



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ANÁLISIS DE LA CRISIS SÍSMICA OCURRIDA EN JULIO DE 2020 EN EL DISTRITO DE TARATA

(Provincia de Tarata – Región Tacna)

Informe Técnico N°003-2020/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Agosto, 2020

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe Técnico

Análisis de la Crisis Sísmica ocurrida en julio de 2020 en el distrito de Tarata
(region - Tacna)

Autores

Lizbeth Velarde

Hernando Tavera

Katherine Vargas

Juan Carlos Villegas

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo

Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN

En la localidad de Tarata (región Tacna), los días 25 y 26 de julio de 2020 ocurrieron 7 sismos con magnitudes entre M3.6 y M4.1 que fueron percibidos con intensidades de III-IV (MM) por la población sin causar daños personales ni efectos secundarios. Estos sismos y su serie de réplicas se distribuyen paralelos a la falla Pacollo, desde el cráter del volcán Purupuruni y a lo largo de 12 km en dirección SE. El mecanismo focal para los sismos principales indica deformación por extensión en dirección SO sobre un plano de falla que buza con un ángulo de 54°. El análisis de datos de interferometría indica desplazamientos de hasta 10 cm para el bloque hundido. Asimismo, se ha registrado señales sísmicas de periodo largo (LP) debido a procesos de resonancia causados por la presión esporádica de fluidos o gases de origen hidrotermal en grietas y fisuras presentes en las cercanías de los domos del volcán Purupuruni.

ÍNDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- TECTÓNICA LOCAL

3.- ANÁLISIS DE LA CRISIS SÍSMICA

3.1.- Parámetros hipocentrales

3.2.- Réplicas

3.2.1.- Eventos tectónicos

3.2.2.- Eventos LP

3.3.- Interferometría diferencial de radar (INSAR)

3.4.- Interpretación sismotectónica

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

El Perú es un país altamente sísmico y por ello, es parte de su geodinámica la ocurrencia continua de sismos de variada magnitud a diferentes niveles de profundidad. El análisis espacial de la actividad sísmica ocurrida en los últimos 60 años (Figura 1), ha permitido comprender que la principal fuente generadora de sismos, por su frecuencia y elevadas magnitudes, es la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, dando origen a sismos con epicentros que se encuentran frente a la zona costera, en el mar; por ejemplo, los sismos recientes ocurridos en Arequipa en el año 2001 y Pisco del 2007; ambos con magnitudes de M8.0. La segunda fuente, genera sismos con menor frecuencia y magnitudes, siendo debido a la lenta deformación del continente, poniendo en evidencia en superficie, la presencia de fisuras en la corteza conocidas como fallas geológicas. Estas fallas se reactivan generando eventos de magnitudes moderadas o enjambres de sismicidad durante periodos cortos (Tavera et al, 2006). En la región sur del Perú, muchas de estas fallas se encuentran cerca de las más importantes estructuras volcánicas presentes desde la región Ayacucho hasta Tacna.

Los días 25 y 26 de julio del 2020, la localidad de Tarata (región Tacna), fue sorprendida con la ocurrencia continua de hasta 7 eventos sísmicos con magnitudes que oscilaron entre M3.6 y M4.1 que generaron intensidades de III-IV (MM) generando alerta en la población. Los epicentros de estos sismos se localizaron entre la localidad de Tarata y los domos del volcán Purupurini, asociados a la reactivación temporal de la falla de Pacollo. Durante los días posteriores se registraron más de 250 réplicas con magnitudes menores a M3.6 cuyas características son analizadas en el presente informe, además de la geometría de la falla Pacollo, su deformación cortical evidenciada con el método INSAR y su interpretación sismotectónica.

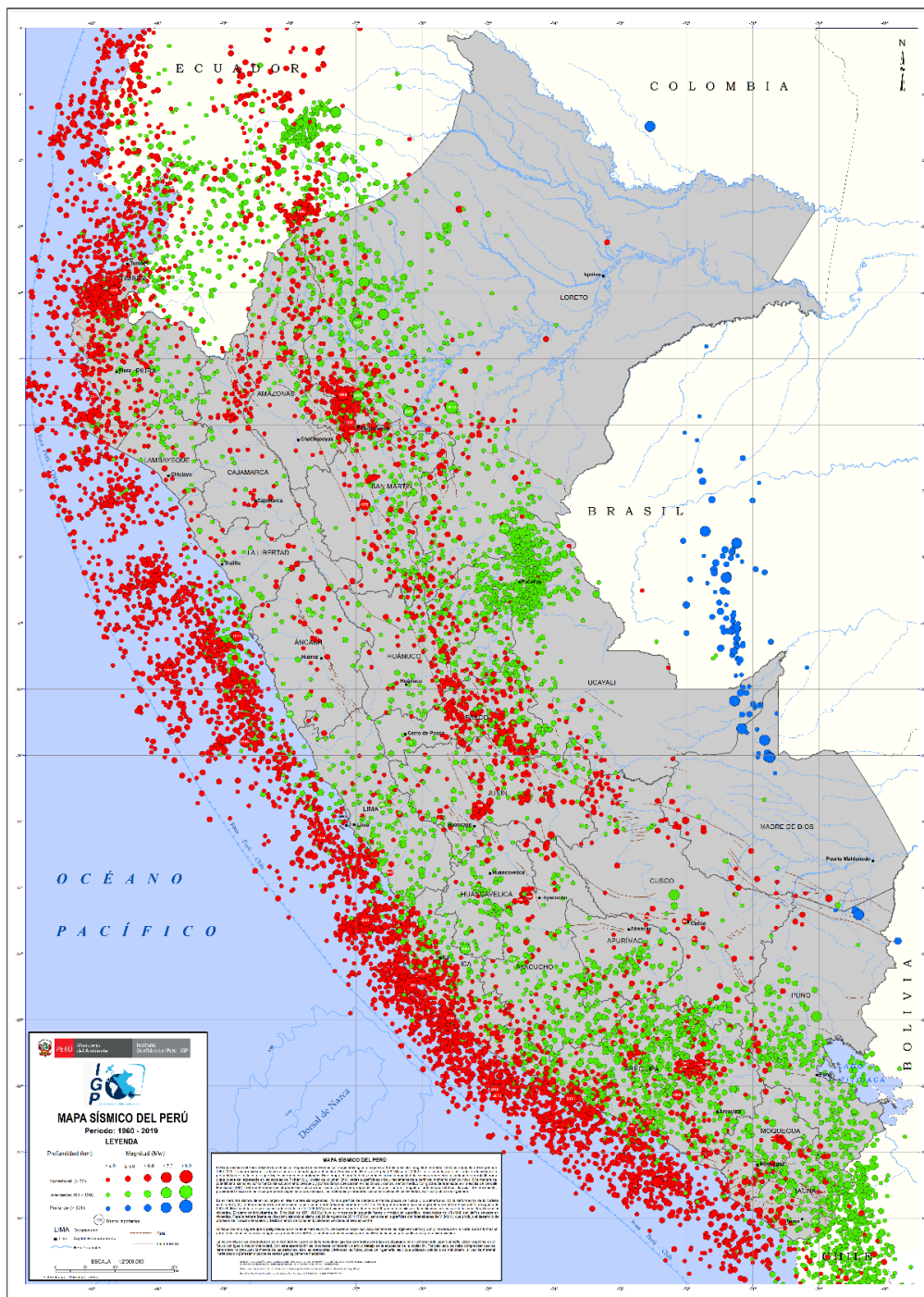


Figura 1: Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960-2019

2.- TECTÓNICA LOCAL

En la región sur del Perú, el sistema de fallas Incapuquio con 200 km de longitud en promedio, se constituye como la mayor estructura tectónica presente en la región sur debido a que está formada por varios segmentos de fallas que presentan, desde el Oligoceno, una compleja historia de formación que aún no es muy comprendida (Jacay et al., 2002). Estos segmentos de fallas son de tipo inverso, normal, transcurrente o asociados a plegamientos (Figura 2).

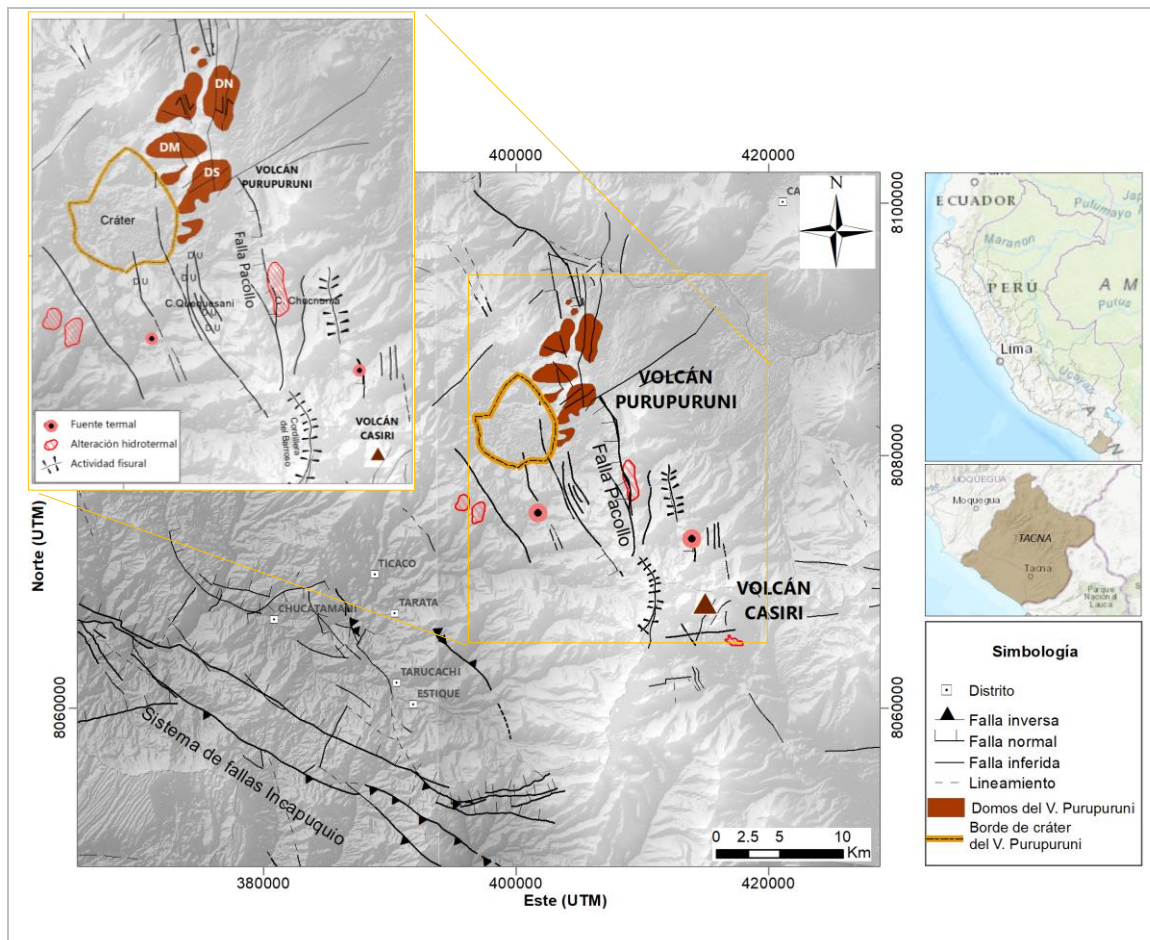


Figura 2: Mapa tectónico del volcán Purupuruni y alrededores (Mendivil, 1969 y Bromley et al, 2019). DN= domo norte, DM= domo medio y DS= domo sur

La falla Pacollo es parte de este sistema, presenta una longitud aproximada de 16 km con un rumbo inicial de N5°O en su extremo sur, para luego, a partir del Cerro Chucñuma cambiar a N30°O hasta perderse cerca al domo sur (DS) del volcán Purupurini (Figura 2). MENDIVIL (1965), tomando en cuenta la posición de los mantos volcánicos y la inclinación de la escarpa, supone que Pacollo es una falla de gravedad con alto ángulo y poco desplazamiento vertical. Aparentemente, el bloque occidental ha descendido con respecto al oriental sin ocasionar mayores deformaciones.

En el extremo NO de la falla Pacollo, se encuentra un conjunto de 4 domos de lava del volcán Purupurini que ocupan áreas de 3.5 a 7 km² e intrusiones con áreas menores a 0.5 km² situadas en el extremo NE del cráter del volcán (Figura 2 y 3). A excepción del domo medio que se orienta en dirección EO, los otros se alargan en dirección NNE. Cruzando el cúmulo de domos hay tres poblaciones de lineamientos y/o fallas orientadas en direcciones N05°E, N85°E y N175°E. La última actividad eruptiva registrada por este volcán, de acuerdo a muestras recolectadas en la parte superior del domo sur, dio una edad de exposición de 5300 ± 1100 años (Bromley et al., 2019). La actividad volcánica más reciente en la zona, está representada por el volcán Casiri y según MENDIVIL (1969), estarían asociados a esta actividad, las solfataras y vertientes termales existentes en el área, unidades que denotan un estado de volcanismo decadente. De acuerdo a Bromley et al, (2019), las muestras tomadas indican una edad de exposición de 2600 ± 400 años para el flujo estratigráficamente más joven de este volcán.

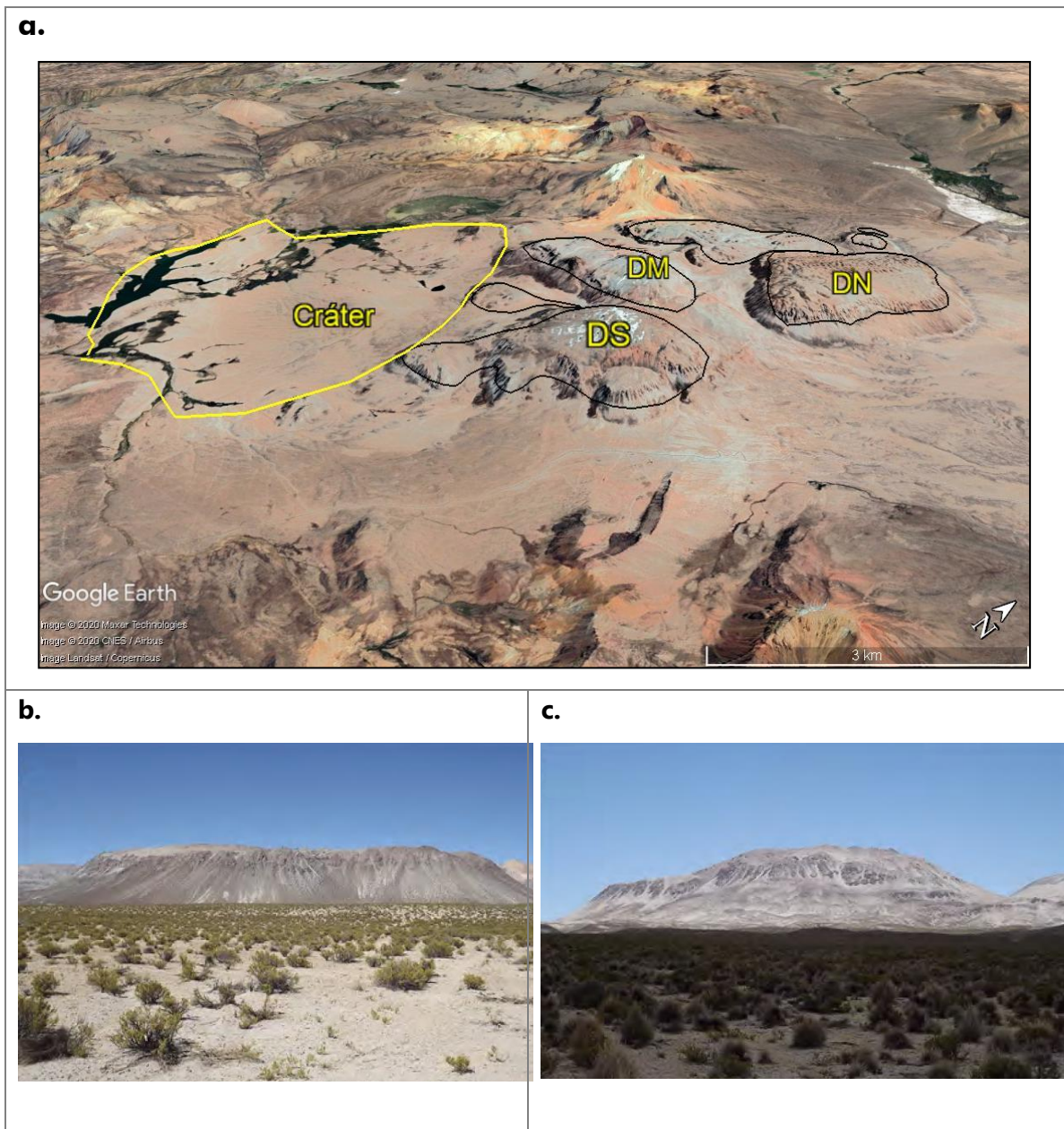


Figura 3.- a) Imagen de Google Earth en el cual se aprecia los domos (líneas negras) y el cráter (línea amarilla) del volcán Purupuruni. Fotografía del domo norte (b) y domo sur (c), (Bromley et al., 2019). DN= domo norte, DM= domo medio y DS= domo sur.

3.- ANÁLISIS DE LA CRISIS SÍSMICA

Entre el 25 y 26 de julio de 2020, el Instituto Geofísico del Perú reporto la ocurrencia de 7 sismos con magnitudes entre M3.6 a M4.1 que alertaron a la población de la localidad de Tarata (región Tacna) y que fueron seguidos por una serie de aproximadamente 250 réplicas cuyas características se describen a continuación.

3.1.- Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales de los sismos ocurridos entre el 25 y 26 de julio fueron obtenidos usando datos de la Red Sísmica Nacional (incluye estaciones de la red de volcanes) y sus valores se presentan en la Tabla 1. Los epicentros de estos sismos se encuentran a 15 y 17 km al NE del distrito de Tarata y a 9 km al SO del volcán Purupuruni con profundidades de hasta 12 km (Figura 4). Estos sismos fueron percibidos por la población de la localidad de Tarata con intensidades de III-IV (MM).

Tabla 1.- Parámetros hipocentrales de los sismos reportados el 25 y 26 de julio por el CENSIS en la localidad de Tarata.

n.º	Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	Mag. (Mw)	Intensidad (MM)
1	25/07/2020	11:31:13	-17.37	-69.91	4.1	III-IV Tarata
2	25/07/2020	13:54:10	-17.40	-69.91	3.6	III Tarata
3	26/07/2020	05:03:58	-17.40	-69.91	4.1	IV Tarata
4	26/07/2020	05:07:11	-17.38	-69.90	4.1	III-IV Tarata
5	26/07/2020	06:06:22	-17.38	-69.93	3.6	III Tarata
6	26/07/2020	06:28:46	-17.40	-69.91	4.1	III-IV Tarata
7	26/07/2020	08:14:15	-17.39	-69.90	3.9	III Tarata

Para tres de estos eventos de moderada magnitud, se ha elaborado el mecanismo focal compuesto usando los primeros impulsos de la onda P obteniendo como resultado un mecanismo de falla tipo normal con planos

nodales orientados en dirección N-S y ejes de tensión en dirección E-O, siendo los ángulos de buzamiento de 54° y 36° respectivamente. La solución obtenida para el mecanismo focal es coherente con la geometría de la falla Pacollo, siendo en este caso, el plano de falla el que buza con un ángulo de 54° en dirección oeste (Figura 4)

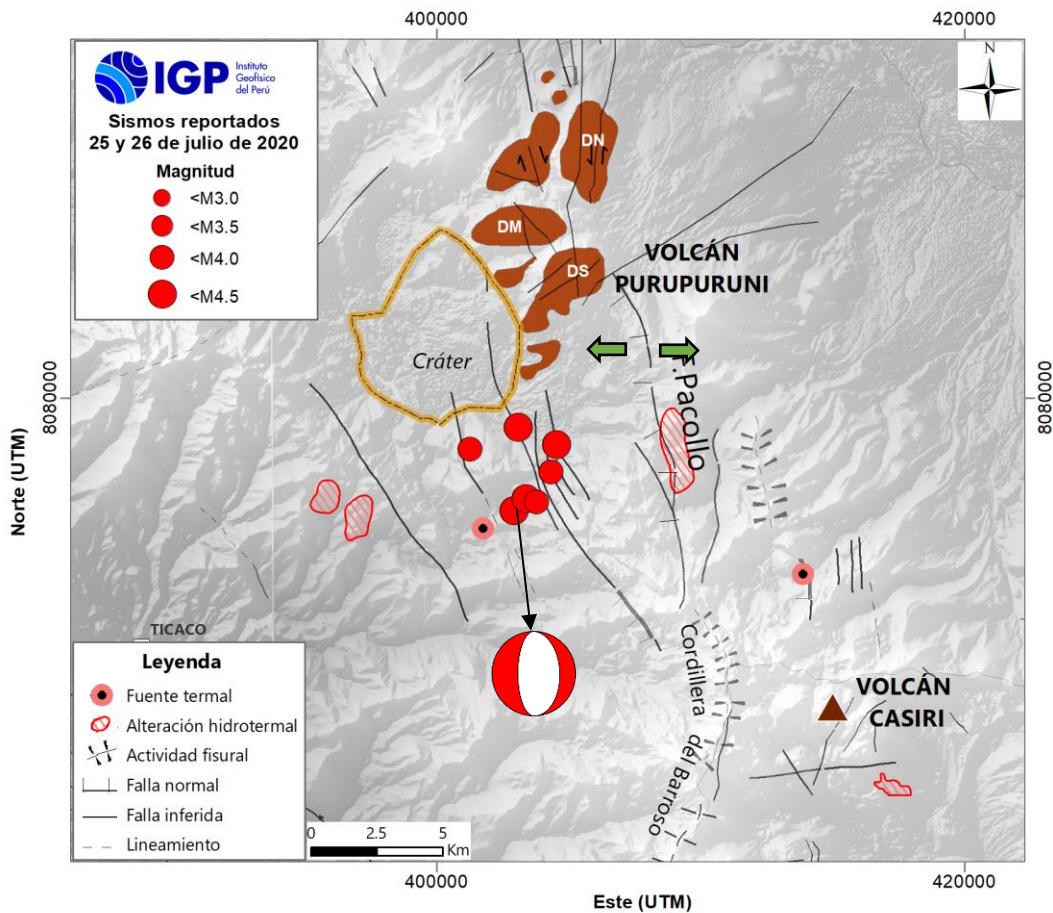


Figura 4: Distribución epicentral de los sismos reportados el 25 y 26 de julio por el CENSIS. La solución del mecanismo focal indica una falla de tipo normal de dirección N-S. Las flechas verdes, indican la dirección de los ejes de tensión. DN= domo norte, DM= domo medio y DS= domo sur

3.2.- Réplicas

Posterior a la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud y durante un periodo de 72 horas, se registraron más de 250 réplicas con magnitudes menores a $M3.6$ que no fueron percibidos por la población (Figura 5). De estas réplicas, el mayor porcentaje presentan fases P y S impulsivas, y según sus espectros con frecuencias pico a 5 Hz definen la ocurrencia de eventos

sísmicos tectónicos (Figura 6). En menor porcentaje se ha registrado eventos con espectros de frecuencias a 1.5 Hz correspondiendo al registro de sismos de periodo largo (LP), que por presentar sus epicentros cercanos al volcán Purupuruni, estarían asociados a movimientos de fluidos dentro de la estructura volcánica.

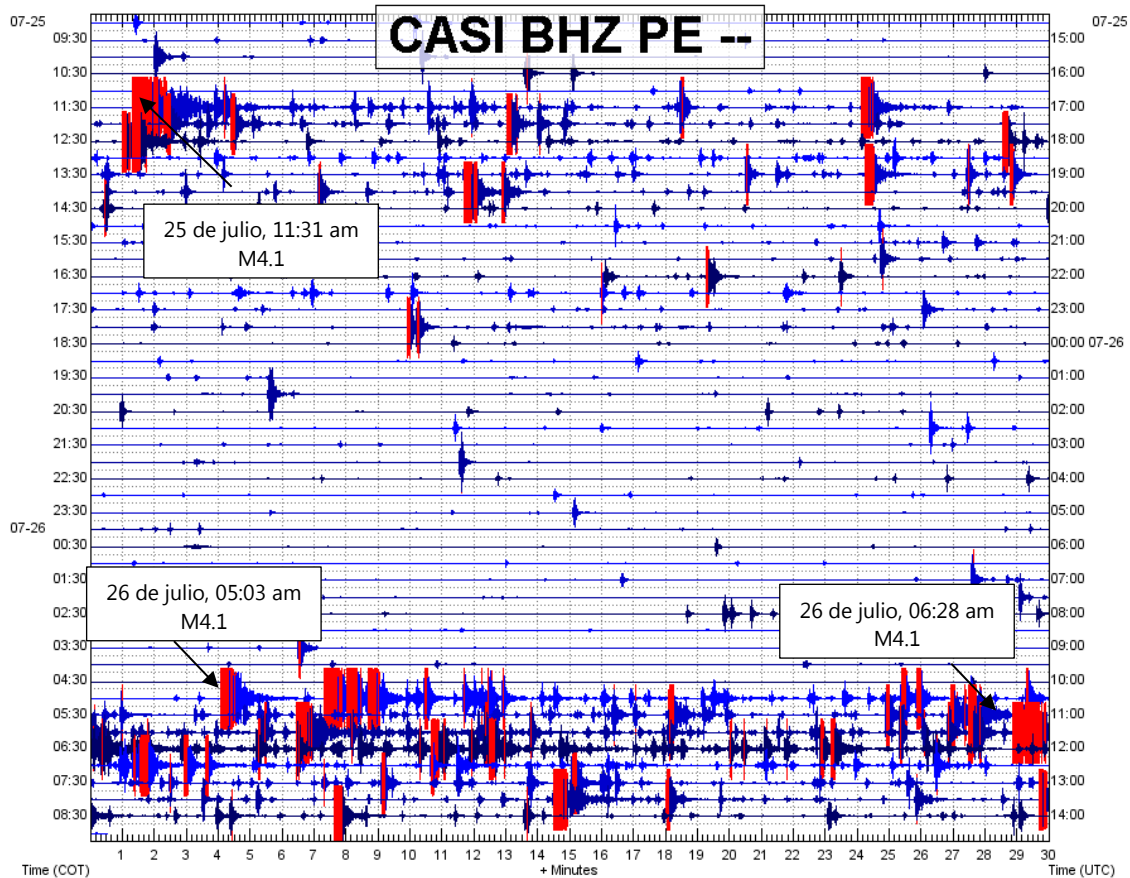


Figura 5: Sismos de mayor magnitud (M4.1) y réplicas registradas por la estación CASI, ubicada a 17 km del epicentro de los sismos.

3.2.1.- Eventos tectónicos

Del total de réplicas registradas, en la Figura 7 se muestra los epicentros de 157 eventos, todos distribuidos, desde el cráter del volcán Purupuruni hasta el extremo sur de la falla Pacollo, estando el mayor número de réplicas entorno al cráter del volcán con profundidades menores a 5 km. Según el perfil A-A', perpendicular a la falla Pacollo, las réplicas se distribuyen en profundidad formando dos importantes agrupamientos, el primero considera eventos que habrían ocurrido por

debajo del cráter del volcán Purupurini y el segundo, sigue una tendencia NE-SO hasta una profundidad de 10 km, definiendo la posible geometría de la falla Pacollo en profundidad con un ángulo de inclinación del orden de 54° (Figura 7).

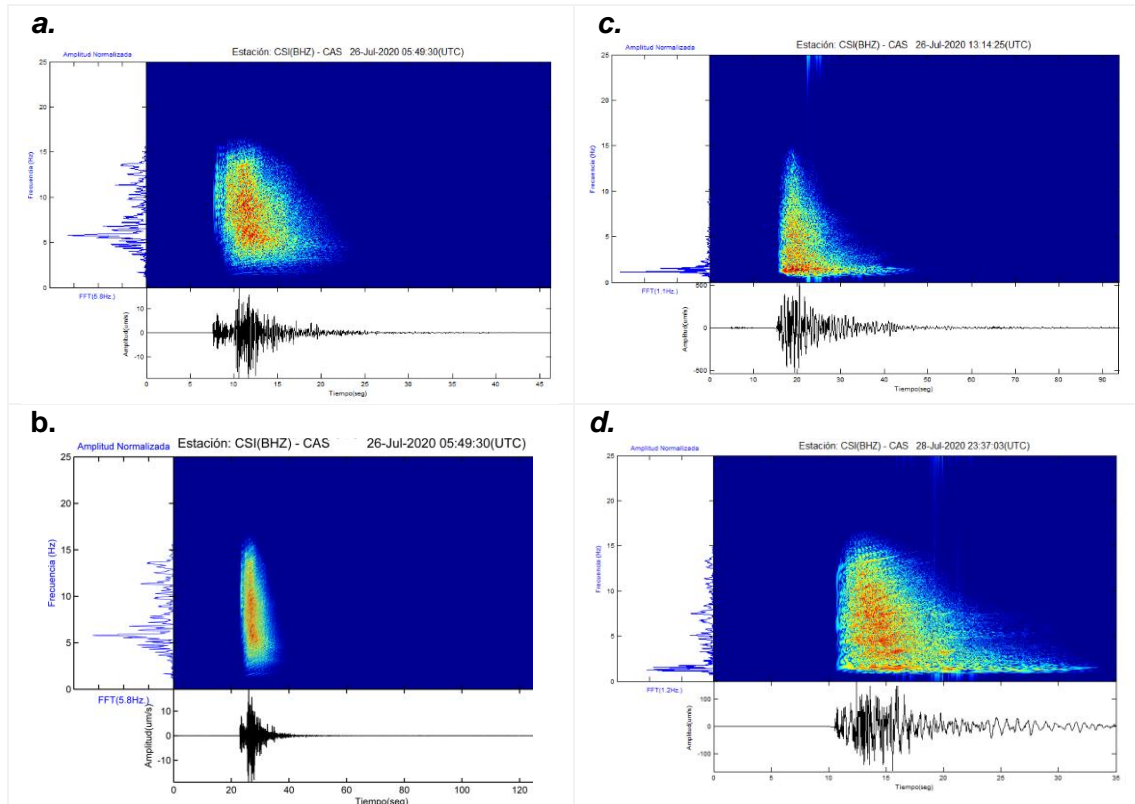


Figura 6: Sismos registrados por la estación Casiri entre el 25 y 28 de julio de 2020: a y b) sismos tectónicos, c y d) sismos de largo periodo.

Para el análisis de la secuencia temporal de la sismicidad en la zona de estudio, se considera además los eventos sísmicos registrados durante un periodo de 30 días previos a la crisis sísmica del 25 y 26 de julio. En la Figura 8a, se observa que los epicentros de los sismos registrados en el mes de mayo se distribuyeron a lo largo del domo sur (DS) y sobre el cráter del volcán Purupurini paralelos a la falla Pacollo. Los sismos ocurridos entre los días 25 y 26 de julio (Figura 8b, c) presentan sus epicentros al borde sur del cráter del volcán Purupurini; mientras que, los epicentros de los sismos ocurridos durante los días 27 y 28 de julio (Figura 8d y 8e), en menor número, se distribuyen a poca

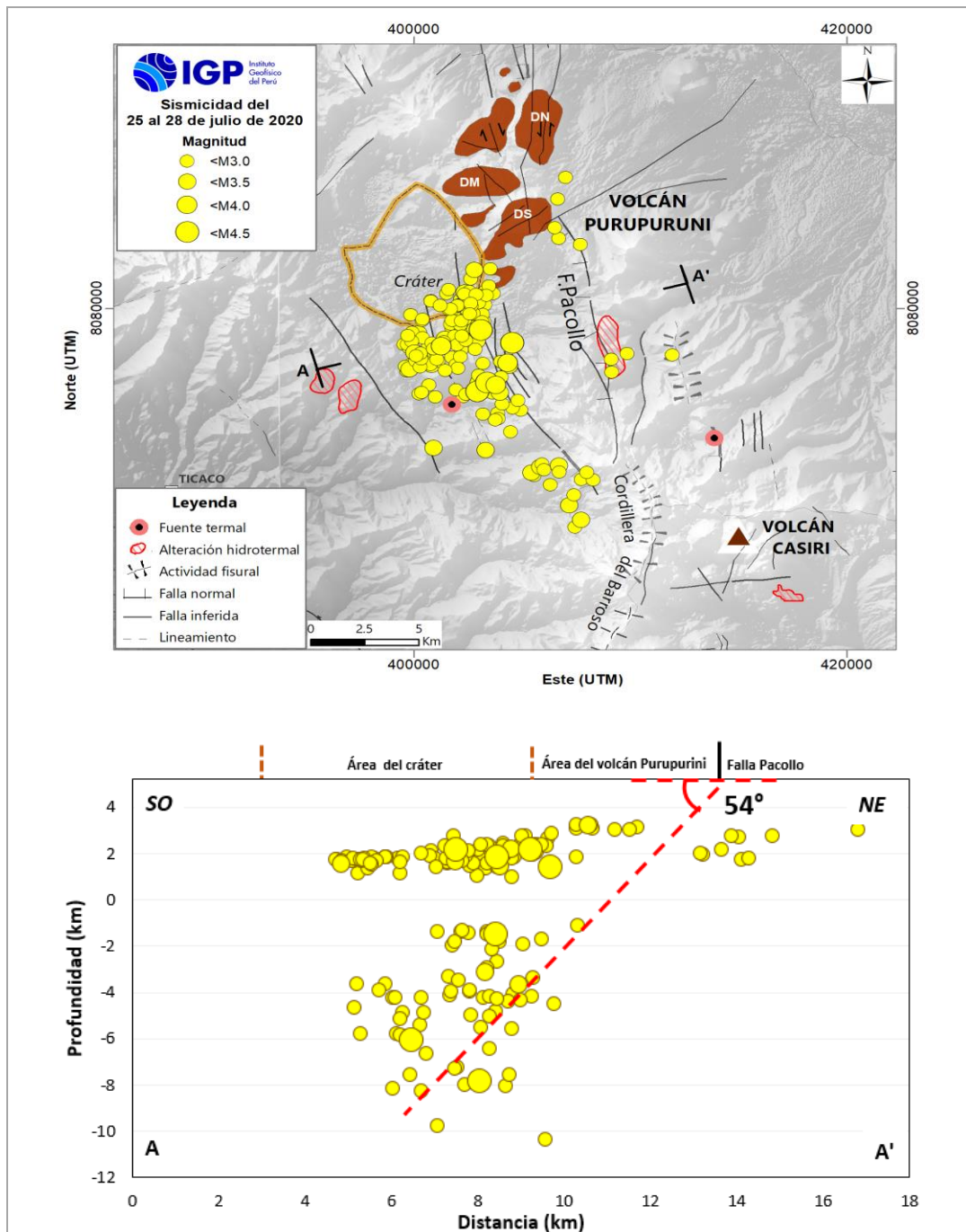


Figura 7: Distribución de los sismos localizados entre el 25 y 28 de julio y perfil A-A' de dirección SO-NE. Los círculos más grandes corresponden a los eventos principales ($M3.6$ - $M4.1$). La línea roja entrecortada, indica el posible plano de falla. DN= domo norte, DM= domo medio y DS= domo sur

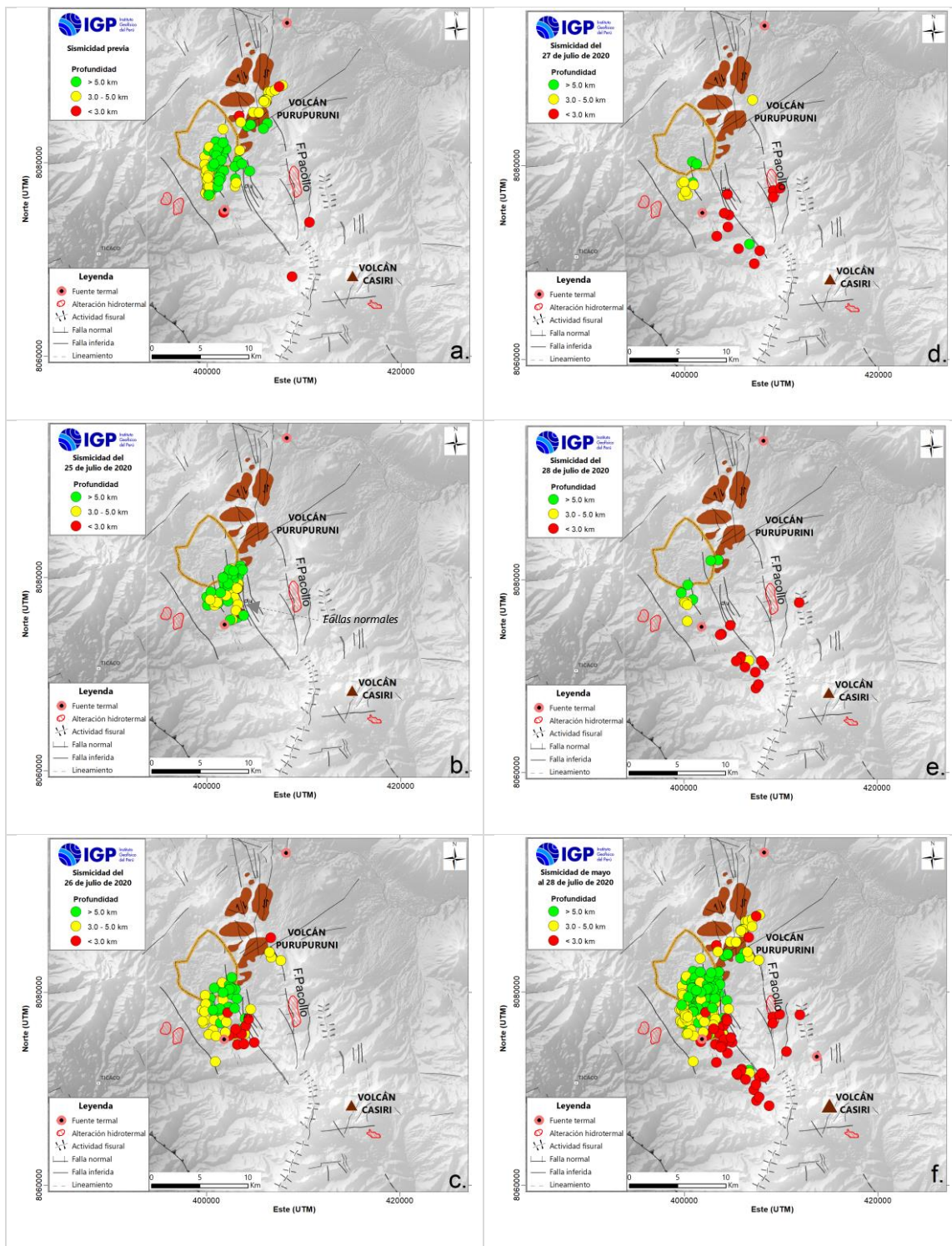


Figura 8: Secuencia temporal de la sismicidad. Sismicidad previa a la crisis sísmica (a), sismicidad del 25 de julio (b), sismicidad del 26 de julio (c), sismicidad del 27 de julio (d) y sismicidad del 28 de julio (e) y sismicidad total (f)

profundidad al sur del cráter y sobre las trazas de lineamientos y/o fallas presentes en el área con orientación en dirección NO-SE. Estos resultados muestran que, durante todo el periodo de ocurrencia de sismos, el proceso de ruptura se propago de norte a sur, desde el domo sur del volcán Purupuruni con focos ocurridos a profundidades de hasta 12 km, para luego al final de proceso de ruptura, alcanzar profundidades más superficiales (Figura 8f). Asimismo, es posible que durante el proceso de ruptura desarrollado sobre el plano de la falla Pacollo, otras fallas de menor dimensión ubicadas en su extremo SO, se habrían reactivado parcialmente.

3.2.2.- Eventos LP

Durante los días 25 y 26 de julio de 2020, se registró en menor porcentaje eventos sísmicos de Periodo Largo (LP) con frecuencias de 1.5 Hz (Figura 6). En general, los eventos LP son considerados como indicadores de disturbios volcánicos debido a que se relacionan con la presencia de fluidos como el magma (Lahr et al., 1994; Chouet, 1996). Los epicentros de los eventos LP se distribuyen entre el cráter del volcán Purupuruni y las zonas de alteración hidrotermal cercanas a una fuente termal ubicada al sur de esta estructura (Figura 9). Durante todo el proceso de ruptura que afectó a la falla Pacollo, el movimiento de fluidos en el interior de esta fuente termal habría dado origen a los sismos LP.

3.3.- Interferometría diferencial de radar (INSAR)

Para el análisis de la deformación local en la zona del volcán Purupuruni y la falla Pacollo, se ha utilizado imágenes de radar disponibles del satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA). En la Figura 10 se presenta el Interferograma realizado con imágenes satelitales obtenidas para los días 3 y 15 de julio de 2020 (órbita descendente del satélite); es decir, para las fechas previas a la crisis sísmica y en la cual se observa que no

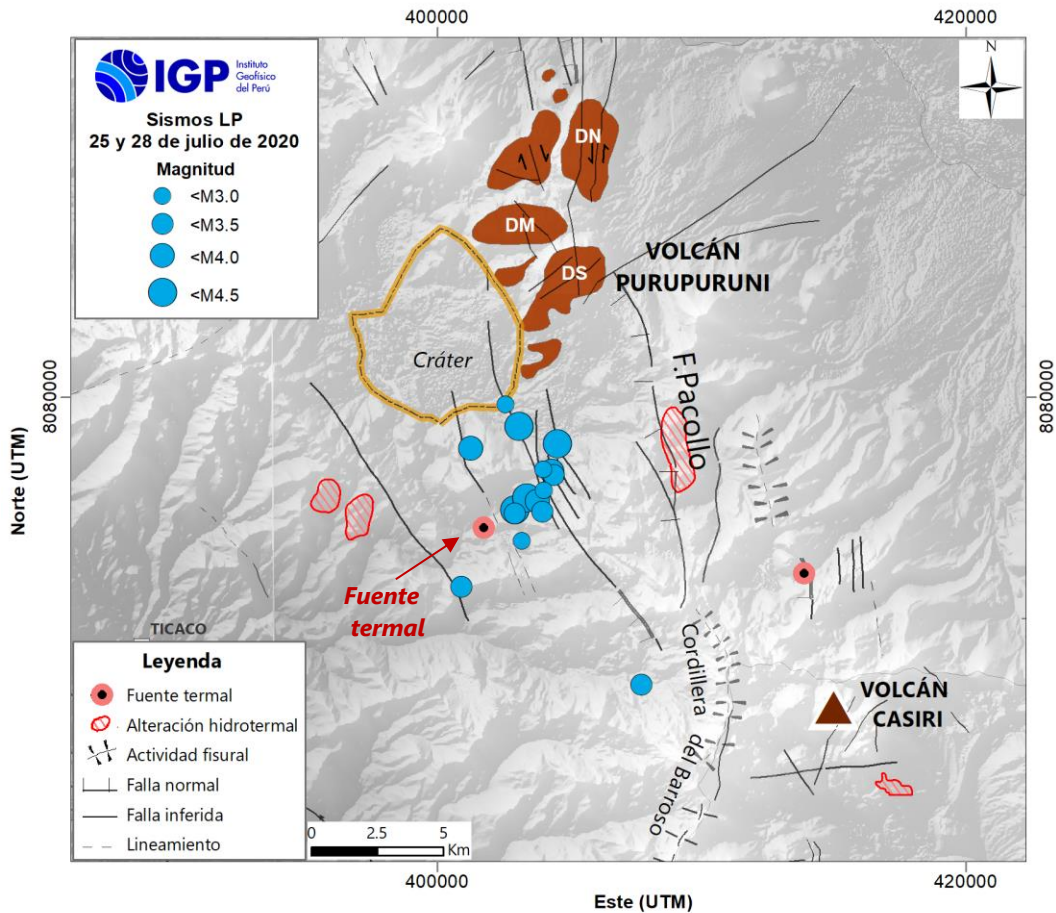


Figura 9: Distribución epicentral de los sismos tipo LP ocurridos en la zona de estudio. DN= domo norte, DM= domo medio y DS= domo sur

existe deformación superficial en la zona. Contrariamente, en la Figura 11 se muestra los interferogramas obtenidos para los días 15 y 27 de julio considerando orbitas descendente y ascendente del satélite. Los resultados permiten identificar el desarrollo de un importante proceso de deformación local de tipo extensional que habría sido generado por una falla normal con orientación N-S consistente con la falla Pacollo. La deformación se extiende sobre una longitud de 6 km indicando que el bloque Oeste habría experimentado descensos del orden de 8 cm (bloque hundido); mientras que, el bloque Este habría soportado un levantamiento del orden de 3 cm.

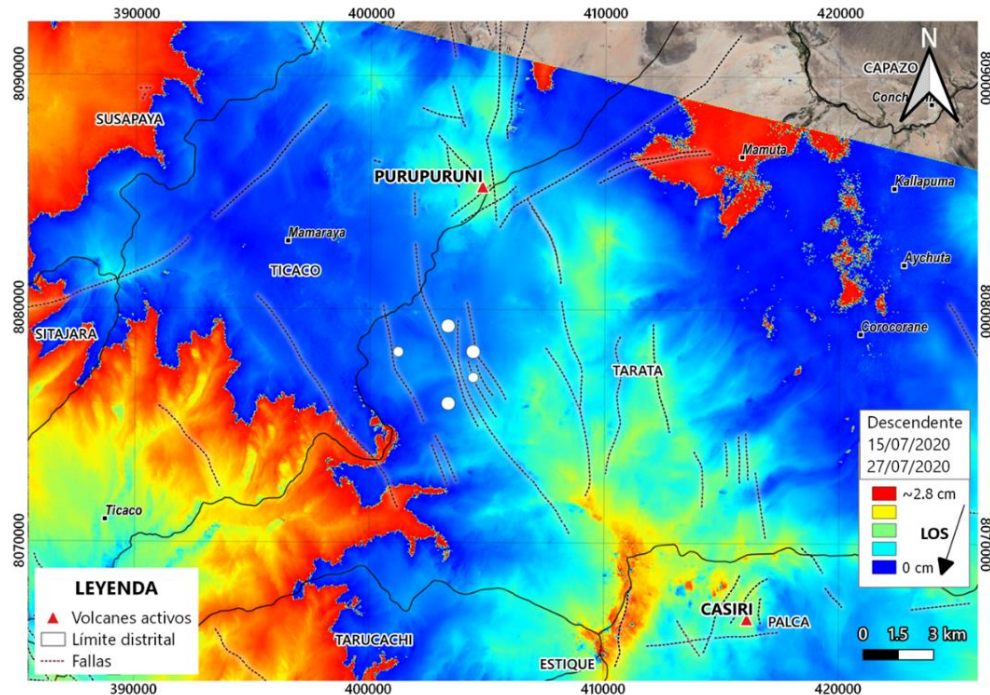


Figura 10: Interferograma para la zona del volcán Purupuruni a partir de imágenes de radar Sentinel-1 para los días 3 y 15 de julio de 2020 (órbita descendente del satélite). No existe deformación superficial.

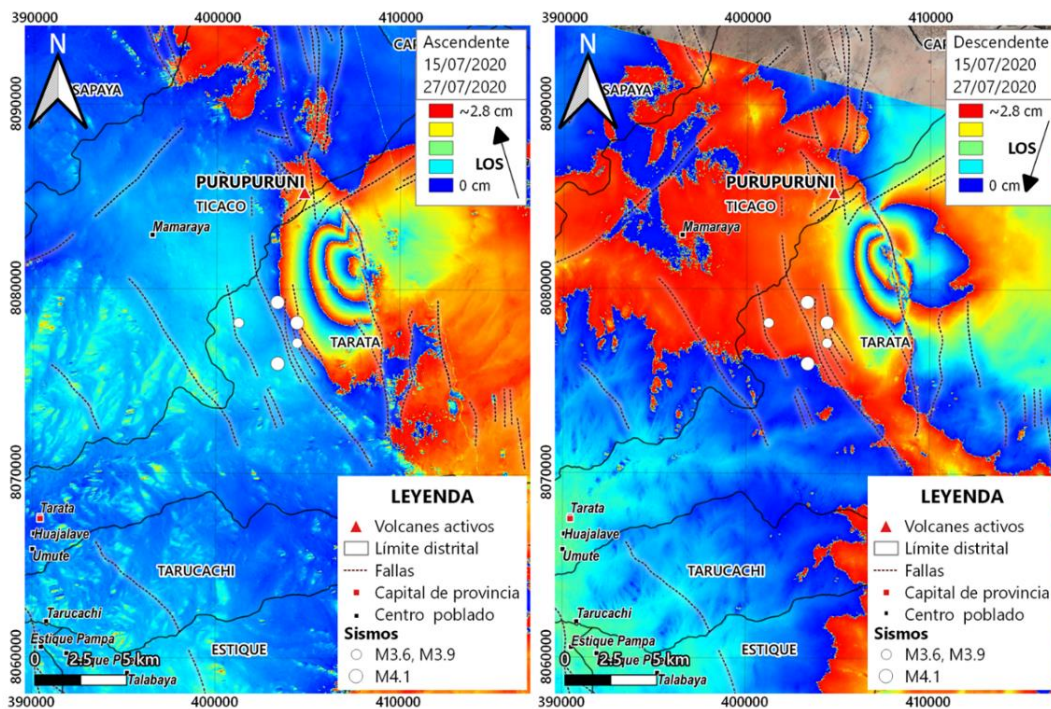


Figura 11: Interferogramas a partir del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 para los días 15 y 27 de julio de 2020 en órbita ascendente (izquierda) y descendente del satélite (derecha). La deformación observada es consistente con esfuerzos extensionales que estarían asociados a la reactivación temporal de la falla Pacollo. Los círculos de color blanco indican los epicentros de los sismos ocurridos entre el 25 y 27 de julio del 2020

Por otro lado, el análisis de desenrollado de la fase interferométrica (unwrapping) usando imágenes del radar Sentinel-1 para los días 15 y 27 de julio en órbita descendente del satélite (Figura 12), muestra con mayor claridad la deformación local producida tras la ocurrencia de la crisis sísmica del 25 y 26 de julio en el entorno de la falla Pacollo. El bloque del extremo Oeste habría soportado hundimientos del orden de 10.1 cm (área de color azul); mientras que, el bloque Este se habría levantado hasta 3.9 cm (área de color rojo). Estos resultados muestran claramente la reactivación temporal de la falla Pacollo.

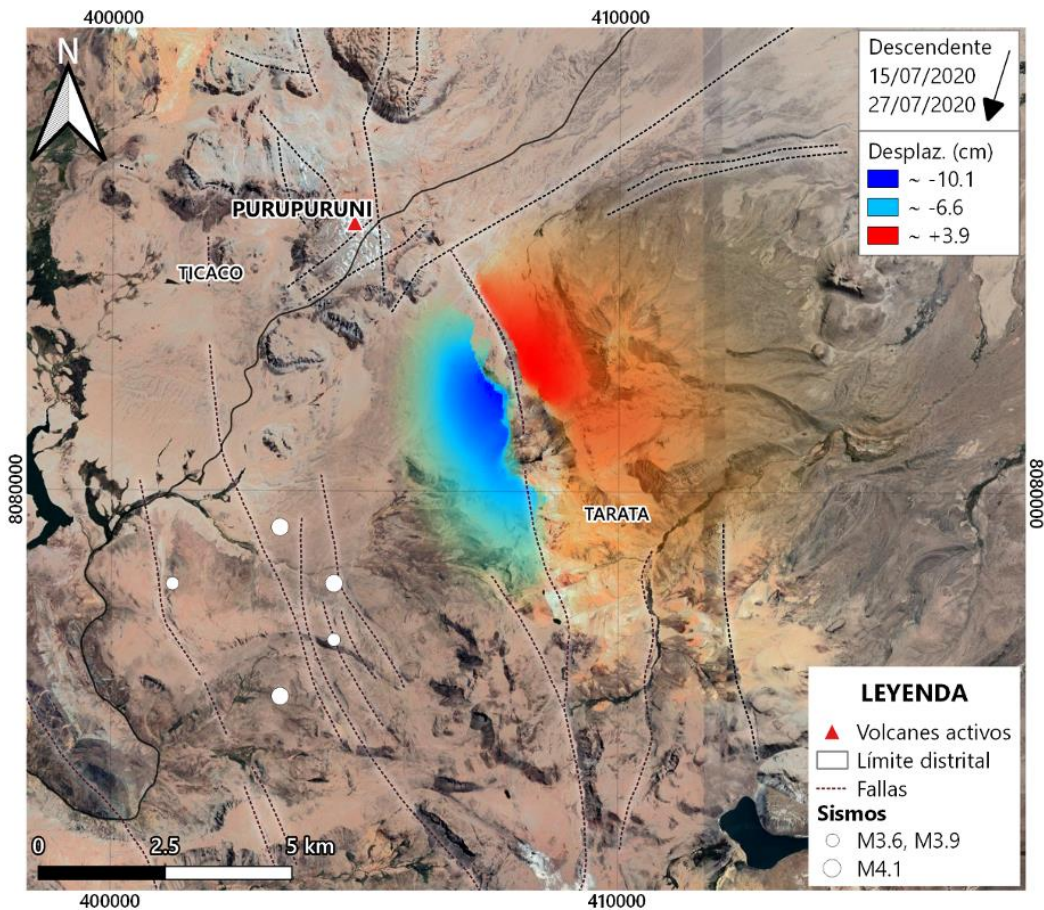


Figura 12: Desenrollado de la fase interferométrica a partir del análisis de imágenes de radar Sentinel-1 (órbita descendente del satélite): bloque hundido de color azul y bloque levantado en color rojo

3.4.- Interpretación sismotectónica

El análisis de la distribución espacial de los sismos ocurridos durante los días 25 y 26 de julio y su serie de réplicas, muestran que la falla Pacollo desarrollo un nuevo proceso de ruptura como parte de su reactivación temporal comprometiendo a fuentes termales del volcán Purupuruni ubicadas en el extremo sur del cráter (Figura 13). Esta falla es del tipo normal con plano de falla que buza en dirección Oeste con un ángulo de 54° . Esta orientación es coherente con la deformación superficial observada en imágenes satelitales analizadas con el método INSAR. El bloque oeste de la falla Pacollo en su proceso de descenso habría generado presión suficiente para alterar los fluidos internos de fuentes termales ubicadas en el extremo sur del cráter del volcán.

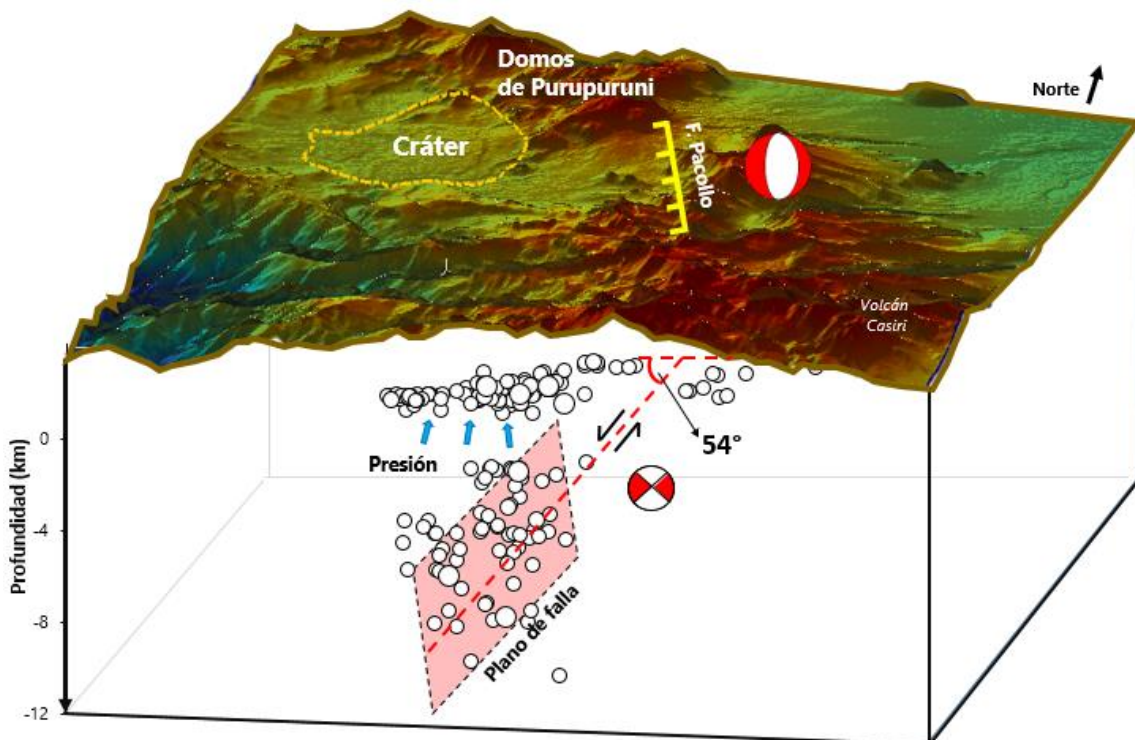


Figura 13: Esquema representativo de la distribución de la sismicidad durante el periodo de ocurrencia. La línea entrecortada, así como el rectángulo rojo, sugieren el plano de falla de Pacollo. Las flechas celestes, indican la migración de la sismicidad a profundidades más superficiales.

CONCLUSIONES

Entre los meses de abril a julio de 2020, se ha registrado un gran número de sismos con epicentros distribuidos entre los Domos del volcán Purupuruni y la falla Pacollo. Los sismos de mayor magnitud ocurrieron entre los días del 25 y 26 de julio con magnitudes entre M3.6 a M4.1. Estos eventos fueron percibidos por la población de Tarata (región Tacna) con intensidades de III-IV (MM). El análisis de la distribución espacial de los sismos y su serie de réplicas, así como la deformación cortical analizada usando imágenes satelitales y el método INSAR, han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- La sismicidad registrada presenta sus epicentros distribuidos entre el domo sur del volcán Purupuruni y el extremo final de la falla Pacollo, sobre una longitud de 16 km. En profundidad, los sismos se distribuyen siguiendo un plano de falla que buza en dirección Oeste con un ángulo de 54° hasta una profundidad de 12 km.
- El proceso de deformación local es puesto en evidencia con el análisis de interferometría, indicando el desarrollo de procesos de deformación extensional en dirección E-O con el hundimiento del bloque Oeste de hasta 10.1 cm y el levantamiento del bloque Este hasta 3.9 cm.
- La sismicidad ocurrida durante el periodo de abril a julio, es debido a la reactivación temporal de la falla Pacollo.
- El registro de eventos tipo LP, es debido a que el bloque Oeste de la falla Pacollo, en su proceso de descenso habría generado presión y altero los fluidos internos presentes en fuentes termales ubicadas al sur del cráter del volcán.

BIBLIOGRAFÍA

- Bromley, G.R.M., Thouret, J., Schimmelpfennig, I. et al (2019). In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bull Volcanol* 81, 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6>.
- Chouet, B. A. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380(6572), 309-316.
- Jacay, J., Sempere, T., Husson, L., & Pino, A. (2002, September). Structural characteristics of the Incapuquio fault system, southern Peru. In *International Symposium on Andean Geodynamics* (Vol. 5, pp. 319-321).
- Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Power, J. A., & Page, R. A. (1994). Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: Implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4), 137-151.
- 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.
- Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 de la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú.

