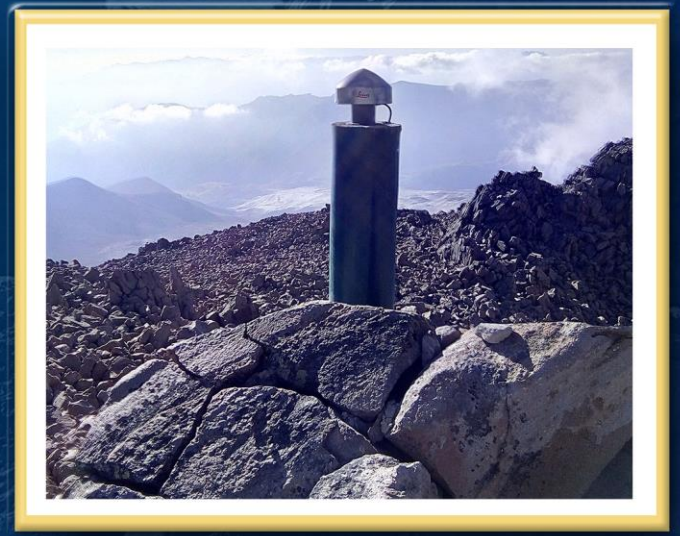


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**Informe Técnico N° A7138**

# VIGILANCIA DE LOS VOLCANES MISTI Y TICSANI, PERIODO 2020

Región Arequipa  
Provincia Arequipa



ABRIL  
2021

**INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO  
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO  
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DEL INGEMMET – OVI**

**Informe Técnico Nro. A7138**

**INFORME TÉCNICO ANUAL:  
VIGILANCIA DE LOS VOLCANES MISTI Y  
TICSANI, PERIODO 2020**

**EDICIÓN ESPECIAL POR VIII ANIVERSARIO DEL OVI**

**Equipo de Vigilancia Volcánica**

Fredy Apaza Choquehuayta  
Beto Ccallata Pacsi  
Mayra Ortega Gonzales  
Luis Fernando Cruz Mamani  
Edu Taipe Maquerhua

**AREQUIPA – PERU**

Abril 2021

## Contenido

RESUMEN .....	5
1 ASPECTOS GENERALES .....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 Problemática .....	6
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Volcán Misti.....	6
1.4.1 Ubicación geográfica .....	7
1.4.2 Antecedentes del volcán Misti .....	7
1.5 Volcán Ticsani .....	7
1.5.1 Ubicación geográfica .....	7
1.5.2 Antecedentes del volcán Ticsani .....	8
2 METODOS Y REDES DE MONITOREO.....	8
2.1 Métodos de monitoreo .....	8
2.1.1 Deformación volcánica.....	8
2.1.2 Sismología volcánica.....	10
2.1.3 Monitoreo visual y sensores Remotos .....	10
2.1.4 Hidroquímica y temperatura de fumarolas.....	11
2.2 Redes de monitoreo.....	11
2.2.1 Red de monitoreo del volcán Misti .....	11
2.2.2 Red de monitoreo del volcán Ticsani .....	14
3 ESTRUCTURACIÓN DE BASE DE DATOS .....	16
3.1 Deformación volcánica.....	16
3.1.1 Archivos de datos de Geodesia .....	17
3.2 Sismología volcánica.....	20
3.2.1 Archivos del área de Sismología volcánica.....	20
3.3 Química de gases volcánicos.....	24
3.4 Monitoreo visual y sensores remotos.....	25
3.4.1 Monitoreo visual .....	25
3.4.2 Sensores remotos.....	27
4 ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS.....	31

4.1	Adquisición de datos y resultados del Volcán Misti.....	31
4.1.1	Deformación Superficial en el Volcán Misti .....	31
4.1.2	Sismicidad del volcán Misti .....	35
4.1.3	Monitoreo visual y sensores remotos en el volcán Misti.....	42
4.1.4	Monitoreo de temperatura de fumarolas.....	46
4.2	Adquisición de datos y resultados del Volcán Ticsani.....	48
4.2.1	Deformación Superficial en el Volcán Ticsani .....	48
4.2.2	Sismicidad del volcán Ticsani .....	50
4.2.3	Monitoreo visual y sensores remotos en el volcán Ticsani.....	53
4.2.4	Resultados del monitoreo de fuentes termales.....	55
5	CONCLUSIONES .....	57
6	RECOMENDACIONES .....	58
7	BIBLIOGRAFÍA.....	59

## RESUMEN

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) realizó el estudio y seguimiento de la actividad volcánica en los volcanes Misti y Ticsani durante el periodo 2020, de manera permanente y continua a través de las técnicas de deformación, sismología volcánica, química de aguas, temperatura de fuentes termales y observaciones en superficie. Estos trabajos se realizaron a fin de entender los procesos y cambios en la dinámica interna de estos sistemas volcánicos indicando procesos de reactivación o incremento de actividad y que posteriormente podrían terminar en una erupción. Por ello, es importante contar con un monitoreo multidisciplinario que permita mejorar el entendimiento de un volcán.

Durante el año 2020, en el volcán Misti la deformación volcánica no registró cambios en la morfología del mismo, la sismicidad se mantuvo en niveles bajos y las alturas de las emisiones observadas, normalmente por las mañanas, no superaron los 1,000 m.s.c (metros sobre el cráter del volcán). Por su parte, el volcán Ticsani no mostró cambios en la deformación, de igual manera, la sismicidad volcánica se mantuvo en niveles bajos y las emisiones alcanzaron alturas de hasta 500 m.s.c.

Evalrados en función al monitoreo multiparamétrico y desde el punto de vista de peligrosidad que representan, en general, ambos se mantienen en **NIVEL DE ALERTA VERDE**, lo cual significa que, los volcanes se encuentra en estado de reposo con condiciones estables, observándose algunas emisiones de gases, mayoritariamente vapor de agua y baja actividad sismo – volcánica.

# 1 ASPECTOS GENERALES

## 1.1 Introducción

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI) busca determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica; evaluar los tipos de peligros volcánicos en base a estudios geológicos y análisis especializados; y proporcionar alertas oportunas a la sociedad sobre una actividad volcánica inminente.

El OVI realiza estudios y monitoreo de los volcanes Misti y Ticsani desde el 2006 de manera sistemática y continua. En el presente Informe Técnico Anual de la actividad de estos volcanes, correspondiente al año 2020, donde se compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia multiparamétricas instaladas en los alrededores de los edificios volcánicos.

## 1.2 Problemática

El Misti y el Ticsani son volcanes activos con actividad eruptiva reciente y representan un gran riesgo para la población aledaña. El volcán Misti es uno de los más peligrosos del mundo debido a que a escasos 17 km al suroeste se desarrolla la ciudad de Arequipa, la segunda ciudad más importante del Perú con más de 1 millón de habitantes. Mientras que el Ticsani tiene alrededor de 5 mil habitantes. Por otro lado, se desarrollan importantes actividades económicas cerca de estos volcanes como la minería, agricultura, ganadería entre otros, los cuales, serían afectados ante una eventual erupción. En tal sentido, con la finalidad de reducir el riesgo de desastres, el presente informe brinda información acerca del estado actual de estos volcanes.

## 1.3 Objetivos

- Realizar el monitoreo multidisciplinario de los volcanes Misti y Ticsani, integrando toda la información generada por las diferentes disciplinas.
- Buscar patrones relacionados con el comportamiento de la actividad de los volcanes.
- Proveer información sobre el estado actual de los volcanes Misti y Ticsani durante el año 2020.

## 1.4 Volcán Misti

El Misti es un estratovolcán situado a 18 km al noreste del centro de la ciudad de Arequipa, y representa el mayor riesgo volcánico en el Perú debido a que en sus faldas se asienta una ciudad densamente poblada, con más de un millón de habitantes.

### 1.4.1 Ubicación geográfica

El volcán Misti se encuentra ubicado en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur peruano. Política y territorialmente, el Misti está situado en la provincia y Región de Arequipa. El cráter del volcán se encuentra en las coordenadas UTM WGS84 243116 E, 8196974 S y Altitud de 5,825 m.s.n.m.

### 1.4.2 Antecedentes del volcán Misti

Según [Thouret et al. \(2001\)](#), la actividad histórica del volcán Misti se puede describir e identificar con las últimas erupciones volcánicas del Misti, estudiando la geología de los distintos depósitos emplazados sobre las caídas y flujos piroclásticos de la erupción de hace 2,050 años. Por otro lado, el método de potencial espontáneo permitió estudiar la estructura y los procesos de circulación de gases en el suelo y fumarolas, estableciendo una zona hidrotermal en el interior del volcán ([Ramos, 2000](#)). Por su parte, [Finizola \(2004\)](#) delimitó la zona hidrotermal donde los fluidos son identificados con el método de potencial espontáneo, en dicho estudio la concentración del CO<sub>2</sub> en el suelo del edificio volcánico fue analizado por cromatografía de gases. Estudios realizados por el equipo de vulcanología de INGEMMET entre el 2006 al 2012 establecieron una línea base para el monitoreo volcánico mediante el registro de emisiones, medición de gases volcánicos y estudio de aguas termales ([Masías et al., 2013](#)). En el volcán Misti se realizaron también estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales asociadas al volcán Misti ([Masías, 2008](#)). Finalmente, desde el año 2015, el INGEMMET, a través del OVI, viene realizando el seguimiento de la actividad volcánica empleando diferentes técnicas, los cuales, han sido detallados en los informes técnicos del 2015, 2017 y 2019.

## 1.5 Volcán Ticsani

El volcán Ticsani es uno de los 10 volcanes activos del Perú y se encuentra localizado en la Provincia de Mariscal Nieto (Moquegua), a 53 km en dirección noreste de la ciudad de Moquegua.

### 1.5.1 Ubicación geográfica

El volcán Ticsani forma parte del sector norte de la Zona Volcánica Central (ZVC). Este volcán está ubicado a 530 km al noreste de la ciudad de Moquegua, entre los distritos de San Cristóbal, Cuchumbaya y Carumas, provincia de Mariscal Nieto. Es accesible desde la ciudad de Moquegua por un desvío desde la carretera binacional Perú-Bolivia, a la altura de Humajalso (campamento del proyecto Pasto Grande), con dirección a Ticsani-Calacoa. La cima del volcán se encuentra en las UTM WGS84329700 E, 8146400 N, Altitud 5415 msnm

## 1.5.2 Antecedentes del volcán Ticsani

La última erupción registrada por el volcán Ticsani ocurrió hace 400 años (Thouret, 2008). En la historia reciente, fuertes sismos asociados principalmente a la actividad tectónica y volcánica han afectado las cercanías de este volcán con daños en la superficie de terrenos de cultivo, viviendas y vías de comunicación. El 17 de mayo de 1999 y el 01 de octubre de 2005 ocurrieron sismos de magnitudes 4.1  $M_L$  y 5.3  $M_L$  respectivamente (Tavera, 2006) que causaron serios daños a los pueblos de Calacoa, Cuchumbaya, Carumas, entre otros. En el 2017 se implementa el monitoreo en tiempo real por parte del OVI, registrándose de manera continua el comportamiento sísmico del volcán esta información se encuentra en los informes técnicos de los años 2017, 2018 y 2019.

## 2 METODOS Y REDES DE MONITOREO

Las técnicas empleadas en los volcanes Misti y Ticsani son principalmente el monitoreo geodésico, sísmico, visual, el monitoreo mediante sensores remotos, el seguimiento de la temperatura de las fumarolas y la composición química de las fuentes termales.

Definir las características físicas y la evolución de las mismas a través del tiempo, nos permite comprender el comportamiento del volcán en un estado no eruptivo y detectar con claridad cambios, que podrían indicarnos el paso a un estado de intranquilidad que podría ser el inicio de un proceso eruptivo

Desde el año 2006, el INGEMMET viene realizando el monitoreo periódico del volcán Misti, fecha en que se implementa una base de datos con muestreos temporales de aguas y gases, mediciones de deformación y además se realizó una campaña sísmica temporal. Por su parte, en el 2012, se implementa el monitoreo del volcán Ticsani mediante el seguimiento de fuente termales, geodesia y campañas sísmicas.

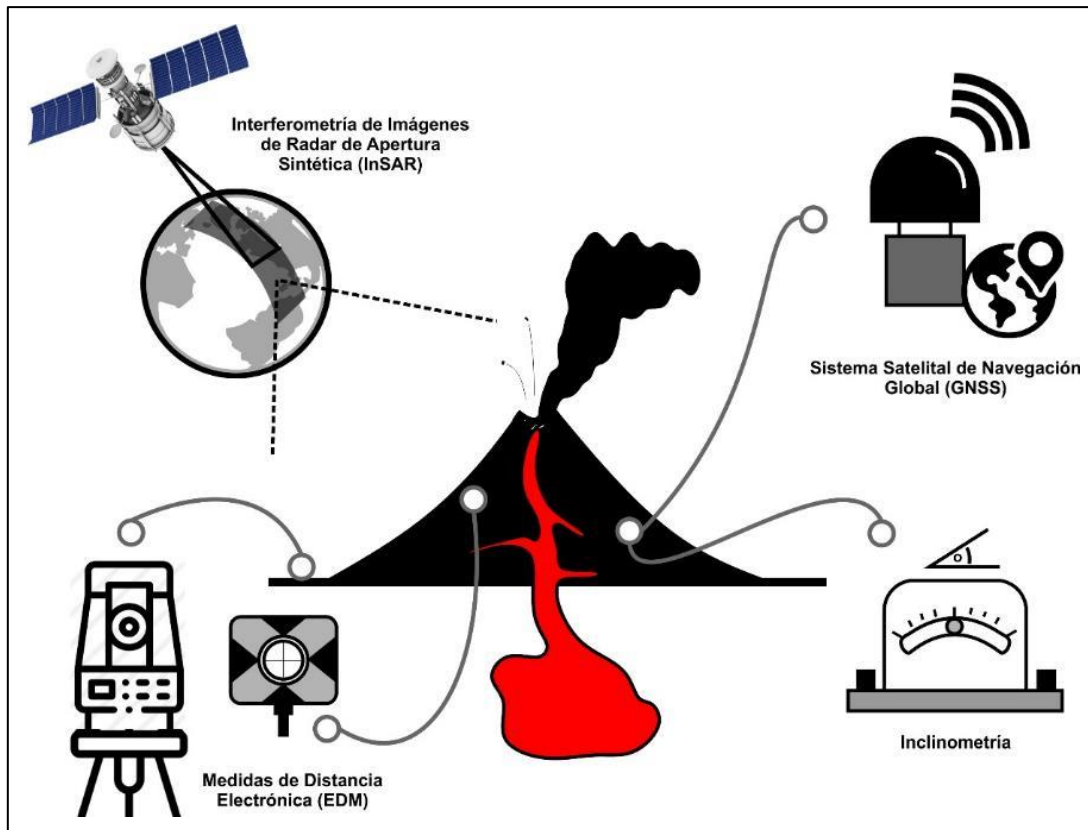
Actualmente, se mantiene el monitoreo en ambos volcanes a través de las siguientes técnicas y/o disciplinas: deformación volcánica, sismología volcánica, monitoreo visual y sensores remotos, Hidroquímica y temperatura de las fuentes termales

### 2.1 Métodos de monitoreo

#### 2.1.1 Deformación volcánica

Los cambios que suceden en la superficie volcánica suelen ser procesos cuyas magnitudes generalmente son de pocos milímetros a centímetros por año. Por ello, a lo largo del tiempo, con el desarrollo y evolución de la tecnología, el INGEMMET ha implementado diferentes metodologías que han permitido registrar tales magnitudes en el Volcán Misti, empezando con técnicas de topografía y geotecnia *in situ* hasta la utilización de información satelital. Estas metodologías se ilustran en la Fig. 2.1 y se describen brevemente a continuación:





**Figura 2.1.** Esquema de las técnicas utilizadas para medir la deformación superficial alrededor del Volcán Misti.

La **Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)** y sus variantes permiten obtener mapas de deformación superficial de un área determinada mediante el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) colectadas por satélites que orbitan la Tierra. Si se adquieren imágenes utilizando una configuración adecuada en dos fechas diferentes, es posible estimar la deformación producida en el terreno mediante la sucesión de franjas de color.

Las **Medidas Electrónicas de Distancias (EDM)** como su nombre lo indica, realizan medidas de distancias entre dos puntos comparando las fases de ida y vuelta de un rayo láser emitido por una estación total hacia unos prismas reflectores instalados en los flancos del volcán

La **Inclinometría** utiliza cualquier dispositivo con la capacidad de medir cambios en la inclinación local de la superficie de la Tierra utilizando un sensor que incluye una burbuja y tres cables dentro de un tubo parcialmente lleno de electrolitos. Durante el año 2020, esta instrumentación aún no se ha instalado en el Volcán Misti.

El **Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS)** está basado en la recepción y procesamiento de información emitida por una constelación de satélites que orbitan el planeta, y receptores geodésicos instalados en la superficie del volcán. Estos satélites proveen la posición de un punto en sus tres dimensiones con un nivel de precisión de magnitud milimétrica. Los pequeños cambios de estas posiciones relativas han sido usados para medir el desplazamiento superficial en volcanes activos (Dvorak y Dzurisin, 1997).

### 2.1.2 Sismología volcánica

La vigilancia sísmica se realiza mediante la instalación de estaciones permanentes las cuales transmitieron la información sísmica en tiempo real, todas estas estaciones fueron estratégicamente distribuidas alrededor del volcán.

Todas las estaciones fueron equipadas con sensores sísmicos de banda ancha, de marca GURALP, modelo CMG – 6TD (0.033 a 50 Hz). Estos sismómetros son dispositivos integrados (sensor y digitalizador en una sola pieza), que presentan accesorios como componentes externos; antena GPS, disco externo de recuperación de datos y alimentación por puerto de 12 v (Fig. 2.2).



**Figura 2.2.** (a) Sensor sísmico GURALP modelo CMG – 6TD. (b) Disco externo. (c) Caja de conexiones externas (Break-out box), (d) Batería (Fuente de energía). (e) GPS. (f) Cable de conexión entre el disco externo y el sensor.

### 2.1.3 Monitoreo visual y sensores Remotos

El monitoreo visual consiste en el seguimiento de la actividad volcánica observada en superficie, la cual, es uno de los recursos más valiosos y útiles, debido a que permite la identificación de cambios en el comportamiento de un volcán y estado de una erupción. Estas observaciones en superficie se realizan mediante imágenes obtenidas de cámaras ópticas de video – vigilancia. Por su parte, la utilización de sensores remotos en volcanes a través de imágenes satelitales (GOES, Sentinel II, PlanetScope), se realiza con la finalidad de monitorear el estado eruptivo de un volcán, comprender el dinamismo de las erupciones volcánicas y evaluar los daños que estas pueden generar.

## 2.1.4 Hidroquímica y temperatura de fumarolas

### 2.1.4.1 Seguimiento de fuentes termales

Consiste en la identificación y seguimiento de la composición química del agua en el tiempo, y de los parámetros físicos como la temperatura.

El monitoreo de fuentes termales durante el año 2020, se limitó a una campaña de muestreo de 6 fuentes termales: PU1, PU2, CU4, CUF, HIB y SQ1, realizada entre el 5 y el 8 de noviembre

Los análisis del agua se realizaron en el laboratorio de química de INGEMMET, aniones para todas las muestras y metales disueltos para las fuentes SA2 y SA3. Utilizando las metodologías y equipos que se enumeran a continuación:

**Metales disueltos - (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO<sub>2</sub>, B, Fe, S)** por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca VARIAN, modelo 735-ES. Además (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Sr, Li, Fe, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn) por Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) marca Perkin, modelo Nexion 300D.

**Aniones - (F-, Cl-, SO<sub>4</sub>=)** por Cromatografía Iónica marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS-5000. Además (CO<sub>3</sub>=, HCO<sub>3</sub>-) por método Titrimétrico marca Thermo Scientific, modelo Orion Versa Star.

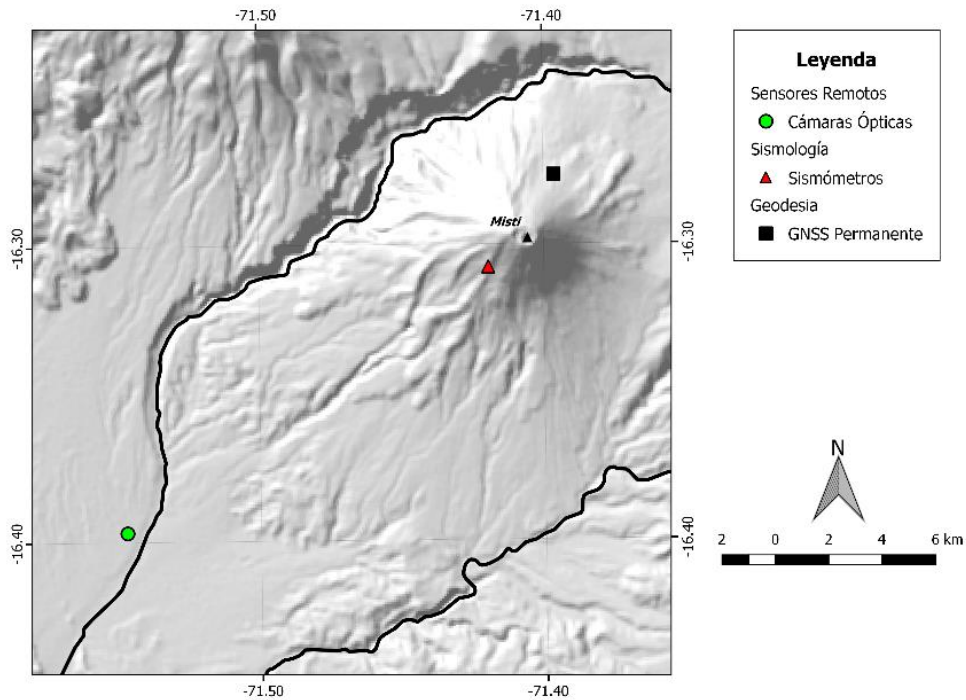
### 2.1.4.2 Temperatura de fumarolas

La medición de temperatura en las fumarolas consiste en colocar un registrador de temperatura tipo datalogger que realiza mediciones continuas de temperatura en intervalos de tiempo y almacena la información para luego ser descargada, se emplean registradores Modelo Tinitag Aquatic 2.

## 2.2 Redes de monitoreo

### 2.2.1 Red de monitoreo del volcán Misti

Durante el 2020, la red de monitoreo multiparamétrico del volcán Misti estuvo conformada por los siguientes equipos en tiempo real (Figura 2.3): (01) estación GPS permanente, (01) estación sísmica, (01) cámara de video vigilancia y el seguimiento de Fuentes termales.



**Figura 2.3.** Red de monitoreo multiparamétrico del volcán Misti.

- La red de monitoreo geodésico estuvo conformada por una (01) estación GNSS de operación permanente (Aguada Blanca - MTAB) y una estación de referencia ubicada ~ 20 km al suroeste en la ciudad de Arequipa (AREQ).
- La red de monitoreo sísmico estuvo conformada por 01 sensor sísmico de banda ancha (MST01), marca GURALP, modelo CMG-6TD (Fig. 2.3). Las especificaciones de dicha estación se muestran en la tabla 2.1. Dicha estación sísmica opera en tiempo real, y está conformada por 01 sensor sísmico y 01 digitalizador integrado, 01 antena GPS para la calibración del tiempo, 01 batería de 12 V, 01 panel solar, un regulador de voltaje, y 01 set de telemetría para la transmisión de la información (Figura 2.5). Estos instrumentos están debidamente protegidos ante las inclemencias del tiempo y están instalados dentro de casetas metálicas, para la prevención ante posibles actos vandálicos.
- los datos son registrados a 100 muestras por segundo, en un rango de frecuencias de 30s a 100Hz.

**Tabla 2.1.** Instrumentación empleada para el monitoreo sísmico, periodo 2020.

Estación	Fecha de instalación	Lugar	Sector	Componente
MST01	15/03/2013	Flanco suroeste	Campamento Pirámide	3C



**Figura 2.3.** Estación MST01, ubicada en el flanco sur del volcán Misti.

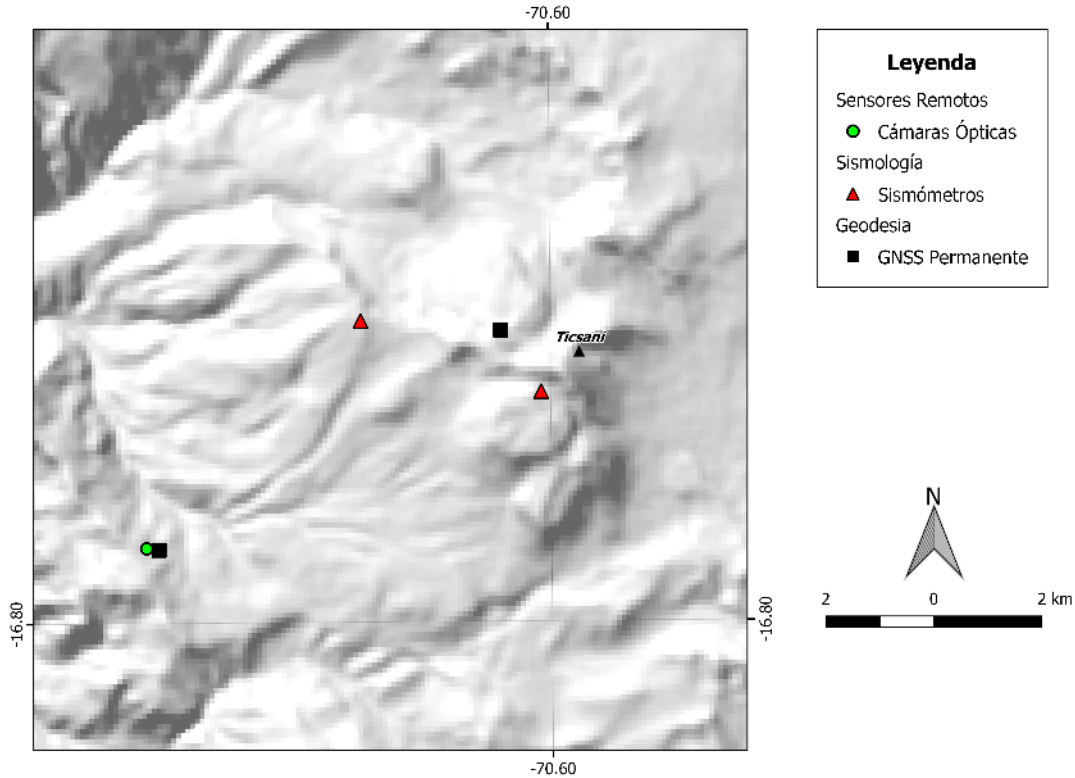
- La red monitoreo visual, estuvo conformada por una cámara ubicada en la Oficina del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), al suroeste del volcán, la cual, monitorea en tiempo real (24/7), la actividad superficial del volcán a través del registro de imágenes. En la Tabla 2.2 se muestra las principales características de la cámara de monitoreo.

**Tabla 2.2.** Características técnicas de la cámara de monitoreo.

Estación	Cámara	Modelo	Tipo	Ubicación	Transmisión
MOVI	Axis	Q1765-LE	Óptica	OVI	Tiempo Real

### 2.2.2 Red de monitoreo del volcán Ticsani

Durante el 2020, la red de monitoreo multiparamétrico del volcán Ticsani estuvo conformada por los siguientes equipos en tiempo real. (Figura 2.4): (1) estación GPS, (02) estaciones sísmicas y (01) cámara de video – vigilancia.



**Figura 2.4.** Red de monitoreo multiparamétrico del volcán Ticsani, 2020.

La red de estaciones de monitoreo geodésico que monitorean la deformación del suelo alrededor del Volcán Ticsani, durante el año 2020, estuvo conformada por una (01) estaciones GNSS de operación permanente: estación Domo 3 (TSD3) y dos estaciones de referencia ubicadas ~ 6 km al suroeste del volcán Ticsani en Soquesane (TSSQ) y ~ 100 km al noroeste en la ciudad de Arequipa (AREQ).

El equipo empleado para la vigilancia sísmica del volcán Ticsani, durante el periodo 2020, fue de 01 estación sísmica de banda ancha: 01 con transmisión de data en tiempo real, vía telemetría (**TIC02**), hacia la oficina del INGEMMET en Arequipa. Esta estación cuenta con un sensor sísmico de banda ancha, marca GURALP, modelo CMG-6TD. Las especificaciones de dicha estación se muestran en la tabla 2.3, cuyos datos son registrados a razón de 100 muestras por segundo, por canal, en un rango de frecuencia de 30s a 100 Hz.

**Tabla 2.3.** Equipo de monitoreo sísmico, en el volcán Ticsani.

<b>Estación</b>	<b>Fecha de instalación</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UMT-S</b>	<b>Componente</b>
TIC02	01/04/2016	325943	8147419	Triaxial

La estación sísmica **TIC02**, está conformada por tres sensores sísmicos y un digitalizador, integrado, una antena GPS para la calibración del tiempo, una batería de 12 V, un panel solar, un regulador de voltaje y 01 set de telemetría para la transmisión de la información (figura 2.5). Estos instrumentos están debidamente protegidos de las inclemencias del tiempo y están instalados dentro de casetas metálicas, para la prevención ante posibles actos de vandalismo.



**Figura 2.5.** Estación sísmica con transmisión en tiempo real **TIC02**, ubicada en el flanco oeste del volcán Ticsani.

El volcán Ticsani, consta de una cámara de monitoreo óptica, la cual se encuentra ubicada en el poblado de Soquesane, en el domo Sur del volcán. En el Tabla 2.4., se muestran las características de esta cámara de monitoreo.

Tabla 2.4. Estación de monitoreo y características técnicas de la cámara de monitoreo del volcán Ticsani.

<b>Estación</b>	<b>Cámara</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Transmisión</b>
TSOQ	Axis	Q1765-LE	Óptica	Soquesane	Tiempo Real

### 3 ESTRUCTURACIÓN DE BASE DE DATOS

El almacenamiento y manejo de datos de las diferentes técnicas aplicadas al monitoreo de volcanes, nos ha permitido organizar nuestra información en una base de datos agrupando y almacenando los datos en un lugar específico de fácil manejo y administración.

A continuación, se detallada el avance en la estructuración de bases de datos por disciplinas.

#### 3.1 Deformación volcánica

La base de datos de estaciones permanentes y temporales que corresponde desde la etapa de adquisición, pre-procesamiento y procesamiento del monitoreo de los volcanes activos en el sur del Perú, presenta una estructura en la cual se clasifican como: Datos originales, Datos Procesados y Resultados (Fig. 3.1).

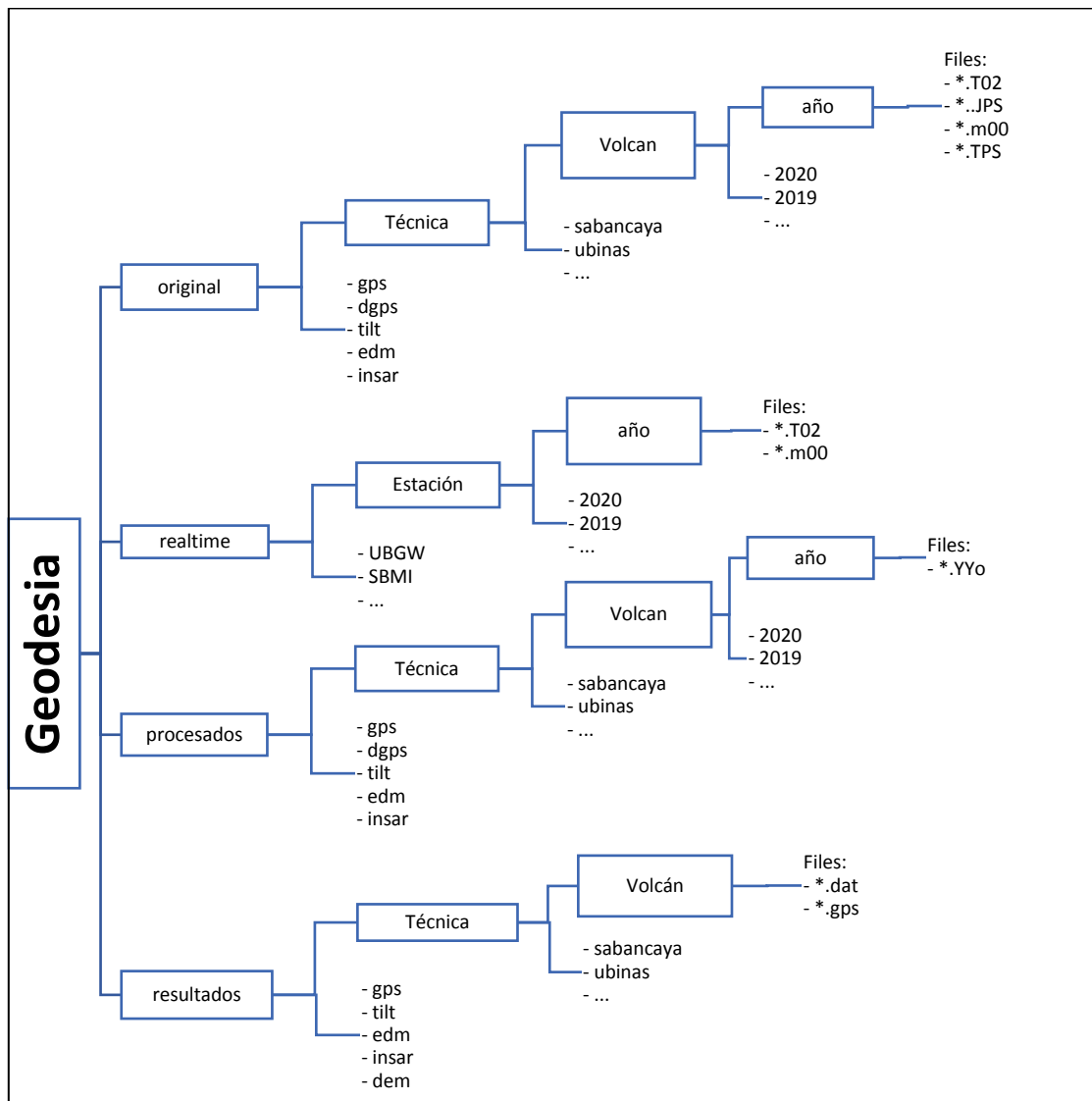


Figura 3.1. Diagrama de la base de datos de Geodesia.



### 3.1.1 Archivos de datos de Geodesia

La clasificación de datos topográficos, geodésicos y satelitales que se emplean en el monitoreo de los volcanes activos, comprende desde la adquisición de la data cruda (original) sea en tiempo real o temporal (campañas de campo), para ello se realiza el pre-procesamiento primario para obtener un archivo estándar por cada técnica, llamado procesado, a partir de esta etapa mediante el procesamiento riguroso se extrae información relevante por cada técnica (EDM, inclinómetro, GNSS, fotogrametría, satelital, etc.), que son los resultados, que permiten analizar cualitativa y cuantitativamente los cambios que ocurren en la superficie del volcán.

#### 3.1.1.1 Datos GPS

La obtención de las series temporales de posiciones precisas, está dentro del procesamiento primario que realiza el área de deformación volcánica del OVI. Dicho proceso además de las líneas base, consiste en extraer la información más importante de los datos GPS, con la finalidad de detectar cambios superficiales en la estructura del volcán (inflación, deflación).

El procesamiento de los datos GPS por estación para cada volcán se realiza convirtiendo los archivos originales (\*.JPS, \*.m00, \*.TPS, \*.T02, \*.T01), mediante el software TEQC, a un archivo de lectura universal. Los archivos originales se encuentran en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo\Geodesia\original\gpscors\volcán\estación\ año\**

Y tienen la siguiente nomenclatura:

**Código Estación + Día GPS + Número Sesión (0). Extensión,**

Por ejemplo: **SBSE0960.JPS**

Los archivos convertidos de lectura universal son llamados RINEX. Y estos se encuentran en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo\procesados\gpscors\volcán\estación\ año\**

Y tienen la siguiente nomenclatura:

**Código Estación + Día GPS + Número Sesión (0). Extensión,**

Por ejemplo: **SBSE0960.20o**

Una vez realizado el procesamiento de los datos RINEX, los resultados se guardan dentro de la siguiente dirección:

\\10.102.131.50\Monitoreo\Geodesia\resultados\gps\volcán\estación\

Hay dos tipos de archivos de salida: posiciones precisas (\*.gps) y líneas base (\*.dat).

**Posiciones (\*.gps)**

GPS es un archivo de texto plano que almacena los datos de la diferencia de las posiciones finales (este, norte y altura en metros), que permite evaluar desplazamientos, deformaciones y cambios en la superficie del volcán. El archivo de salida consta de 7 columnas, delimitado por comas y su unidad está expresada en metros (m). En la Figura . 3.2, se observa la estructura del archivo. Este tipo de archivos de salida presentan la siguiente nomenclatura:

**Estación.gps** (Por ejemplo: **SBSE.gps**)

*YYYYMMDD	dN	dE	dU	Sn	Se	Su
20151003	0.04824	-0.01491		-0.08203	0.00191	0.00263 0.00723
20151004	0.04656	-0.01203		-0.08664	0.00555	0.00799 0.02531
20151005	0.04852	-0.01167		-0.07955	0.00192	0.00280 0.00729
20151006	0.04947	-0.01358		-0.08562	0.00188	0.00289 0.00756
20151007	0.04916	-0.01152		-0.08436	0.00179	0.00270 0.00707
20151008	0.04863	-0.01341		-0.08144	0.00182	0.00252 0.00688
20151009	0.04853	-0.01360		-0.08185	0.00179	0.00281 0.00780
20151010	0.04749	-0.01458		-0.08314	0.00187	0.00249 0.00686
20151011	0.04934	-0.01367		-0.08586	0.00177	0.00254 0.00673
20151012	0.04920	-0.01310		-0.08179	0.00169	0.00246 0.00663
20151013	0.04905	-0.01267		-0.08199	0.00178	0.00272 0.00708
20151014	0.04941	-0.01263		-0.08235	0.00193	0.00296 0.00755
...						

**Figura 3.2.** Estructura de archivo de resultados, con extensión \*.gps.

Descripción de columnas del archivo resultados \*.gps:

- a) **Fecha:** Fecha UTC (año-mes-día) expresados en número de fechas de serie.
- b) **dif\_Este:** Diferencia de la componente Este (metros).
- c) **dif\_Nort:** Diferencia de la componente Norte (metros).
- d) **dif\_Vert:** Diferencia de la componente Altitud (metros).
- e) **error Es:** Sigma o error de la componente Este (metros).
- f) **error No:** Sigma o error de la componente Norte (metros).
- g) **error Ve:** Sigma o error de la componente Altitud (metros).

**Líneas Base (\*.dat)**

Archivo de texto creado para almacenar y comparar la diferencia de la distancia entre dos estaciones GNSS de interés, que permite cuantificar la velocidad de desplazamiento de una estación para un determinado periodo. La Fig. 3.3, muestra la estructura del archivo y presentan la siguiente nomenclatura:

**mb\_CodEstación1\_GPS\_CodEstación2\_GPS.dat** (Por ejemplo: **mb\_SBSE\_GPS\_SBHO\_GPS.dat**)

```
Globk Analysis GGVer 10.71.014 Fri Jan 22 15:34:36 EST 2021
SBSE_GPS to SBHO_GPS Solution 1

2016 10 6 11 59 1.93930 0.00230
2016 10 7 11 59 1.93930 0.00190
2016 10 8 11 59 1.93870 0.00190
2016 10 9 11 59 1.94030 0.00260
2016 10 10 11 59 1.93970 0.00190
2016 10 11 11 59 1.93870 0.00190
...
```

**Figura 3.3.** Estructura de archivo de salida para líneas base \*.dat.

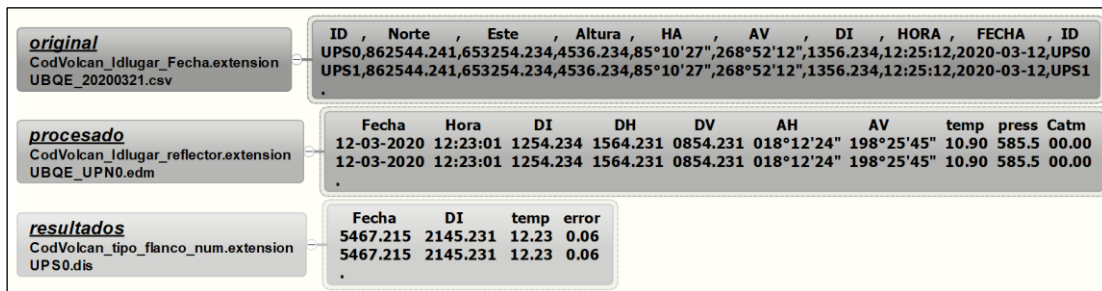
Descripción de columnas del archivo resultados \*.dat:

- a) **Fecha:** Compuesto por 5 columnas (año mes (mm) día (dd) hora (HH) minuto (MM)).
- b) **baseline:** Es la longitud entre dos estaciones o línea base (metros).
- c) **error:** Es el sigma o error de la línea base expresado (metros).

**3.1.1.2 Datos EDM (\*.dis)**

Es un formato de archivo de texto que almacena las variaciones horizontales que se miden en la superficie volcánica mediante lecturas directas de la distancia inclinada, está compuesta por 4 columnas y delimitado por espacios, sus unidades están expresadas en metros (m). La Figura , muestra el tipo de archivo de salida. El archivo de resultados presenta la siguiente nomenclatura:

**CodVolcanTipoFlancoNumero.dis** (Por ejemplo, **UPS0.dis**)



**Figura 3.4.** Tipo de dato del archivo de salida para mediciones EDM.

Descripción de columnas del archivo resultado \*.dis:

- a) **Fecha:** Expresados en número de fechas de serie (yyyy-mm-dd hh:mm:ss)
- b) **DI:** Es la variación horizontal de la distancia inclinada expresado en metros
- c) **Temp:** Es la temperatura registrada en el instante de medición en grados centígrados
- d) **error:** Sigma o error de la distancia inclinada

## 3.2 Sismología volcánica

La base de datos de las estaciones sísmicas telemétricas y no telemétricas, corresponde desde la etapa de adquisición, pre-procesamiento y procesamiento del monitoreo de los volcanes activos en el sur del Perú. La estructura que presenta la base de datos de esta área es la siguiente (Fig. 3.5):

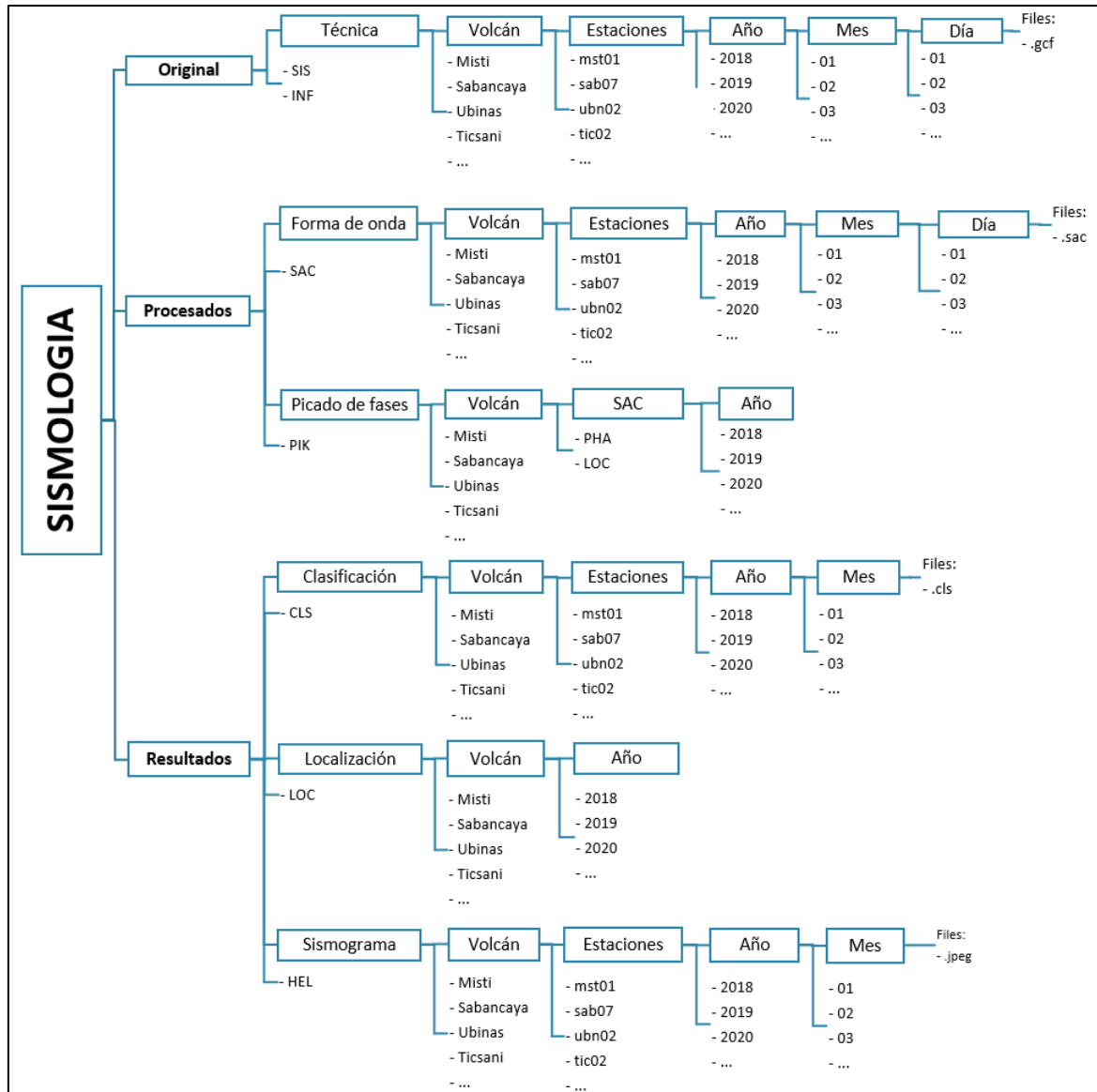


Figura 3.5. Estructura de la base de datos del área de Sismología volcánica.

### 3.2.1 Archivos del área de Sismología volcánica

#### 3.2.1.1 Clasificación de señales sísmo – volcánicas

La clasificación de señales sísmicas en volcanes, está dentro del procesamiento primario que realiza el área de sismología volcánica del OVI, este proceso consiste en extraer la información más importante de la señal sísmica, con la finalidad de detectar cambios en la sismicidad

(número y tipo de señales sísmicas, parámetros espectrales, energía sísmica, magnitud sísmica, desplazamiento reducido, etc.).

La clasificación de las señales sísmicas se realiza analizando los archivos \*.sac mediante un software especializado (Classification\_OVI.m), dichos archivos se encuentran en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.46\Monitoreo\Sismología\Procesados\SAC\volcán\estación\año\mes\día**

Y tiene la siguiente nomenclatura:

**año mes día\_hora.estación sísmica.componente.sac** (Por ejemplo: 20190216\_0300.sab07.z.sac)

Una vez realizada la clasificación por estación sísmica y para cada volcán, se genera un archivo de salida \*.cls, el cual, se ubica en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.46\Sismología\Resultados\CLS\volcán\estación\año\mes**

El nombre del archivo presenta la siguiente nomenclatura:

**año mes día\_estación sísmica.cls** (Por ejemplo: 20200317\_sab07.cls)

En la Fig. 3.6, se puede apreciar la información que se guarda dentro de los archivos de salida, donde se muestra la clasificación realizada de un día para el volcán Sabancaya en la estación sísmica SAB07.

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
EXP	2019-09-15	00:00:49.94	1.08	51639	78	20190915_0000.sab07.z.sac	0.2790	1	42.00	50.71
LP1	2019-09-15	00:03:01.55	1.15	22007	44	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0344	0	16.55	20.58
LP1	2019-09-15	00:21:11.89	1.17	13031	64	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0169	0	9.81	12.33
LP1	2019-09-15	00:22:43.50	1.67	3953	19	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0009	0	1.67	2.50
LP1	2019-09-15	00:25:43.91	3.10	6908	33	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0037	0	1.21	2.47
VT1	2019-09-15	00:30:58.64	4.80	7698	17	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0015	0	0.73	1.85
VT1	2019-09-15	00:33:39.74	12.22	14980	32	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0051	0	0.30	1.22
LP1	2019-09-15	00:38:39.94	1.64	42181	59	20190915_0000.sab07.z.sac	0.1332	0	18.62	27.71
LP1	2019-09-15	00:39:38.07	1.43	4338	18	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0012	0	2.42	3.37
EXP	2019-09-15	00:54:49.77	1.45	49722	97	20190915_0000.sab07.z.sac	0.2798	1	27.69	38.70
LP1	2019-09-15	00:56:36.00	1.66	3345	25	20190915_0000.sab07.z.sac	0.0009	0	1.53	2.29
LP1	2019-09-15	01:00:07.67	1.17	4133	23	20190915_0100.sab07.z.sac	0.0015	0	3.14	3.94
LP1	2019-09-15	01:00:27.81	1.68	3113	17	20190915_0100.sab07.z.sac	0.0007	0	1.33	2.00

**Figura 3.6.** Ejemplo de archivo de salida que se genera cuando se realiza la clasificación de señales sísmicas.

Donde:

**a.** Tipo de señal sísmica (Tabla )

**Tabla 3.1.** Tipos de señales sísmicas asociados a distintos procesos.

<b>COL</b>	Colapso	<b>SWL</b>	Enjambre sísmico de LP's
<b>EXP</b>	Explosión	<b>TEC</b>	Tectónico
<b>HYB</b>	Híbrido	<b>TEL</b>	Telesismo
<b>LAH</b>	Lahar	<b>TOR</b>	Tornillo
<b>LP1</b>	Largo periodo	<b>TRE</b>	Tremor espasmódico
<b>LPS</b>	Largo periodo superficial	<b>TRA</b>	Tremor armónico
<b>MUL</b>	Múltiples eventos	<b>VLP</b>	Very Low Period
<b>RFL</b>	Caída de rocas	<b>VT1</b>	Volcano – tectónico
<b>RUI</b>	Ruido	<b>VTB</b>	Volcano – tectónico superficial
<b>SWV</b>	Enjambre sísmico de VT's	<b>VTD</b>	Volcano – tectónico distal

- b.** Fecha UTC (año-mes-día).
- c.** Hora UTC (hh:mm:ss.ss).
- d.** Frecuencia pico (Hertz).
- e.** Amplitud máxima (Cuentas).
- f.** Duración de la señal sísmica (Segundos).
- g.** Archivo SAC donde se ha clasificado la señal sísmica.
- h.** Energía sísmica liberada (Megajoules – MJ).
- i.** Calidad de la señal sísmica (claridad de la señal sísmica).
- j.** Desplazamiento reducido de ondas superficiales (cm<sup>2</sup>).
- k.** Desplazamiento reducido de ondas de cuerpo (cm<sup>2</sup>).

### 3.2.1.2 Localización de señales sismo – volcánicas

La localización de un sismo, se realiza con la finalidad de conocer la ubicación en superficie y en profundidad del mismo (epicentro, hipocentro). Los archivos de localización son datos finales del procesamiento del picado de las fases sísmicas P y S, de las redes telemétricas y no telemétricas de los volcanes, los cuales, se encuentran en formato \*.txt y se ubican en la

siguiente dirección:

\\10.102.131.46.\monitoreo\Sismologia\Resultados\LOC\volcán\ año.txt

El nombre del archivo de salida presenta la siguiente nomenclatura:

**Locvolcán\_año.txt** (Por ejemplo: LocSab\_2019.txt)

Cada archivo tendrá un encabezado tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 3.7:**

yyyy/mm/dd	hh:mm:ss.ss	Latitud	Longitud	Prof	Mag	Er_lat	Er_lon	Er_z
2014/07/20	16:13:51.86	-15.64800	-71.86983	-00.95	1.9	0.45	2.43	1.77
2014/07/21	10:23:31.99	-15.73133	-71.83350	-02.30	1.5	0.26	0.39	0.36
2014/07/21	11:28:08.82	-15.78217	-71.86617	-02.20	1.7	0.23	2.38	0.77
2014/07/24	21:19:10.84	-15.67183	-71.89033	-00.68	2.1	0.30	1.26	0.79
2014/08/02	17:29:00.64	-15.75633	-71.86017	09.29	2.1	0.48	0.94	0.49
2014/08/02	18:35:32.25	-15.80417	-71.88083	-04.27	1.2	0.21	0.44	0.23
2014/08/02	18:45:21.74	-15.80550	-71.88300	-03.01	2.1	0.21	0.28	0.25
2014/08/02	18:52:54.98	-15.79317	-71.88200	-04.77	1.2	0.23	0.80	0.37
2014/08/02	18:55:28.50	-15.80417	-71.88283	-03.25	0.7	0.21	0.28	0.25
2014/08/02	19:43:33.95	-15.79017	-71.87800	-05.02	0.9	0.53	0.65	0.58
2014/08/02	20:02:02.90	-15.80500	-71.88317	-03.62	1.5	0.21	0.28	0.28
2014/08/02	20:38:41.97	-15.79533	-71.86783	-04.10	2.3	0.14	0.31	0.32
2014/08/02	20:43:37.99	-15.80200	-71.87883	-04.32	1.5	0.22	0.53	0.12
2014/08/02	20:48:00.66	-15.80400	-71.87050	-04.50	1.4	0.17	0.44	0.19
2014/08/02	23:11:13.81	-15.81017	-71.87650	-04.94	1.2	0.17	0.61	0.31
2014/08/02	23:56:55.07	-15.79933	-71.86150	-04.72	1.3	0.13	0.69	0.60
2014/08/03	00:10:08.18	-15.79583	-71.86367	-04.88	1.0	0.10	0.86	0.86
2014/08/03	01:38:27.70	-15.79833	-71.86683	-04.73	2.9	0.11	0.55	0.39
2014/08/03	03:39:41.34	-15.75600	-71.86667	02.26	1.8	0.24	0.48	0.44
2014/08/03	04:48:32.11	-15.78183	-71.87950	10.61	2.0	0.54	1.02	0.50
2014/08/03	06:03:10.01	-15.78833	-71.88100	10.23	2.9	0.53	0.99	0.49

**Figura 3.7.** Ejemplo de archivo de salida que se genera cuando se realiza la localización de señales sísmicas.

A continuación, se describe cada columna (Tabla 3.2):

**Tabla 3.2.** Archivo de salida generado cuando se realiza la localización de señales sísmicas.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO	OBSERVACIONES
yyyy/mm/dd	año, mes y día	
hh:mm:ss.s	hora:minuto:segundos decimales	Hora UTC
Latitud	latitud	Grados decimales
Longitud	longitud	Grados decimales
Prof	Profundidad (Km)	Profundidad respecto al nivel del mar.

Las profundidades negativas (-) estarán por encima del nivel del mar

Mag	Magnitud sísmica local (MI)
Er_lat	Error en latitud (Km)
Er_lon	Error en longitud (Km)
Er_z	Error en profundidad (Km)

### 3.3 Química de gases volcánicos

La estructura de la organización de la base de datos y resultados del área de Química de gases volcánicos, se muestra a continuación en la Fig. 3.8:

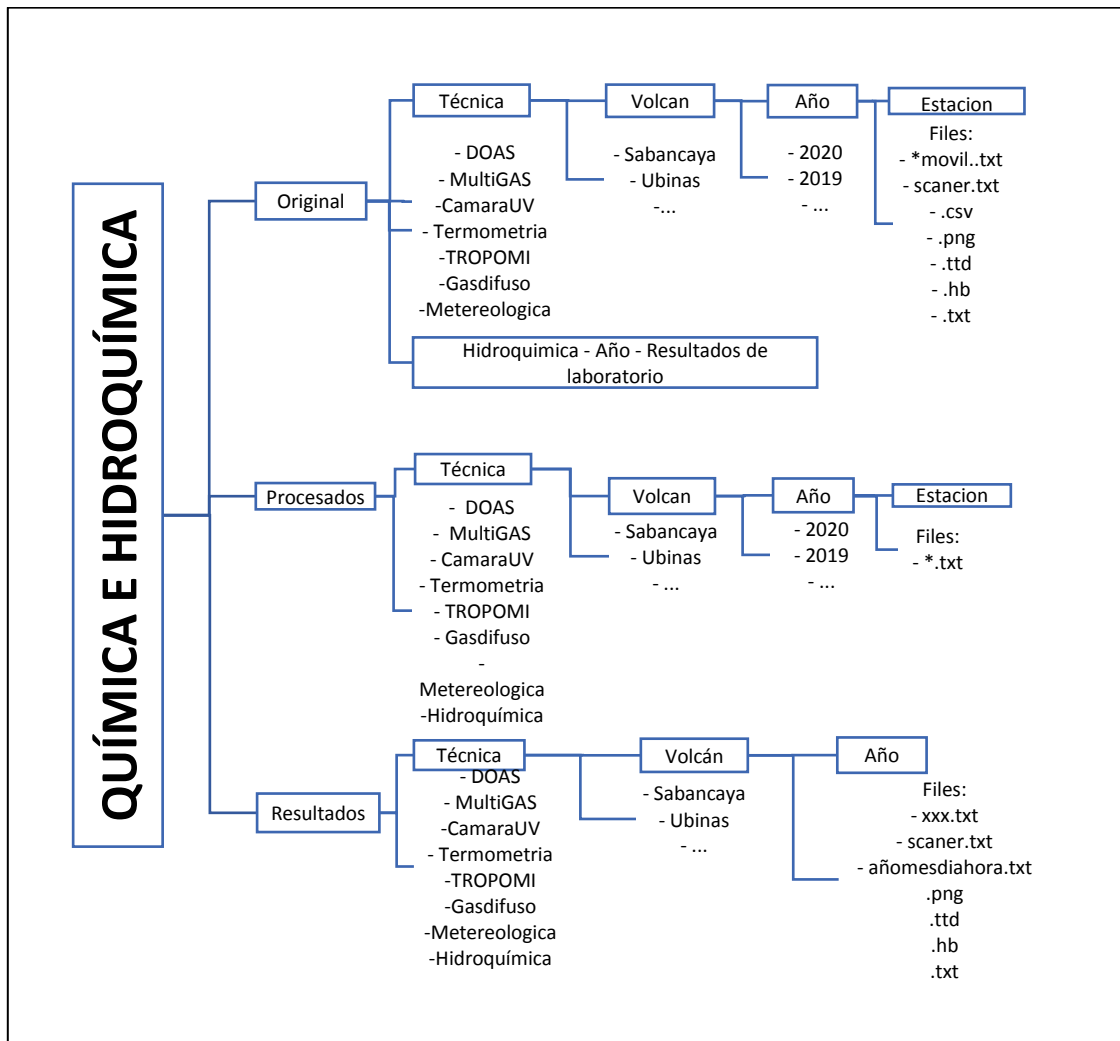


Figura 3.8. Diagrama de la base de datos del área de Química de gases volcánicos.



### 3.4 Monitoreo visual y sensores remotos

En la Fig. 3.9, se muestra la distribución de la base de datos del área de monitoreo visual y sensores remotos, clasificados como: datos originales, procesados y resultados obtenidos del análisis de las fotografías e imágenes satelitales.

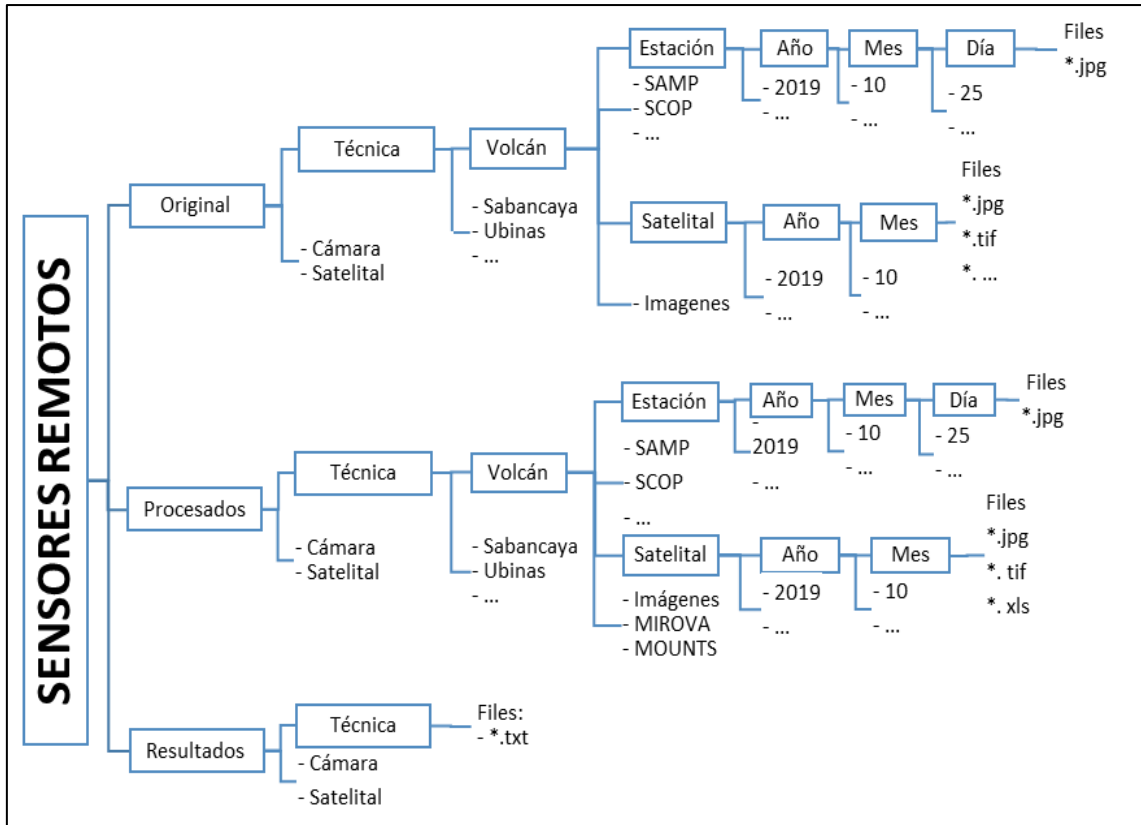


Figura 3.9. Estructura de la base de datos de Monitoreo visual y sensores remotos.

Algunas abreviaciones a tomar en consideración:

- MIROVA:** Observación Infrarroja Media de la Actividad Volcánica, es un sistema de detección de puntos calientes casi en tiempo real basado en el análisis MODIS.
- MOUNTS:** Proyecto de sistema de monitoreo volcánico mundial usando imágenes satelitales, basándose en imágenes InSar, SWIR y TROPOMI.
- MODVOLC:** Sistema de monitoreo en busca de la firma de emisión térmica de erupciones volcánicas, incendios forestales y fuentes de calor antropogénica.

#### 3.4.1 Monitoreo visual

Para cuantificar las observaciones propias de cada volcán, se realiza el seguimiento de varios parámetros como: la altura de las emisiones, el color de las emisiones, dirección de los vientos, entre. Las variaciones importantes de estos parámetros indicarían cambios en la actividad volcánica o proceso eruptivo.

En la Fig. 3.10, se muestra un ejemplo del archivo de salida del monitoreo visual.

a	b	c	d	e	f	g
04/03/2020-05:55:37.00	1000	4	4	NO	SCOP	EC
04/03/2020-07:10:52.00	300	4	4	NO	SAMP	EC
04/03/2020-07:23:53.00	500	4	4	NO	SAMP	EC
04/03/2020-08:02:27.00	500	4	4	NO	SAMP	EC
04/03/2020-08:09:27.00	400	3	3	NO	SAMP	EC
04/03/2020-08:17:59.00	300	2	2	NO	SAMP	EC
04/03/2020-08:35:00.00	400	4	4	NO	SAMP	EC
04/03/2020-08:49:07.00	300	3	3	NO	SAMP	EC

**Figura 3.10.** Archivo de texto donde se muestra la cuantificación de los parámetros de monitoreo visual.

Donde:

- a. Fecha=Día/mes/año
- b. Hora local=Hora: minuto: segundo
- c. Altura de las emisiones en metros sobre el cráter
- d. Color de las emisiones
- e. Dirección de las emisiones
- f. Estación
- g. Tiempo de emisión

La base de datos obtenida a partir de las cámaras de monitoreo es transmitida en tiempo real hacia el OVI y es almacenada en la carpeta “Original”, ubicada en la siguiente ruta:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Original\Cámara\Nombredelvolcán\Estación\ año\mes  
 \día**

Por ejemplo:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Original\Cámara\Sabancaya\SAMP\2019\01\18**

Dentro de la carpeta “Día” se almacenarán las imágenes fotográficas con extensión .jpg y tendrán la siguiente nomenclatura:

**Serie.CámaraAA-mmdd-hhmmss.jpg** (Por ejemplo: **FSB19-0118-000036.jpg**)

Dónde: **AA**=año, **mm**=mes, **dd**=día, **hh**=hora, **mm**=minuto, **ss**=segundo.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las imágenes fotográficas se presentan por año en un archivo de texto con extensión .vis y es almacenado en la carpeta de “Resultados”, en la dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Resultados\Cámara**

En la carpeta “Cámara” se almacenará el archivo de texto.vis, que contiene los resultados numéricos de la evaluación de la fenomenología del volcán:

**AAAA\_Cod.Volcán.vis** (Por ejemplo: **2019\_SAB.vis**)

Dónde: **AAAA**=año, **Cod. Volcán**=Código del volcán

### 3.4.2 Sensores remotos

Los satélites, que proporcionan las imágenes para realizar el seguimiento de la actividad en superficie del volcán, se han codificado con tres caracteres. A continuación, se muestra la lista de satélites de imágenes satelitales con su respectivo código (Tabla 4.3):

**Tabla 4.3. Codificación de satélites.**

<b>SATÉLITE</b>	<b>CÓDIGO</b>
RapidEye Ortho Tile	ROT
3-band PlanetScope Scene	3PS
4-band PlanetScope Scene	4PS
RapidEye Basic Scene	RBS
Landsat 8 Scene	LS8
Sentinel-2 Tile	ST2
SkySat Scene	SKS
SkySat Collect	SKC

Las imágenes crudas que se descargan, son almacenadas dentro de la carpeta “Original”, en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Original\Satelital\Nombre del  
volcán\Imágenes\ año \mes**

Dentro de la carpeta “Mes”, la nomenclatura de las carpetas contenedoras de las imágenes crudas tienen la siguiente nomenclatura:

**Código de satélite –AAAAMMDD (Por ejemplo: LS8-20200303)**

Dónde: **AAAA**=año, **MM**=mes, **DD**=día

Dentro de las carpetas contenedoras se encontrarán archivos de imágenes con formato .JPEG, .TIF, etc. Además de archivos complementarios.

Las imágenes se procesarán de acuerdo a las posibilidades y requerimientos de los días que se obtienen las imágenes satelitales. Estarán almacenados en la carpeta Procesados, en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Procesados\Satelital\Nombredelvolcán\Imágenes\ año  
\mes**

Luego, la imagen procesada tendrá la siguiente nomenclatura:

**AAAAMMDD\_HHMMSS\_Código de volcán\_Código de satelie\_Azimut\_Datum\_Bandas.tif**

Por ejemplo: **20200303\_140304\_SAB\_LS8\_50\_WGS84\_421.tif**

A la par de las imágenes satelitales, se encuentran otras webs de información de imágenes satelitales, las cuales, son procesadas y están plasmadas en sus respectivas plataformas, por ejemplo: MIROVA, MOUNTS, MODVOLC. Las imágenes recopiladas de estas plataformas estarán en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Procesados\Satelital\Nombredelvolcán\NombrePlataf  
orma\ año \mes**

Por

ejemplo:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Procesados\Satelital\Sabancaya\MIROVA\2020\04**

Dentro de la carpeta “Mes”, estará almacenada la imagen obtenida de las plataformas con la siguiente nomenclatura:

**AAAAMMDD\_HHMMSS\_Código de volcán\_Código Plataforma.jpg**

Por ejemplo: **20200316\_102305\_SAB\_MIR.jpg**

En la carpeta “Resultados”, se encontrarán los datos numéricos obtenidos de las carpetas de procesados. A partir de las imágenes se pueden detallar algunos parámetros como el alcance de las emisiones, evolución del domo y mediciones de áreas. Los resultados estarán ubicados en la siguiente dirección:

**\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Resultados\Satelital**

Dentro de la carpeta “Satelital”, estará almacenado el archivo de texto donde se muestra los resultados numéricos con la siguiente nomenclatura:

**Año\_código de volcán\_IS.txt** (Por ejemplo: **2020\_SAB\_IS.txt**)

El archivo .txt tendrán resultados numéricos medidos de acuerdo a lo requerido.

En las plataformas de imágenes satelitales procesadas se detallarán los datos numéricos obtenidos de sus respectivas páginas web.

**Año\_Código de volcán\_Código Plataforma.vis** (Por ejemplo: **2020\_SAB\_MIR.txt**)

A continuación, se muestran los archivos de texto obtenidos a partir de plataformas de imágenes satelitales procesadas (Fig. 3.11).

Fecha(Juliano)	Radiancia	Energia
43493,13889	0,489	6,395
43523,14931	0,838	13,075
43532,14583	0,62	8,794
43550,26389	1,441	24,435
43561,25	2,547	42,524

**Figura 3.11.** Formato de salida de los datos obtenidos de la plataforma de imágenes satelitales MODVOLC.

Dónde:

- a. **Radiancia:** Estimación de la potencia radiante de esos puntos calientes (en W).
- b. **Energía:** La radiación espectral sumada de 3.959 micrones de esos puntos calientes.

Formato de salida donde se muestran los parámetros obtenidos de la plataforma de imágenes satelitales MOUNTS (Fig. 3.12):

Fecha	Hora	Pixeles_Hot_Spo	Fecha	Hora	Coherencia	Fecha	Hora	SO2 [tons]
10/01/2019	14:57	34	15/01/2019	10:15	152380	25/01/2019	18:29	1113,5
15/01/2019	14:57	1	20/01/2019	10:22	181203	26/01/2019	18:14	123,8
20/01/2019	14:57	1	21/01/2019	23:15	137600	27/01/2019	17:54	157,7
25/01/2019	14:57	2	27/01/2019	10:15	147604	28/01/2019	17:34	0,1
30/01/2019	14:57	1	01/02/2019	10:22	361049	28/01/2019	19:14	1169,7
04/02/2019	14:57	22	02/02/2019	23:15	199262	29/01/2019	18:54	618

Figura 3.12. Parámetros obtenidos de la plataforma de imágenes satelitales MOUNTS.

Dónde:

- a. **Fecha:** Día/mes/año/hora.
- b. **Pixeles\_Hot\_Spot:** Número de pixeles caliente x106 de la imagen sin zoom.
- c. **Fecha:** Día/mes/año/hora.
- d. **Coherencia:** Número de pixeles no correlacionados (coherencia <0.5).
- e. **Fecha:** Día/mes/año/hora.
- f. **SO2:** Masa de gas en la atmosfera dada en toneladas (área de 500x500km).

Formato de salida donde se muestran los datos de la plataforma de imágenes satelitales MIROVA (Figura 3.13).

Día	Hora	VRP (MW)	ZEN	AZI
25-03-2020	02:45	7	61	84
25-03-2020	05:50	2	42	99
25-03-2020	15:15	0	21	81
26-03-2020	18:05	0	50	83

Figura 3.13. Formato de salida donde se muestran los datos de la plataforma de imágenes satelitales MIROVA.

Dónde:

- a. **Día:** Día/mes/año.
- b. **Hora:** Hora de toma del dato.
- c. **VRP:** Intensidad de la anomalía térmica (en MW).
- d. **ZEN:** Ángulos del zenit del satélite.
- e. **AZI:** Ángulos del azimut del satélite.

## 4 ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

### 4.1 Adquisición de datos y resultados del Volcán Misti

#### 4.1.1 Deformación Superficial en el Volcán Misti

##### 4.1.1.1 *Procesamiento GNSS*

Los receptores GNSS son un conjunto de sistemas de navegación global, entre ellos está el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Son los datos de este sistema los que se han procesado para la vigilancia geodésica del Volcán Ubinas.

El procesamiento de los datos GPS se realizó en el software GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010), utilizando una metodología similar a la descrita en Boixart et al., (2020). Ante la ausencia de un marco de referencia local que elimine la influencia tectónica causada por la subducción de placas en la zona de estudio, se ha utilizado el principio de relatividad Galileana, descrita por Galileo Galilei en 1638, ajustando las posiciones y velocidades a la estación IGS instalada en Arequipa (AREQ).

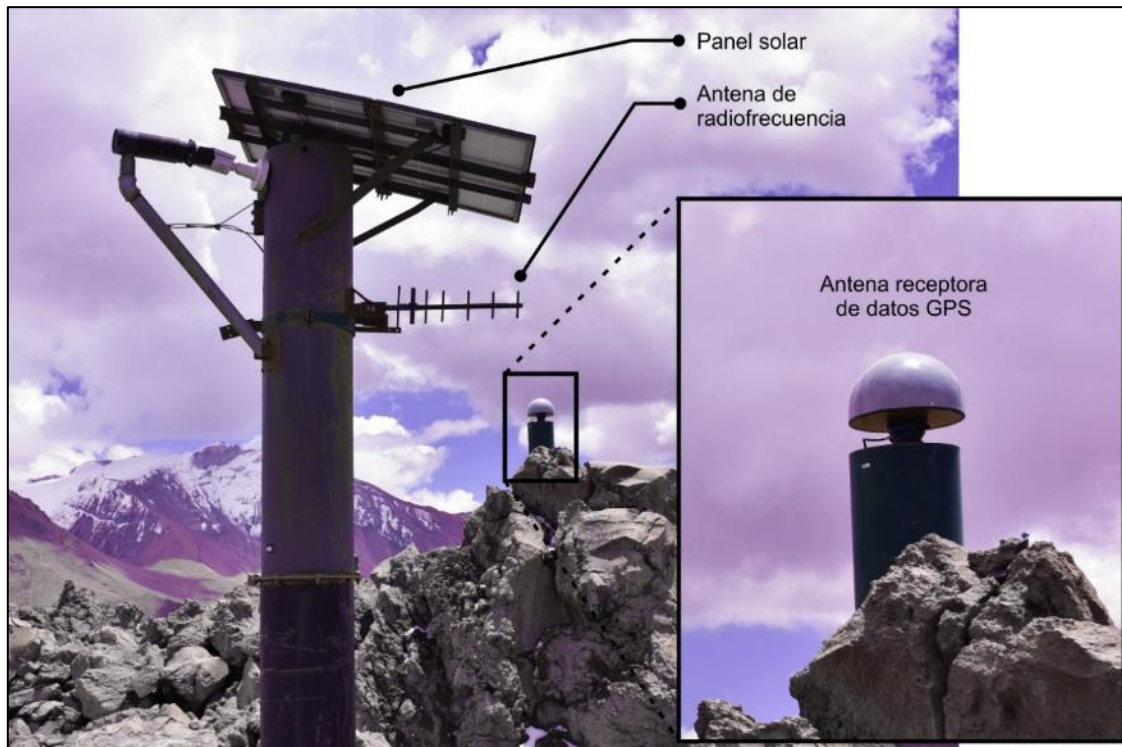
Para el análisis de deformación volcánica usando datos GPS, se estimó las posiciones horizontales y verticales de la estación.

##### 4.1.1.2 *Procesamiento InSAR*

Los datos de Interferometría SAR provistos en el presente informe, corresponden a interferogramas calculados por COMET LiCS a través de su cadena de procesamiento automático LIC SAR. El cálculo de estos interferogramas fue realizado de hasta tres imágenes subsecuentes en el tiempo con una resolución espacial de aproximadamente 100 m. Los resultados son publicados en el portal web de COMET-LICS Sentinel-1 InSAR y pueden ser descargados gratuitamente.

Durante el año 2020, debido a la contingencia sanitaria mundial por el Covid-19, los datos obtenidos corresponden a las estaciones de operación permanente.

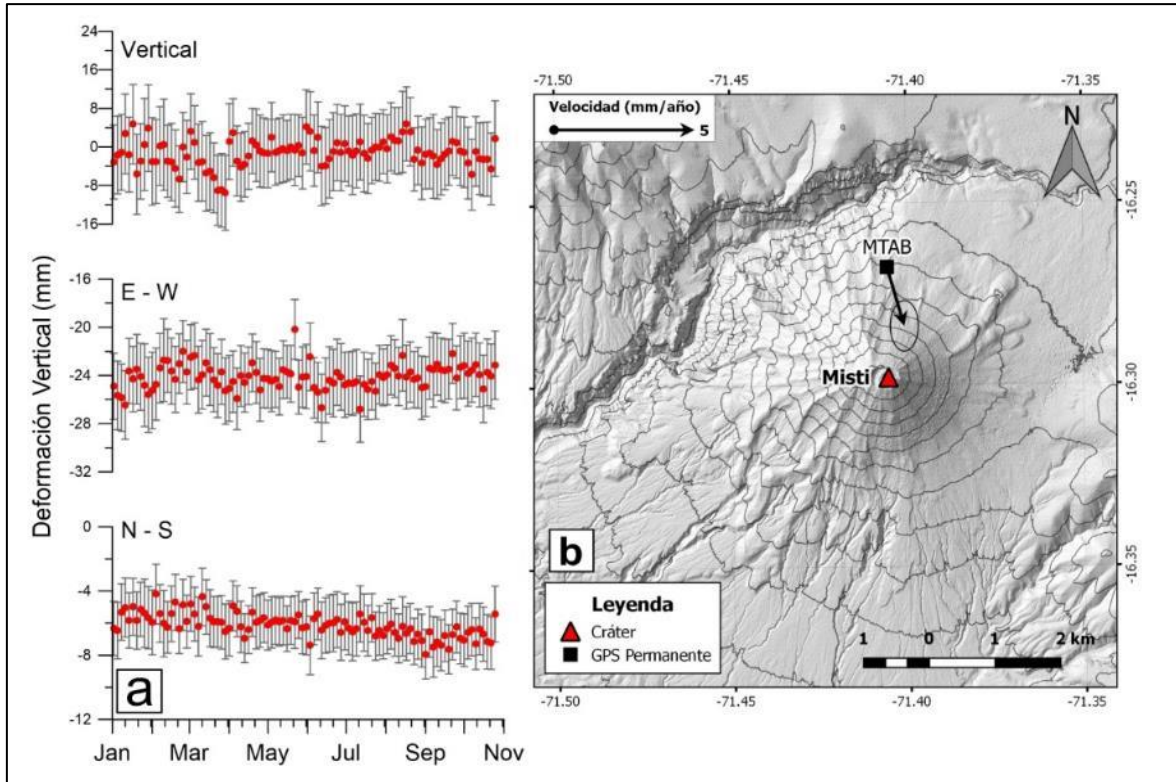
Esta estación GNSS de operación permanente ha sido instalada con el apoyo inicial del Programa de Atención ante Desastres Volcánicos (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La estación está compuesta por una antena y receptor geodésico enlazado a una red local de telecomunicaciones que permite el envío de la información al Observatorio Vulcanológico mediante antenas de radiofrecuencia y energía solar (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Antena receptora de una estación geodésica. En la imagen se ilustra la ubicación de los paneles solares encargados de la fuente de alimentación energética y la antena de radiofrecuencia encargada de la emisión de información hacia el Observatorio.

La estación geodésica ubicada al norte del Volcán Misti no evidencia deformación superficial. Las magnitudes de la velocidad registradas son de 2 mm/año en la componente horizontal y 1 mm/año en la componente vertical (Fig. 4.2). Los errores estimados son de 1 mm/año en la componente horizontal y 2 mm/año en la componente vertical. Estas magnitudes no representan un proceso de deformación superficial precursor de una erupción en el Volcán Misti.

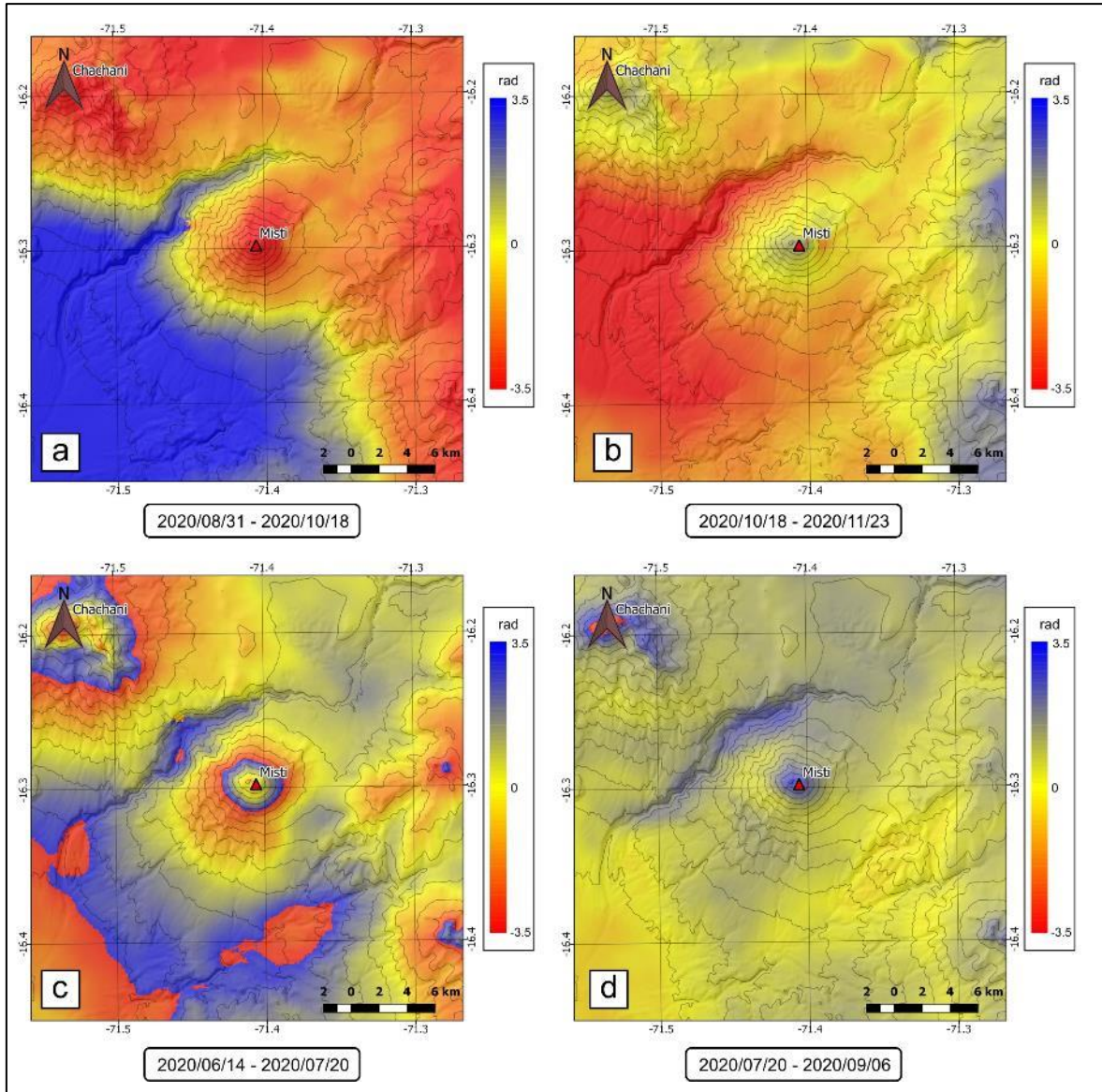




**Figura 4.2** (a) Series temporales de la estación geodésica MTAB. (b) Mapa general del vector de velocidad de deformación horizontal de la estación geodésica instalada en el volcán Misti.

Los interferogramas obtenidos a través de LicSAR tampoco evidencian deformación alrededor del edificio volcánico. Las órbitas ascendentes no muestran variación en la zona de estudio y las órbitas descendentes presentan franjas asociadas al cambio de topografía (Fig. 4.3).

Durante el año 2020, los datos obtenidos corresponden a los datos proporcionados por la plataforma COMET LiCS (<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>).

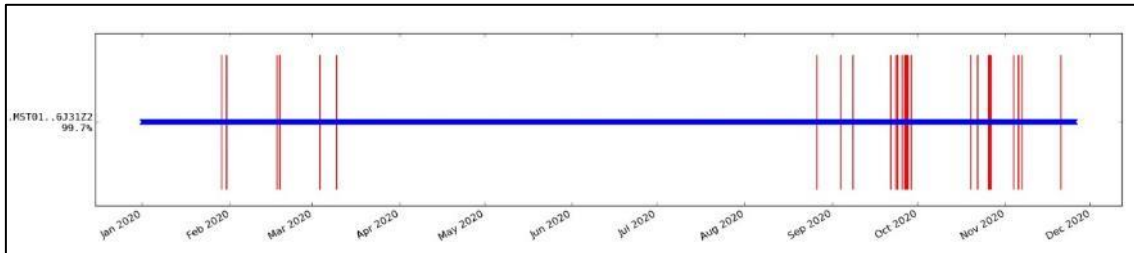


**Figura 4.3.** Interferogramas del Volcán Misti en órbita ascendente (a y b) y órbita descendente (c y d).

## 4.1.2 Sismicidad del volcán Misti

### 4.1.2.1 Operatividad

El porcentaje de operatividad de la red de monitoreo sísmico del volcán Misti durante el año 2020 fue del 99.7%. En la Fig. 4.4, se aprecia que las barras horizontales de color azul representan los periodos de funcionamiento; las barras verticales de color rojo representan periodos en que hubo pérdida de datos debido a problemas técnicos.



**Figura 4.4.** Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la red de monitoreo sísmico del volcán Misti – 2020.

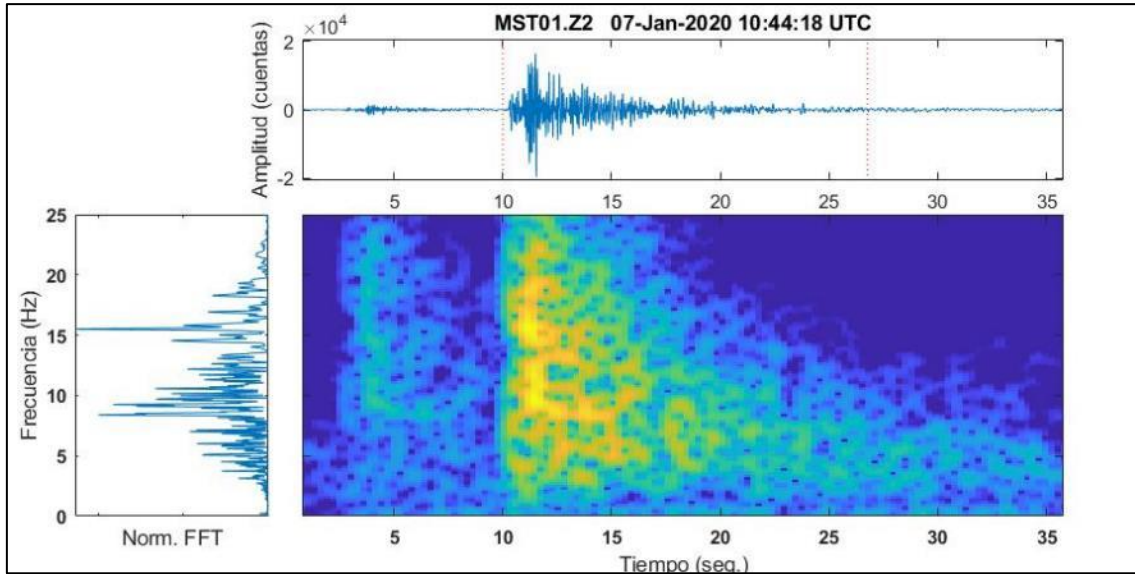
### 4.1.2.2 Procesamiento

Para el monitoreo sísmico, básicamente, se hace un procesamiento primario, que consiste en extraer la información más importante que permita detectar cambios en la actividad sísmica. Al realizar la clasificación de las señales sísmicas (programa: Classification\_OVI, modificado por personal del OVI del programa Classification), por defecto el programa extrae los siguientes parámetros:

- Hora de ocurrencia del evento sísmico.
- Amplitud máxima (cuentas).
- Frecuencia máxima (Hz).
- Duración (s).
- Energía sísmica (MJ).
- Desplazamiento reducido – DR (cm<sup>2</sup>).

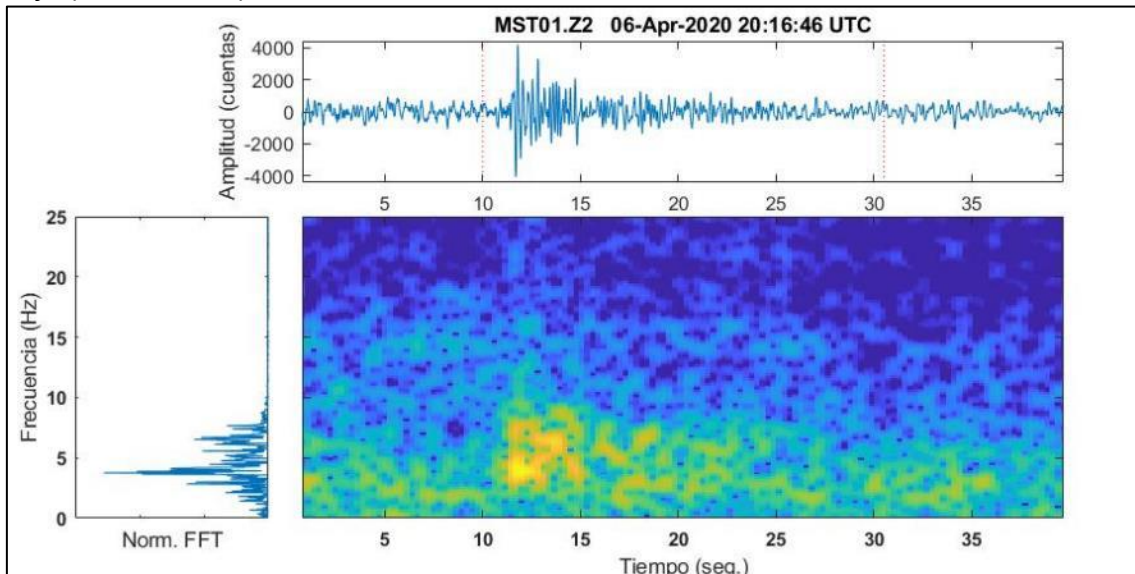
### 4.1.2.3 Caracterización de las señales sísmicas

- **Sismo volcano-tectónico (VT).** Son eventos provocados por las fracturas de rocas, asociados al ascenso de magma desde el interior de la tierra hacia el volcán, posiblemente debido a la presión por introducción de magma, interacción de fluidos magmáticos con el medio encajante, desgasificación de gases y cambios bruscos de temperatura (contracción y/o dilatación). Los eventos VT (Fig. 4.5), se caracterizan por tener claras llegadas de las ondas P y S y por el contenido de altas frecuencias (> 5Hz).



**Figura 4.5.** Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 07 de enero de 2020, componente Vertical.

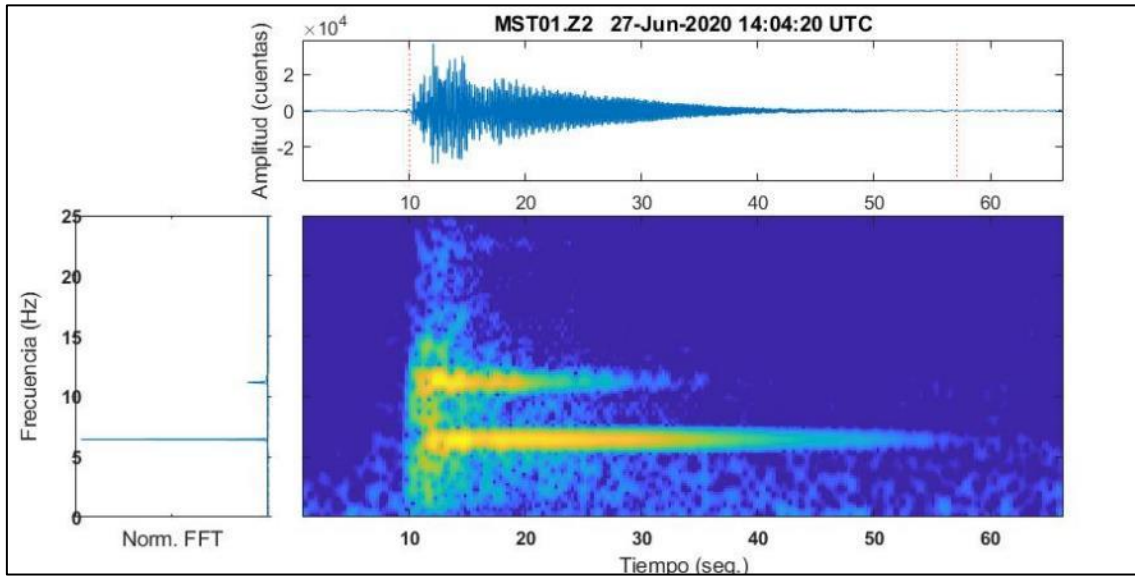
- **Sismos de periodo largo (LP).** Son eventos asociados a procesos de la dinámica de fluidos en el sistema hidrotermal del volcán. Los eventos LP (Fig. 4.6), se caracterizan porque no presentan llegadas legibles de la fase S y el contenido espectral principal es bajo (entre 1-4 Hz).



**Figura 4.6.** Evento Largo Periodo (LP), registrado el 06 de abril de 2020, componente Vertical.

- **Sismos tipo tornillo (TOR).** Se caracterizan por su forma armónica, la cual ha sido interpretada como la oscilación de un resonador excitado por la interacción de mezclas de líquidos y gases en forma de burbujas a grandes presiones. La manera en que decae la amplitud del sismograma a lo largo del tiempo es lenta, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es lenta también. Su espectro muestra uno

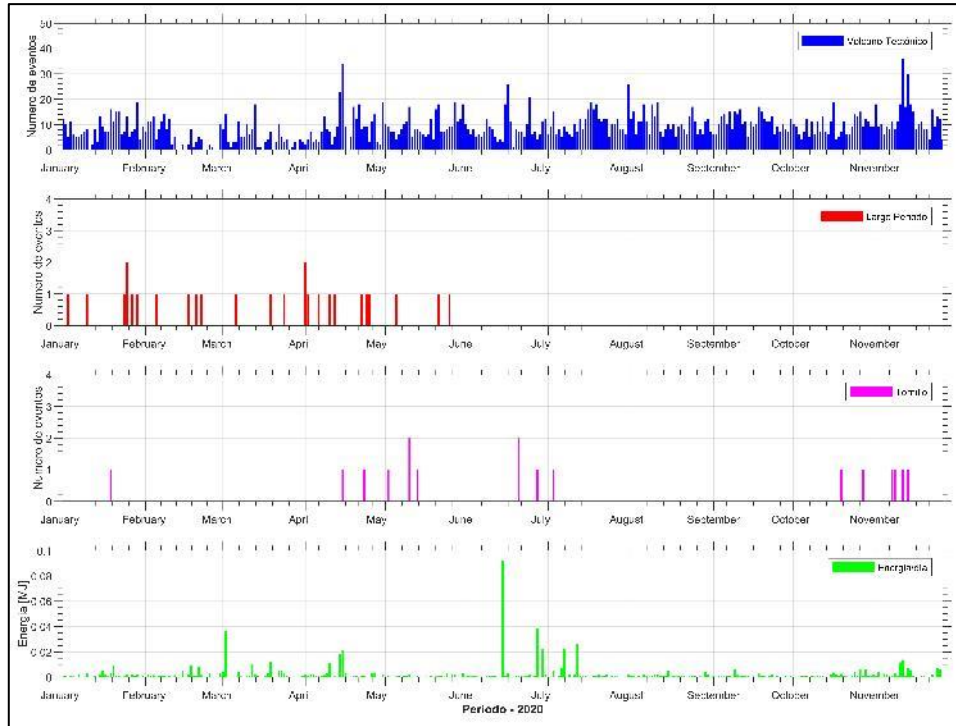
o pocos picos en las frecuencias de los armónicos que aportan la energía del sismo (Fig. 4.7).



**Figura 4.7.** Evento Tornillo (TOR), registrado el 27 de junio de 2020, componente Vertical.

#### 4.1.2.4 Estadística general y por tipo de evento

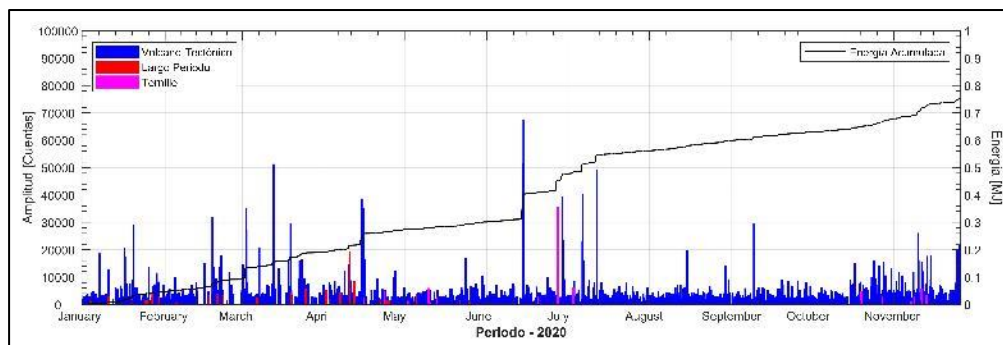
La actividad sísmica del volcán Misti estuvo dominada principalmente por sismos tipo VT, con una tasa de ocurrencia promedio casi constante, de 09 eventos por día, llegando a registrarse un máximo de 36 eventos el 11 de noviembre de 2020 (Fig. 4.7). Seguidamente, a una tasa esporádica, se registró sismos de tipo LP. Durante el 2020 se registraron eventos tipo Tornillo en menor proporción. Finalmente, se observa el registro de eventos de muy baja energía diaria, registrándose un máximo de 0.092 MJ el 14 de junio de 2020 (Fig. 4.8).



**Figura 4.8.** Evolución temporal de la actividad sísmica de volcán Misti por tipo de evento identificado para el periodo – 2020.

#### 4.1.2.5 Energía sísmica liberada

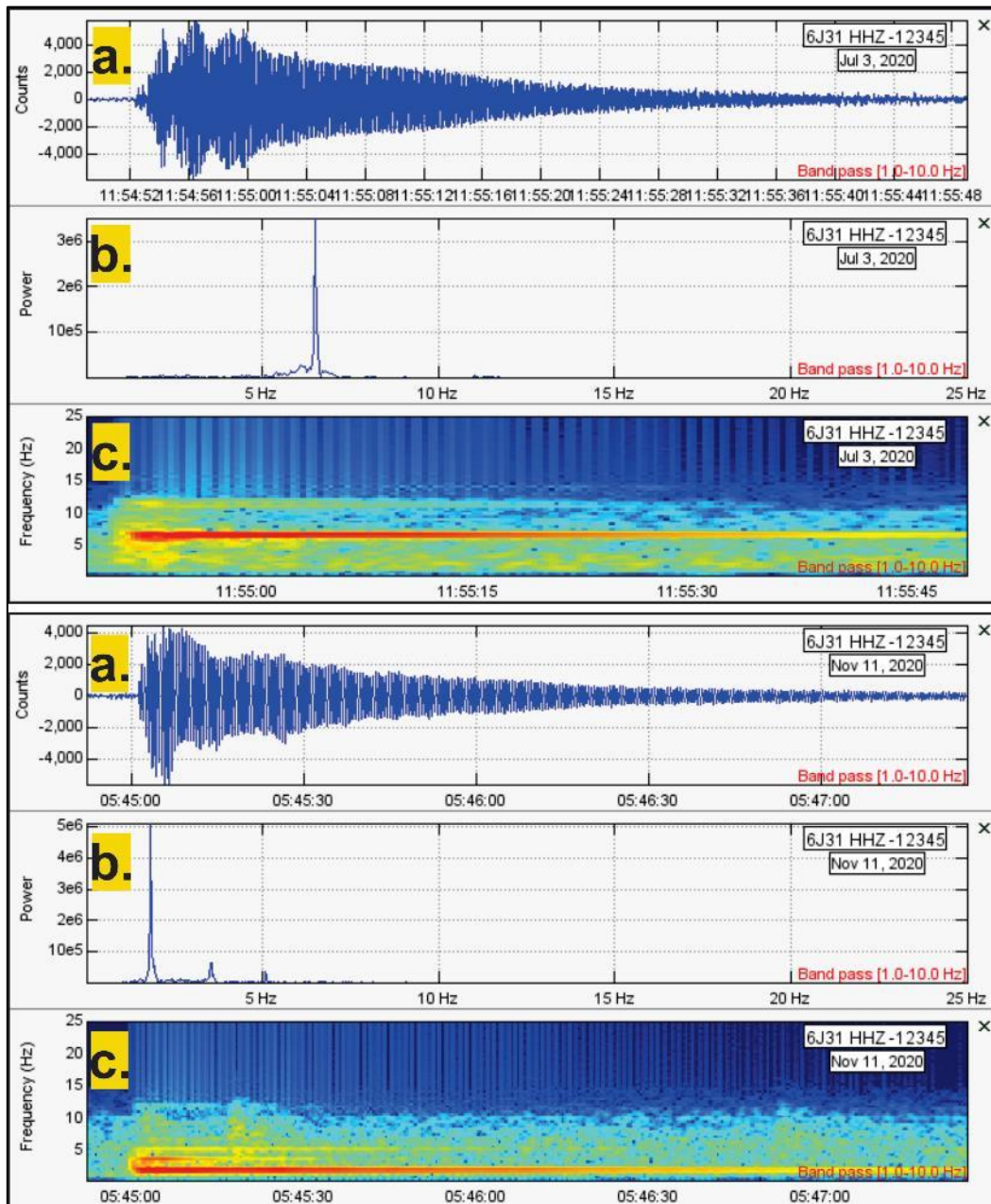
La leve actividad sísmica del volcán Misti registrada durante el 2020, también puede ser cuantificada en función de la energía sísmica liberada por los eventos volcánicos (sismos tipo VT, LP, TOR). Así, estos eventos han liberado una energía total de 0.75 MJ de energía (Fig. 4.9). Siendo esta energía, mínima, en comparación con el volcán Sabancaya (en alerta naranja).



**Figura 4.9.** Energía sísmica liberada del volcán Misti para el 2020. VT: sismo Volcano-tectónico, asociado al fracturamiento de rocas y LP: sismo de largo periodo.

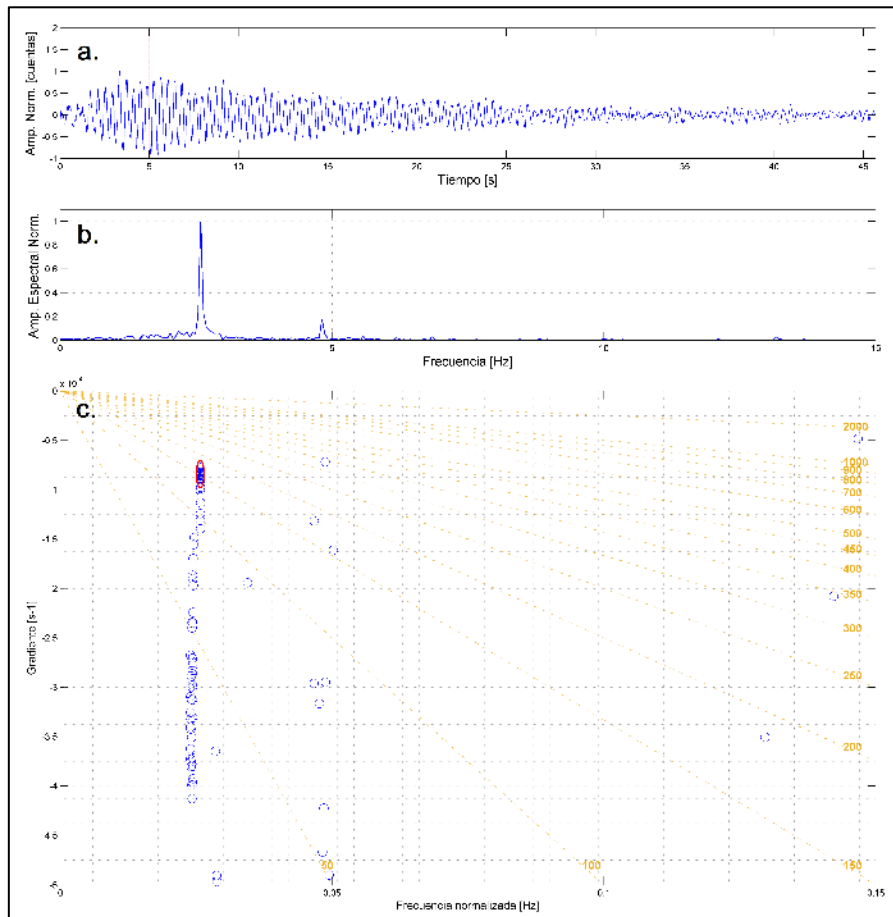
4.1.2.6 *Estimación del Factor de calidad (Q) para sismos “Tornillos”*

A lo largo del 2020 se registró un total de 15 sismos “Tornillo” en el volcán Misti (Fig. 4.10), con los cuales, se realizó un análisis espectral AR para la obtención del factor de calidad (Q) a fin de conocer su origen y significado de su ocurrencia. Para su análisis, se aplicó el algoritmo SOMPI a través del script Qsompv2 (desarrollado por personal del SGC y modificado por el OVI).



**Figura 4.10.** Sismos “Tornillo” registrados en el volcán Misti el 03 de julio a las 11:54 UTC (imagen superior) y el 28 de noviembre a las 05:45 UTC (imagen inferior).  
 (a) Formas de onda; (b) contenido espectral y (c) espectrograma.

En la Figura 4.11, se muestra el análisis de la señal sísmica “Tornillo”, **(a)** Forma de onda del evento, las líneas rojas indican el tramo de señal seleccionada para el análisis; **(b)** Contenido frecuencial donde se puede observar que presenta una frecuencia dominante en 2.3 Hz y otra sub – dominante en 4.8 Hz y **(c)** Diagrama de iso-Q donde se identifica la mayor acumulación de elementos de onda (círculo rojo).

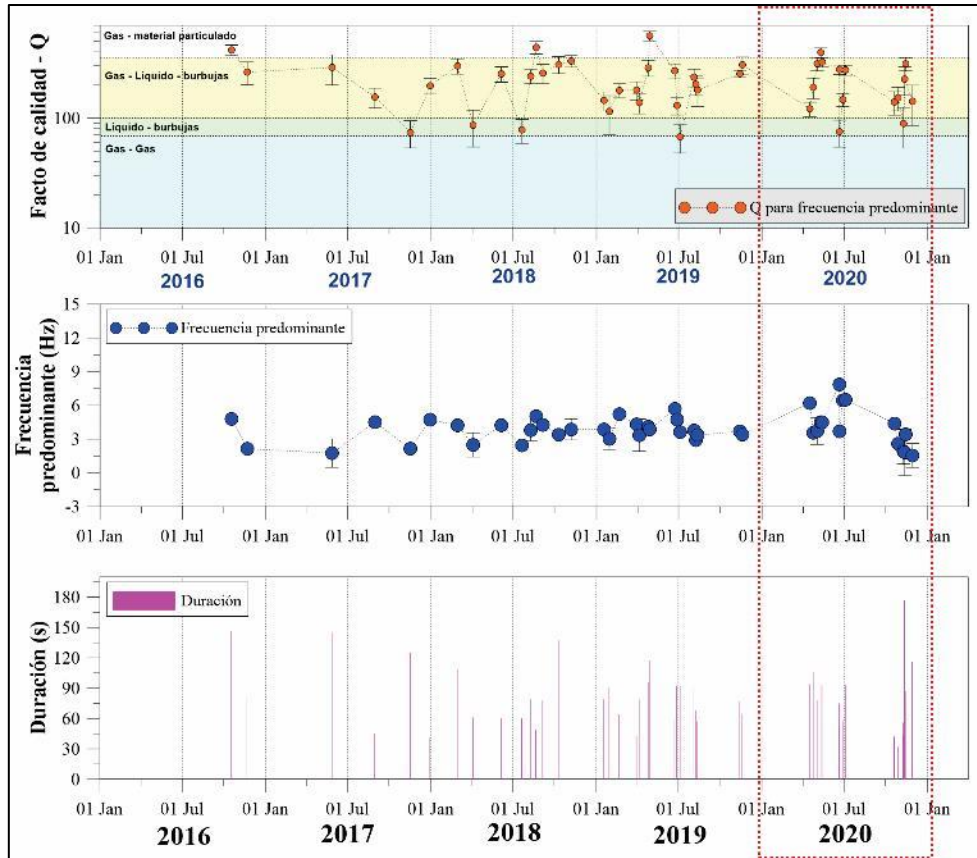


**Figura 4.11.** Análisis de la señal de tipo Tornillo registrada el día 27/10/2020 a las 16:41:46 hora UTC por la estación MST01 – componente vertical (Z).

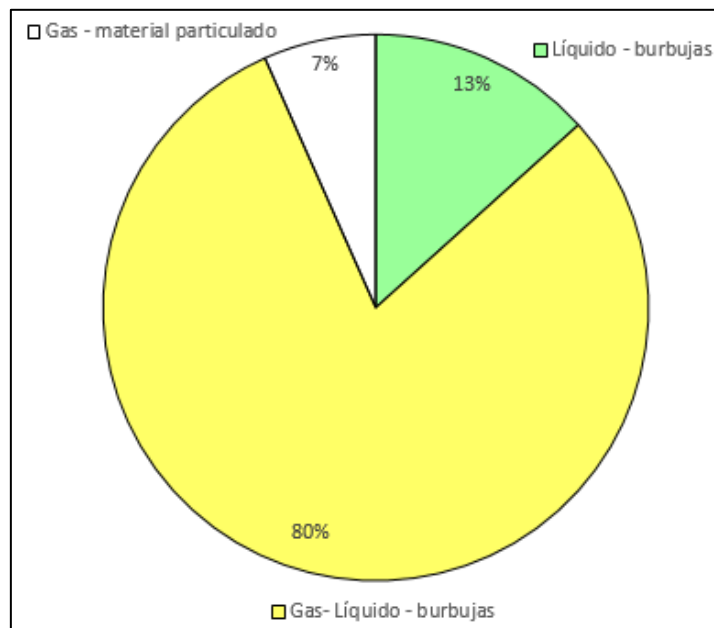
En la Figura 4.12, se muestra la variación temporal del factor de calidad del resonador ( $Q_r$ ), frecuencia ( $f$ ) y duración ( $s$ ) de los sismos “Tornillo” ocurridos desde el año 2016 hasta el 2020. El recuadro rojo punteado indica los sismos solo durante el año 2020, en el cual, los valores de  $Q_r$  oscilaron entre los 70 y 400 aproximadamente. Las frecuencias predominantes se mantuvieron en promedio en los 5 Hz, mientras que las duraciones fueron de hasta 152 segundos. En base a los resultados obtenidos a partir del método Sompi y de acuerdo a los diagramas de contornos propuestos por Kumagai & Chouet (2001), se muestra que la mayoría de los tornillos analizados, han sido generados por una mezcla de **Gases + Líquido + Burbujas**, y en mucha menor proporción por Líquido +



Burbujas y Gas – Material particulado (Fig. 4.13); lo cual, sugiere que este tipo de actividad estaría asociada principalmente al dinamismo o perturbación del sistema hidrotermal.



**Figura 4.12.** Evolución temporal de los parámetros estimados de los sismos de tipo “Tornillo” registrados desde el 2016 al 2020.



**Figura 4.13.** Porcentaje de posibles mezclas que estarían generando los sismos “Tornillo” en el volcán Misti, periodo: 2020.

### 4.1.3 Monitoreo visual y sensores remotos en el volcán Misti

#### 4.1.3.1 Características de las emisiones, forma y ocurrencia

Durante el año 2020, el volcán Misti ha presentado una actividad baja, comprendida por emisiones tenues de gases y vapor de agua, de coloración blanquecina, las cuales no superaron los 1,100 m sobre el nivel del cráter y cuya mayor duración fue de 250 minutos, como se muestra en la Tabla 4.1. La ocurrencia eventual de estos eventos evidencia que el volcán Misti continúa en un periodo de tranquilidad, asimismo, la coloración blanquecina, nos indica la presencia de agua en las emisiones, manifestada mediante abundante vapor de agua; del mismo modo, los aerosoles volcánicos, también formarían parte de estas emisiones. En la Fig. 4.14 se muestra la serie temporal de la altura de las emisiones del volcán Misti y su duración durante el año 2020.

Debido a la presencia de nubosidad entre los meses de enero y marzo, no se ha podido distinguir la ocurrencia de emisiones en el volcán Misti, salvo algunos días con mayor visibilidad donde se observaron emisiones de hasta 200 m de altura sobre el nivel del cráter y cuya máxima duración fue de 145 minutos. Estas emisiones se observaron muy esporádicamente(I).

Desde fines de marzo hasta junio, las emisiones mostraron un leve incremento en su altura, llegando a un máximo de 800 m sobre el nivel del cráter y una duración de hasta 250 minutos. Durante este periodo de tiempo, las emisiones estuvieron caracterizadas por presentar coloraciones blanquecinas y se desplazaron en dirección Sureste con mayor frecuencia (II).

En el mes de julio, mejoró considerablemente la visibilidad hacia la cima del volcán, evidenciándose la ausencia de emisiones volcánicas (III).

Desde el mes de agosto hasta fines de noviembre del 2020, las emisiones se presentaron eventualmente y en alturas de hasta 1,100 m, el 07 de noviembre y una duración máxima de 196 minutos, el 10 de septiembre, representada por emisiones de vapor de agua, color blanquecino. Las emisiones se desplazaron en varias direcciones al Este, Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste (IV).

*Tabla 4.1. Características de las emisiones del volcán Misti durante el año 2020.*

	I	II	III	IV
Periodo	Ene-Feb-Mar	Mar-Abr-May-Jun	Jul	Ago-Sept-Oct-Nov
<b>Altura máxima (m)</b>	200	800	0	1100
<b>Duración Máxima (min)</b>	145	250	0	196
<b>Coloración</b>	Blanquecina	Blanquecina	-	Blanquecina
<b>Visibilidad</b>	Baja	Media	Alta	Media

Tanto la altura de las emisiones como su duración se encuentran directamente proporcionales durante el año 2020 (Figura 4.14), asimismo, a partir del análisis realizado la actividad en el

volcán Misti no muestra variaciones importantes, por lo cual, se mantuvo en alerta verde durante el presente año.

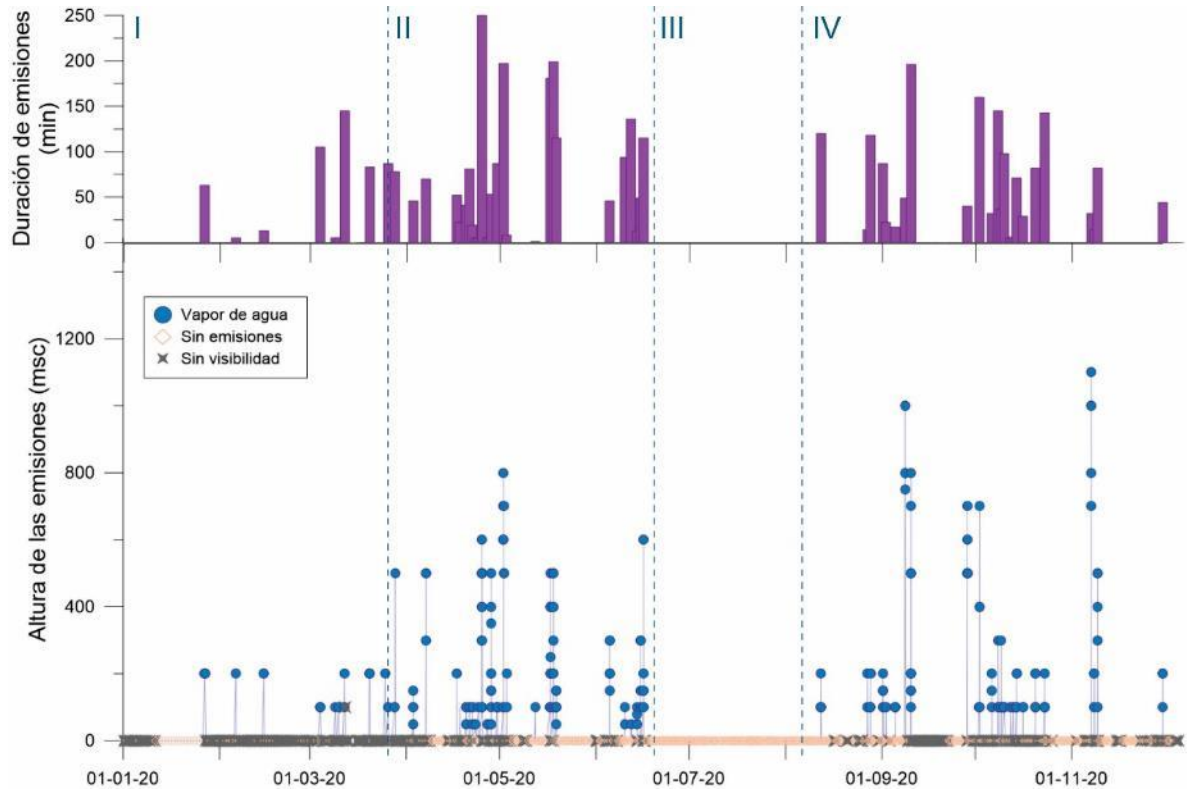


Figura 4.14. Histograma de la altura y duración de las emisiones volcánicas del volcán Misti, durante el periodo de enero a noviembre del 2020.

#### 4.1.3.2 Dirección predominante

La dispersión de las plumas volcánicas del Misti, se desplazaron preferentemente en dirección Sureste (37%), seguido por el Noreste (16%), Este (16%), Sur (14%), Noroeste (8%), Suroeste (6%) y Norte (2%), como se muestra en la siguiente Figura 4.15.

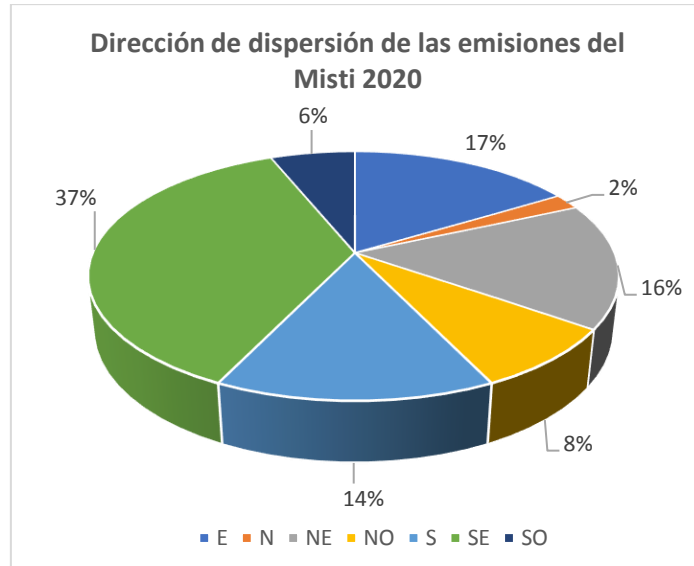


Figura 4.15. Dirección de dispersión de las emisiones volcánicas del volcán Misti durante el año 2020.

#### 4.1.3.3 Imágenes representativas

Registro de imágenes más representativas del volcán Misti durante el año 2020, desde la estación de monitoreo MOVI, ubicada al Suroeste del volcán en las Fig. 4.16 y 4.17.



Figura 4.16. Imagen del 28 de abril del 2020, a las 07:03 am, donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura de 150m por encima del nivel del cráter (izquierda) y en el lado derecho, imagen del 16 de junio del 2020, a las 06:20am donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura máxima de 100 m.



Figura 4.17. Imagen del 28 de agosto del 2020, a las 07:07 a.m., donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura de 150m por encima del nivel del cráter (izquierda) y en el lado derecho, imagen del 07 de noviembre del 2020 a las 06:40 a.m. donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura máxima de 1,100 m.

#### 4.1.3.4 Análisis mediante las imágenes satelitales

Mediante el análisis de las imágenes satelitales Sentinel 2, en su combinación de bandas 12, 8a, 4, no fue posible identificar ningún tipo de anomalía térmica, como se muestra en la Figura 4.18.

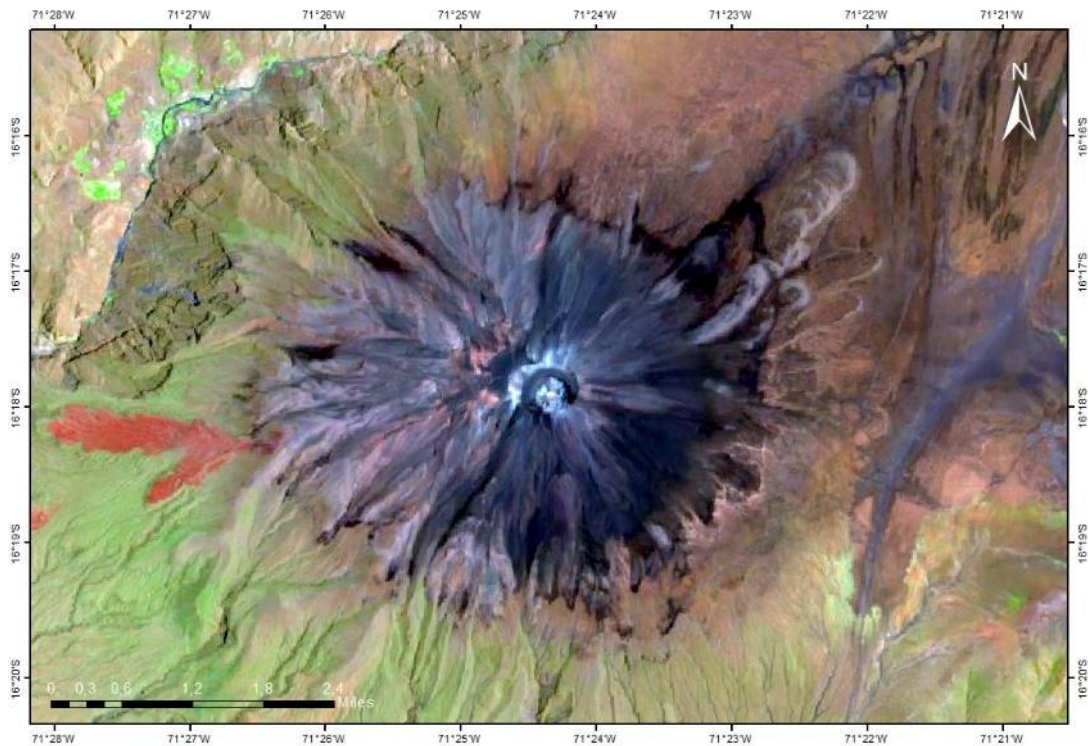
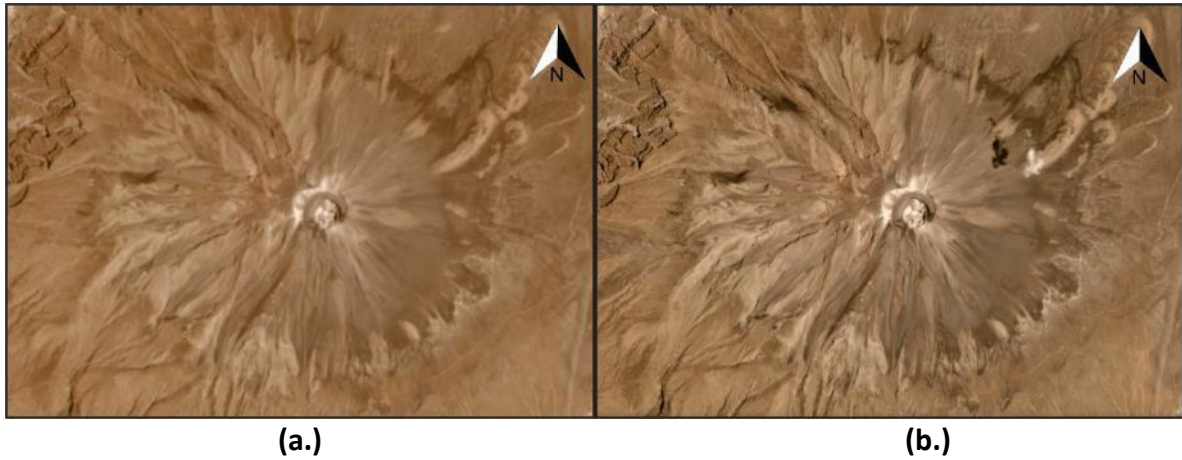


Figura 4.18. Volcán Misti, imagen Satelital Sentinel 2, L2A, del 15 de noviembre del 2020.

Asimismo, se hizo una comparación visual entre dos imágenes satelitales Planetscope de resolución 3.0 m, correspondiente a las fechas 10 de diciembre del 2019 y 23 de noviembre del 2020. Al comparar visualmente las imágenes, no se observó ningún cambio físico resaltante en

ambas imágenes, como se muestra en la Figura 4.19. Durante el 2020, no se observaron cambios morfológicos en la estructura volcánica.



**(a.)** **(b.)**  
 Figura 4.19. Interpretación visual de las características físicas del volcán Misti. Imagen Satelital Planetscope del 10 de diciembre del 2019 (a.) y 23 de noviembre del 2020 (b.)

#### 4.1.4 Monitoreo de temperatura de fumarolas

##### 4.1.4.1 Red Termométrica

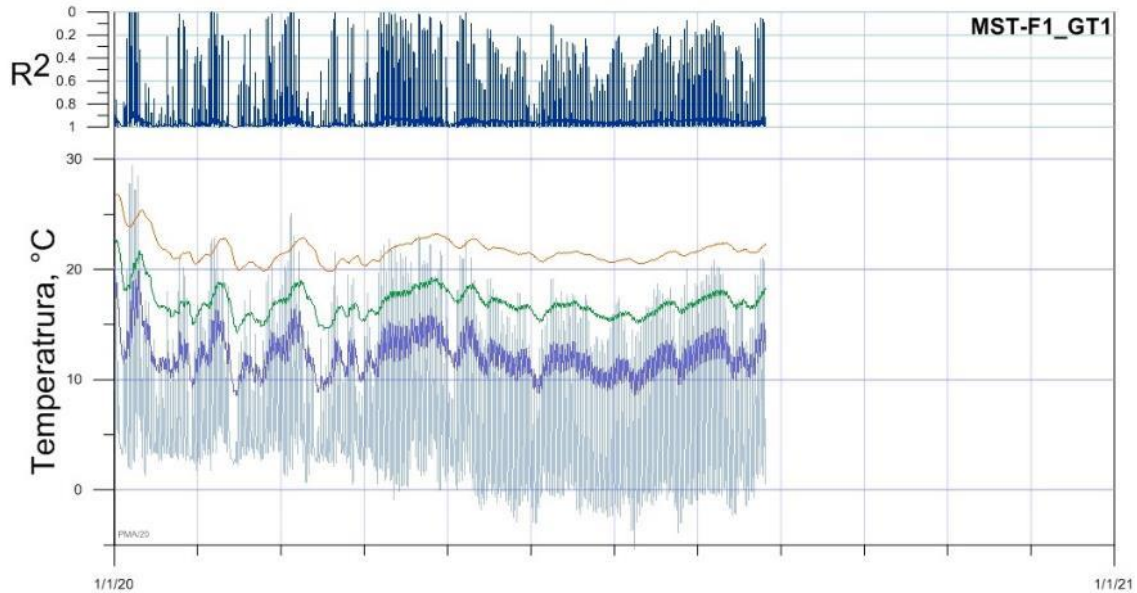
Durante el año 2020, la red de monitoreo de temperatura de las fumarolas del volcán Misti estuvo conformada por 2 estaciones (figura 4.20); la primera denominada MST-F1 instalada en el borde norte del cráter, con un arreglo para el registro de temperatura a 10, 30, 50 y 70 cm de profundidad, montado con equipos Tinytag TGP-4520, el que registró hasta el 26 agosto del 2020. La segunda estación MST-F2, se ubica en el interior del cráter en el borde del domo de lava, cerca de una de las fumarolas más grandes en la parte norte, el equipo con que contó fue un registrador Tinytag TG-4100, registró hasta el 09 de diciembre.



Figura 4.20. Imagen de la ubicación de las estaciones de medición continua de la temperatura en el cráter Misti MST-F1 y MST-F2 en el borde y domo de lava respectivamente.

#### 4.1.4.2 Resultados de Temperatura de las fumarolas

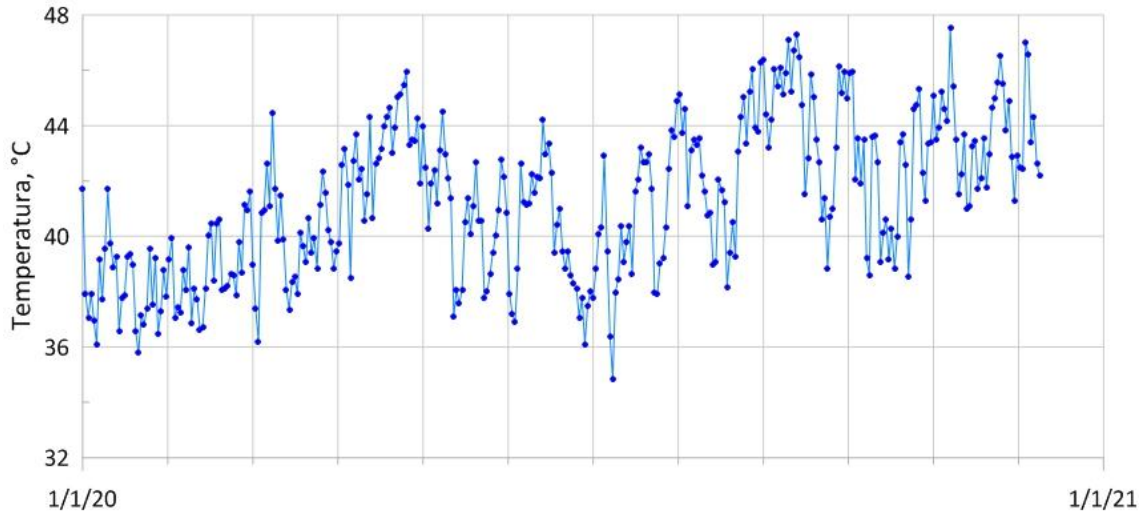
La temperatura de las fumarolas registradas en la estación MST-F1\_GT1 (Fig. 4.21), no muestra cambios relevantes en cuanto a la actividad volcánica; sin embargo, se nota claramente efectos como la estacionalidad, día-noche y mareas terrestres, lo que es más notable en los termómetros más superficiales.



**Figura 4.21.** Resultados de la medición continua de la temperatura en el cráter del volcán Misti MST-F1 con el arreglo de la gradiente térmica, durante el 2020.

El registro de la temperatura de las fumarolas MST-F2\_GT1, se realiza a través de un muestreo puntual a las 00:00 Hs de cada día, en las proximidades de la fumarola (Fig. 4.22), con el fin de encontrar variaciones de temperatura, mas no la temperatura absoluta.

Los resultados nos muestran un ligero incremento en la temperatura durante los meses de verano relacionados también al periodo de lluvias, el rango de las lecturas estuvieron entre 35 °C el 9 de septiembre a 48 ° C el 7 de noviembre. No se observaron cambios significativos asociados a la actividad volcánica.

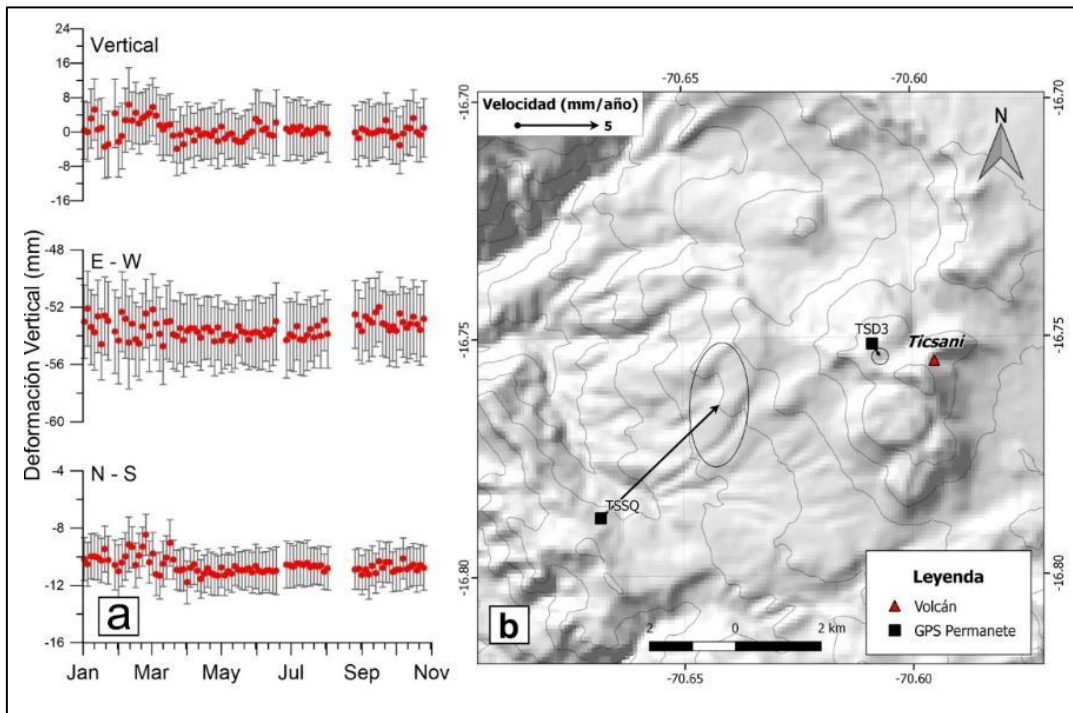


**Figura 4.22.** Resultados de la medición continua de la temperatura en el domo de lava del cráter Misti MST-F2, con los registros diarios a las 00:00 Horas, durante el 2020.

## 4.2 Adquisición de datos y resultados del Volcán Ticsani

### 4.2.1 Deformación Superficial en el Volcán Ticsani

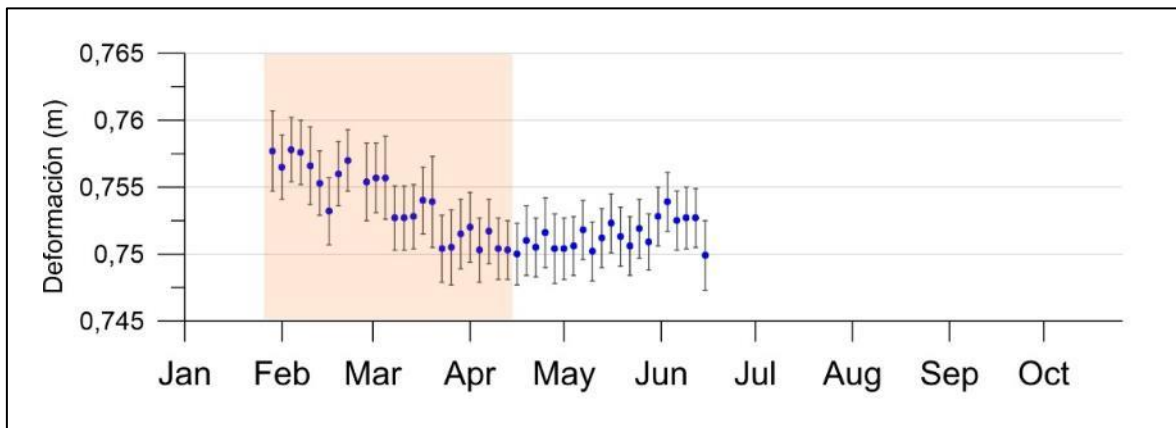
Durante el año 2020, la deformación superficial registrada por el receptor geodésico ubicado en el Domo 3 del volcán Ticsani ha evidenciado magnitudes de 1 mm/año en la componente horizontal y -2 mm/año en la componente vertical (Fig. 4.23). Los errores estimados son entre 1 y 2 mm/año en ambas componentes (horizontal y vertical). Estos valores indican que no registra deformación superficial en esta zona.



**Figura 4.23.** (a) Series temporales de la estación geodésica TSD3. (b) Mapa general de los vectores de velocidad de deformación horizontal de las estaciones geodésicas instaladas alrededor del Volcán Ticsani.

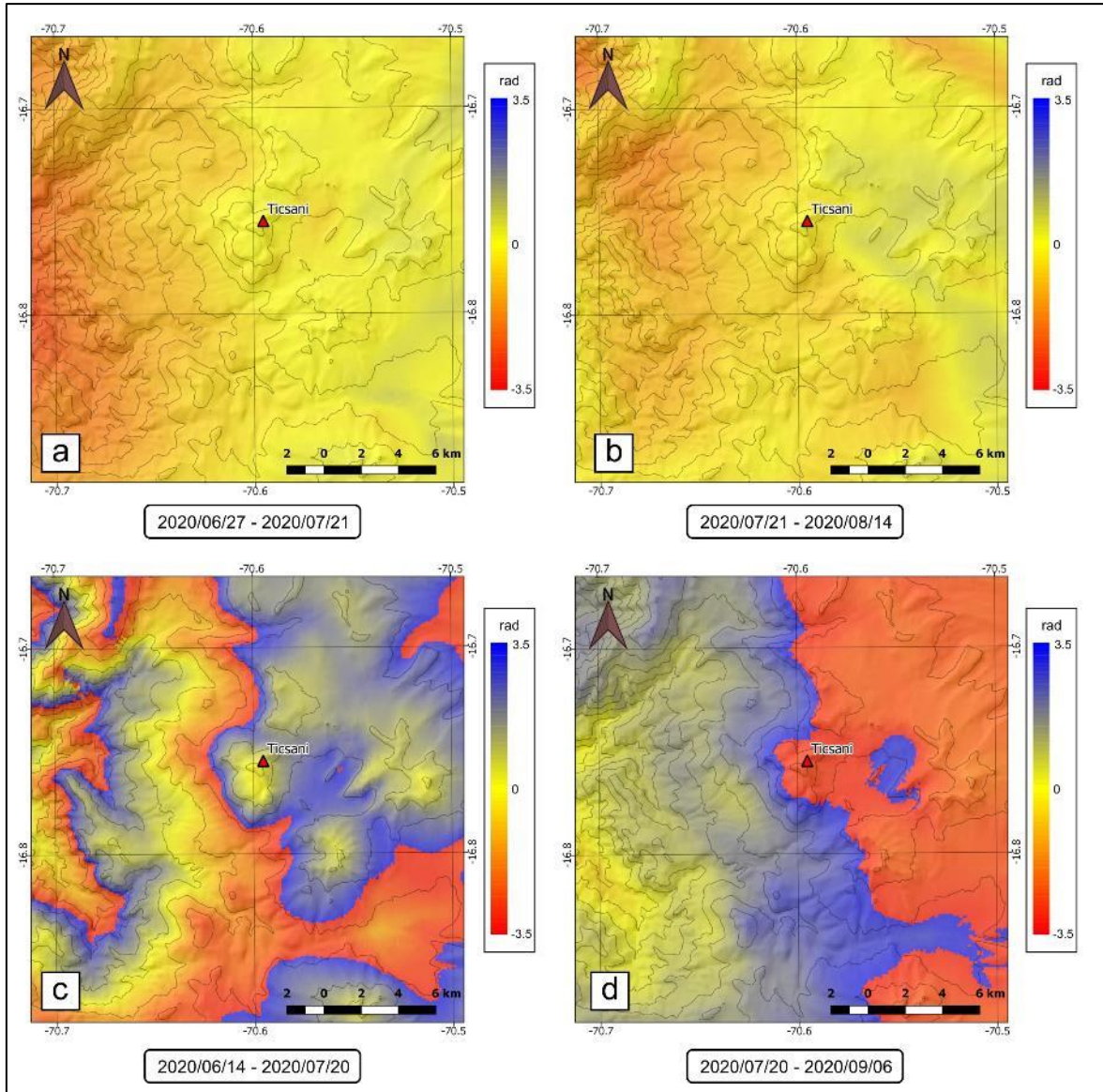


Sin embargo, la estación geodésica instalada en Soquesane (TSSQ), ubicada a 6 km al suroeste del Domo 3, ha evidenciado desplazamiento horizontal de  $11 \pm 2$  mm en dirección noreste. Este desplazamiento ocurrió entre febrero y el 13 de abril del año 2020 a una velocidad de 10 mm/año (Figura 4.24). Los meses posteriores, hasta junio, no se ha evidenciado desplazamientos de similares magnitudes. La ausencia de este desplazamiento en la estación ubicada en el volcán Ticsani, permite inferir que el origen es de dinámica local, probablemente asociado con otro factor geológico relacionado con el sistema de fallas Carumas-Calacoa (Benavente et al., 2018) presente en la zona.



**Figura 4.24.** (a) Serie temporal de la línea base estimada entre las estaciones geodésicas TSD3 y TSSQ. La sombra naranja representa el periodo en el que se registró desplazamiento horizontal en la estación ubicada en Soquesane.

Los interferogramas obtenidos a través de LicSAR tampoco evidenciaron deformación alrededor del edificio volcánico. Las órbitas ascendentes no muestran variación en la zona de estudio y las órbitas descendentes presentan franjas asociadas al cambio de topografía (Figura 4.25).

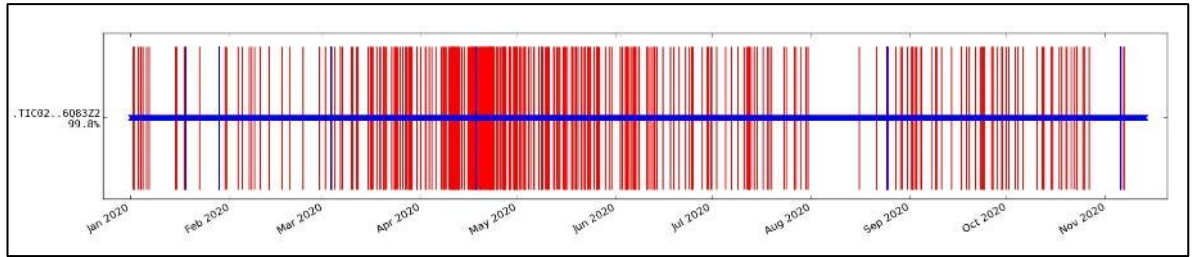


**Figura 4.25.** Interferogramas del Volcán Ticsani en órbita ascendente (a y b) y órbita descendente (c y d).

## 4.2.2 Sismicidad del volcán Ticsani

### 4.2.2.1 Operatividad

La Fig. 3.26, muestra la operatividad de la estación (**TIC02**). La barra azul sólida horizontal representa los periodos de funcionamiento de la estación y las barras rojas verticales, los periodos sin registro.



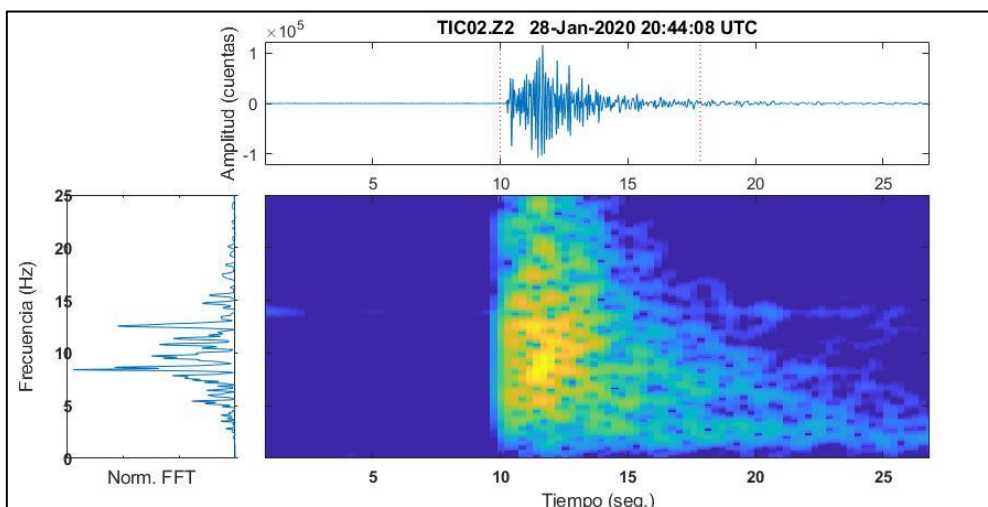
**Figura 4.26.** Operatividad de la estación sísmica TIC02, desplegada en el volcán Ticsani durante el 2020.

#### 4.2.2.2 Análisis de la actividad sísmica

En general, la actividad sísmica del volcán Ticsani, observada durante el periodo de operatividad, corresponden a sismos de tipo volcano-tectónicos VT. Dichos eventos están asociados a fracturamiento de rocas volcánicas al interior del volcán. Se registraron alrededor de 06 sismos Volcano-Tectónicos (VT) por día en promedio durante el 2020. También se ha observado un incremento puntual de varias decenas de sismos de tipo volcano-tectónicos por día (por ejemplo, el 21 de noviembre – 2020). No obstante, cabe señalar que este tipo de comportamiento sísmico es propio de un volcán activo.

#### 4.2.2.3 Caracterización de las señales sísmicas

- **Sismo volcano-tectónico (VT).** Son eventos provocados por las fracturas de rocas, asociados al ascenso de magma desde el interior de la Tierra hacia la superficie del volcán, posiblemente debido a la presión por intrusión de magma, interacción de fluidos magmáticos con el medio encajante, desgasificación de gases y cambios bruscos de temperatura (contracción y/o dilatación). Los eventos VT (Fig. 4.27), se caracterizan por tener claras llegadas de las ondas P y S y por el contenido de altas frecuencias (> 5Hz).



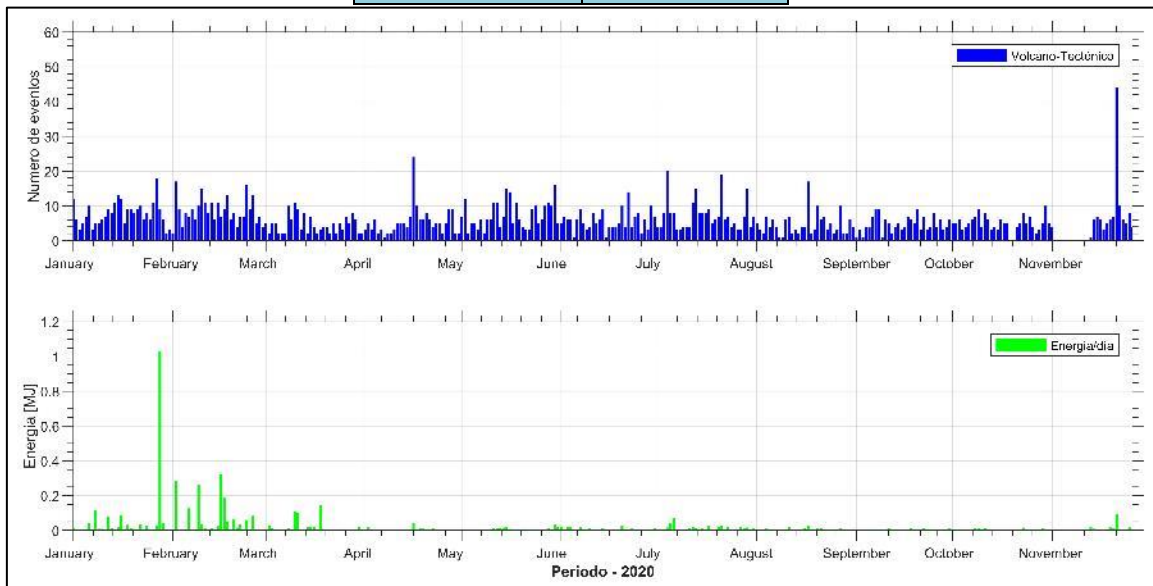
**Figura 4.27.** Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 28 de enero de 2020, componente Vertical.

**4.2.2.4 Estadística general y por tipo de evento**

La actividad sísmica registrada en el volcán Ticsani consistió principalmente en sismos tipo volcano-tectónico (VT), con una tasa de ocurrencia promedio casi constante, de 06 eventos por día, llegando a registrarse un máximo de 249 eventos el mes de febrero de 2020 (Tabla 4.2); asimismo, se registraron eventos tipo Tectónicos. En la Fig. 4.28 se observa el histograma de la evolución diaria de los sismos tipo VT y la liberación de la energía sísmica diaria llegando a registrarse un máximo de 1.03 MJ el 28 de enero de 2020.

**Tabla 4.2.** Resumen estadístico de enero a diciembre – 2020, de la actividad sísmica del volcán Ticsani.

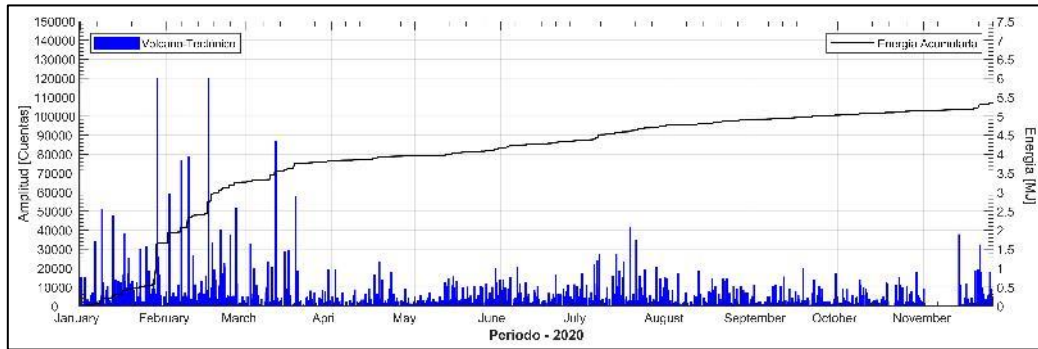
Fecha	Sismos VT/día
Enero	241
Febrero	249
Marzo	143
Abril	159
Mayo	230
Junio	173
Julio	227
Agosto	143
Setiembre	143
Octubre	152
Noviembre	122?
Diciembre	?
<b>TOTAL</b>	<b>1982</b>



**Figura 4.28.** Evolución temporal de la actividad sísmica de volcán Ticsani, por tipo de evento identificado para el periodo 2020.

#### 4.2.2.5 Energía sísmica liberada

La actividad sísmica del volcán Ticsani registrada durante el año 2020, también puede ser cuantificada, en función de la energía sísmica liberada por los eventos sismo-volcánicos (sismos tipo VT). Así, estos eventos han liberado una energía acumulada total de 5.33 MJ de energía (Fig. 4.29). Siendo esta energía considerablemente leve, en comparación al volcán Sabancaya (alerta naranja).

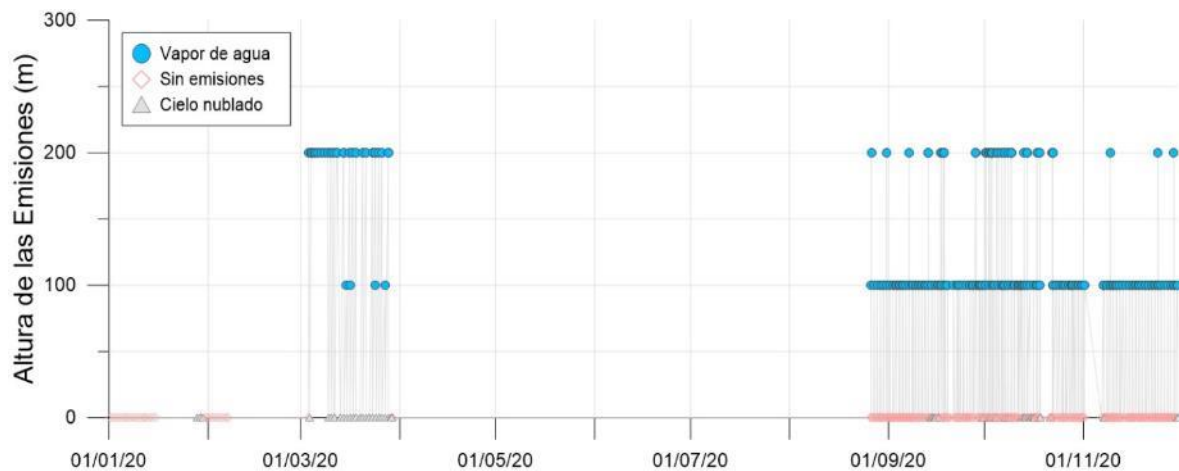


**Figura 4.29.** Energía sísmica liberada del volcán Ticsani para el 2020. VT: sismo Volcano-tectónico, asociado al fracturamiento de rocas.

### 4.2.3 Monitoreo visual y sensores remotos en el volcán Ticsani

#### 4.2.3.1 Características de las Emisiones, forma y ocurrencia

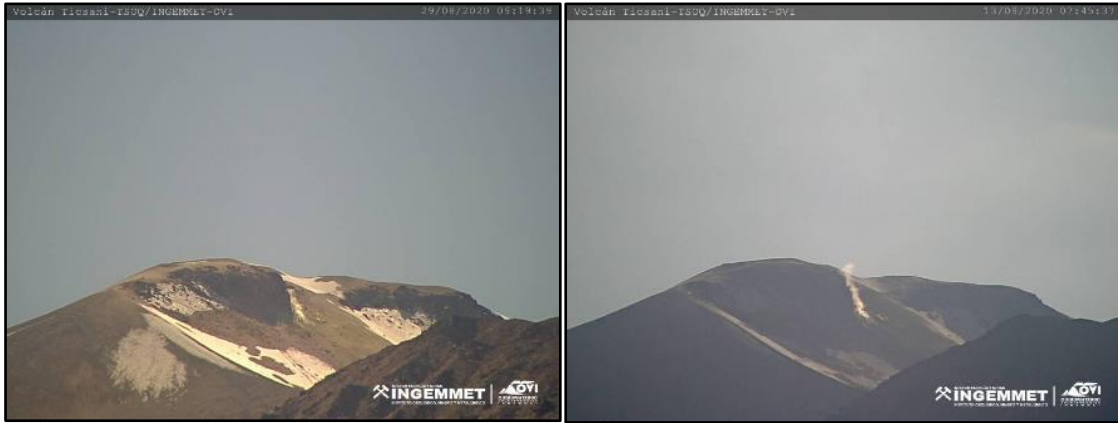
En la Fig. 4.30, se aprecia que las emisiones en el Volcán Ticsani han presentado alturas de hasta 200 m como máximo, compuestas de vapor de agua y gases de coloración blanquecina, durante el 2020. Estas emisiones se manifestaron de manera continua, pero en algunas ocasiones, debido a las condiciones climáticas, no fue posible visualizar la presencia de estas. Las emisiones muy tenues del Ticsani se dispersaron en dirección Noreste y Noroeste con mayor frecuencia.



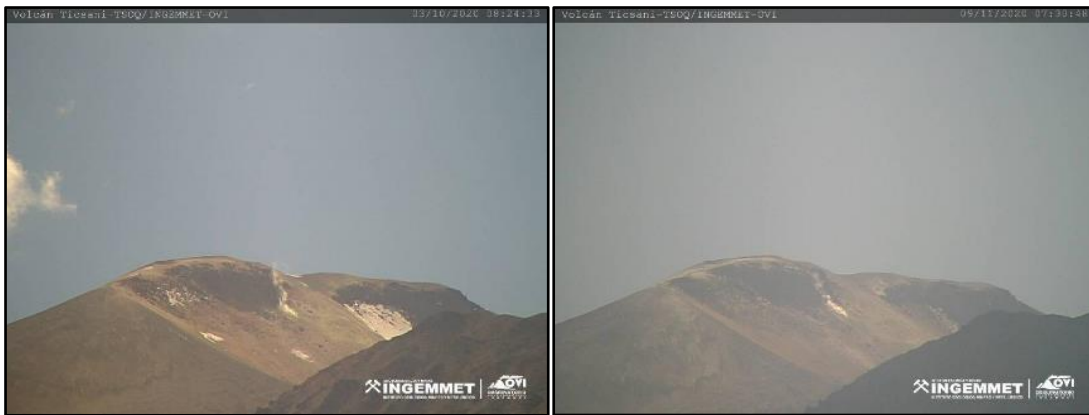
**Figura 4.30.** Histograma de la altura de las plumas volcánicas del volcán Ticsani, durante el periodo enero a noviembre del 2020.

#### 4.2.3.2 Imágenes representativas

En las Fig. 4.31 y 4.32, se muestra el registro de las imágenes más representativas del volcán Ticsani durante el año 2020, desde la estación de monitoreo TSOQ, ubicada al Suroeste del volcán. en el poblado de Soquesane.



**Figura 4.31.** Imagen del 29 de agosto del 2020, a las 09:19 am, donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura de 200 m por encima del nivel del cráter (izquierda) y al lado derecho, imagen del 13 de septiembre del 2020, a las 07:45 am donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura máxima de 200 m.

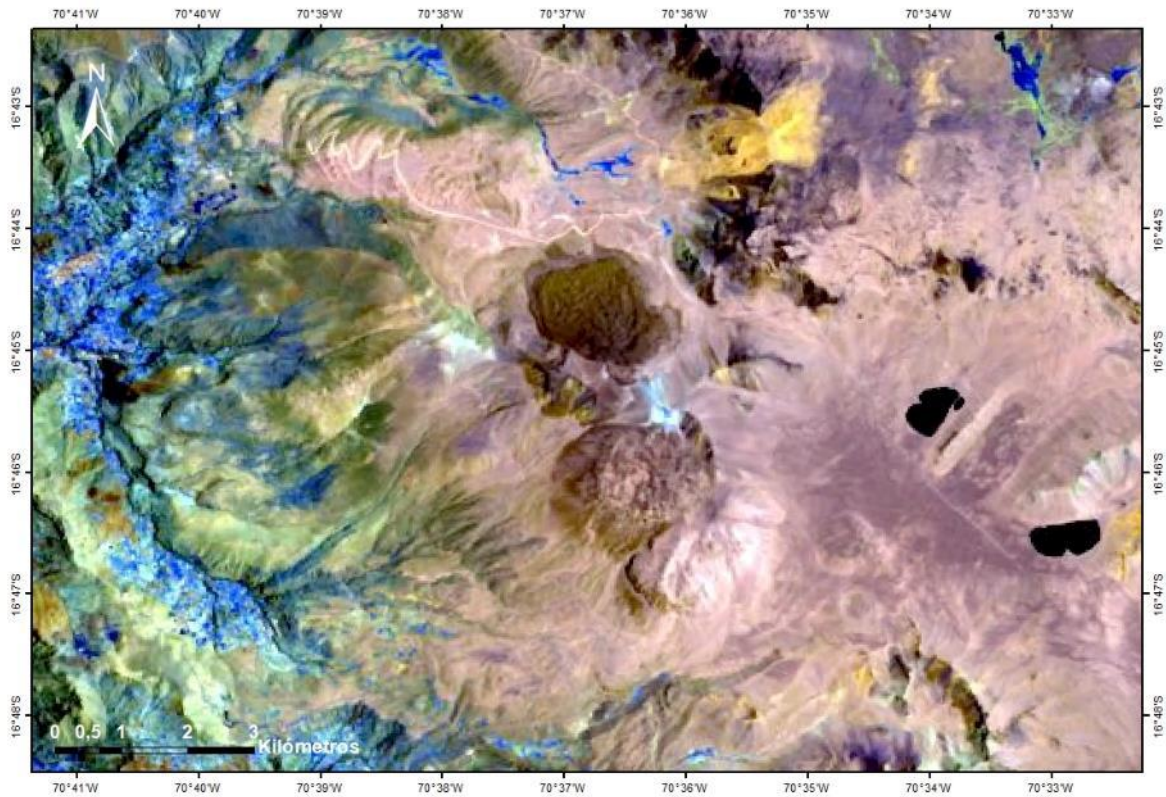


**Figura 4.32.** Imagen del 03 de octubre del 2020, a las 08:24 am, donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura de 200 m por encima del nivel del cráter (izquierda) y al lado derecho, imagen del 09 de noviembre del 2020, a las 07:30 am donde se observan emisiones de vapor de agua y gases, que alcanzan una altura máxima de 200 m.

#### 4.2.3.3 Análisis mediante las imágenes satelitales

El volcán Ticsani, ubicado en la región Moquegua, es un complejo volcánico constituido por afloramientos de domos. Su actividad superficial es leve, observándose fumarolas hasta de una altura máxima de 200m.

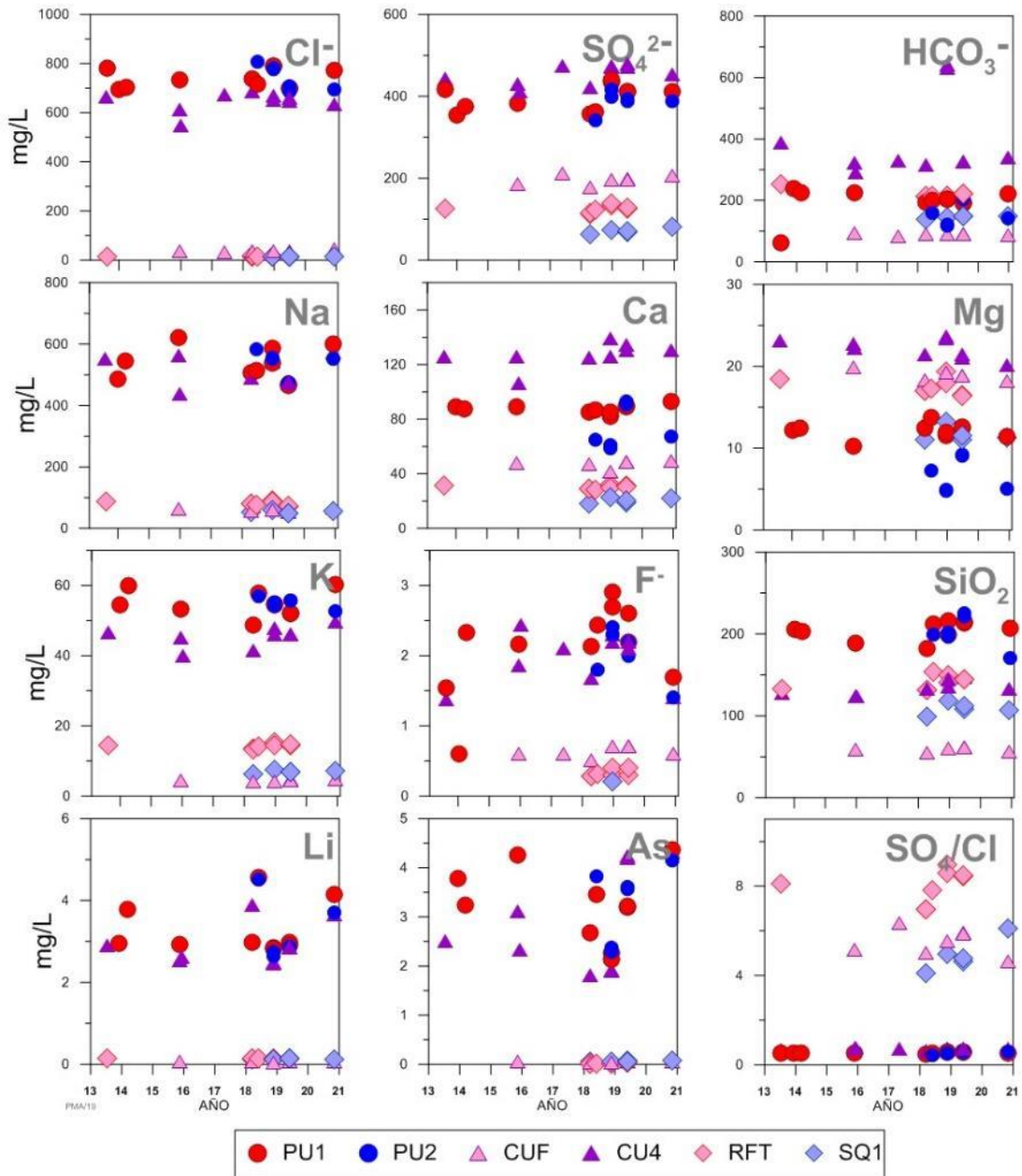
Para hacer una evaluación térmica, se utilizó las imágenes satelitales Sentinel 2, en su combinación de bandas 12, 8a, 4, como se muestra en la Fig. 4.33. Mediante la evaluación, no fue posible distinguir ninguna anomalía térmica en toda el área de influencia del volcán Ticsani.



**Figura 4.33.** Volcán Ticsani, imagen Satelital Sentinel 2, del 14 de noviembre del 2020.

#### 4.2.4 Resultados del monitoreo de fuentes termales

Los resultados del monitoreo de las fuentes termales del volcán Ticsani, durante el año 2020, comparadas con los años anteriores, no muestran cambios significativos que indiquen una perturbación del sistema hidrotermal asociado a un incremento de la actividad volcánica (Fig. 4.34).



**Figura. 4.34.** Gráfica de los principales elementos y compuestos monitoreados en las 6 fuentes termales, entre los años 2013 al 2020.



## 5 CONCLUSIONES

En función al análisis de los resultados obtenidos a través de los diferentes métodos de monitoreo para ambos volcanes, durante el año 2020, se concluye:

- El volcán Misti ha evidenciado velocidades de desplazamiento menores a 2 mm/año con errores estimados entre 1 y 2 mm/año. No se evidencia deformación volcánica.
- En cuanto a la deformación, la estación geodésica ubicada en el Volcán Ticsani ha evidenciado velocidades de desplazamiento menores a 2 mm/año con errores estimados entre 1 y 2 mm/año. No se evidencia deformación volcánica en esta zona. Sin embargo, la estación geodésica de referencia ubicada en Soquesane (6km al suroeste del Domo 3) ha evidenciado desplazamiento horizontal de  $11 \pm 2$  mm en dirección noreste entre Febrero y el 13 de Abril. Este evento está probablemente asociado a otro peligro geológico relacionado con el sistema de fallas Carumas-Calacoa presente en la zona.
- El volcán Misti se registró un total de 15 sismos “Tornillo” con frecuencias predominantes en los 5Hz y factores de calidad que oscilaron entre los 70 y 400. Estos sismos en su mayoría corresponderían a una mezcla de Gases + Líquido + Burbuja, sugiriendo que esta actividad estaría asociada principalmente al dinamismo y perturbación del sistema hidrotermal.
- El volcán Misti ha presentado una actividad baja caracterizada por emisiones de vapor de agua y gases, que no superaron los 1100m de altura desde el cráter, las cuales se presentaron esporádicamente. Asimismo, a través del análisis de las imágenes satelitales Sentinel 2, en sus bandas del infrarrojo cercano, no hay evidencia de anomalías térmicas relacionadas a la actividad del volcán Misti. Del mismo modo, la evaluación morfológica visual comparando imágenes satelitales Planetscope del año 2019 y 2020, no se muestran cambios morfológicos en el volcán.
- No se observaron variaciones importantes en la temperatura de las fumarolas del volcán Misti
- El volcán Ticsani ha evidenciado desplazamiento horizontal de  $11 \pm 2$  mm en dirección noreste. Este desplazamiento ocurrió entre febrero y el 13 de abril del año 2020 a una velocidad de 10 mm/año, probablemente asociado con otro factor geológico relacionado con el sistema de fallas Carumas-Calacoa.
- El volcán Misti se registró sismos tipo volcano-tectónico (VT), con una tasa de ocurrencia promedio casi constante, de 06 eventos por día y la liberación de la energía sísmica diaria llegando a registrarse un máximo de 1.03 MJ el 28 de enero de 2020.
- El volcán Ticsani, durante el año 2020 ha presentado emisiones de vapor de agua y gases, las cuales se han visualizado diariamente con mayor frecuencia y no han superado los 200m de altura desde el flanco oeste del volcán. Asimismo, mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel 2, no se observaron anomalías térmicas relacionadas a la actividad del volcán Ticsani.
- No se han observado cambios en las fumarolas del volcán Misti que nos indiquen un cambio en su actividad.

- Los resultados del monitoreo de aguas termales del Ticsani no ha presentados cambios significativos, por lo que no se evidencia una mayor interacción entre el sistema hidrotermal y el magmático, que el registrado los últimos años.

## 6 RECOMENDACIONES

- Continuar con el monitoreo de los volcanes Misti y Ticsani de manera constante, periódica y multidisciplinaria, con la finalidad de establecer continuidad en los registros de la data obtenida a través de las disciplinas (sísmica, visual, deformación).
- Implementar la instrumentación en los diferentes métodos de monitoreo para ambos volcanes a fin de mejorar el pronóstico de erupciones.
- Se sugiere implementar el análisis de deformación utilizando imágenes satelitales de radar de apertura sintética, con el fin de validar la ubicación de la cámara magmática modelada.
- Mantener el nivel de alerta en **VERDE**.
- Informarse permanentemente de la situación del volcán a través de los reportes diarios, de actividad y semanales emitidos por el OVI.



Lic. Fredy Erlington Apaza Choquehuayta

INGEMMET

Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL  
Director  
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
INGEMMET

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. y Audin, L. 2018, Neotectónica y peligro sísmico en la región Moquegua.
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D. & Battaglia, M., 2020. Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. *Remote Sensing*, 12(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>
- DVORAK, J. J. & DZURISIN, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 343-384.
- Finizola, A., Le´nat, J.-F., Macedo, O., Ramos, D., Thouret, J.C., Sortino, F., (2004). Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 135, 343– 360.
- Herring, T., King, R. W. & McCluskey, S., 2010. M. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology Technical Report, Cambridge.
- Kumagai, H. & Chouet, B. (2001) – The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and geometry, *Geophys. Res. Lett.* 28(17), 3325–3328 p.
- Masías, P. (2008). Estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales y frías asociadas al volcán Misti, Póster, 75 Congreso Iberoamericano de Química, Cusco
- Masias, P., Taipe, E., Antayhua, Y. & Ramos, D. (2013) - Monitoreo de los Volcanes Misti y Ubinas, Periodo 2006 – 2012, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 54, 104p.
- Ramos D. (2000). Aplicación del método geofísico del potencial espontáneo para el estudio estructural del volcán Misti, Tesis para optar el título de ingeniero Geofísico, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 173 pág.
- OVI (2015). MONITOREO ANUAL DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN MISTI 2015, INGEMMET informe técnico.
- OVI (2017). MONITOREO ANUAL DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN MISTI 2017, INGEMMET informe técnico.
- OVI (2019). EVALUACION DE LA ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA 2019, INGEMMET informe técnico.
- OVI (2017). MONITOREO DEL VOLCÁN TICSANI PERIODO 2017. INGEMMET informe técnico.
- OVI (2019). A6952 Monitoreo de los volcanes Ubinas Ticsani (Moquegua), Tutupaca, Yucamani y Purupuruni (Tacna) 2019, INGEMMET informe técnico.
- Tavera, H. (2006) Características Sismotectónicas de la crisis sísmica de Octubre del 2005 en la Región del Volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú, 78 p
- Thouret, J.C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.* 113 (12), 1593–1610.
- Thouret J.-C., Mariño J., Davila J., Rivera M., Fuvigne E., Loutsch I. (2008). “Erupciones explosivas durante el Pleistoceno tardío y Holoceno en el sur del Perú, Proyecto Tefro - estratigráfico del sur del Perú TESSOPE”