbita ascendente con imágenes del 15 de junio de 2019 al 23 de mayo de 2021, b) Interferograma en órbita descendente con imágenes del 9 de junio de 2019 al 17 de mayo de 2021, c y d) desplazamiento en línea de vista del satélite (LOS) a partir de desenrollado de interferogramas a y b respectivamente, e-f) vista tridimensional y perfil de sismos en profundidad A-A' (O-E) y B-B' (S-N). Los sismos son representados con círculos, con el tamaño y color variable según su magnitud. Los círculos de color gris claro representan los sismos del 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 sismos registrados en 2021 representados en círculos gris oscuro.

Si bien la deformación más relevante en los interferogramas es la registrada en julio de 2020, al comparar imágenes de dos años de diferencia temporal, también es posible observar las cuatro zonas de deformación descritas anteriormente (Figuras 16a-16d). La distribución espacial de la sismicidad sigue aproximadamente el alineamiento de la falla Pacollo con profundidades menores a 19 km bajo la superficie (Figura 16e y 16f). Antayhua et al. (2021) realizó el cálculo de los mecanismos focales para los eventos ocurridos en abril de 2021 (Figura 16c, flecha morada), así como el gCMT (Figura 16d, flecha azul), evidenciando que estos estarían asociados a una falla de rumbo, ocasionando deformación en un área de 1 km² (Figura 8). Bromley et al. (2019) describió tres poblaciones discretas de fallas de rumbo en los domos Purupuruni, lo cual validaría las deformaciones ocurridas en agosto de 2020 y abril de 2021 en el entorno del volcán Purupuruni. Asimismo, el mecanismo focal calculado para el sismo del 22 de mayo de 2021 (Figura 16d, flecha morada) muestra un proceso mixto de extensión y desgarre lateral derecho consistente con la ruptura normal y el hundimiento en la zona 4 (Figura 9).

4.2.- Evolución temporal de la deformación

El análisis de las series de tiempo de deformación DInSAR muestra importantes variaciones de deformación entre los años 2019 al 2021. En la Figura 17 se muestra la correlación de la deformación con el incremento de sismos y su energía liberada (CENVUL), siendo el pico principal de energía y número de sismos cercanos al volcán Purupuruni (Figura 17c) y ocurridos en julio de 2020. Estos resultados se correlacionan con el hundimiento del punto P2 correspondiente al lado oeste de la falla Pacollo en órbita ascendente (Figura 17a) y descendente (Figura 17b). Asimismo, el incremento de la sismicidad se correlaciona con el desplazamiento del punto P1 (lado este de la falla Pacollo) que se aleja del satélite en la dirección LOS en órbita ascendente (Figura 17a) y un acercamiento en la órbita descendente (Figura 17b), observaciones que son interpretadas como un

desplazamiento lateral en dirección sureste. Posteriormente, los picos de sismicidad registrados durante abril y mayo de 2021 cercanos al volcán Purupuruni (Figura 17c) y al volcán Casiri (Figura 17d) se correlacionan con las zonas de deformación 3 y 4 ubicadas en los domos norte del Purupuruni y al noroeste del volcán Casiri, respectivamente.

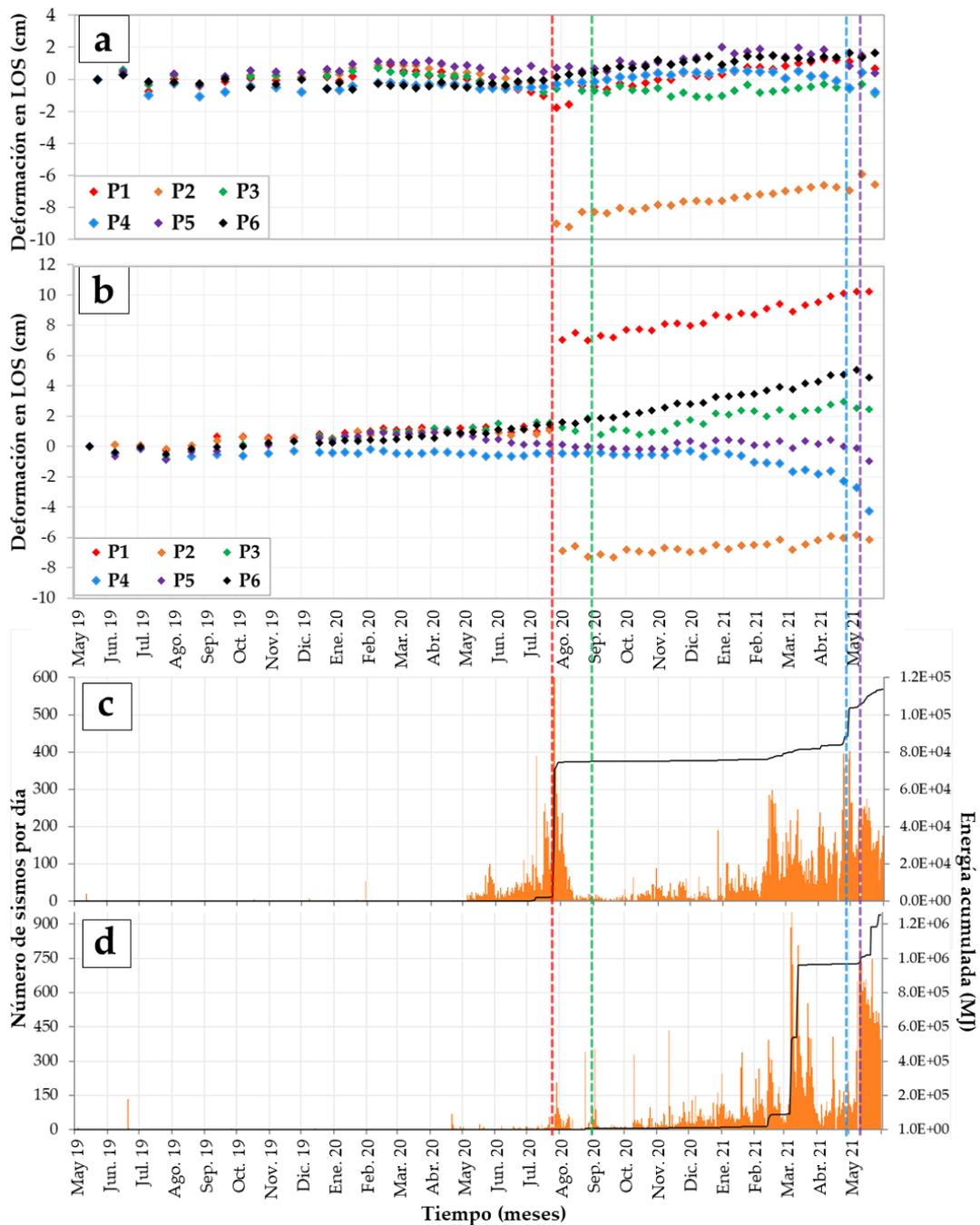


Figura 17, a) Serie de tiempo de deformación en órbita ascendente, b) órbita descendente, c) número de sismos diarios de tipo volcano-tectónico próximos al volcán Purupuruni, y d) próximos al volcán Casiri registrados por la red sísmica volcánica del CENVUL.

Por otro lado, el levantamiento (acercamiento del punto P6 en la dirección LOS en ambas órbitas del satélite) registrado al sur del Casiri (Figuras 17a y 17b) es constante desde mayo de 2020 y coincide con el incremento de la sismicidad (Figuras 17c y d). Según la fase interferométrica (Figuras 16a y 16b) y el desenrollado de fase (Figuras 16c y 16d), esta deformación positiva abarca los volcanes Purupuruni y Casiri, ocupando un área de $\sim 36 \times 25$ km. En esta zona también se encuentra el punto P1, ubicado en el lado este de la falla Pacollo y el punto P3 en el domo sur del Purupuruni, donde también se observa una tendencia positiva en las series de tiempo (Figuras 17a y 17b). Esta deformación positiva, tendría relación con el incremento del número de sismos en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri (Figuras 17c y 17d) que ha ido aumentando de manera progresiva en toda la zona, para luego migrar hacia el sureste en dirección del volcán Casiri, desde febrero de 2021 (Antayhua et al., 2021).

4.3.- Deformación DInSAR y GNSS

Además de los resultados obtenidos con el método DInSAR, los resultados del procesamiento de datos GNSS muestran deformación en la zona de estudio (Figura 18). Los datos de DInSAR del punto P6 desde mayo de 2020 presentan mayores velocidades de deformación, coincidente con el inicio de la ocurrencia de sismos de magnitud mayor a $M3.5$. Estos valores son coherentes con el desplazamiento vertical de aproximadamente 8.5 cm registrado con GNSS en el punto CA01.

Los resultados obtenidos con GNSS en los demás puntos de control ubicados entre los volcanes Purupuruni y Casiri, muestran el desarrollo de una deformación centimétrica en las componentes horizontal y vertical. En efecto, en el mapa de vectores presentado en la Figura 18 (flechas magenta), los puntos GNSS presentan preferentemente deformación positiva (levantamiento). Los vectores horizontales (flechas azules en Figura 18), presentan desplazamiento preferente al noreste y sureste; mientras que, los

puntos PU05, PU06 y CA05 presentan desplazamientos en dirección sur, noroeste y suroeste, respectivamente. Estos resultados son coherentes con el lóbulo de deformación positiva que se observa con datos DInSAR sobre un área que abarca desde el sur del volcán Purupuruni hasta el sur del volcán Casiri. Los desplazamientos horizontales se aproximan en magnitud y dirección a la forma elipsoidal alargada obtenida con datos de interferometría.

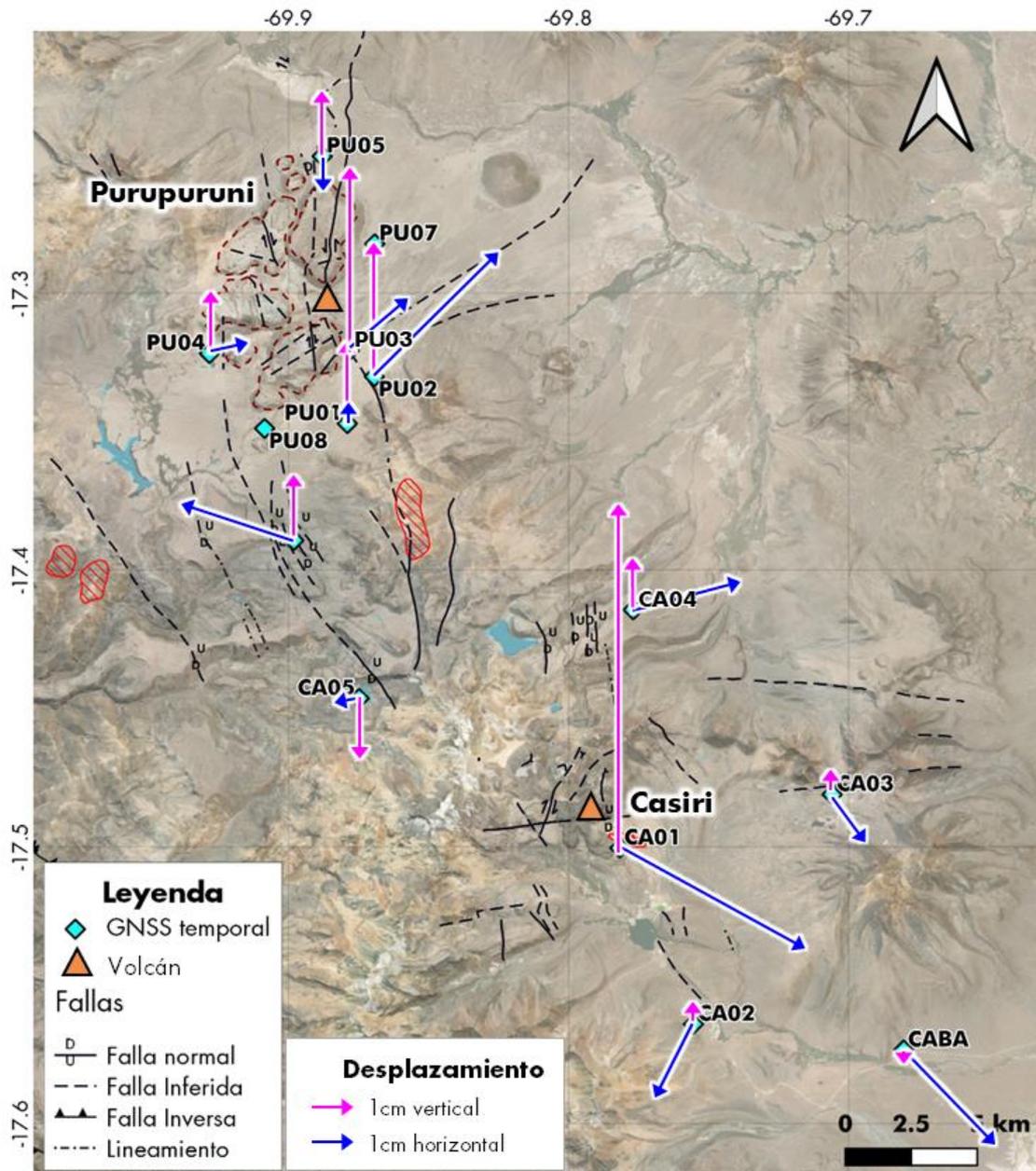


Figura 18, Mapa de vectores de deformación obtenidos con GNSS en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri.

Asimismo, el punto GNSS PU02, ubicado en la cercanía del punto P1 de la serie temporal DInSAR, ha presentado tendencia positiva en ambas órbitas del satélite posterior a la crisis de julio de 2020, coherente con la deformación positiva registrada en la componente vertical del GNSS. De igual manera, el punto P2 de la serie DINSAR, cercano al punto GNSS PU01, también ha presentado desplazamiento positivo en ambas órbitas, pero en menor magnitud que el punto P1, similar a lo observado en los vectores GNSS.

Dado que la deformación registrada en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri es positiva y relacionada a un levantamiento, esta podría estar asociada a una sismicidad pre-eruptiva como consecuencia del ascenso de magma hacia la superficie que desestabiliza a las fallas activas. Sin embargo, hasta la fecha no existen evidencias de tipo vulcanológico (emisiones de gases, incremento de temperatura de fuentes termales, etc.) e incluso no se ha detectado sismicidad asociada al ascenso de magma para validar dicha hipótesis (Antayhua et al., 2021). Por tal motivo, esta intranquilidad sísmica estaría asociada principalmente a origen tectónico, relacionado a la geodinámica de la falla Pacollo.

CONCLUSIONES

- El estudio de la deformación superficial de la corteza en el entorno de los volcanes Purupuruni y Casiri usando imágenes satelitales de radar, series temporales DInSAR y la actividad sísmica registrada en 2019 a 2021, ha permitido identificar la presencia de 4 zonas de deformación asociadas a fallas activas.
- La deformación en la Zona 1 (interferometría DInSAR) debido a la crisis sísmica de julio de 2020, es consistente con deformación tectónica extensional de la falla Pacollo. El lado oeste de la falla presentó un hundimiento de hasta 11 cm en la dirección de línea de vista del satélite (LOS); mientras que, el lado este experimentó un desplazamiento horizontal en dirección sur-sureste. Estos resultados son coherentes con las soluciones de los mecanismos focales para los sismos de mayor magnitud ocurridos el 25 y 26 de julio de 2020 (M5.0); es decir, fallas de tipo normal oblicua y una pequeña componente strike-slip con desplazamiento horizontal dextral. El modelamiento matemático de la deformación se ajusta a una falla normal, ubicada a una profundidad entre 0.2 a 3.8 km por debajo de la superficie.
- En agosto de 2020, se observó deformación en la Zona 2, ubicada en el domo sur del volcán Purupuruni y cuyo patrón indicaría que se trata de una falla strike-slip con dirección NE-SO, donde el lado oeste se aleja ~11 cm en órbita ascendente (desplazamiento en dirección noreste) y el lado este se acerca ~6 cm en órbita descendente (dirección sur), lo cual podría ser asociado a un posible desplazamiento lateral de falla de rumbo sinistral. Asimismo, en el mes de abril y mayo de 2021, se ha observado deformación en las

Zonas 3 y 4, con patrones asociados a hundimientos en los domos norte del Purupuruni y a 10 km al sur de este volcán.

- El análisis de interferogramas obtenidos con la técnica DInSAR con diferencia temporal de dos años, de mayo de 2019 a mayo de 2021, así como las series de tiempo en órbitas ascendente y descendente, muestran un patrón de deformación positiva o el levantamiento de un área extensa en forma de elipse, que abarca desde el sur del volcán Purupuruni hasta el sur del Casiri. Dicha deformación también ha sido observada con las mediciones GNSS temporales; es decir, el levantamiento en la componente vertical y desplazamientos de las componentes horizontales que se distribuyen en forma de una elipse similar al lóbulo de deformación observado con DInSAR. Este levantamiento podría asociarse a un posible proceso de inflación por ascenso de magma; sin embargo, los datos sísmicos analizados para el mismo periodo, no evidencian tal escenario.
- La deformación y sismicidad ocurrida en la zona de estudio estuvo asociada a la reactivación de la falla Pacollo.

AGRADECIENTOS

Este trabajo de investigación se ha desarrollado en colaboración con el Dr. Maurizio Battaglia del VDAP-USGS. Nuestro agradecimiento al personal del CENSIS y CENVUL del Instituto Geofísico del Perú por proporcionar la información sísmica ocurrida en el área de estudio desde el año 2020 a la fecha.

BIBLIOGRAFÍA

- 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>.
- Battaglia, M., Alpala, J., Alpala, R., Angarita, M., Arcos, D., Eullades, L., Eullades, P., Muller, C. & Narvaez, L. (2019). Monitoring volcanic deformation. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2019. 9-May-19 doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10902-9.
- 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.
- Berardino, P., G. 863 Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792.
- Bromley, G., Thouret, JC., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademarker, K., Vivanco, S., ASTER Team Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic ³He and ¹⁴C 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. INGEMMET. Boletín serie B: Geología Económica, 63, 209p.
- Cruz, V.; Flores, R. & Velarde, Y. (2020). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, región Tacna, INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 69, 315p,
- De Silva, S. L., & Francis, P. W. (1991). Volcanoes of the central Andes, Springer-Verlag, 216 p.
- 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.
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., McClusky, S.C. (2010) GPS Analysis at MIT 10.70. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, MIT, Cambridge.
- Mendivil, S. (1965) Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave (Hojas 35-x, 35-y). Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín, 10, 99 p.
- OIEA - Organismo Internacional de Energía Atómica (1992). Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina, Viena. IAEA-TECDOC-641 ISSN 1011-4289.
- 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>)

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/8zq2c02m>.

USGS (2020). From Observations to Insights—How Scientists Use Models to Study What’s Going on Under the Grizzlies’ Feet. Recuperado de: https://www.usgs.gov/center-news/observations-insights-how-scientists-use-models-study-what-s-going-under-grizzlies-feet?qt-news_science_products=4#qt-news_science_products

Vargas, V., Cruz, V., Antayhua, Y., Rivera, M., Chirif, H. & West, J. (2012) - Estudio geotérmico campo Borateras. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 47, 74 p.

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>

Yu, C.; Li, Z.; Chen, J.; Hu, J.C. (2018) Small Magnitude Co-Seismic Deformation of the 2017Mw6.4Nyingchi Earthquake Revealed by InSAR Measurements with Atmospheric Correction. Remote Sens. 2018, 10, 684.

