

Servicio Vulcanológico Nacional

INFORME ESPECIAL N° 01 – 2018

ESTADO ACTUAL DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN TICSANI

Resultados del monitoreo y vigilancia
2014-2018



Autores: J. Cruz, O. Macedo, J. Del Carpio, L. Ali, W. Alvarado, R. Centeno, J. Concha, R. Chijcheapaza, L. Macedo, A. Malpartida, V. Montesinos, N. Limachi, N. Puma, J. Torres, J. Vilca, K. Vargas, L. Velarde

Abril 2018

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPITULO I	3
1.1. UBICACIÓN	3
1.2. ACCESIBILIDAD	3
1.3. OBJETIVOS	3
2. CAPITULO II	5
VULCANISMO, ORIGEN DEL VOLCÁN TICSANI	5
2.1. CONTEXTO EN QUE OCURRE EL VULCANISMO EN EL PERÚ	5
2.2. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI	6
2.3. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN TICSANI	7
3. CAPITULO III	8
ESTUDIOS EFECTUADOS E INFORMACIÓN GEOFÍSICA-VULCANOLÓGICA EN EL VOLCAN TICSANI EN LOS ÚLTIMOS 13 AÑOS	8
3.1. ACTIVIDAD SÍSMICA NOTABLE OCURRIDA EN 2005	8
3.2. CAMPAÑA DE OBSERVACIÓN Y REGISTRO SÍSMICO EN 2006	13
3.3. DEFORMACIÓN DEL SUELO OBSERVADA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (2005)	15
3.4. POTENCIAL ESPONTANEO (PE) EN EL VOLCÁN TICSANI: CAMPAÑA DE JUNIO DE 2017	17
4. CAPITULO IV	19
MONITOREO SÍSMICO EN TIEMPO REAL,	19
INSTALACIÓN DE LA RED SÍSMICA TEMPORAL Y TELEMÉTRICA	19
4.1. ACTIVIDAD SÍSMICA CARACTERÍSTICA EN LA ZONA DEL VOLCÁN TICSANI	21
4.1.1. <i>Sismos de tipo fractura o VT</i>	21
4.1.2. <i>Sismos de baja frecuencia (LP)</i>	23
4.1.3. <i>Eventos de tipo Tremor</i>	23
4.1.4. <i>Eventos de tipo Híbrido</i>	24
5. CAPITULO V	26
SEÑALES DE INTRANQUILIDAD OBSERVADAS LOS ÚLTIMOS AÑOS EN EL VOLCÁN TICSANI	26
5.1. ACTIVIDAD SÍSMICA BAJO EL VOLCÁN TICSANI Y ACTIVACIÓN DE LA FALLA F2	26
5.2. ENJAMBRES SÍSMICOS	29
5.3. SISMICIDAD DE TIPO HÍBRIDO	30
5.4. APARICIÓN DE NUEVOS FOCOS SÍSMICOS Y MIGRACIÓN DE LA SISMICIDAD.	33
5.5. VOLUMEN DE MAGMA INTRUÍDO	35
5.6. SENSORES SATELITALES	36
5.6.1. <i>Temperatura ASTER</i>	36
5.6.2. <i>Densidad de gas SO₂ monitoreado por el sensor OMI</i>	37
6. CAPITULO VI	39

EVOLUCIÓN SÍSMICA DE LA ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN TICSANI	39
PRONÓSTICO DE ERUPCIONES.....	39
7. CAPITULO VII	42
PELIGROS VOLCANICOS Y EVALUACIÓN DE RIESGO EN EL VOLCÁN TICSANI	42
7.1. EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO	43
8. CONCLUSIONES	45
9. RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXO I.....	51
ANEXO II	52

INTRODUCCIÓN

El Ticsani se ubica a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua y 8 km del distrito de Calacoa; políticamente está localizado en la provincia de Mariscal Nieto, en la región Moquegua. Según el reciente estudio "Evaluación del riesgo volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro" (Macedo et al., 2016), el volcán Ticsani ha sido catalogado en el grupo de volcanes de "Alto Riesgo" del Perú. **EL INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERU (IGP)**, a través de su Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), desde hace más de 15 años ha estudiado la sismicidad de la zona donde se emplaza este volcán y **desde 2014 mantiene una red sísmica de 04 estaciones de vigilancia que actualmente envía las señales vía telemetría, en tiempo real hasta los laboratorios del OVS-IGP**. Asimismo, en 2005-2006 al ocurrir sismos importantes que afectaron a Calacoa, San Cristóbal, y otros distritos próximos al volcán, el IGP ha efectuado estudios de las características y consecuencias de la sismicidad tectónica local. Es muy frecuente que en zonas de volcanismo activo, ocurra también una actividad tectónica (reactivación de fallas, con sismos superficiales) importante; la zona del Ticsani no es ajena a este comportamiento y en los últimos años se ha observado notables indicios de intranquilidad volcánica que se exponen en el presente informe, y que deben ser tomados en cuenta por la comunidad y las autoridades del SINAGERD.

La más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años con un índice de explosividad volcánica (IEV) entre 2 y 3 (Siebert et al., 2010). Según los estudios realizados por el IGP (Mariño, 2002; Mariño y Thouret, 2003) esta última erupción presentó actividad de tipo freatomagmática, precedió la formación del domo denominado "domo D3" y pudo haber presentado columnas eruptivas de hasta 10 km de altura. Actualmente el volcán no solamente muestra una actividad fumarólica visible en varios puntos cercanos a su cima y domo más reciente, sino también una actividad sísmica notable e incesante. Asimismo, en la zona se observa una actividad hidrotermal importante, representada por surgentes de agua y vapor en un radio menor a la decena de kilómetros, destacando las fuentes termales del río Putina situado al noroeste del edificio volcánico.

En el presente informe técnico se encontrará los **resultados de los estudios geofísicos que el IGP ha efectuado en la región del volcán Ticsani durante 4 años (2014-2018), con especial énfasis en los estudios de sismología volcánica**, empleado por ser el método de monitoreo reconocido mundialmente como el mejor y más adecuado para vigilar a los volcanes activos. No obstante, el IGP no ha descuidado el empleo de otros métodos que aportan información complementaria importante como las mediciones de

temperatura y de gases SO₂, mediciones de campo eléctrico natural ó PE, así como observaciones in-situ.

Como producto del análisis de los datos e información recabados, se ha desarrollado un modelo esquemático que explica de manera integrada los resultados de las mediciones científicas obtenidas y de las observaciones de campo. Asimismo, en este informe técnico se detalla los peligros volcánicos y el nivel de riesgo del volcán Ticsani hallado mediante el reciente estudio integral de Macedo et al (2016).

1. CAPITULO I

1.1. Ubicación

Este edificio volcánico se ubica en el segmento sur de la cordillera occidental de los andes peruanos. Sus coordenadas son: 16°45' de Latitud Sur y 70° 36' de Longitud Oeste. Políticamente, se localiza en la jurisdicción del distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto de la región Moquegua. Entre los centros poblados próximos y más importantes de la zona se encuentran Calacoa, Soquezane, Quebaya, San Cristobal, Carumas y Cambrune.

La ciudad más importante de la región es Moquegua, la cual se encuentra a una distancia de 60 km al suroeste del Ticsani (Figura. 1.1).

1.2. Accesibilidad

El acceso hacia la región del volcán Ticsani cuenta con vías afirmadas, aunque en los tramos finales se constituyen en trochas que en épocas de lluvia dificultan el acceso. Para llegar hacia el Ticsani se considera como principal acceso la carretera asfaltada Ilo – Desaguadero, que pasa por Moquegua y los centros poblados Torata, Chillihua hasta Humajalso. A partir de Humajalso se toma un desvío hacia el norte que constituye la carretera afirmada Humajalso-Ticsani-Calacoa que pasa por el flanco este del volcán Ticsani, punto en el cual se toma un ramal de trocha que llega hasta el domo reciente (D3). Otra opción es tomar la carretera asfaltada Ilo-Desaguadero hasta el cruce de las carreteras Moquegua Carumas, siguiendo por la vía afirmada que pasa por Sacuaya, Quebaya y Calacoa.

1.3. Objetivos

- Informar del estado actual del volcán Ticsani, basado en mediciones e información técnica-científica
- **Hacer de conocimiento de las autoridades del SINAGERD acerca de las señales de intranquilidad volcánica** que se han registrado por medio de la red de instrumentos geofísicos que vigilan la actividad del volcán Ticsani, desde mayo de 2014 hasta marzo de 2018.

- Dar explicaciones acerca del **origen de la sismicidad observada y su relación con el estado de la actividad del volcán Ticsani**.
- Dar a conocer los resultados de las campañas temporales de trabajos geofísicos, así como resultados de **observaciones en la deformación del terreno** realizados en las últimas décadas.
- **Recordar a las autoridades y público en general** que el Ticsani es un volcán activo con actuales señales de intranquilidad, resaltando además **los peligros asociados ante una eventual erupción volcánica** y el grado de vulnerabilidad de la población, de la infraestructura local y regional, y de las vías de comunicación. El análisis y cuantificación de ambos factores (peligro y vulnerabilidad) han permitido, finalmente, catalogar al Ticsani como un **volcán de “Alto Riesgo”**.

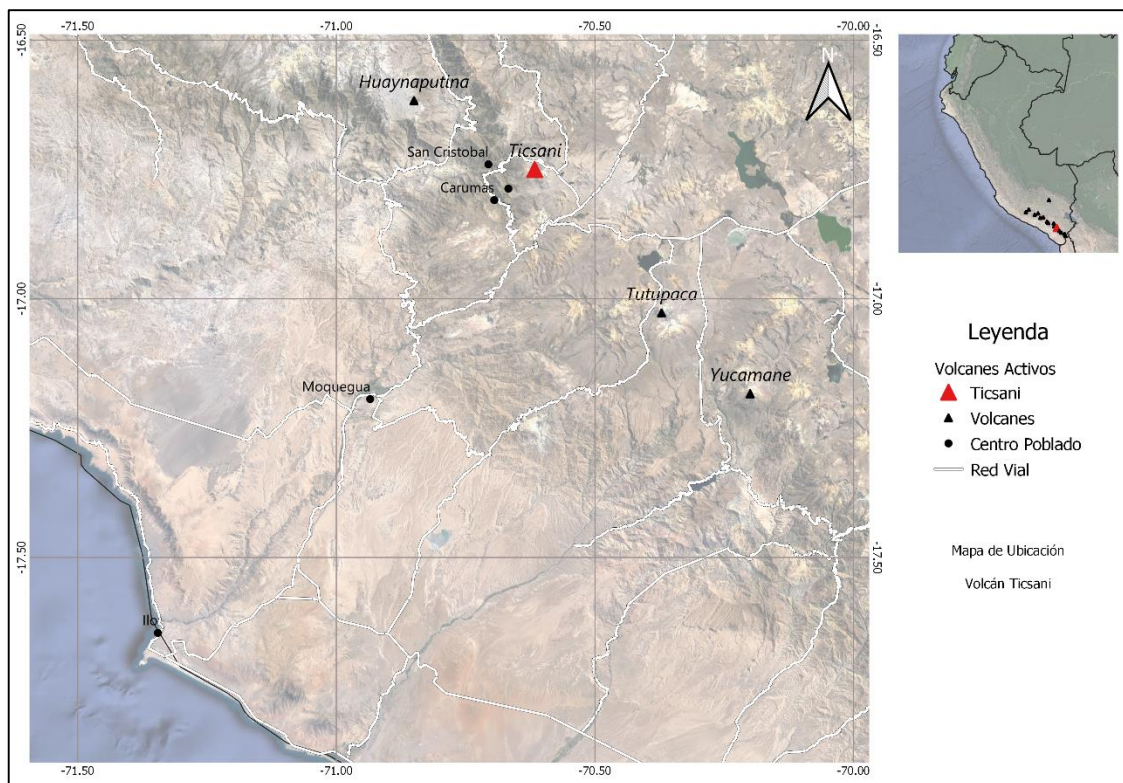


Figura 0.1 Mapa de Ubicación. El Ticsani (triángulo rojo) se encuentra en la región de Moquegua, sur del Perú.

2. CAPITULO II

VULCANISMO, ORIGEN DEL VOLCÁN TICSANI

2.1. Contexto en que ocurre el vulcanismo en el Perú

A lo largo de la cadena andina la actividad volcánica está distribuida en tres principales segmentos volcánicos cuaternarios activos, así tenemos, las zonas Volcánicas del Norte, Centro y del Sur (ZVN, ZVC y ZVS), respectivamente. Los volcanes activos del sur del Perú y norte de Chile están dentro de la ZVC, por ende el volcán Ticsani pertenece a esta zona y se ubica en su sector septentrional (Figura 2.1).

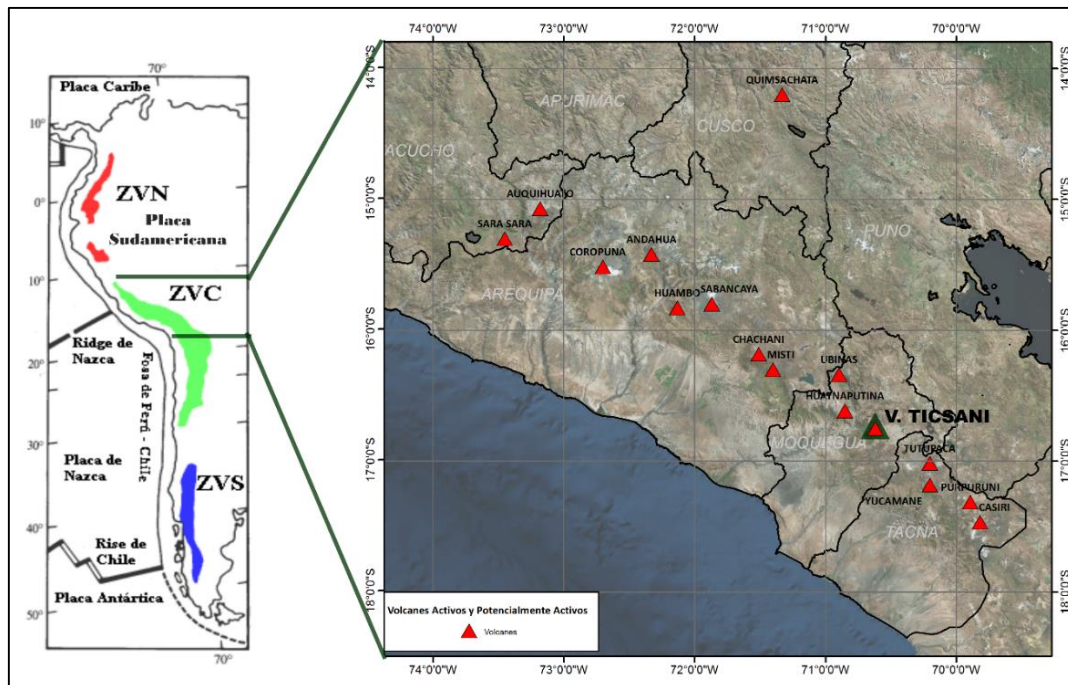


Figura 0.1 Zonas volcánicas de América del Sur (Izquierda). Zona volcánica central: Volcanes activos y potencialmente activos del Perú (Derecha).

El volcán Ticsani, así como todos los volcanes activos del Perú, ha sido generado como consecuencia de la subducción o hundimiento de la placa de Nazca por debajo de la placa de Sudamérica (Figura 2.2). En efecto, la subducción tiene como consecuencia la perturbación de la astenósfera a profundidades próximas a la centena de kilómetros propiciando que, finalmente, se genere magma de densidades menores. Es debido a su baja densidad del nuevo magma que éste asciende hasta la superficie aprovechando zonas de debilidad (zonas de fallamiento), formando así los volcanes activos del Perú.

Una característica en los volcanes de subducción, como es el caso de los volcanes peruanos, es que su magma es viscoso y contiene importantes volúmenes de gas, lo cual lo hace altamente explosivo. Es ésta condición lo que hace muy peligrosos a todos nuestros volcanes.

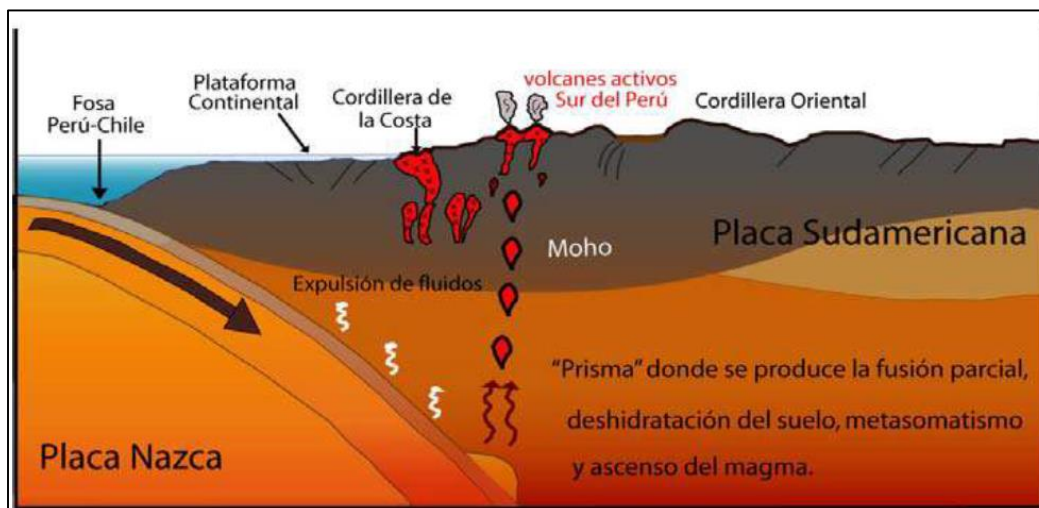


Figura 0.2 Esquema de la subducción donde la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana.

2.2. Contexto geomorfológico y estructural de la región del volcán Ticsani

Las características geomorfológicas de este macizo son propias de la puna o altiplanicie de la cordillera occidental, presentando pendientes fuertes, áreas de flujos de lavas y de avalanchas de escombros. El volcán Ticsani está conformado por estructuras volcánicas de destrucción como una caldera de avalancha, cráteres y el afloramiento de tres domos denominados D1, D2 y D3 (domo reciente), cuya característica es que se encuentran alineados de Norte a Sur (Figura 2.3A).

El resultado de los esfuerzos predominantes para la región del volcán Ticsani pueden observarse en superficie por la existencia de fallas de dirección NW-SE, N-S. A proximidades de la cumbre, se observa escarpas de fallas con dirección N-S visibles desde el NE como es el caso de la falla F2 (Figura 2.3B). Al oeste del volcán Ticsani se observan también fallas antiguas con orientación NW-SE (Lavallé et al., 2009).

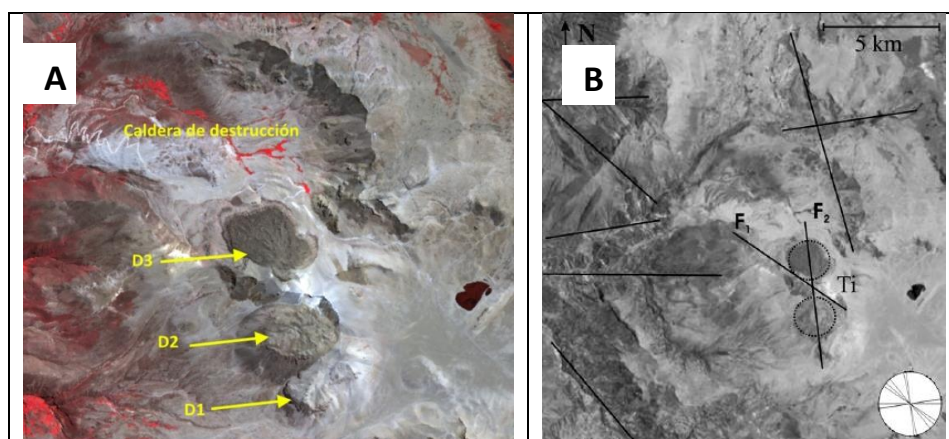


Figura 0.3.- (A): Caldera de destrucción o avalancha, domos D1, D2 y D3 del volcán Ticsani. (B): Estructuras locales de la región del volcán Ticsani (Lavallé et al., 2009).

2.3. Actividad histórica del volcán Ticsani

En los últimos 11 000 años se registraron tres erupciones explosivas (freatomagmáticas y sub-pliniana) cada una de ellas precedieron al emplazamiento de domos, eyectando entre 0.015 hasta 0.4 km³ de ceniza y pómez con Índices de Explosividad Volcánica (IEV) de 2 a 4 (Mariño, 2002), en un rango que va del 0 al 8. Ver anexo I.

Hace más de 10 600 años AP, se presentó una importante erupción sub-pliniana, correspondiente a la segunda etapa "Ticsani moderno" según lo confirman depósitos de caída lapilli y pómez "Ticsani gris" (Mariño, 2002). La columna eruptiva habría llegado hasta los 17 km de altura con un IEV de 4 asociado al segundo cráter y posterior emplazamiento del domo D2.

Una segunda erupción habría ocurrido antes de 1600 D.C. como muestran los depósitos de caída de ceniza que infrayacen a los depósitos de caída del volcán Huaynaputina. La última erupción de tipo freatomagmática que precedió la formación del domo D3 (posterior a año 1600 D.C.) ocurrida hace menos de 400 años, podría haber presentado una columna eruptiva de hasta 10 km de altura con un IEV de entre 2 y 3. Este proceso volcánico está representada por los depósitos de caída pómez del "Ticsani parduzco" (Mariño, 2002).

En la actualidad existen pequeñas fumarolas restringidas a las proximidades de la cima del volcán, además de una actividad hidrotermal importante, representada por surgentes de agua y vapor que se distribuyen principalmente al NW, también se encuentran algunas fuentes termales al E y SW del volcán dentro de un radio de 9 km. Destacan las fuentes termales del río Putina siendo la segunda zona geotermal más importante del Perú (Mariño & Thouret, 2003).

3. CAPITULO III

ESTUDIOS EFECTUADOS E INFORMACIÓN GEOFÍSICA-VULCANOLÓGICA EN EL VOLCÁN TICSANI EN LOS ÚLTIMOS 13 AÑOS

A continuación, se describen estudios geofísicos realizados anteriormente por el **Instituto Geofísico del Perú** en la región del volcán Ticsani. Estas campañas fueron conducidas por el área de Sismología del IGP en 2005 (Tavera, 2006) y por el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) del IGP en 2006. Los resultados de estos estudios nos han permitido mejorar el análisis e interpretación de la actividad sísmica que ocurre en la zona y su relación con el volcán Ticsani. Por otro lado, se realizaron estudios de deformación mediante el método InSAR realizados por Gonzales, (2006) y por Jay et al., (2013).

3.1. Actividad sísmica notable ocurrida en 2005

El 01 de octubre del 2005 a las 22:19 horas UTC se registró un sismo de magnitud 5.3 ML, localizado sobre el domo reciente (D3) del volcán Ticsani, a 8 km al este del poblado de Calacoa, (Tavera, 2006), con una profundidad de 5.7 km (Figura 3.1). Este sismo y su serie de réplicas afectaron las localidades de Calacoa, Cuchumbaya y Carumas entre otras ubicadas al oeste del volcán Ticsani, causando daños en un gran número de viviendas de adobe (Figura 3.2). Estos movimientos, además de causar alarma en la población y autoridades, ocasionaron también la preocupación de los habitantes acerca de la posibilidad de reactivación del volcán Ticsani.

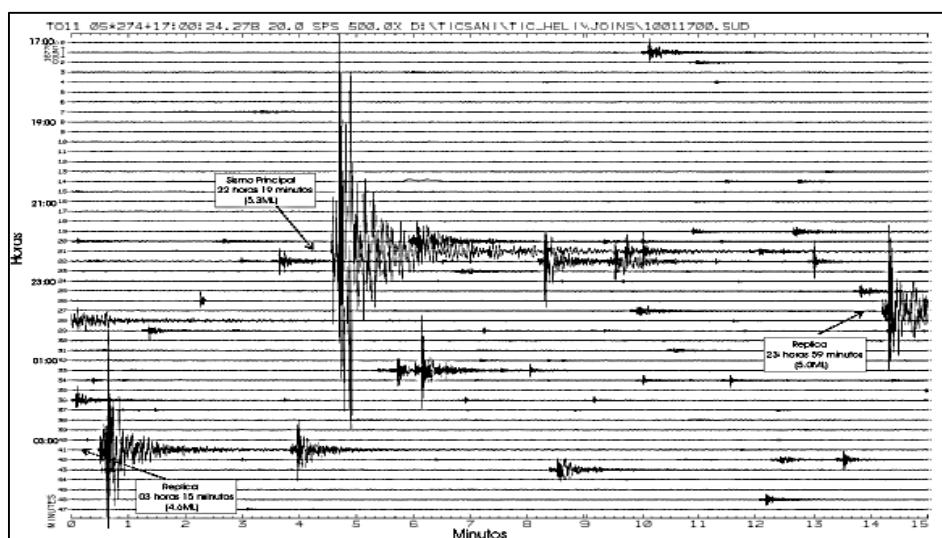


Figura 0.1 Sismograma del 01 y 02 de octubre 2005 de la estación sísmica Toquepala (TOQ), según Tavera (2006).



Figura 0.2 Imágenes que muestran los daños ocasionados en la localidad de Calacoa por el sismo de magnitud 5.3 ML ocurrido el 01 de octubre de 2005.

En los días siguientes al sismo del 01 de octubre, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) instaló una red sísmica temporal (Figura 3.3) que operó por un periodo de 10 días (12-22 de octubre). Esta red estuvo conformada por cuatro estaciones sísmicas digitales equipadas con sensores de banda ancha, es decir capaces de registrar señales sísmicas de altas y bajas frecuencias. En la tabla 3.1 se aprecian las coordenadas de las cuatro estaciones (TIC, PAL, CRM y HMA), y su altitud.

La identificación y análisis de las señales se realizó tomando como referencia la estación TIC, ubicada muy próxima al domo D2. Se registraron y clasificaron un total de 2570 sismos, la mayoría de ellos relacionados a procesos de ruptura donde las señales sísmicas presentan fases P y S claras, y contienen frecuencias predominantes entre 4 Hz y 13 Hz. Los días 15 y 20 de octubre de 2005 fueron los días de mayor actividad sísmica.

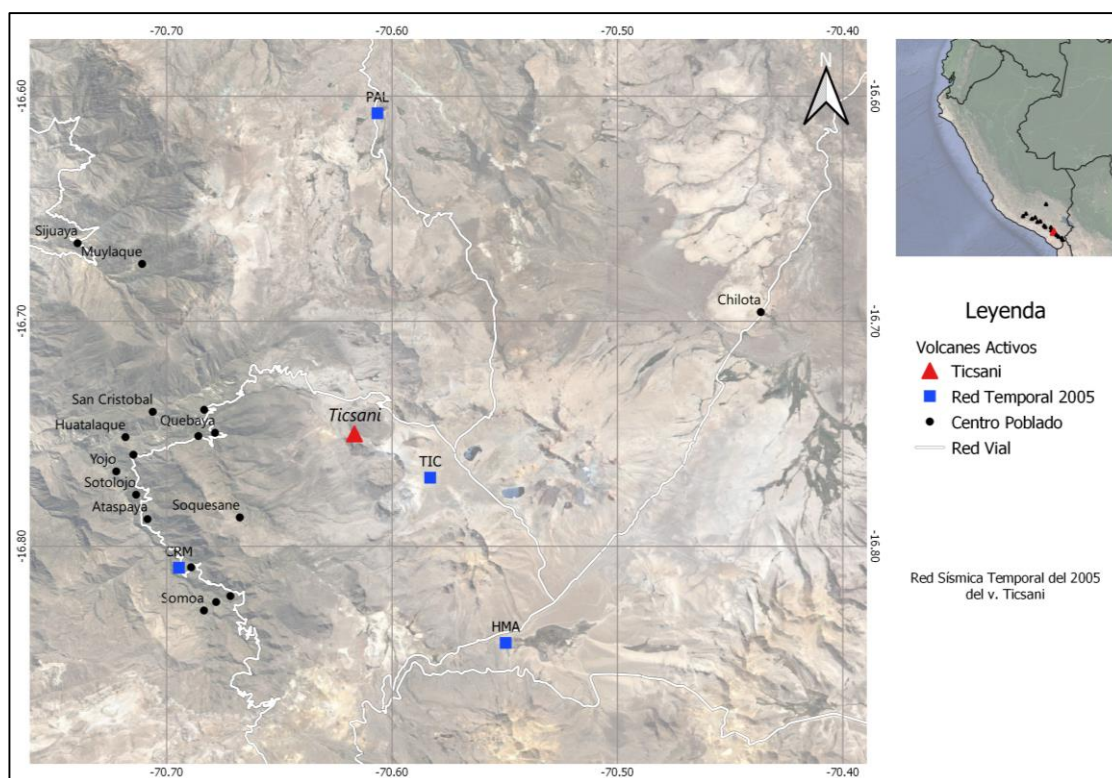


Figura 0.3 Distribución de las estaciones sísmicas temporales en 2005.

Red Temporal Ticsani 2005				
Estación	Código	Longitud	Latitud	Altitud
Ticsani	TIC	-70.58	-16.77	4805
Pallatea	PAL	-70.61	-16.61	4409
Carumas	CRM	-70.69	-16.81	3074
Humajalso	HMA	-70.55	-16.84	4471

Tabla 0.1 Ubicación de las estaciones sísmicas temporales que conformaron la red de 2005.

En el marco del trabajo e investigación de la actividad volcánica del Ticsani, Cruz (2015) efectuó el análisis de las señales obtenidas y obtuvo la localización de los eventos registrados empleando un modelo de velocidades particular para esta zona. En este trabajo se logró localizar con buena precisión un total de 241 eventos de tipo ruptura de magnitudes moderadas, de hasta 3.6 ML. En la figura 3.4 se observa que la distribución de sismos muestra un importante agrupamiento sobre el domo D3 y la caldera de avalancha. Sobre la misma figura se observa otro grupo sísmico, aunque de menor número, localizado a 3 km al SE del volcán. Estos sismos aparentemente tienen orientación NW-SE. Así mismo, se observan sismos relativamente dispersos que comprenden las zonas de Humajalso, Huaytire y Pampa Huancane a 20 km al SE del volcán Ticsani.

En cuanto a su distribución en profundidad, los perfiles E-W y N-S (Figura 3.4) muestran a sismos localizados bajo el domo reciente (D3) con una profundidad de hasta los 20 km. Sobre los perfiles mostrados, destaca un agrupamiento situado por debajo de la caldera, a profundidades de hasta 12 km; este foco sísmico es especialmente claro en el perfil N-S. Los sismos se encuentran por debajo del domo D3 y la caldera de avalancha.

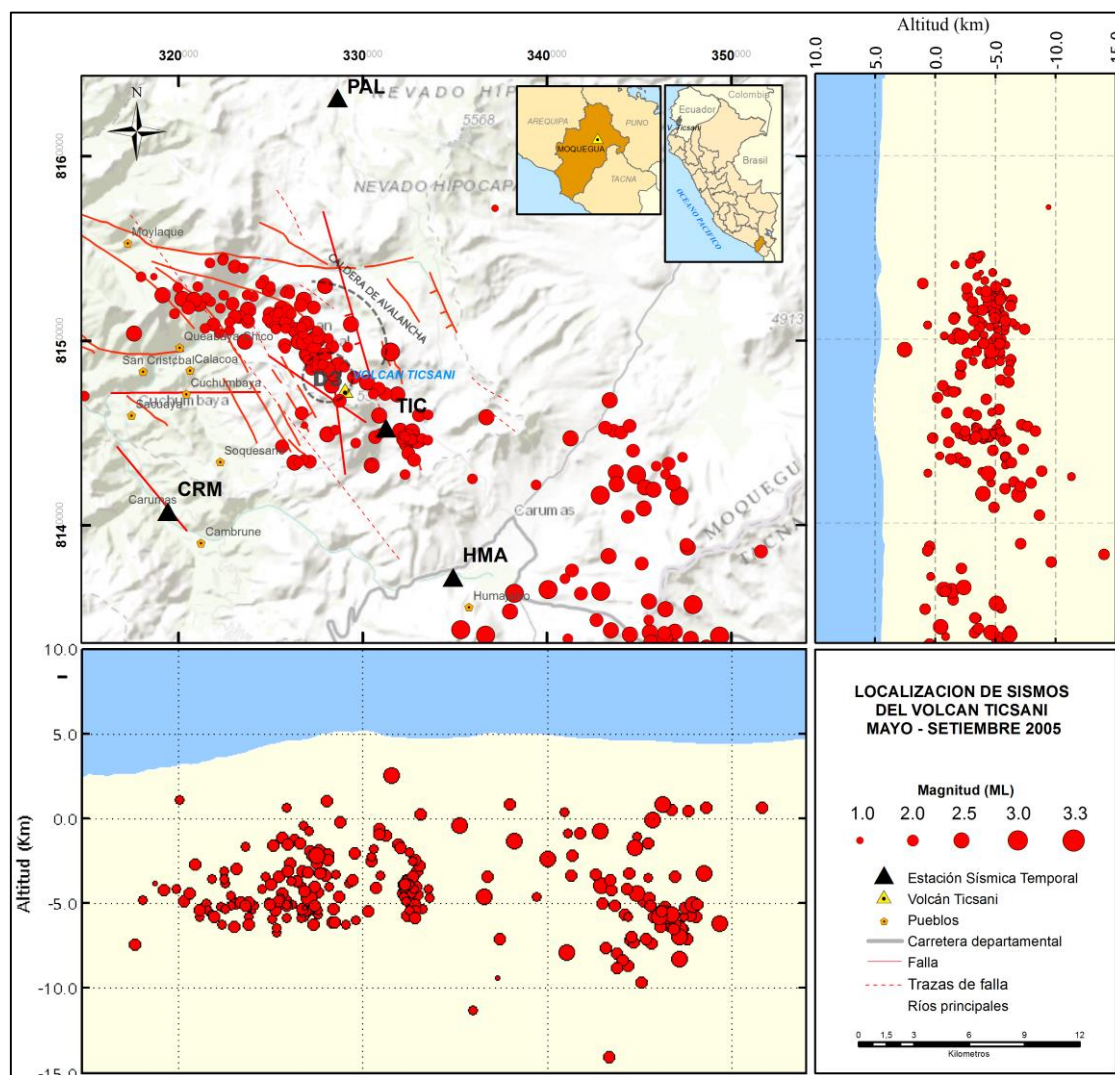


Figura 0.4 Distribución de los sismos en planta y profundidad, perfiles N-S y E-W. Sismos ocurridos durante los días 14 al 22 de octubre del 2005. Rasgos estructurales modificado de Lavallé et al., (2009), Gonzales (2009) y Carlotto, (2009).

Tavera et al., (2006) realizaron la interpretación sismotectónica del sismo del 01 de octubre mediante el cálculo de mecanismos focales para el evento principal y sus réplicas más representativas. Según las soluciones obtenidas, los mecanismos focales corresponden a fallas de tipo normal con planos orientados en dirección NW-SE y ángulos de buzamiento con dirección NE y SW (Figura 3.5). Por otro lado, mediante reconocimientos de campo efectuados en toda esta área luego del sismo del 01 octubre de 2005, se sabe que al menos la falla N155° ubicada a 4 km al suroeste del domo D3 del Ticsani fue reactivada en esa oportunidad (comunicación oral O. Macedo; Gonzales et al., 2009, Tavera et al, 2006). Ver figura 3.6.

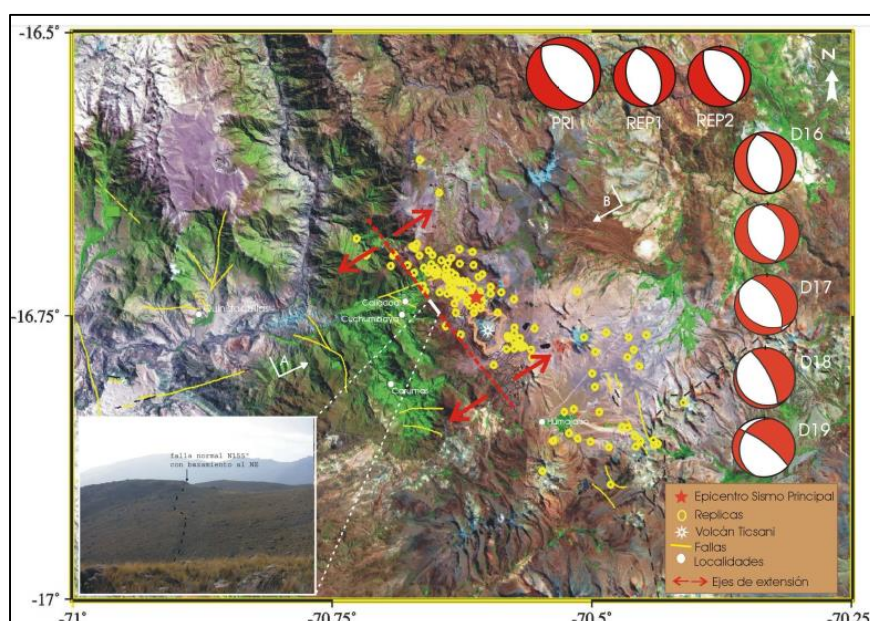


Figura 0.5 Interpretación sismotectónica del sismo del 01 de octubre de 2005 y de su serie de réplicas ocurridas en la región del volcán Ticsani. Las esferas indican mecanismos focales de tipo extensivo para el sismo principal (PRI), réplicas mayores REP 1-2 y réplicas ocurridas entre los días 16 y 19 (D16 y D19).

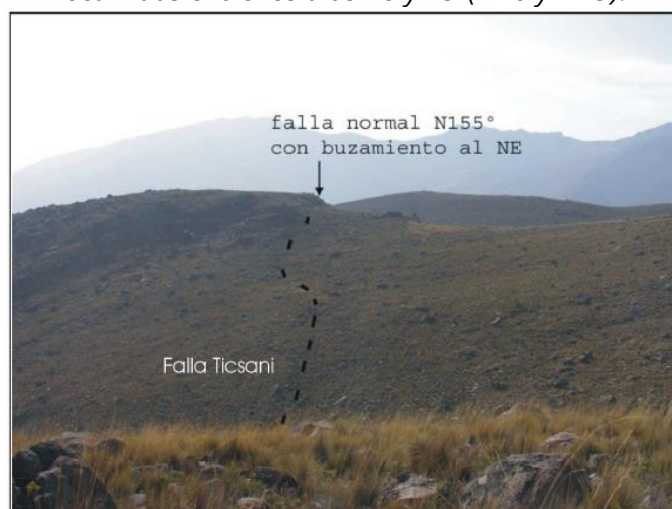


Figura 0.6 La imagen muestra la Falla Ticsani de orientación N155° identificada en campo (Foto: O. Macedo)

3.2. Campaña de observación y registro sísmico en 2006

Entre setiembre y diciembre del 2006 el Observatorio Vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú operó siete estaciones sísmicas: TCN, HMA, HTR, PAL, CHT, SCR y CRM, distribuidas en un radio de 30 km alrededor del volcán Ticsani. La estación TCN estuvo localizada sobre el domo reciente (D3) del volcán (Figura 3.7). Se usaron sismómetros de banda ancha Guralp, y registradores TITAN3-XT. La Tabla 3.2 muestra la posición de las estaciones instaladas.

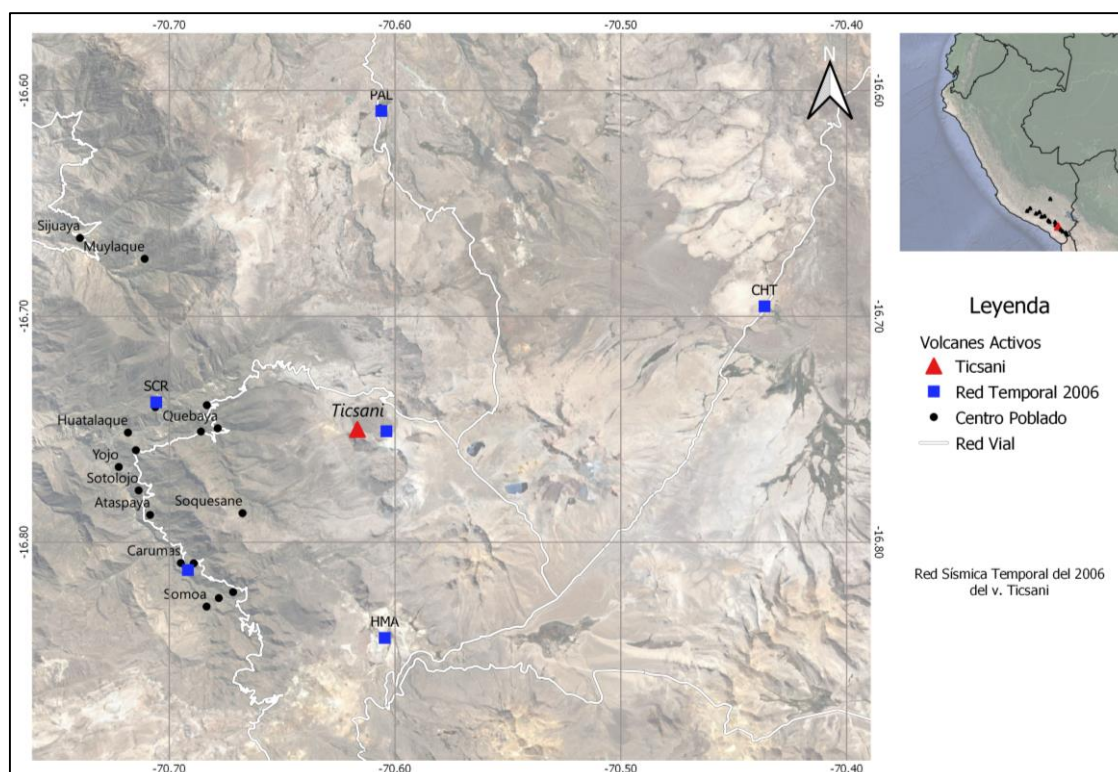


Figura 0.7 Distribución de las estaciones sísmicas temporales en 2006.

La campaña se realizó entre el 14 de setiembre y el 03 de diciembre del 2006. Los eventos registrados fueron en general sismos de tipo ruptura con fases de arribo P y S bien definidas. La estación TCN fue utilizada como estación de referencia para la clasificación de los sismos; se registraron un total de 511 sismos, con una tasa promedio de 6 sismos por día. En esta oportunidad, también se registraron 216 eventos de baja frecuencia relacionados al paso de fluidos (agua, vapor de agua y gases).

Durante esta campaña 2006, se observaron dos picos de actividad sísmica de tipo fractura (VT) ocurridos el 27 de setiembre y 27 de noviembre, al registrar 32 y 26 sismos, respectivamente (Figura 3.8B). Los sismos de periodo largo o LP (Figura 3.8A) tuvieron una tasa promedio de 3 sismos por día, siendo el día 01 de noviembre el día en que se registró el mayor número de eventos. Durante el periodo de análisis no se registraron enjambres sísmicos.

Red Temporal Ticsani 2006				
Estación	Código	Este	Norte	Altitud
<i>Ticsani</i>	<i>TCN</i>	<i>329040</i>	<i>8147316</i>	<i>5115</i>
<i>Humajalzo</i>	<i>HMA</i>	<i>329040</i>	<i>8137188</i>	<i>4434</i>
<i>Huaytire</i>	<i>HTR</i>	<i>353439</i>	<i>8132503</i>	<i>4516</i>
<i>Pallatea</i>	<i>PAL</i>	<i>328672</i>	<i>8163003</i>	<i>4391</i>
<i>Chillota</i>	<i>CHT</i>	<i>346847</i>	<i>8153570</i>	<i>4408</i>
<i>San Cristobal</i>	<i>SCR</i>	<i>318159</i>	<i>8148646</i>	<i>3173</i>
<i>Carumas</i>	<i>CRM</i>	<i>319723</i>	<i>8140438</i>	<i>3131</i>

Tabla 0.2 Ubicación de las estaciones sísmicas temporales que conformaron la red de 2006.

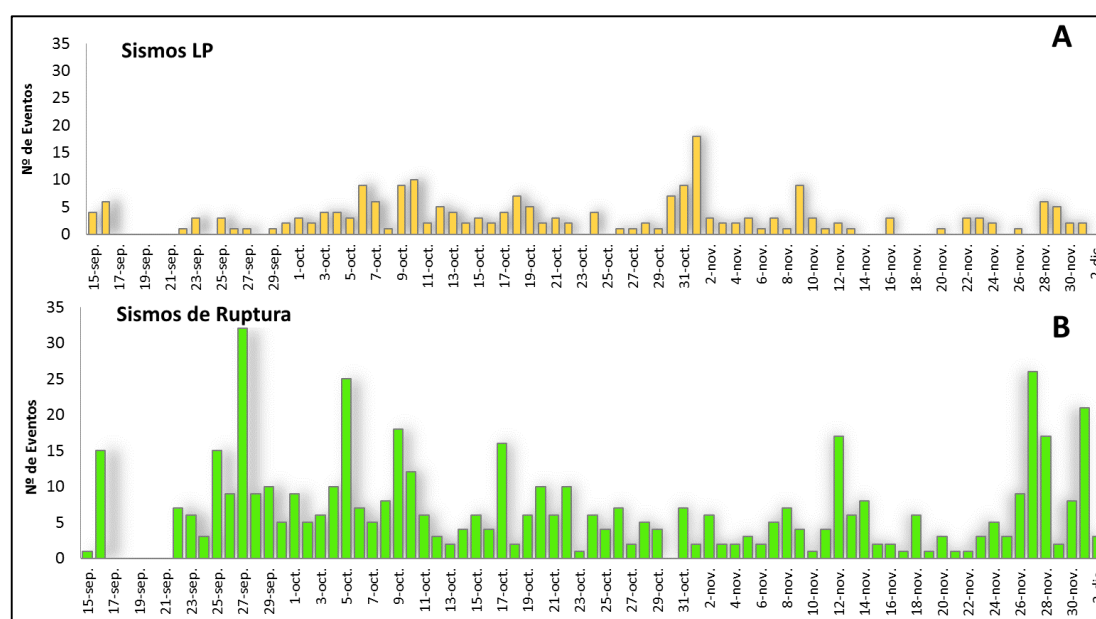


Figura 0.8 Histograma de ocurrencia de eventos registrados por la estación TCN. A) Sismos de baja frecuencia o LP y B) Sismos de ruptura o VT.

3.3. Deformación del suelo observada en la región del volcán Ticsani (2005)

Los estudios de sismicidad realizados durante el 2005 guardan relación con las mediciones de deformación efectuadas en 2005, en base a interferometría radar (InSAR), realizado por Jay et al. (2013) y Gonzales et al. (2006). En ambos trabajos los científicos identificaron dos zonas de deformación (Figura 3.9) que probablemente estuvieron asociadas a los eventos sísmicos de octubre de 2005 durante el cual se produjo el evento de 5.3 ML el 01-10-2005. La interpretación de las imágenes InSAR muestran que la deformación habría ocurrido entre el 29 de junio y el 22 de noviembre del 2005 (Jay et al., 2013). La primera zona deformada está ubicada a 7 km al NW del volcán Ticsani, y presenta un área de subsidencia (~10.3 cm de desplazamiento proyectado en la línea de vista del satélite-LOS) y otra de levantamiento (~3.5cm LOS), y coincide con la falla activa de orientación N155° claramente reconocida en el campo (comunicación personal O.Macedo; Gonzales et al., 2006), con desplazamientos de tipo normal. Por tanto, es muy probable que estas deformaciones halladas (subsidencia de 10.3 cm y levantamiento de 3.5 cm), sean consecuencia del enjambre de sismos de octubre 2005 (Holtkamp et al., 2011). La segunda zona deformada se encuentra a 17 km al SE del volcán y corresponde a una sola y amplia subsidencia de forma elíptica (~6cm LOS; figura 3.9); en este caso no se ha observado asociación alguna con deformaciones por fractura superficial. Jay et al. (2015) consideran una posible relación entre las dos deformaciones, a 7 km al NW y a 17 km al SE del volcán, sugiriendo que el enjambre de sismos ocurridos inicialmente podría haber debilitado el sistema de fallas, lo que provocó la liberación de los fluidos atrapados al SE del volcán, y generó a su vez nuevos sismos de fractura y subsidencia de la zona.

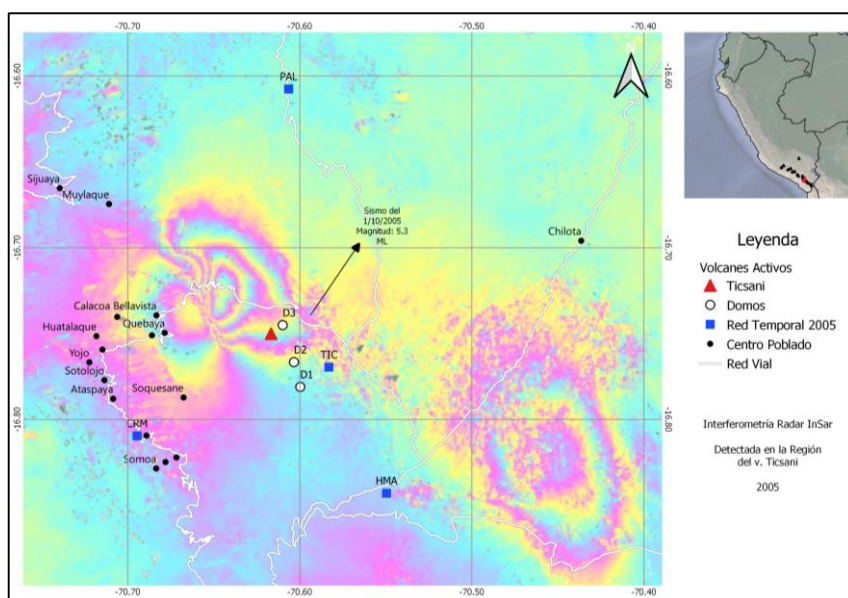


Figura 0.9 Deformación de interferometría Radar (InSAR) en 2005, donde se observan franjas de deformación del suelo en dos zonas, una hacia el NW del volcán Ticsani (domos D1, D2 y D3), y la otra hacia el SE del volcán. Modificado de Gonzales et al.,(2006).

Este tipo de monitoreo volcánico basado en información satelital es realizado constantemente por el OVS-IGP en colaboración con la universidad de Cornell (USA). Anteriormente, con motivo de señales de intranquilidad registradas en el volcán Sabancaya en 2013 se logró obtener interferogramas (imágenes de deformación) que mostraban dos anomalías muy evidentes, la primera se localizó a 6 km al NE del cráter y la segunda se ubicó a 15 km al noroeste del mismo (Figura 3.10; Jay et al, 2015).

En el Ticsani, Holtkamp et al. (2011) desarrollaron una serie de tiempo de imágenes InSAR en la zona de este volcán (Figura 3.11). Ese estudio muestra que antes de ocurrir el sismo del 01 de octubre de 2005 no se evidenciaba ninguna anomalía de deformación importante en la zona, a excepción de la registrada en la laguna Viscacha situada a 40 km al SE del volcán, detectada entre 2003 y 2004. Poco antes de ocurrir este evento sísmico los interferogramas mostraron una anomalía de deformación muy clara (Figuras 3.9 y 3.11).

Actualmente no se ha registrado nuevamente anomalías de tipo InSAR en la zona del volcán Ticsani, sin embargo, el monitoreo por deformación satelital es continuo gracias a la colaboración de la universidad de Cornell.

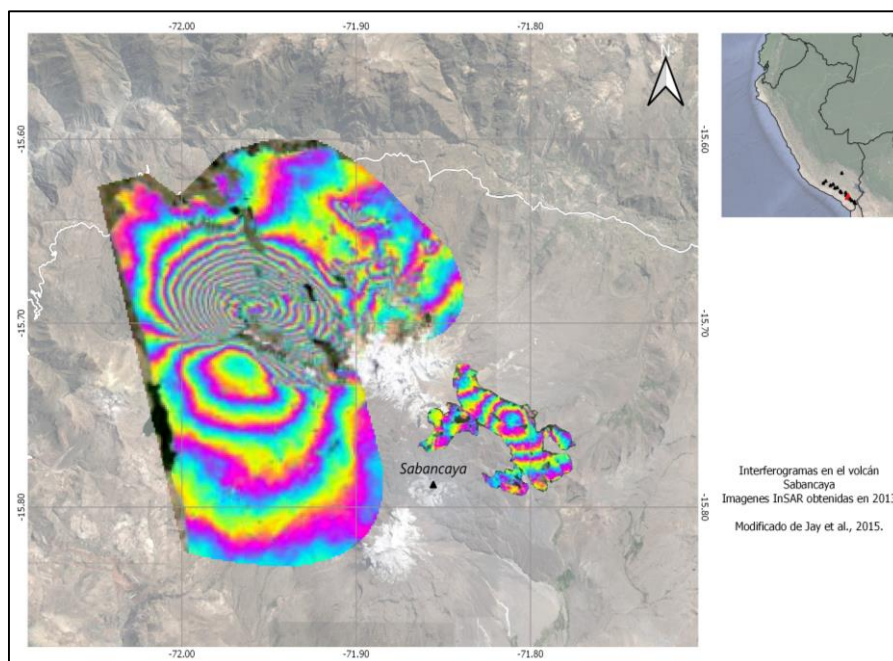


Figura 0.10 Interferogramas (Jay et al, 2015) durante la etapa de intranquilidad volcánica en el volcán Sabancaya detectada por el OVS-IGP en el año 2013. La deformación observada al NE del cráter se observó en febrero 2013, mientras que la anomalía ubicada al NW corresponde al sismo de Cabanaconde (5.7 ML) de julio 2013 en inmediaciones del volcán Sabancaya.

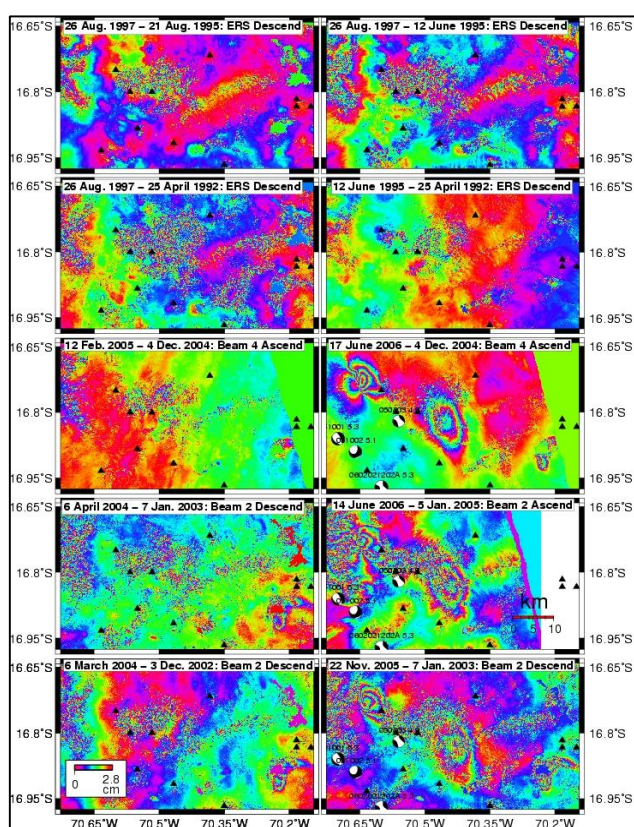


Figura 0.11 Interferogramas del enjambre sísmico de Ticsani en 2005. Los primeros siete interferogramas no muestran deformación en la zona del volcán, pero algunos muestran deformación cercana a la laguna Viscacha en marzo de 2004 (Holtkamp et al., 2011).

3.4. Potencial Espontaneo (PE) en el volcán Ticsani: Campaña de junio de 2017

El método PE aplicado en volcanes activos puede ser usado para develar la distribución de fuentes térmicas. También se usa para investigar límites estructurales que pueden estar escondidos (enterrados). Asimismo, el PE puede mostrar la dinámica o comportamiento del sistema hidrotermal en zonas volcánicas. Los recientes estudios muestran que el volcán Ticsani presenta un sistema hidrotermal cuyo emplazamiento no es simétrico y está influenciado por disimetría en la topografía (Byrdina et al., 2013). La actividad hidrotermal en la zona es importante y está representada por surgentes de agua y vapor, que se distribuyen al NW, E y SW del volcán en un radio de 9 km.

Con el propósito de comprender la dinámica del sistema hidrotermal del Ticsani es que el Instituto Geofísico del Perú realiza en 2017 la primera campaña temporal empleando el método de Potencial Espontaneo (Figura 3.12), obteniendo medidas PE según perfiles L1 y L2 (Figura 3.13) con una extensión total de 5.9 km. Los datos fueron adquiridos con un paso de muestreo de 20

metros cuyo punto inicial se encuentra próximo a la zona de fumarolas del Ticsani, cercano al domo D2.

Los resultados de estos trabajos muestran el inicio de la zona hidrotermal en la inflexión más negativa de la curva (Figura 3.13), también se observa una ligera variación (circunferencia naranja) asociada a litología. Los datos que se obtienen tienen el propósito de servir de referencia en la vigilancia del sistema hidrotermal del volcán Ticsani. Si ocurriera un elevado aumento en la temperatura del sistema, ello probablemente se traducirá en un cambio notable en los valores del potencial eléctrico natural del suelo. Por tanto, un sistema de medición continua del PE podría detectar tal variación. Un sistema como el descrito ya ha sido anteriormente desarrollado en el volcán Ubinas y se ha obtenido notables resultados.



Figura 0.12 Registros fotográficos de adquisición de datos de Potencial Espontaneo

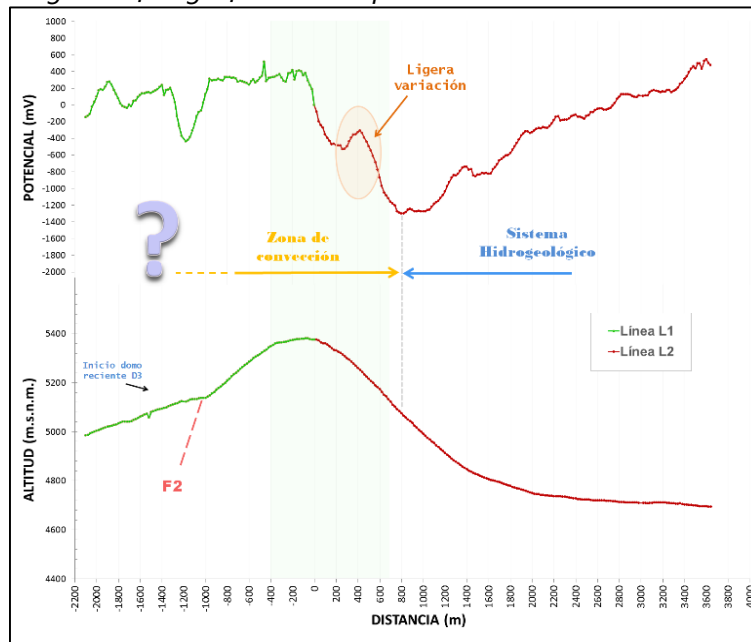


Figura 0.13 Esquema comparativo de variación del potencial espontaneo respecto a la altitud y distancia. Los perfiles L1 y L2 corresponden a trabajos efectuados por el OVS - IGP en 2017.

4. CAPITULO IV

MONITOREO SÍSMICO EN TIEMPO REAL, INSTALACIÓN DE LA RED SÍSMICA TEMPORAL Y TELEMÉTRICA

Considerando la alta actividad encontrada en el Ticsani durante los estudios sísmicos realizados por el IGP desde 2005 y otros anteriormente mencionados, el Instituto Geofísico del Perú decide instalar y operar una nueva red sísmica temporal alrededor del volcán Ticsani en mayo de 2014, en colaboración con la Universidad de Liverpool (Reino Unido). El objetivo de esta campaña fue de estudiar las características de la notable sismicidad que se había observado desde años anteriores, lo cual podría estar asociado a una eventual reactivación del sistema volcánico. La red estuvo conformada por cinco estaciones (HTR, PAL, CHT, SOQ y TCN) dispuestas en un radio de 25 km respecto al volcán (Figura 4.1), que operaron hasta julio de 2015. Los resultados obtenidos con esta información fueron relevantes, pues la actividad sísmica del volcán era muy importante, constatándose que las tasas de sismicidad se incrementaron en comparación con los estudios previos realizados 9 años atrás. Resultó que la sismicidad estaba agrupada en gran medida bajo el mismo cráter del Ticsani.

Estos nuevos resultados confirmaron la alta actividad sísmica en la zona, y entonces el IGP decide establecer el **monitoreo permanente mediante la instalación de estaciones sísmicas con transmisión telemétrica**. La nueva y sofisticada red sísmica con transmisión en tiempo real **comenzó a operar en agosto de 2015** con una estación situada en el domo D3, siendo posteriormente ampliada en diciembre del mismo año hasta un total de cuatro estaciones (TCN1, MUYQ, SPDR y HYTR). Por tanto, hoy en día la red del volcán Ticsani (Figura 4.1) viene a ser la cuarta red de vigilancia permanente que cuenta con modernos instrumentos para vigilancia de volcanes en el Perú. Las otras tres redes están sobre los volcanes Misti, Sabancaya y Ubinas.

La estación TCN1 es la estación de referencia para los estudios que se realizan en este volcán y para la clasificación de eventos sísmicos registrados. Esta estación TCN1 estando situada sobre el más reciente de los domos (domo D3) de este volcán activo y cerca de zonas de fumarolas actuales, **sus sensores sísmicos llegan a captar toda vibración de fluidos que transitan por las inmediaciones del cráter**, posiblemente por su proximidad a las fuentes. En el análisis sísmico que diariamente realizan los especialistas del IGP, la estación TCN1 permite discriminar las señales que se registran en las tres otras estaciones, lo cual favorece una correcta clasificación de las señales registradas.

Por su parte, las estaciones SPD, MUYQ y HYTR se encuentran a 9 km, 13 km y 20 km del volcán, respectivamente (Figura 4.1). En conjunto las cuatro estaciones de la red Ticsani permiten determinar la localización de sismos gracias a que conforman una buena cobertura azimutal en la región. Las características en cuanto a ubicación, código y altura de las estaciones temporales y telemétricas se detallan en la tabla 4.1.

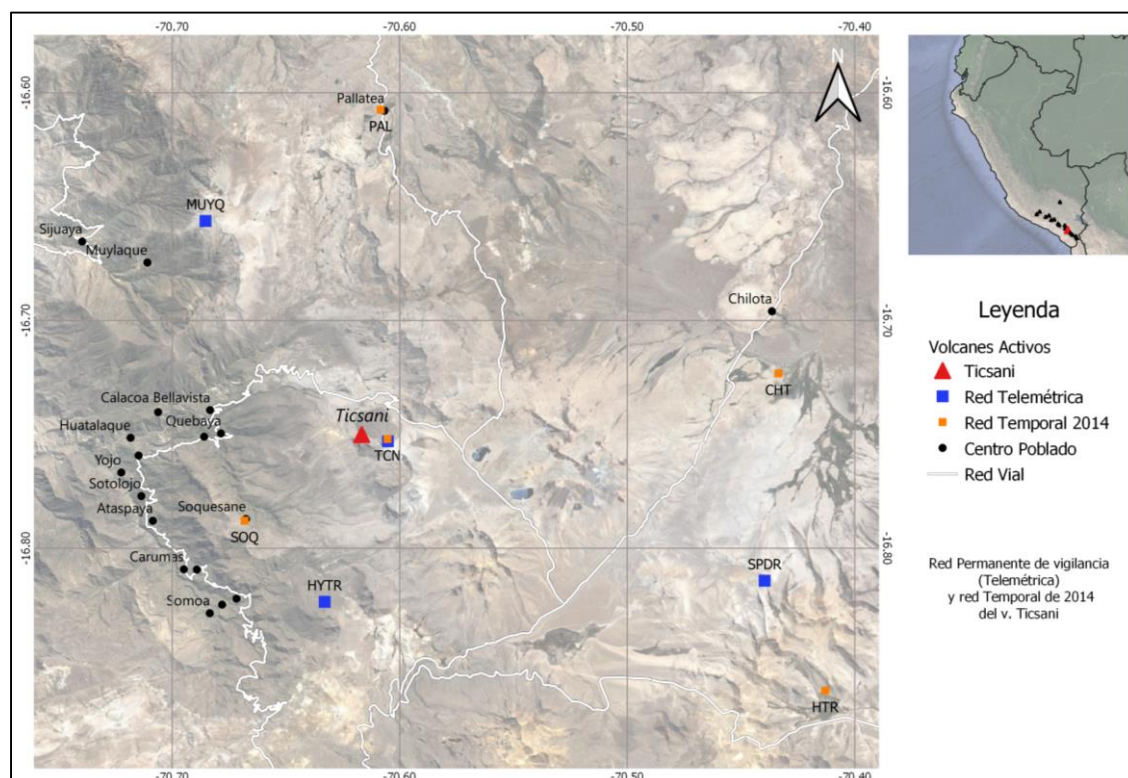


Figura 0.1 Distribución de estaciones sísmicas telemétricas (cuadrado azul) y temporales (cuadrado naranja) en la región del volcán Ticsani.

Estación	Tipo	Código	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m.)
Ticsani	Telemetría	TCN1	-16.75	-70.61	5132
Muyllaque	Telemetría	MUYQ	-16.66	-70.69	4584
San Pedro	Telemetría	SPDR	-16.82	-70.63	4395
Huaytire	Telemetría	HYTR	-16.81	-70.44	4703
Huaytire	Temporal	HTR	-70.41	-16.86	4573
Pallatea	Temporal	PAL	-70.61	-16.61	4406
Chillota	Temporal	CHT	-70.43	-16.72	4349
Soquesane	Temporal	SOQ	-70.67	-16.79	3713
Ticsani	Temporal	TCN	-70.61	-16.75	5133

Tabla 0.1 Ubicación de las estaciones sísmicas telemétricas (2015) y temporales (2014).



Figura 0.2 Estación sísmica telemétrica para el monitoreo en tiempo real del volcán Ticsani.

4.1. Actividad Sísmica característica en la zona del volcán Ticsani

Los sismos que se registran en el volcán Ticsani corresponden a aquellos generados por fractura de rocas, por paso de fluidos con poca energía, así como por movimiento de fluidos con gran energía (probablemente magma).

4.1.1. Sismos de tipo fractura o VT

Sismos relacionados a fractura de rocas, generados en las proximidades del volcán (distancias menores a 5 km del cráter) son muy comunes en Ticsani. Estos eventos también son denominados VTPs o volcano-tectónicos proximales. Similar a ellos, pero situados a distancias mayores (más de 5 km) son denominados volcano-tectónicos distales o VTD. Los sismos de fractura en el Ticsani presentan fases de llegada de onda P y onda S en general muy claras, de tipo impulsivo. Estos eventos tienen una duración promedio de 25 segundos, y muestran amplias bandas espectrales con picos que van entre 2 Hz y 16 Hz.

Por lo general en esta región se han observado frecuencias dominantes promedio de 6 Hz. Los sismos de fractura en Ticsani presentan coda con decaimiento en forma exponencial, que es la parte final del sismo. En la figura 4.3 se observa el registro de un sismo VTP detectado por la estación TCN1, cabe señalar que la diferencia entre los tiempos de arribo de sus fases es menor a 1s.

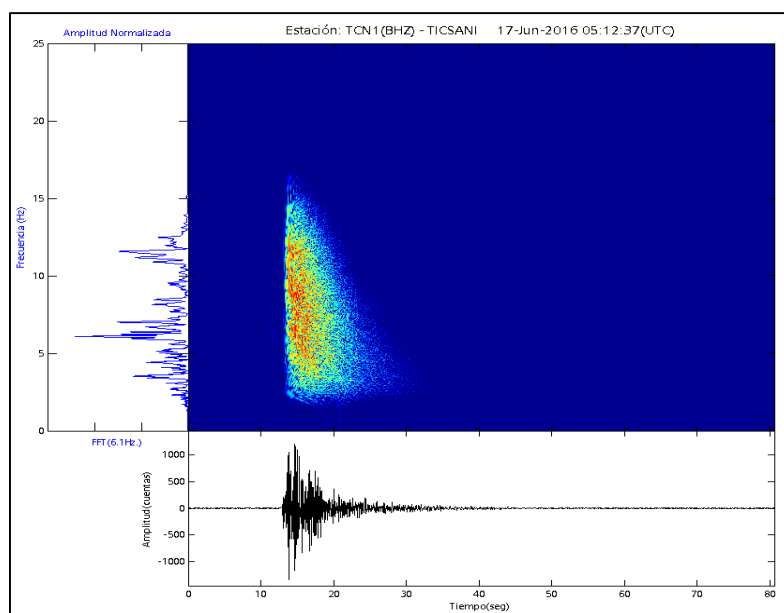


Figura 4.3 Ejemplo típico de registro de sismo de tipo VTP en el volcán Ticsani, evento registrado el 17/06/2016 a las 05:12:37 UTC en la estación TCN1, componente Z.

En cuanto a los sismos de fractura distales (o sismos VTD), éstos también presentan fases P y S claramente distinguibles, aunque su diferencia de tiempos de arribo es mayor. Un ejemplo de este tipo de sismo se puede observar en la figura 4.4. Este sismo fue registrado por la estación TCN1 el 11 de julio de 2016 a 22:01:09 UTC.

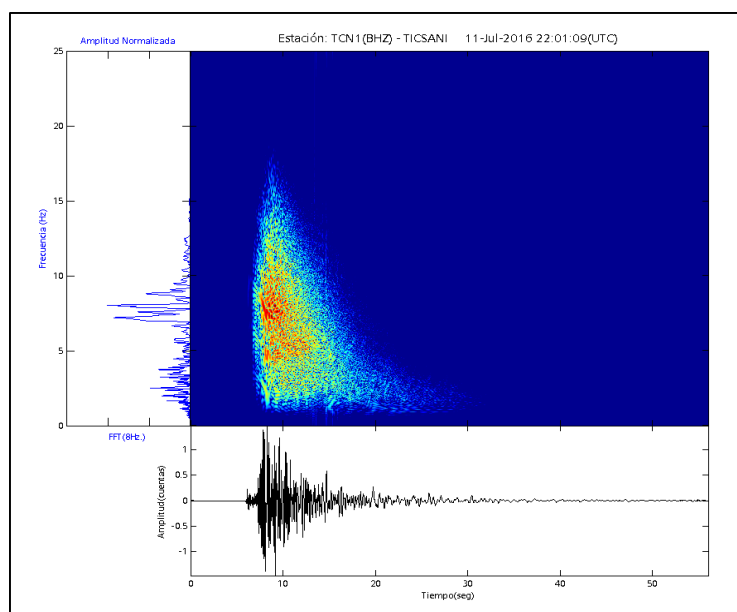


Figura 4.4 Ejemplo de sismo de fractura distal (VTD) en el volcán Ticsani. El evento fue registrado el 11/07/2016 a 22:01:09 UTC en la estación TCN1, componente Z.

4.1.2. Sismos de baja frecuencia (LP)

Los eventos de baja frecuencia o de periodo largo (LP) constituyen una particularidad propia de los sistemas volcánicos. Estas señales están asociadas al paso o movimiento de fluidos. En el registro de este tipo de eventos es difícil determinar el momento exacto del inicio de la onda P y S pues se presentan emergentes. Por tanto, son también difíciles de localizar por métodos convencionales. Una característica adicional es que estos eventos presentan un decaimiento lento de su coda.

La figura 4.5 muestra un ejemplo típico de un evento de baja frecuencia registrado en la estación TCN1 el día 16 de enero 2016, el espectrograma muestra mayor incidencia en las frecuencias por debajo de 5 Hz.

4.1.3. Eventos de tipo Tremor

Muchos volcanes en el mundo muestran señales de tremores en sus diferentes estados de actividad y gran parte de tales señales están asociadas a tránsito de gases del sistema volcánico o hidrotermal a nivel superficial. Los tremores registrados en el Ticsani son de tipo espasmódico y presentan un rango de duración que va desde los 40 hasta los 148 segundos. Las frecuencias dominantes alcanzan picos promedio de 6 Hz y son poco energéticos (Figura 4.6).

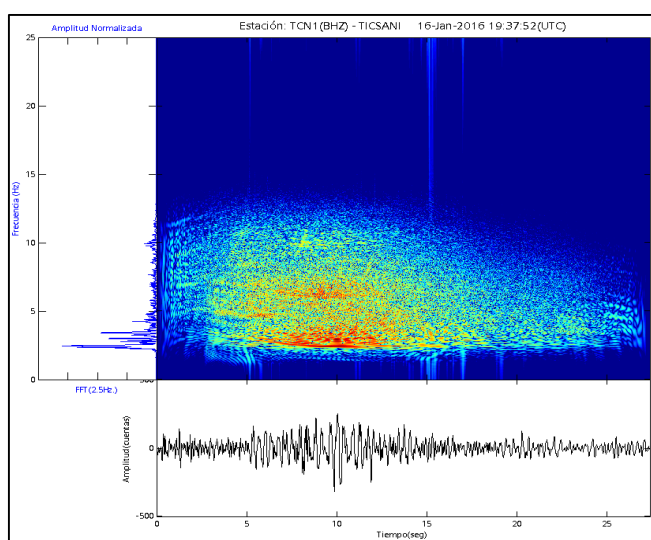


Figura 4.5 Ejemplo de sismo de baja frecuencia ó LP registrado por la estación TCN1 el 16 de enero a las 19:37hrs (UTC).

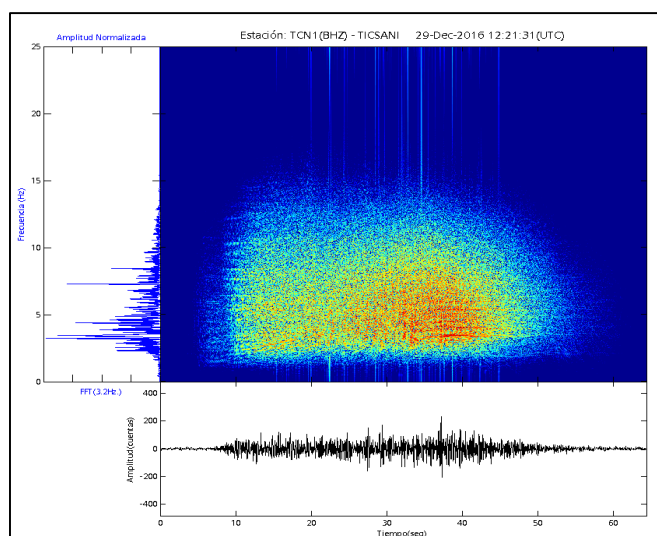


Figura 4.6 - Ejemplo de registro de sismo tipo Tremor en el volcán Ticsani. Evento registrado el 29/12/2016 12:21:31 UTC en la estación TCN1, componente Z.

4.1.4. Eventos de tipo Híbrido

Los sismos híbridos son aquellos que en su contenido espectral presenta tanto altas como bajas frecuencias. **En el volcán Ticsani se ha registrado sismos híbridos notables por su gran energía, lo cual es la principal característica del comportamiento de este volcán.** En efecto, en algunas ocasiones se ha observado señales tan energéticas que llegaron a registrarse en estaciones situadas a más de 150 km de distancia, en las redes sísmicas de los volcanes Misti y Sabancaya. Estos híbridos, que han empezado a ser registrados desde Setiembre 2016, no se presentan con frecuencia sino más bien son esporádicos. El análisis nos muestra que ocurren a profundidades relativamente someras, entre 8 y 12 kilómetros.

Una característica especial es que tienen frecuencias dominantes muy bajas, próximas a 0.3 Hz (figura 4.7). Al mismo tiempo, presentan frecuencias que pueden alcanzar hasta los 8 Hz. Los híbridos del volcán Ticsani tienen inicios emergentes, y en general siempre son registrados por las cuatro estaciones de la red Ticsani.

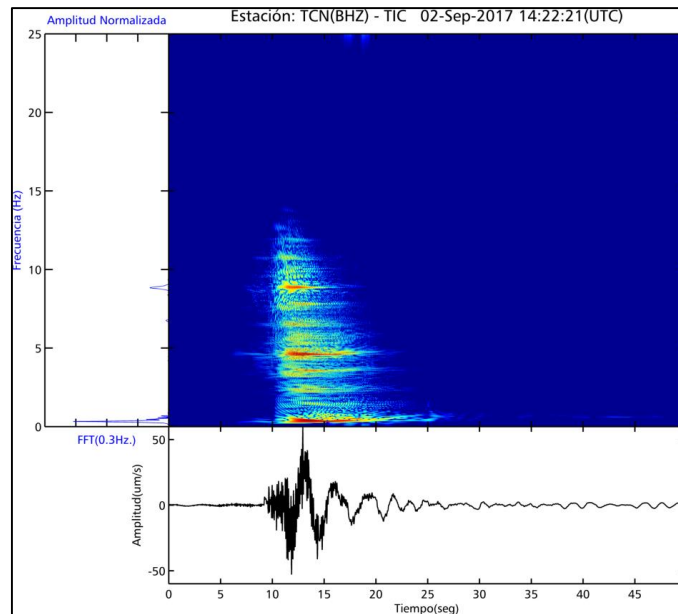


Figura 4.7 Ejemplo de sismograma y espectrograma de un "sismo Híbrido" registrado en el volcán Ticsani el 02/09/2017 a las 14:22 UTC, componente Z. (Red de estaciones sísmicas en tiempo real del IGP)

5. CAPITULO V

SEÑALES DE INTRANQUILIDAD OBSERVADAS LOS ÚLTIMOS AÑOS EN EL VOLCÁN TICSANI

5.1. Actividad sísmica bajo el Volcán Ticsani y activación de la falla F2

Los volcanes usualmente se encuentran ubicados a lo largo de una falla tectónica o en la intersección de las mismas. En el caso del volcán Ticsani, se encuentra sobre una zona que incluye un gran sistema regional de fallamiento, y donde además se emplaza todo un grupo de volcanes: Ubinas-Huaynaputina-Ticsani, los que tendrían asociados cámaras principales alrededor de los 20 a 35 km de profundidad (Lavallée et al., 2009). En la campaña sísmica desarrollada en 2014, se identificaron alrededor de 2000 sismos de fractura (VT) de los cuales 334 fueron localizados (figura 5.1 y 5.2).

La sismicidad observada en 2014 se ubica bajo la zona que ocupa el edificio volcánico y en particular cruzando los tres domos (D1, D2 y D3), tal como se observa en las figuras 5.2 y 5.3. Esta sismicidad que en el perfil presenta una marcada linealidad, se ubica sobre la falla F2 de orientación N-S identificada por Lavallée et al., (2009). En la figura 5.3 se ha trazado el perfil B-B' de manera que resulte perpendicular a la falla F2, allí se puede observar que la sismicidad se encuentra alineada siguiendo un buzamiento de 70° al oeste, es importante destacar que la sismicidad ocurrió en su mayor parte durante el enjambre de sismos que se inició el 24 de junio (Figura 5.1).

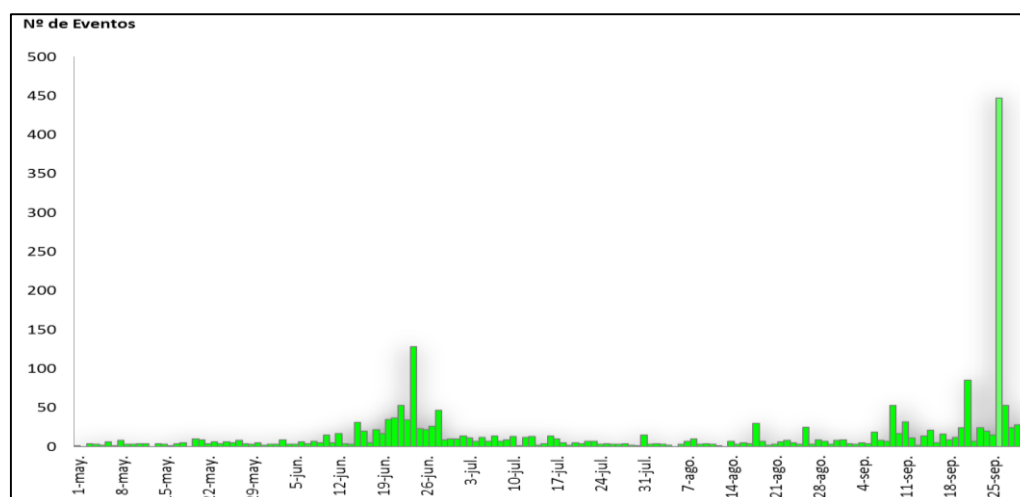


Figura 5.1 Histograma del número de eventos VT, relacionados a fractura de rocas, registrados por la campaña sísmica de 2014.

Cruz (2016) realizó el cálculo de mecanismos focales para sismos situados próximos al domo D3. El análisis demostró movimientos de tipo normal con planos orientados en dirección norte-sur. En la figura 5.4 se observan los sismos cuyo mecanismo focal ha sido calculado y se presentan sobrepuestos al mapa estructural de Lavallée et al., (2009), y se observa que esta sismicidad se localiza próxima a la falla F2.

Por tanto, es muy probable que la principal sismicidad observada en la campaña de 2014 ha tenido su origen en la reactivación de la falla F2 descrita por Lavallée et al. (2009).

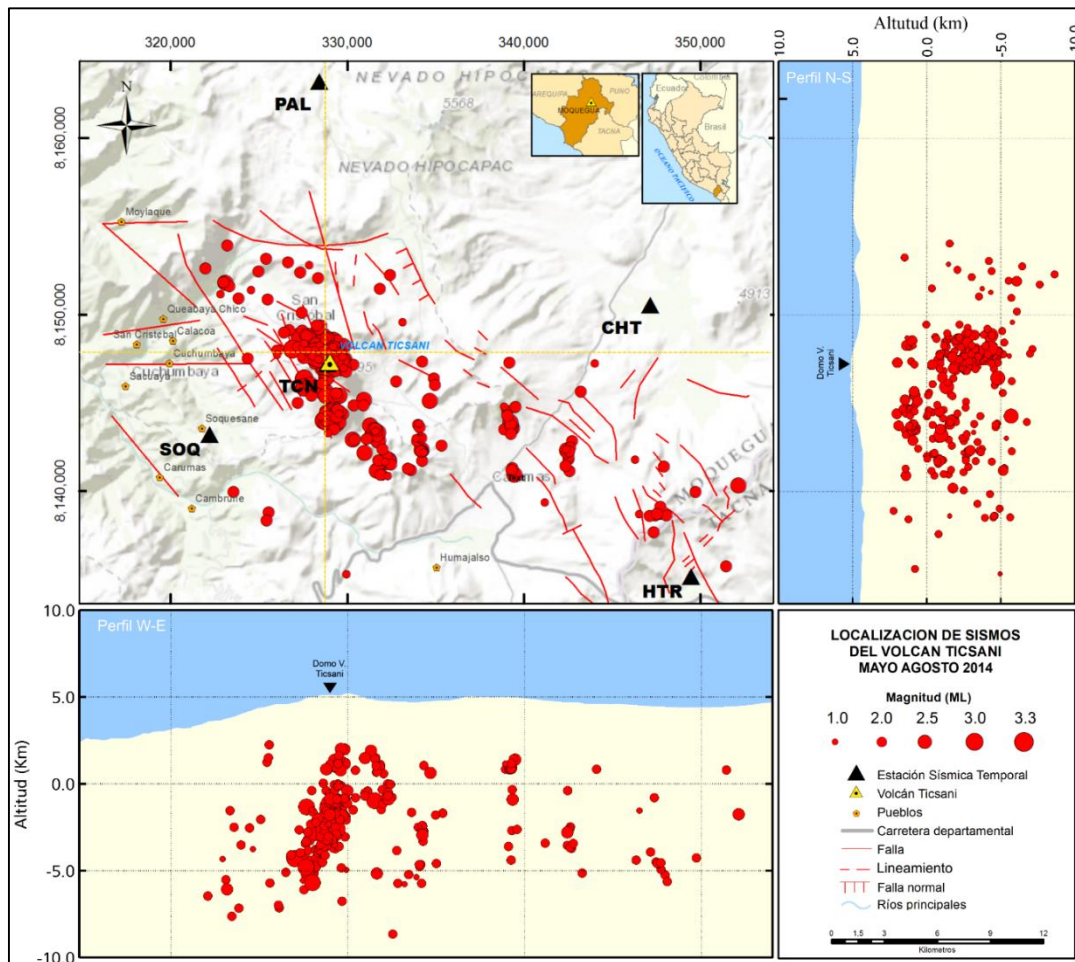


Figura 5.2 Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad; se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán. Rasgos estructurales modificado de Lavallée et al., (2009), Gonzales et al., (2009) y Carloto (2009).

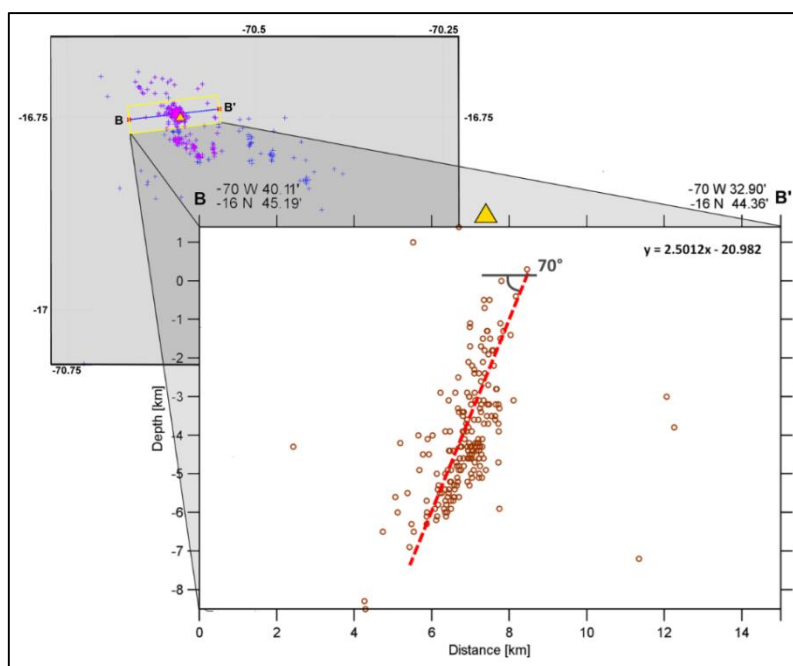


Figura 5.3 Perfil B-B' realizado sobre D3 (domo reciente), se observa un ángulo de 70° entre la horizontal y la línea de tendencia (línea discontinua roja)

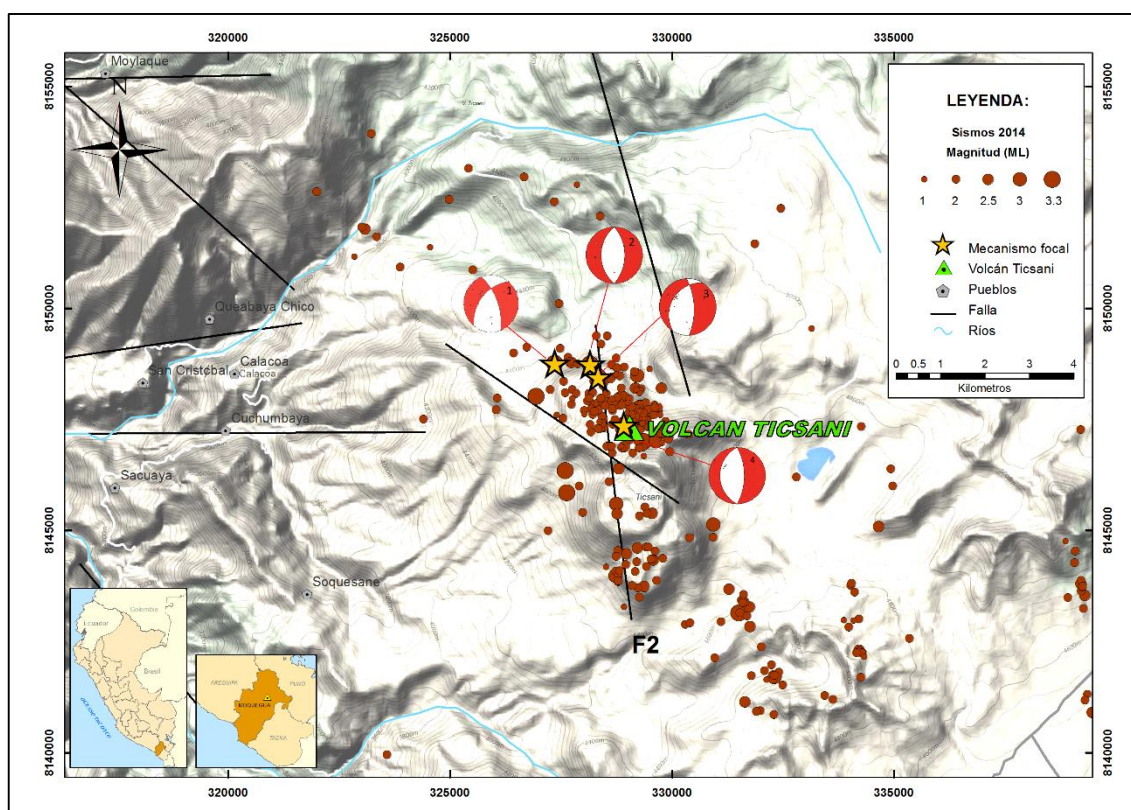


Figura 5.4. Mapa sísmico y mecanismos focales de los principales sismos. Se observa también las fallas determinadas por Lavallée et al (2009), donde destaca la falla F2.

5.2. Enjambres sísmicos

Un agrupamiento de sismos desarrollados en un área determinado y durante un tiempo relativamente restringido, es denominado enjambre sísmico. La interacción que generan los sismos durante el enjambre puede proporcionar información valiosa acerca de la fuente que los origina. En un enjambre no hay un sismo principal (Main Shock) seguido de réplicas que decrecen muy rápidamente en magnitud, sino mas bien varios sismos de magnitud notable que se suceden en un tiempo corto. Mc Nutt (1996) ha descrito bien a estos sismos cuando dice que los sismos que constituyen un enjambre se distribuyen en un área específica y en un tiempo relativamente corto.

Los enjambres sísmicos son inherentes a los volcanes puesto que su ocurrencia se da en este tipo de ambientes (McNutt, 2000), su actividad denota influencia de fluidos magmáticos en las proximidades de fallas tectónicas preestablecidas, y pueden ser indicios precursores de procesos eruptivos (White & McCausland, 2016). La figura 5.5 muestra que **los enjambres sísmicos que están ocurriendo en el volcán Ticsani son frecuentes**. Esto constituye un **importante indicio de que existiría una componente magmática** en la generación de la sismicidad que se observa actualmente en este volcán.

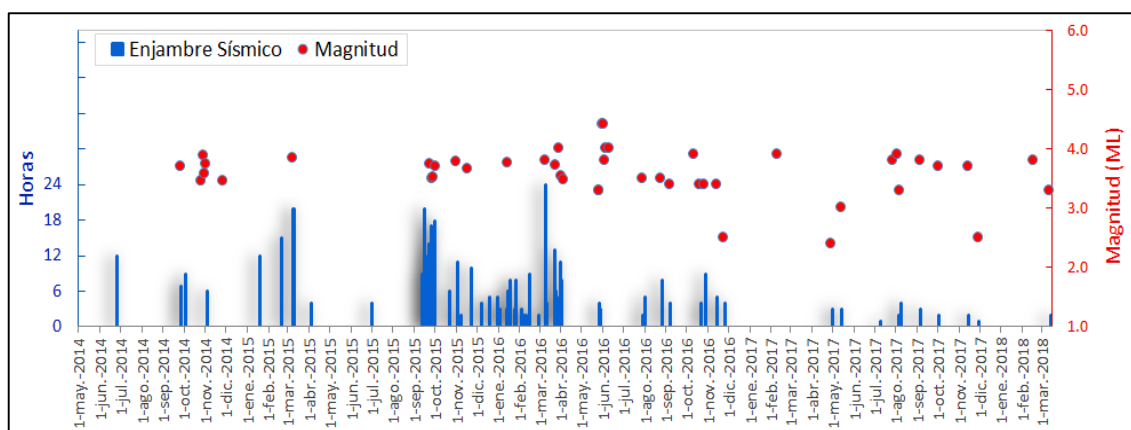


Figura 5.5. Distribución de enjambres sísmicos en el tiempo, y magnitud de sismos principales durante mayo 2014 y marzo 2018.

Durante todas las campañas realizadas sobre el Ticsani (2005, 2014 y desde 2015) muy frecuentemente se ha observado enjambres sísmicos. Desde el 2014 se han registrado alrededor de 76 enjambres, algunos de ellos tienen hasta 24 horas de duración, y los más energéticos han sido detectados también por la red del volcán Ubinas (53 km al noroeste del Ticsani). Los enjambres del Ticsani agrupan a un gran número de sismos, habiéndose llegado a observar hasta 1200 sismos en un solo día (Figura 5.6).

adelante, se ha determinado que los híbridos del Ticsani se originan a niveles de profundidad mucho más profundo que los registrados en Sabancaya o Ubinas.

La figura 5.8 muestra que los híbridos han venido siendo registrados a partir de setiembre de 2016, y que no ocurren diariamente sino que son relativamente esporádicos.

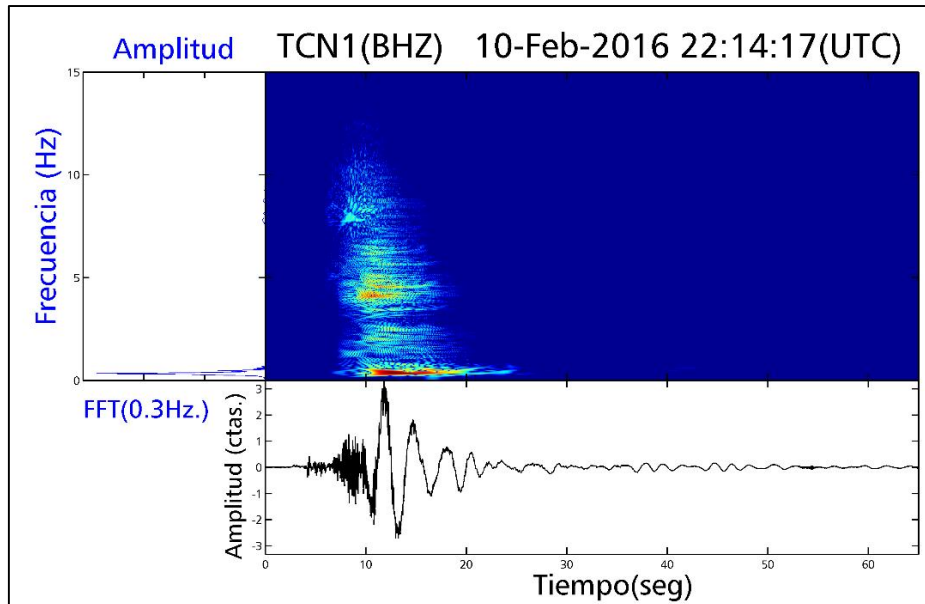


Figura 5.7 Sismo de tipo Híbrido registrado en el volcán Ticsani el 02/09/2017 a las 14:22 UTC, en la componente Z, se observan frecuencias de 0.3hz y 8 Hz.

La mayor concentración en la ocurrencia de estos eventos fue observada entre setiembre y noviembre de 2016, también durante este periodo se registró un incremento sustancial de sismos de tipo fractura (VTP). Ver figura 5.8.

La característica esencial de los Híbridos del Ticsani es que presentan frecuencias muy bajas menores de 1 Hz y pueden ser muy energéticos; algunos eventos han sido detectados por las redes de monitoreo tan lejanas como la red de los volcanes Ubinas, Misti y Sabancaya. Un claro ejemplo es el sismo registrado el 10 de febrero de 2016 a las 22:14 (UTC), genero una magnitud de 3.2 ML (Magnitud Local). Según los parámetros hipocentrales calculados estos eventos se encuentran localizados muy próximos al volcán Ticsani dentro de los focos de sismicidad proximal (figura 5.9) y a profundidades entre 8 y 12 km bajo la superficie del domo (Cruz et al., 2016).

Resumiendo lo anterior, se puede decir que la fuente de los sismos híbridos está bajo el volcán Ticsani y que se trata de sismicidad asociada a movimiento de fluidos magmáticos. Esta información es valiosísima a la hora de evaluar las señales de intranquilidad que presenta este macizo volcánico.

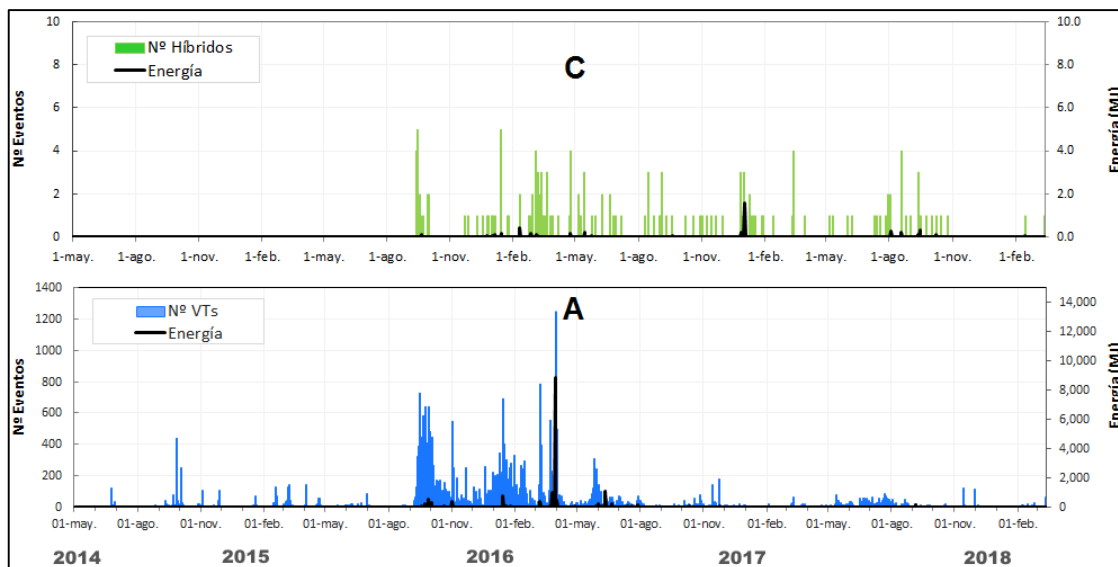


Figura 5.8: Histograma de eventos híbridos (A) y VTPs (B) registrados por la estación TCN1. Datos registrados entre mayo de 2014 y marzo de 2018.

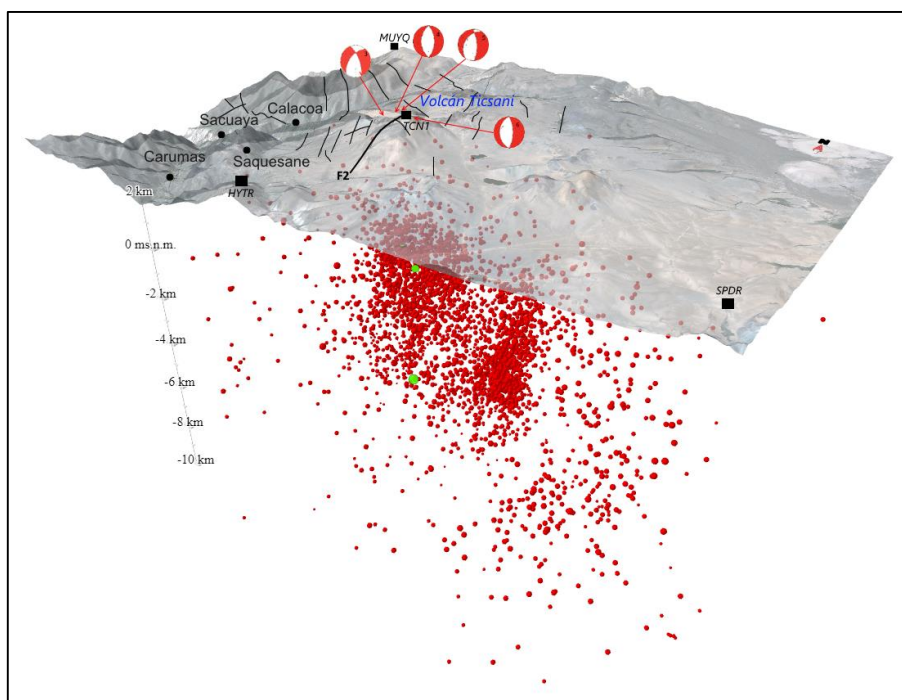


Figura 5.9- Sismicidad de fractura (puntos rojos) y sismos híbridos (esferas verdes) localizados en la zona del volcán Ticsani entre mayo 2014 y abril 2016 (Cruz et al., 2016).

5.4. Aparición de nuevos focos sísmicos y migración de la sismicidad.

Durante el monitoreo ininterrumpido realizado sobre el Volcán Ticsani se ha observado cómo la sismicidad ha migrado en el espacio y en el tiempo. La figura 5.10 muestra la sucesiva sismicidad por meses. Se observa cómo se fueron formando nuevas agrupaciones o focos de sismicidad que en algunas ocasiones se reactivaban luego de un espacio de tiempo. La migración sísmica ha sido observada en un radio de 20 km respecto del volcán Ticsani, destacando que en esta región el modo de ocurrencia de estos focos se dio en la mayoría de ocasiones como enjambres sísmicos.

El mapa de distribución de la sismicidad VT presenta seis agrupamientos importantes representados dentro de circunferencias verdes (Figura 5.11), y han sido clasificados con letras. El agrupamiento A se concentra 9km al NW del Ticsani y próxima a la estación MUYQ (3km), un segundo agrupamiento B se encuentra a 3.5 km también al NW del volcán, es preciso señalar que este agrupamiento se encuentra sobre el lóbulo de subsidencia registrado entre 2004 y 2006 (Jay et al., 2013; Gonzales, 2006).

El agrupamiento C se encuentra próximo al volcán con la particularidad que la sismicidad conforma lineamientos con direcciones N-S y E-W, cabe resaltar que el lineamiento N-S es coincidente con la falla F2 descrita por Lavallé et al., (2010). El cuarto agrupamiento D se ubica hacia el lado este del Ticsani a 6 km, también conforma un lineamiento de dirección N-S no descrito en la bibliografía. Finalmente, los focos sísmicos E y F se encuentran en el sector ESE presentando sismicidad dispersa, también es importante destacar los sismos registrados en estos agrupamientos que se encuentran en la zona donde se registró una amplia subsidencia elíptica de acuerdo a la deformación InSAR de 2005. También, en los perfiles E-W y N-S se puede observar que los sismos alcanzan profundidades de hasta 25 km respecto a la superficie (Figura 5.11).

La migración de la sismicidad distal/proximal evaluada y monitoreada durante los últimos años en esta región es signo de intranquilidad que podría ser interpretada como precursor del inicio de un probable proceso eruptivo, según afirma este concepto el científico Randall White especialista en la vigilancia de procesos eruptivos y pronóstico de erupciones. Según White (2011) la sismicidad distal es un fenómeno basado en la transmisión de presiones de fluidos bajo o cerca del edificio volcánico. Además, afirma que la aparición de esta sismicidad puede ocurrir días o años antes del inicio de actividad eruptiva. Como se ha demostrado en el volcán Ticsani se observa sismicidad VT proximal y distal conformando focos sísmicos que migran desde el 2005 hasta la actualidad.

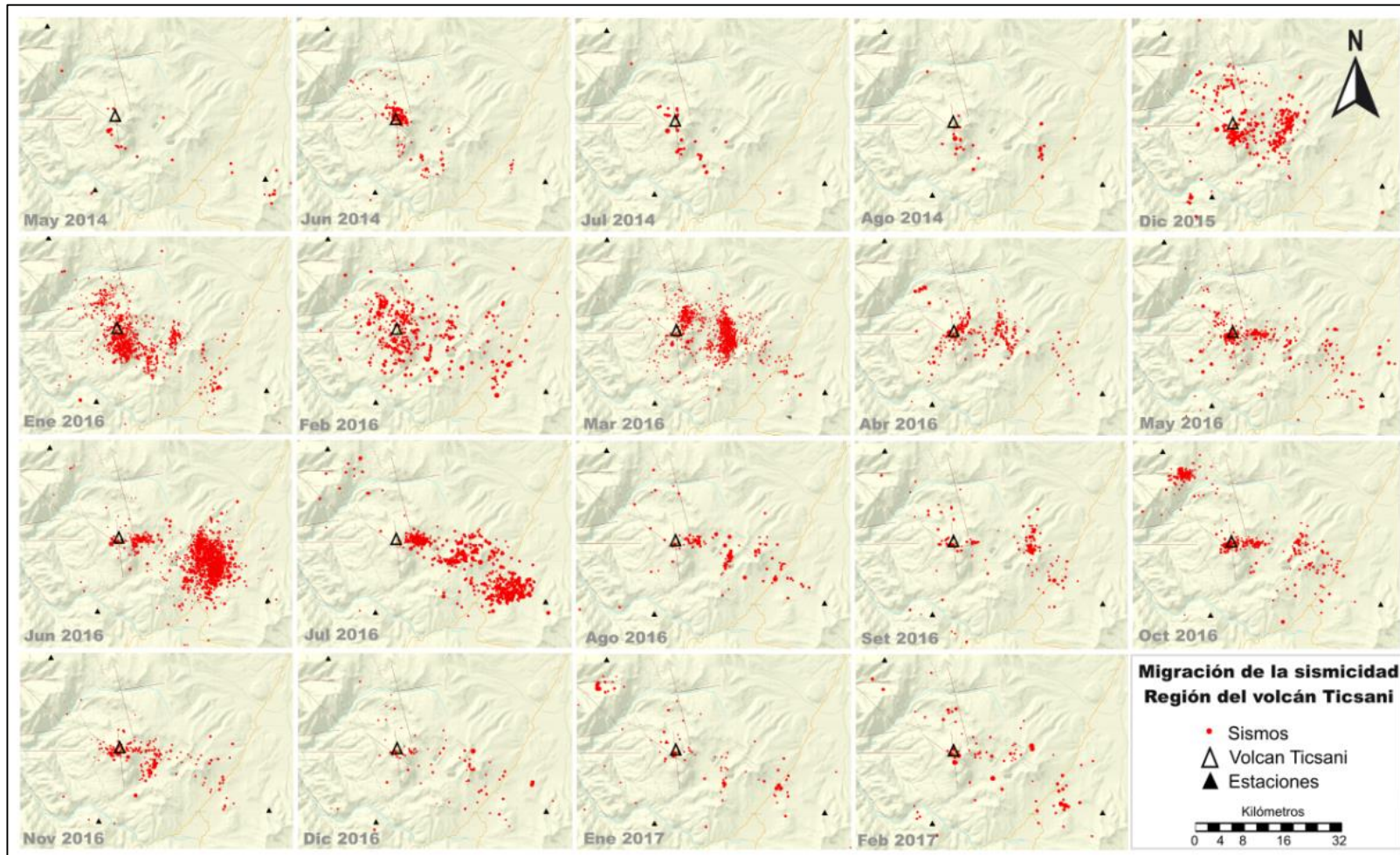


Figura 5.10 Migración de la actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (mayo 2014 - febrero 2017). Se observan las agrupaciones de sismos proximales y distales al Volcán Ticsani.

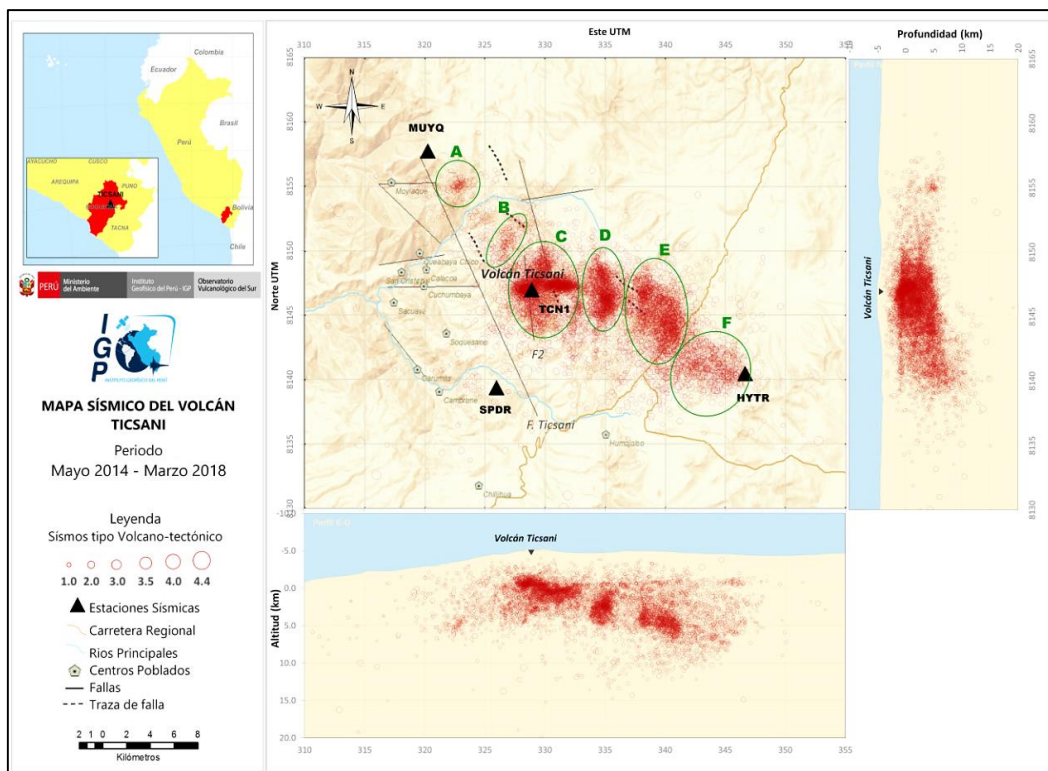


Figura 5.11 Distribución en superficie y profundidad de sismos VTP y VTD registrados en la región del volcán Ticsani, periodo mayo 2014 –marzo 2018. Se observan seis agrupamientos: A, B, C, D, E y F.

5.5. Volumen de magma intruído

A partir de las altas tasas de sismicidad observadas anteriormente, se ha estimado el momento sísmico acumulativo de los sismos de fractura VT proximales y distales para la zona del volcán Ticsani, habiéndose obtenido un valor de 6.87×10^{16} Nm, lo cual equivale a una magnitud acumulada de 5.2 ML (Figura 5.12).

Recientes investigaciones muestran que los enjambres de sismos VT ocurren inducidas o como consecuencia de intrusiones magmáticas en zonas volcánicas. La actividad sísmica VT precursora a erupciones de volcanes que se han mantenido sin erupción por décadas puede darse en lapsos diversos, desde días hasta años antes de una erupción (White & McCausland, 2016). Asimismo, dichos autores muestran que el volumen de magma intruído puede ser estimado de manera sencilla a partir del momento sísmico acumulado de los sismos VT mediante la expresión:

$$V = 0.71 \text{ Log log}_{10} \sum \text{Momento} - 5.32$$

Aplicando la expresión anterior y el momento sísmico acumulado, calculado entre mayo 2014 y marzo de 2018, se obtiene que bajo la zona del Ticsani se estaría intruyendo un volumen de magma de unos 4 millones de metros cúbicos (Figura 5.12).

Si bien aún no ha habido ascenso de magma y/o fluidos magmáticos hasta la superficie, la importante actividad descrita (sismos híbridos muy energéticos y situados entre 8 y 12 km bajo el volcán, y presencia de sismicidad en enjambre) son un serio indicio para una probable próxima reactivación.

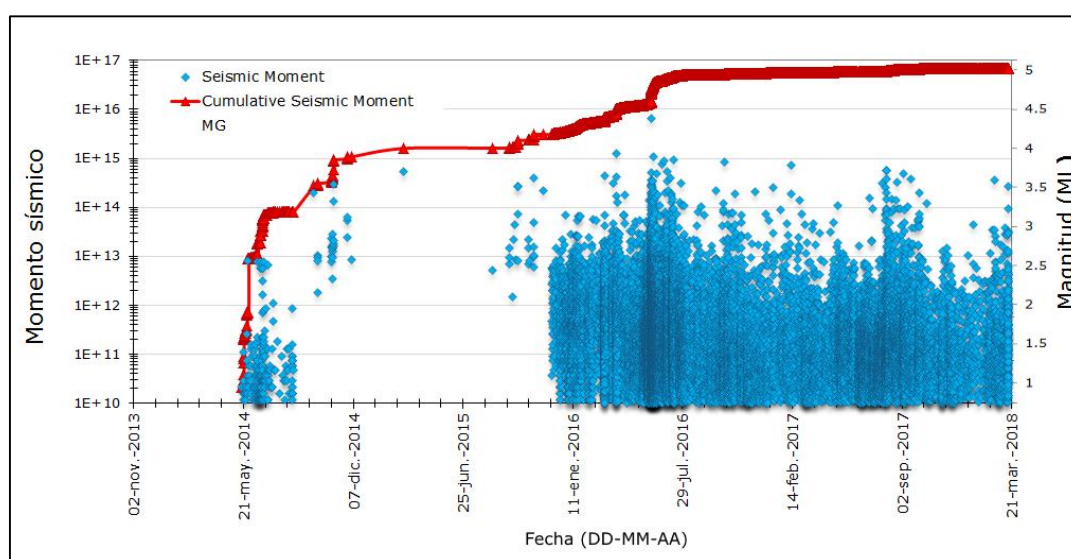


Figura 5.12 Momento sísmico acumulado y magnitud (ML) versus el tiempo.

5.6. Sensores Satelitales

5.6.1. Temperatura ASTER

El sensor denominado Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzada Satelital (ASTER) ha sido diseñado para adquirir temperatura de la superficie del suelo, emisividad, reflectancia y elevación de la superficie y es administrado por la NASA y por la agencia espacial de Japón.

En un estudio reciente "Monitoreo de los volcanes peruanos desde el espacio con sensores termales e InSAR", Delgado et al. (2018) han detectado, gracias a información ASTER, una anomalía térmica de bajo nivel pero visible. En la figura 5.13 se observa que la temperatura de la zona del volcán Ticsani, comparada con su entorno ha subido de unos 5°C desde el año 2014 hasta la actualidad, es decir aproximadamente 1.25°C/año. Nótese que, justamente ya desde 2014 los sensores sísmicos del IGP captaron sismicidad compatible con presencia de fluidos volcánicos en esta zona.

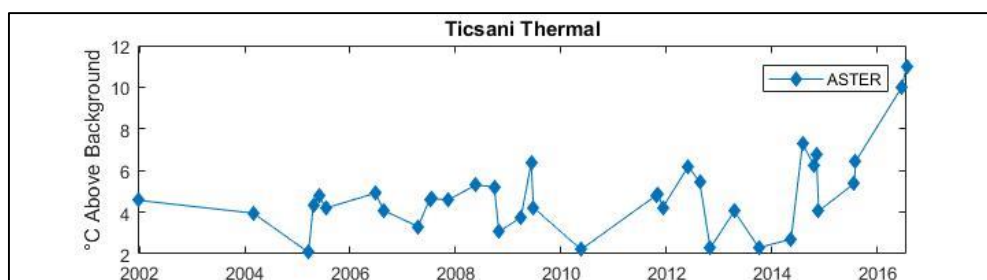


Figura 5.13 Series de tiempo de la temperatura nocturna del instrumento ASTER en Ticsani (Delgado et al., 2018).

Si el Ticsani incrementa su actividad podría presentar anomalías de temperatura más altas, el sensor ASTER podría detectarlo nítidamente como en Sabancaya entre 2015 y 2016 (Figura 5.14).

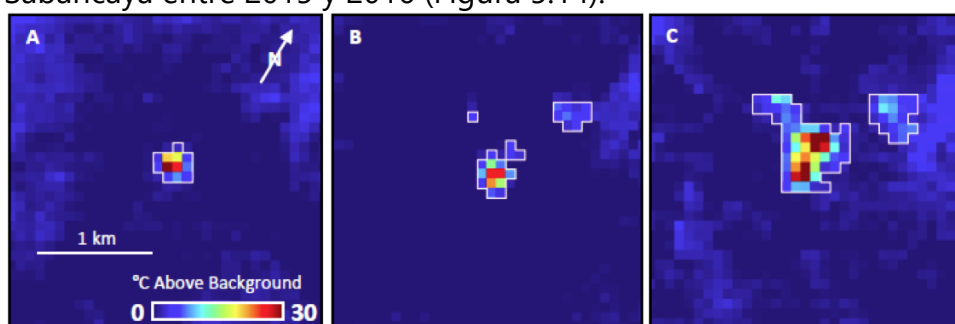


Figura 5.14 Temperaturas ASTER nocturnas por encima del nivel de base en el volcán Sabancaya para el periodo 2015 – 2016 (Delgado et al., 2018).

5.6.2. Densidad de gas SO₂ monitoreado por el sensor OMI

El sensor OMI, conocido también como Instrumento de Monitoreo de Ozono, es un espectrómetro de amplio campo de visión diseñado para monitorear el ozono y otras especies atmosféricas, incluidos los aerosoles. Puede medir gases contaminantes como el NO₂ y el SO₂ (dióxido de azufre). En volcanes el SO₂ está relacionado a gases de origen magmático y son un parámetro importante que se integra al monitoreo continuo que realiza el OVS-IGP.

Actualmente, en el volcán Ticsani, el sensor OMI no ha detectado ninguna desgasificación del gas SO₂ que es un gas característico cuando el magma está llegando a la superficie o muy próximo a ella. Las anomalías detectadas por este sensor en el sur peruano corresponden a las emisiones de gases generadas por el volcán Sabancaya (Figura 5.15).

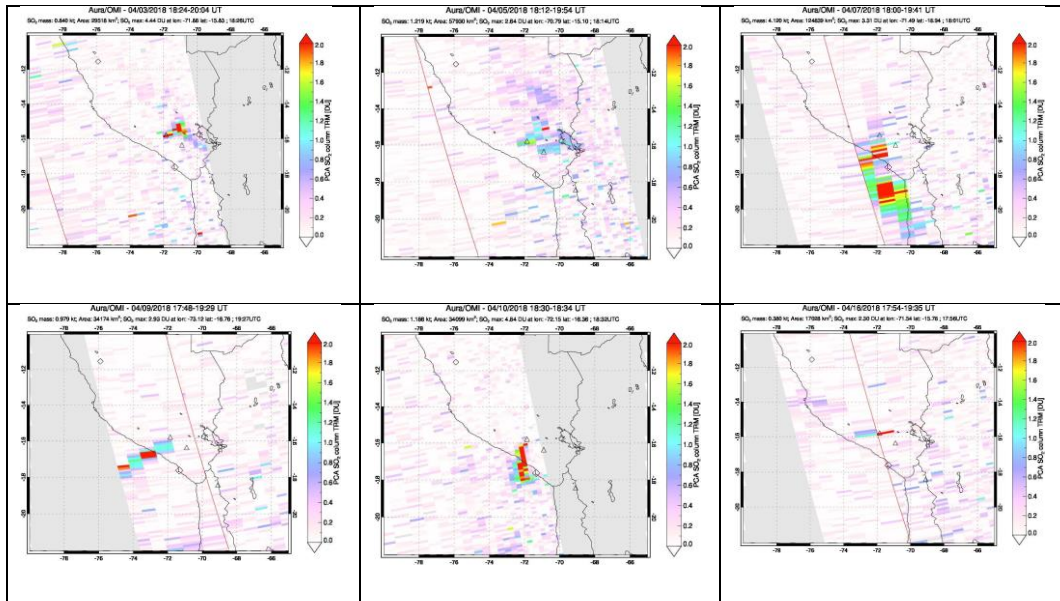


Figura 5.15 Anomalías de densidad de gas SO_2 detectadas por el sensor OMI para el sur peruano. Los tonos rojos muestran la desgasificación que produce actualmente el volcán Sabancaya.

6. CAPITULO VI

EVOLUCIÓN SÍSMICA DE LA ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN TICSANI PRONÓSTICO DE ERUPCIONES

El monitoreo continuo sobre el volcán Ticsani ha evidenciado signos de intranquilidad notables y propios de un volcán activo en camino hacia un posible inicio de un proceso eruptivo. Las observaciones realizadas indican que el Ticsani se encuentra en el inicio del patrón indicado por White (2011) mostrado en las figuras 6.1 y 6.2. De acuerdo a este modelo el volcán Ticsani ha presentado intrusiones de magma evidenciadas por los energéticos sismos Híbrido registrados desde 2016, la presencia de sismos en enjambre y las altas tasas de sismicidad VT distal y proximal. Aun cuando en el esquema se ha considerado el modelo de Fournier (1999) y White (2011), pensamos que se debe tener en cuenta los importantes esfuerzos tectónicos que afectan permanentemente a esta zona volcánica.

La figura 6.2 presenta un esquema modelo para el volcán Ticsani, tomando como base el modelo de Hill (2002) para explicar la ocurrencia de sismos híbridos y los enjambres sísmicos. Las muy bajas frecuencias de los sismos híbridos registrados bajo el Ticsani, constituyen indicios del ascenso e ingreso de magma a la cámara magmática. El magma en ascenso genera incremento de temperatura y de presión en el entorno que ocasiona, a su vez, sismos en enjambre situados alrededor del volcán. White y McCausland (2016) estiman que los fluidos del sistema hidrotermal pueden transmitir la presión hasta decenas de kilómetros de distancia favoreciendo la aparición de sismicidad VT distal como se observa en la región del volcán Ticsani. Es posible, incluso, que este fenómeno podría haber favorecido la sismicidad y deformación de 2005.

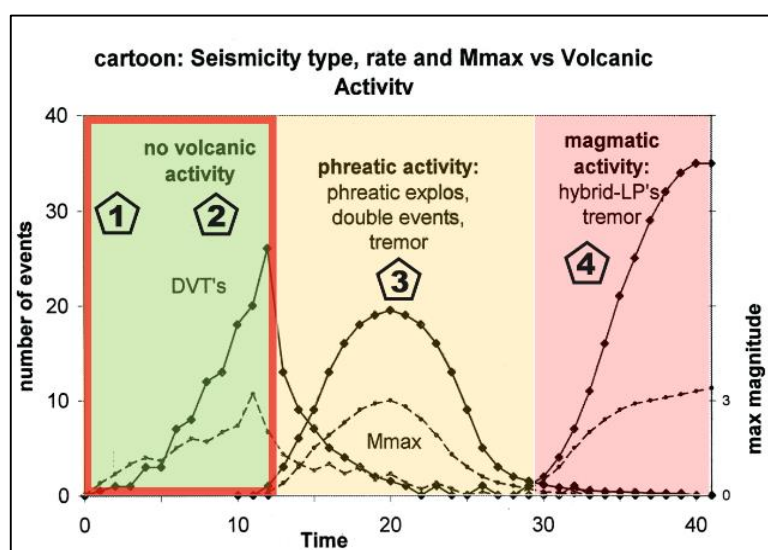


Figura 6.1 Según el modelo de pronóstico de erupciones de White, debido a las fases 1 y 2 registradas en Ticsani, la actividad observada en este volcán corresponde al primer cuadro de la figura.

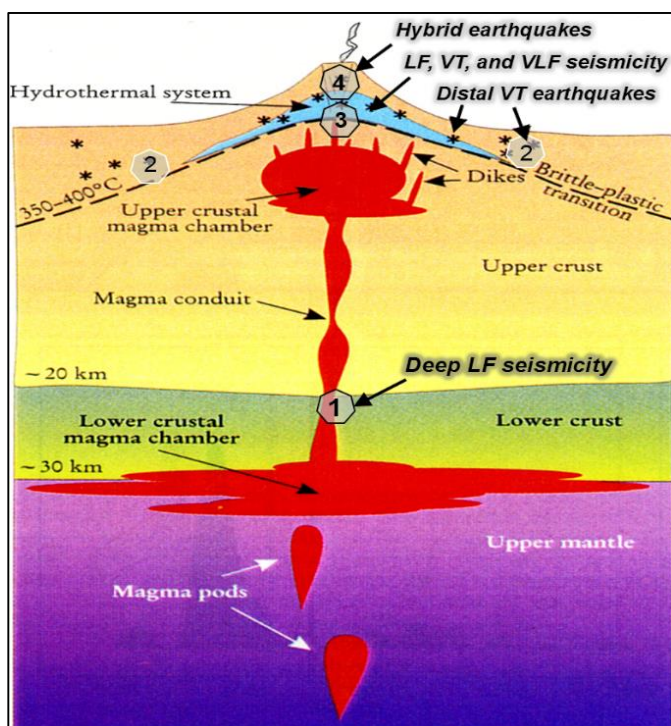


Figura 6.2 Modelo geológico basado en Hill D. et al, (2002) y White (2011) que muestra los diferentes tipos de sismos asociados a erupciones volcánicas. Actualmente se registran en la zona del volcán Ticsani las fases 1 y 2.

La figura 6.3 muestra a los sismos VT que ocurren debido a la presurización del sistema. Cada pulso de intrusión de magma transmite pulsos de presión a través de acuíferos que intersecan fallas tectónicas preestablecidas situadas en el entorno del volcán y/o a varios kilómetros de distancia. Mientras el magma intruye gradualmente, los acuíferos se presurizan y por tanto aumenta la lubricación en las fallas de la zona. Una falla visiblemente reactivada es la falla **F2** descrita por Lavallée et al. (2009). Otras fallas inferidas como **F** también sería afectada por estas presiones. Este fenómeno explica la aparición de los focos sísmicos observados y su migración.

Las intrusiones de magma por el momento no logran alcanzar la superficie, esto significa que los conductos internos que llegan hasta la zona del cráter continúan presentando un alto grado de obstrucción, sin embargo, estos aportes magmáticos que generaron actividad sísmica relevante pueden ser un indicio de una próxima reactivación, por lo cual resta permanecer vigilantes.

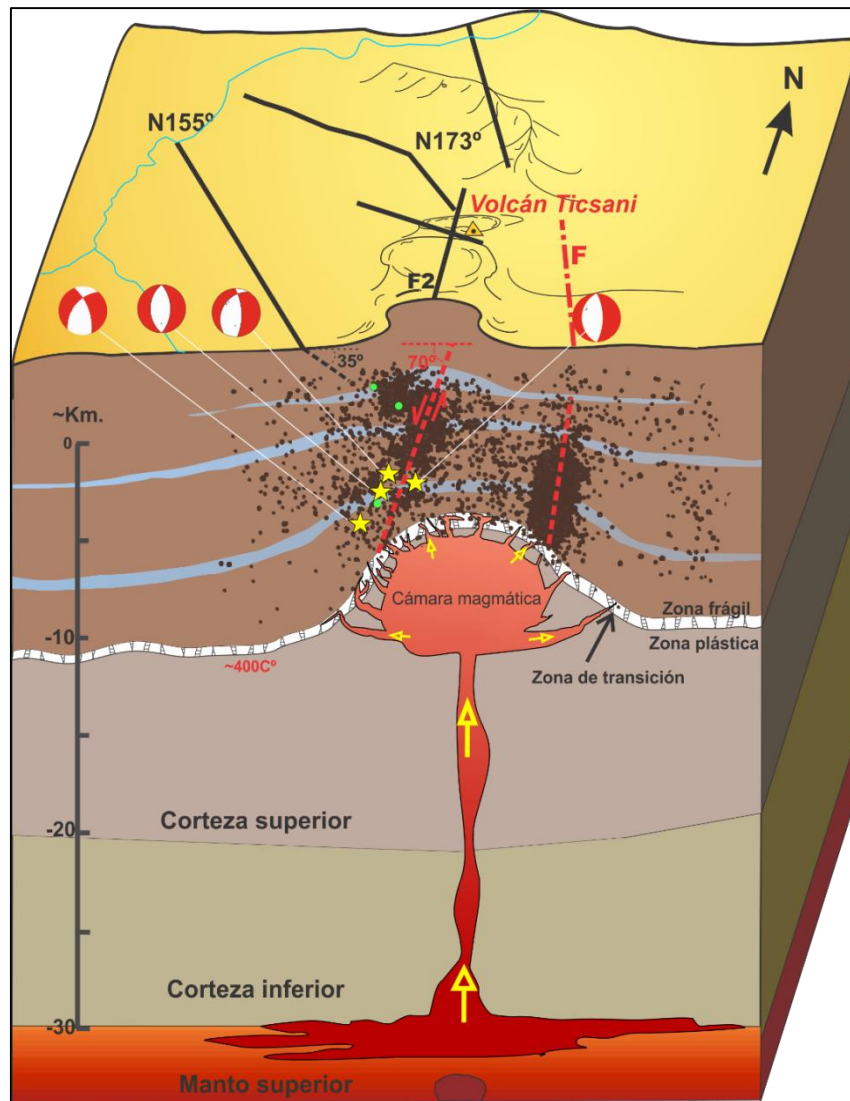


Figura 6.3 Esquema modificado de Fournier (1999) el cual explica la generación de los sismos de fractura (VT) debido a intrusiones de magma y a la presión de fluidos volcánicos. Los círculos en verde representan sismos Híbridos.

7. CAPITULO VII

PELIGROS VOLCANICOS Y EVALUACIÓN DE RIESGO EN EL VOLCÁN TICSANI

Hoy en día una eventual erupción del volcán Ticsani constituye un riesgo potencial para los poblados de Calacoa, Soquesane (8 km de distancia), Carumas (11 km), Quebaya, Cuchumbaya, Sijuaya, Muylaque, San Cristobal, Sacuaya, Yojo, Sotolojo, Ataspaya, Saylapa, Pallatea, además de numerosos caseríos localizados al oeste y sureste del volcán dentro de un radio de 12 km donde habitan más de 5,000 personas. Flujos piroclásticos, colapso de domo, caídas de tefras, ceniza, pómez, entre otros, afectarían seriamente las zonas próximas a este volcán (figuras 7.1 y 7.2).

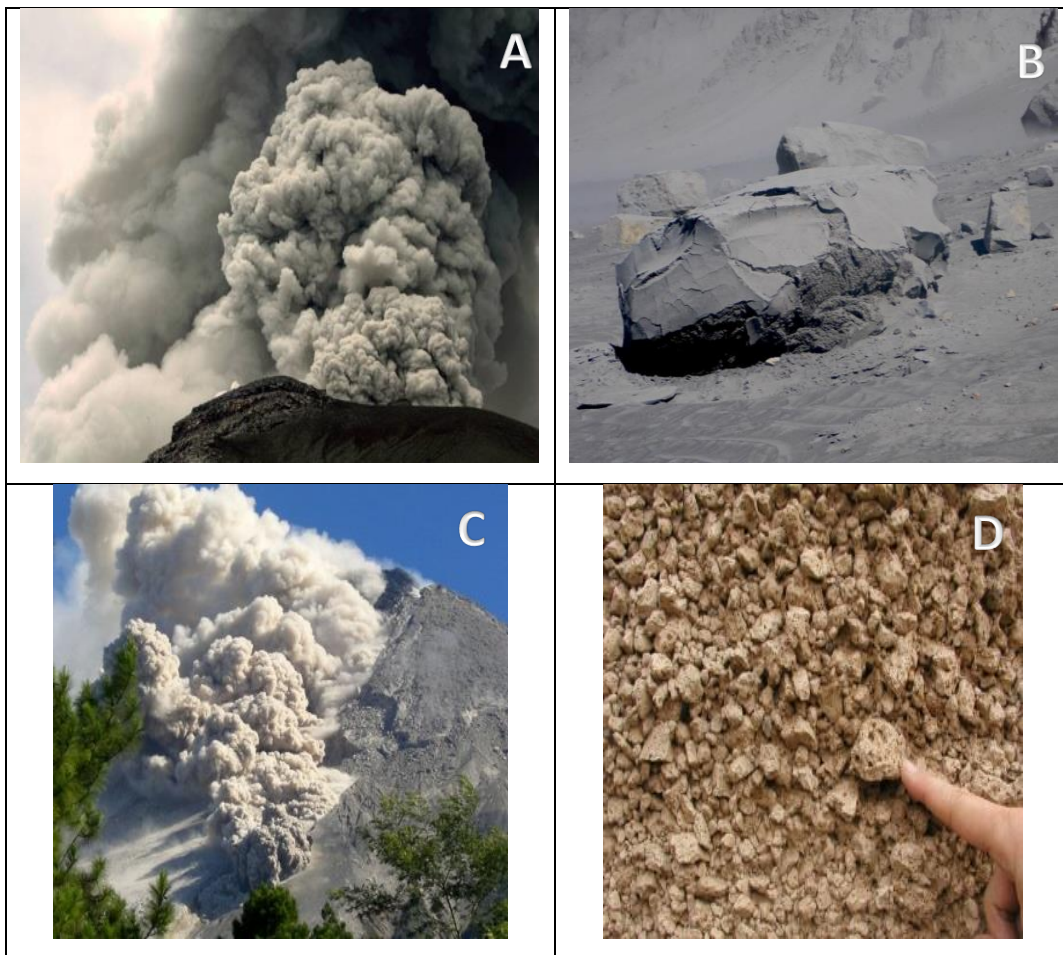


Figura 7.1 Algunos peligros volcánicos que podrían afectar a las poblaciones próximas al volcán Ticsani de suceder un proceso eruptivo. A: Caída de cenizas, B: Proyectiles y balísticos, C: Flujos piroclásticos, D: Caída de pómez.

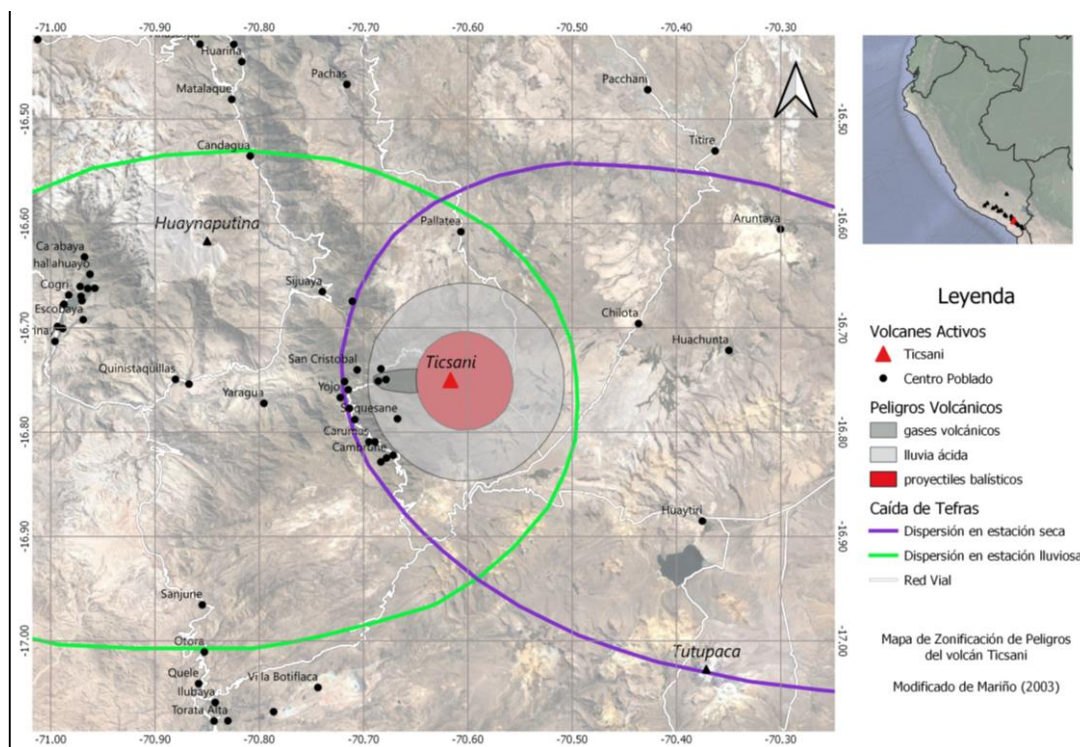


Figura 7.2 Mapa de zonificación de peligros en la región del volcán Ticsani por caídas de tefras, proyectiles balísticos y gases volcánicos. Mapa basado en una erupción moderada sub-pliniana (modificado de Mariño, 2003).

7.1. Evaluación del Riesgo Volcánico

El Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP en colaboración con instituciones científicas ha desarrollado la Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú (Macedo et al., 2016), donde se efectúa una estimación semicuantitativa, orientada a la evaluación objetiva del riesgo volcánico que representa la actividad volcánica a nivel nacional. Este sistema es una adaptación del modelo utilizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) denominado "National Volcano Early Warning System" (NVEWS) desarrollado por Ewert et al. (2005).

El nivel de riesgo volcánico viene determinado por el producto de los dos puntajes hallados para el peligro volcánico y exposición (vulnerabilidad). Este ejercicio nos proporciona como resultado un valor relativo que representa el "Riesgo Volcánico Relativo" (RVR). Tal valor ofrece un diagnóstico previo que es muy útil para la planificación y la intervención de la política pública.

El riesgo volcánico es calculado en base a la siguiente formulación:

$$\text{RIESGO VOLCANICO RELATIVO} = \text{PELIGRO VOLCANICO} \times \text{EXPOSICIÓN} \dots\dots(a)$$

Los principales factores de peligro asociados al Ticsani muestran que, hace 11 600 años presentó una erupción con IEV igual a 4, en una escala que va del 0 a 8; la última erupción data de hace menos de 400 años; durante sus erupciones ha emitido flujos piroclásticos; además, presenta actividad sísmica, de deformación y fumarólica actualmente. El puntaje acumulado de todos estos factores equivale a 10 de un máximo de 19.

Mientras que los factores de exposición relacionados a este volcán detallan principalmente que, existen poblaciones importantes en un radio de 30 km desde el centro volcánico; en caso de erupción el tráfico aéreo sería muy perjudicado; además, existe infraestructura energética y de transporte muy próxima al edificio volcánico. Por tanto, los resultados de exposición por erupción acumulan un total de 13.5 puntos de un máximo de 22.7.

Si aplicamos el producto de ambos factores, tal como indica la fórmula "a" obtenemos una puntuación total RVR de 135.3, este resultado concerniente al volcán Ticsani muestra que este macizo presenta un nivel de **riesgo alto** (Macedo et al., 2016). Dentro de este mismo nivel de riesgo se encuentran los volcanes Yucamane Tutupaca Huaynaputina y Chachani (Figura 7.3), los detalles para el cálculo del RVR del Ticsani se encuentran en el Anexo II.

Finalmente, el volcán Ticsani está considerado en el proyecto denominado **Ampliación y Mejoramiento del Sistema de Alerta Volcánica en el Perú**, a cargo del Instituto Geofísico del Perú y que actualmente se encuentra en ejecución. Gracias a ello se ha contemplado mejorar la instrumentación de la red de monitoreo telemétrico en dicho volcán.

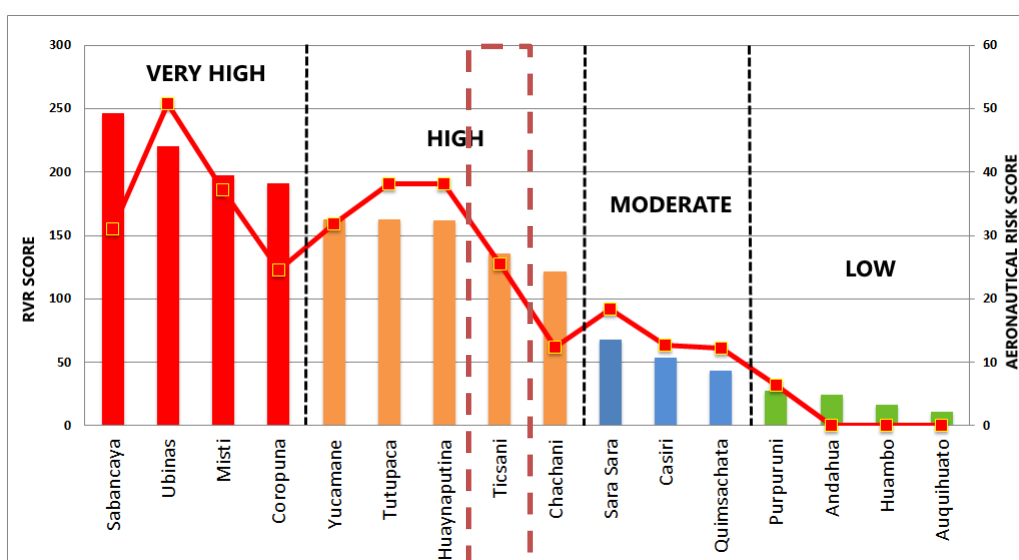


Figura 7.3 Categorización de los volcanes según el RVR. Los grupos (Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo) son determinados observando el agrupamiento de las barras. De acuerdo a esta categorización el volcán Ticsani presenta un **RVR alto**.

8. CONCLUSIONES

- El volcán Ticsani es un volcán activo en cuyo entorno se ha registrado incesante actividad sísmica en los últimos 19 años. Se ha observado sismicidad por fractura de rocas (VT), así como sismos asociados al paso de fluidos (LP) y tremores asociados a desgasificación superficial.
- Últimamente, desde 2016, se está registrando sismos de tipo Híbrido muy energéticos relacionados al movimiento de magma a unos 8 a 12 kilómetros de profundidad, así como sismos de fractura que vienen “en enjambre”.
- El número de eventos registrados solo entre septiembre de 2015 y marzo de 2016 superó los 33 mil sismos de tipo fractura.
- A partir de 2014 se ha determinado una importante actividad a proximidad del cráter (en cuyo interior se encuentra el domo reciente D3) y que está asociada a una falla activa “F2” que lo cruza con orientación norte-sur.
- La sismicidad de fractura (VT) es migrante, tal como se ha observado en la reactivación de otros volcanes en el mundo, y como lo señala White (2011). Esta sismicidad es inducida debido a presión de fluidos bajo que es transmitida a distancias que pueden ser muy lejanas al edificio volcánico. Los sismos registrados en Ticsani generaron magnitudes que alcanzaron los 4.4 ML y se distribuyeron con profundidades de hasta 20 km bajo la superficie, los focos sísmicos siguen un lineamiento acorde con el sistema regional de fallamiento.
- El volumen de magma que ha ascendido hasta posicionarse bajo el volcán corresponde a 4 millones de m³. Este cálculo se basa en el momento sísmico acumulado de los sismos VT ocurridos desde 2014.
- Según las observaciones en campo, así como los datos satelitales recabados por la Universidad de Cornell (USA) indican que desde 2014 se observa un aumento paulatino de 1.2°C/año en la zona del volcán Ticsani. Esta observación está correlacionada con la actividad sísmica muy particular observada en este volcán.
- Por el comportamiento eruptivo del Ticsani en tiempos históricos se puede considerar un posible escenario eruptivo. Considerando la última erupción del volcán Ticsani se puede esbozar un escenario eruptivo con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 2 y 3.

- La Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú (Macedo et al., 2016) indica que el Ticsani es considerado como un volcán de alto riesgo; dicho documento recomienda, entre otros, mejorar la red de vigilancia actual.
- El Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP ha efectuado amplios estudios sísmicos para determinar el estado actual del volcán, y dispone de un modelo de pronóstico de erupciones volcánicas aplicable para el volcán Ticsani. Se espera que el modelo sirva para mejorar los pronósticos del posible comportamiento del volcán.
- La red sísmica del IGP funciona correcta y adecuadamente y transmite en tiempo real. La información recabada permite la elaboración de mapas sísmicos, reportes especiales, así como los reportes quincenales que han llegado a las autoridades y público en general desde 2014.

9. RECOMENDACIONES

- Del mismo modo que se hizo para el caso de la erupción del volcán Ubinas, las autoridades del Gobierno Regional de Moquegua debe constituir un comité científico-técnico para la preparación y gestión de una posible crisis eruptiva del volcán Ticsani a la brevedad.
- Las autoridades deberán establecer procedimientos de contingencia, así como planes de prevención y mitigación ante erupciones volcánicas. Es necesario la preparación para disminuir el riesgo.
- Se debe educar y capacitar a la comunidad y autoridades y público en general mediante talleres informativos, dando a conocer que el volcán Ticsani es un volcán activo e informar periódicamente de las probabilidades que se inicie un periodo eruptivo.
- Permanecer informados mediante los reportes de monitoreo de la actividad volcánica y el nivel de alerta, los reportes son emitidos quincenalmente por el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) del IGP.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v. 91 (2001) p.69-80.
- Byrdina, S., Ramos, D., Vandemeulebrouck, J., Masias, P., Revil, A., Finizola, A., y otros. (2013). Influence of the regional topography on the remote emplacement of hydrothermal systems with examples of Ticsani and Ubinas volcanoes, Southern Peru. (P. Shearer, Ed.) *Earth and Planetary Science Letters*, 152-164.
- Carlotto, V. (2009). Puesta en evidencia de fallas activas mediante fotografías aéreas en la región de Huaytire-Laguna Suches, Moquegua, Sur del Perú. *Archivo técnico INGEMMET*, 5p.
- Cruz, J. (2016). Actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (Moquegua) para el periodo mayo - setiembre del 2014. *Tesis de grado profesional. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa - Perú*, 159p.
- Cruz, J., Macedo, O., Puma, N., Del Carpio, J., & Torres, J. (2016). Características de la actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (Moquegua) durante el periodo 2014-2016. *XVII Congreso Peruano de Geología. Sociedad geológica del Perú*, 5p.
- Del Carpio, J., Macedo, O., & Torres, J. (2016). A new method for volcanic eruption forecasting applied with success on Ubinas volcano. *Conferencia mundial de ingeniería en reducción del riesgo de desastres WECDRR. Lima - Perú*, 10.
- Delgado F., Reath K., Pritchard M., Alcott A., Moruzzi S., Styer A., Jay J., Aron F., Coppola D. & Lundgren P. (2018). Monitoreo de volcanes Peruanos desde el espacio con sensores termales e InSAR.
- Fournier, R. (1999). Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. *Bulletin of the society of economic Geologists*, p. 1205-1208.
- Geiger L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bulletin of St. Louis University*, 8 (1), p. 56-71.
- Gonzales, K., Froger, J., Rivera, M., & Audin, L. (2006). Deformación co-sísmica producida por el sismo Mb=5.4 del 01 de Octubre de 2005 (Carumas-Moquegua), detectada por interferometría radar - InSAR. *In XIII Congreso peruano de Geología. Vol, 2005, pp. 488-489*.
- Gonzales, K., Froger, J.-L., Audin, L., & Macedo, O. (2009). Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por interferometría Radar – InSAR. *Sociedad Geológica del Perú SGP*.
- Hasegawa, A., & Isacks, I. (1981). Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations. *L. Geophys.Res.*, B,86, 4971-4980.
- Hill, D., Pollitz F. & Newhall C. (2002). Earthquake - Volcano interactions. American Institute of Physics, S-0031-9228-0211-020-9.

- Holtkamp, S., Pritchard, M., & Lohman, R. (2011). Earthquake swarms in South America. *Geophys. J. Int.* 187,128-146.
- Isacks, B. (1988). Uplift of the Central Andean Plateau and Bending of the Bolivian. *J. Geophys. Res.* 93, p. 3211-3231.
- Jay, J., Delgado, F., Torres, J., Pritchard, M., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002-2014. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2780-2788.
- Jay, J., Pritchard, M., Aron, F., Delgado, F., Macedo, O., & Aguilar, V. (2013). Volcano-tectonic interactions at Sabancaya and other Peruvian volcanoes revealed by InSAR and seismicity. *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts V51E-2735*.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition*.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). *Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (2009) 253–264.
- Macedo, O., Taipe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., y otros. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. *Informe Técnico Instituto Geofísico del Perú (IGP)--Instituto Geofísico UNSA-Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Arequipa - Perú.*, mayo 2016, 75 p.
- Mariño, J. (2002). Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). 160.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima*.
- McNutt, S. (1996). Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. *Springer-Verlag, Berlin New York*, Pp. 99-146.
- McNutt, S. (2000). Volcanic seismicity, *Encyclopedia of Volcanoes*. Ed. H. Sigurdsson, *Academic Press, San Diego*, Pp. 1015-1034.
- Norabuena, E. (1992). Velocity structure of the subducting Nazca Plate beneath Central Perú as inferred from travel time anomalies. *Tesis de maestría, Virginia Polytechnic Institute*, 64 p.
- Puma, N., Torres, J., Macedo, O., Centeno, R., Del Carpio, J., & Cruz, J. (2016). Evolución de la actividad sismo-volcánica en la zona del volcán Sabancaya (2013-2016). *XVIII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú*, 5p.
- Sebrier, M., & Soler, P. (1991). Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late orogenic Oligocene time to present. *In: R.S. Harmon and C.W. Rapela Eds, Andean magmatism and its tectonic setting. Geol. Soc Amer. Spec. Paper*, 265, 259-278.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press, Berkeley*.
- Tavera, H. (2006). *Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua)*. Instituto Geofísico del Perú, Lima.

- Torres, J. (2014). Evaluación de la actividad sismovolcánica asociada a la intranquilidad del volcán Sabancaya, periodo enero-julio 2013. *Tesis de grado profesional. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa-Perú*, 148p.
- Wassermann, J. (2012). Volcano Seismology, IASPEI New manual of seismological observatory practice 2. *Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Second, edited by Peter Bormann*, p. 1-77.
- White R., & McCausland W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309 (2016) 139–155. *Published by Elsevier B.V.*
- White, R. (2011). Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. *Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.*
- Zobin, V. (2012). General Properties of Volcano-Tectonic Earthquake Swarms. Introduction to Volcanic Seismology. *Second edition, pp. 144-160. Elsevier, 482 p.*

ANEXO I

Tabla del Índice de Explosividad Volcánica (IEV)

IEV	Altura de pluma o columna eruptiva	Volumen	Clasificación	Frecuencia	Descripción del evento	Ejemplo de erupción
0	<100 m	>1000 m ³	Hawaiano	Diario	No explosivo	Kilauea (USA)
1	100–1000 m	>10,000 m ³	Haw/Stromboliano	Diario	Reducido	Stromboli (ITALIA)
2	1–5 km	>1,000,000 m ³	Stromboliano/Vulcaniano	Semanalmente	Moderado	Misti (PERU), 1440-70 Ubinas (PERU), del 2006 al 2009
3	3–15 km	>10,000,000 m ³	Vulcaniano	Anualmente	Moderado a fuerte	Ruiz (COLOMBIA), 1985 Sabancaya (PERU), de 1990 a 1998
4	10–25 km	>0.1 km ³	Vulcaniano/Pliniano	>10 años	Fuerte	Misti (PERU), hace 2000 años Galunggung (Java INDONESIA), 1982
5	>25 km	>1 km ³	Pliniano	>100 años	Muy fuerte	St. Helens (USA), 1981
6	>25 km	>10 km ³	Pliniano/Ultra-Pliniano	>100 años	Muy fuerte	Huaynaputina (PERU),1600
7	>25 km	>100 km ³	Ultra-Pliniano	>1000 años	Muy fuerte	Tambora (INDONESIA), 1815
8	>25 km	>1000 km ³	Ultra-Pliniano	>10,000 años	Muy fuerte	Toba (Sumatra INDONESIA), hace 71000 años

ANEXO II

Ficha de evaluación del factor de peligro y del factor de exposición para el volcán Ticsani

VOLCAN TICSANI		
Factores de Peligro	Calificación	Breve Explicación
Tipo de Volcán	1	Es un volcán de tipo Lava domo (Siebert et al. 2010).
Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica)	1	11600 BP -+ 80, VEI = 4 (LAMEVE-VOGRIPA).
Actividad explosiva en <500 a.	1	VEI de 2-3 (Siebert et al. 2010; Mariño 2002).
Actividad explosiva mayor en <5000 a.	0	La explosión de 1800 solo alcanzo de 2-3 VEI. (Mariño 2002).
Recurrencia eruptiva	2	En los últimos 11 000 se produjeron tres erupciones explosivas (Mariño & Thouret 2003).
Flujos piroclásticos Holocenos	1	2 flujos piroclásticos de bloques y cenizas, asociados al colapso de domos (Mariño & Thouret 2003).
Flujos de lava Holocenos	0	No (Mariño & Thouret 2003).
Lahares Holocenos	0	No hay registro.
Tsunamis Holocenos	0	No.
Potenciales explosiones hidrotermales	1	Si (Byrdina et al., 2013). Erupción freatomagmática, posterior al año 1600 D.C (Mariño & Thouret 2003).
Potencial Sector de Colapso	0	Colapso de domos durante el Holoceno (Mariño 2002).
Fuente primaria de Lahar	0	No tiene casquete glaciar que supere el 1Mm ³ de hielo.
Actividad sísmica observada	1	Sí (IGP).
Deformación observable de la superficie	1	2005 deformación a 7 km al NO y 17 km al SE del Ticsani (Jay et al, 2013; Gonzales, 2006).
Fumarola o desgasificación magmática	1	Si muestra fumarolas y gases (IGP).

Factores De Exposición	Calificación	Breve Explicación
Población contenida en un radio de 30 Km (VPI)	4.2	14838 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(14838)=4.2$
Población cercana a cursos de agua o valles fluviales	0	No corresponde.
Muertes históricas.	0	No hay antecedentes o no existen fatalidades.
Evacuaciones históricas.	0	No hay antecedentes.
Exposición de la Aviación local	2	Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia (275km).
Exposición de la Aviación regional	4.4	Aeropuertos de la Paz, Arica, Tacna, Arequipa y Juliaca es aprox. 22831 personas. $\log_{10}(22831)=4.4$
Infraestructura energética.	1	12Km al SW línea eléctrica (SEAL, IGP).
Infraestructura de transporte.	1	Carretera binacional a 11.6km al S del volcán.
Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles.	1	Calacoa 8 Km al W del volcán.

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=10 x 13.5

RVR = 135.3