

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6997

INFORME TÉCNICO ANUAL: VIGILANCIA DE LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA, PERIODO 2019

Misti: Región Arequipa
Provincia Arequipa
Coropuna: Región Arequipa
Provincia Castilla
Distrito Viraco



DICIEMBRE

2019

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

Informe Técnico Nro. A6997

**INFORME TÉCNICO ANUAL:
VIGILANCIA DE LOS VOLCANES MISTI Y
COROPUNA, PERIODO 2019**

Equipo de Vigilancia Volcánica

Fredy Apaza Choquehuayta
Rafael Miranda Cruz
Beto Ccallata Pacsi
Pablo Masías Alvarez
Luis Fernando Cruz Mamani
David Valdivia Humerez
Carlos Luza Huillca
Domingo Ramos Palomino
Yanet Antayhua Vera
Mayra Ortega Gonzales
Rosa Anccasi Figueroa
Edu Taipe Maquerhua

AREQUIPA – PERU

Diciembre - 2019

Contenido

RESUMEN	5
1 INTRODUCCION.....	6
1.1 Objetivos	6
1.2 Volcán MISTI.....	6
1.2.1 Ubicación.....	7
1.2.2 Antecedentes	7
1.2.3 Técnicas de Vigilancia.....	8
1.2.4 Red de Vigilancia	8
1.3 Volcán Coropuna	9
1.3.1 Ubicación.....	9
1.3.2 Antecedentes	10
1.3.3 Técnicas de Vigilancia.....	10
1.3.4 Red de Vigilancia	11
2 VIGILANCIA QUÍMICA.....	12
2.1 Vigilancia de Gases Volcánicos del volcán Misti	12
2.1.1 Móvil DOAS:	12
2.2 Vigilancia de Fuentes Termales en el volcán Misti.....	13
2.2.1 Fuentes de Agua.....	13
2.2.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales del Misti.....	13
2.3 Vigilancia de Fuentes Termales en el volcán Coropuna.....	14
2.3.1 Fuentes de Agua.....	14
2.3.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales del Coropuna.....	14
3 VIGILANCIA GEODÉSICA	16
3.1 Red de Vigilancia volcán Misti.....	16
3.2 Resultados del Vigilancia GPS.....	17
3.3 Resultados GPS.....	17
3.4 Red de Vigilancia volcán Coropuna	19
3.5 Procesamiento	20
3.5.1 GPS	20
3.5.2 Deformación volcánica del Coropuna	20
4 VIGILANCIA SÍSMICA.....	22
4.1 Red Sísmica volcán Misti	22

4.2	Operatividad.....	23
4.3	Procesamiento y Análisis.....	23
4.4	Resultados.....	23
4.4.1	Señales sísmicas representativas.....	23
4.4.2	Estadística general y por tipo de evento.....	25
4.4.3	Energía sísmica liberada.....	26
5	SENSORES REMOTOS.....	27
5.1	Red de Cámaras volcán Misti.....	27
5.2	Características de las Emisiones.....	28
5.2.1	Forma y ocurrencia.....	28
5.2.2	Dirección predominante.....	29
5.2.3	Imágenes representativas de emisiones fumarólicas.....	29
6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	31
6.1	Volcán Misti.....	31
6.2	Volcán Coropuna.....	33
7	CONCLUSIONES.....	34
8	RECOMENDACIONES.....	35
9	BIBLIOGRAFÍA.....	36

RESUMEN

El estudio y seguimiento de la actividad volcánica mediante los cambios en la morfología y la dinámica interna de los volcanes Misti y Coropuna, durante el periodo de evaluación 2019, fue realizado por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) temporalmente (Volcán Coropuna), permanente y continuamente a través de las técnicas de la sismología volcánica, Química de fuentes termales, deformación volcánica, y observaciones visuales del volcán, a fin de entender los procesos internos de estos dos sistemas volcánicos, así como los movimientos de los magmas, la naturaleza de cada sistema volcánico es muy diferente y variables en cada región, por esas consideraciones un cambio en la dinámica interna del volcán no es signo inequívoco de una erupción en el corto plazo, ya que se existen sistemas volcánicos que han mostrado una nula o muy pequeños cambios en su morfología y variaciones internas que han terminado en una erupción. Es de importancia contar con más técnicas de monitoreo que permitan mejorar al entendimiento de un volcán, no basta una técnica para determinar el estado de un volcán. En general durante el 2019 el volcán Misti presento una actividad sísmica baja, con una tasa de ocurrencia sísmica de 10 sismos por día (siendo esta la más alta durante el año), mientras las alturas observadas normalmente por las mañanas de algunas emisiones no superaron los 1000 msc (metros sobre el cráter del volcán), así como la deformación volcánica no ha observado cambios en la morfología en ambos volcanes (Misti y Coropuna), el análisis de las fuentes termales en el Misti y Coropuna no han mostrado cambios significativos en su actividad. Actualmente ambos volcanes se encuentran con una baja actividad, evaluados desde el punto de vista de su peligrosidad que representan y que se espera ampliar la red de monitoreo para ajustar mejor las tendencias y las variaciones anuales.

Según la vigilancia realizada durante todo el año 2019 los volcanes Misti y Coropuna se encuentran en NIVEL DE ALERTA VERDE que significa: El volcán se encuentra en estado de reposo con condiciones estables, se observan algunas emisiones de gases mayoritariamente vapor de agua y presenta una actividad sísmica de baja intensidad.

1 INTRODUCCION

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, creó el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) cuyo fin es 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, a fin de incrementar e implementar la gestión de riesgo de desastres a beneficio de la población y a su vez, reducir el mismo en el sur del país en base a la vigilancia permanente de los volcanes activos en el sur del Perú.

Cumpliendo con la función que le ha sido encomendada, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, como centro de investigación y vigilancia de volcanes activos del sur del Perú, de carácter multidisciplinario, realiza la vigilancia sistemática y continua de los volcanes: Sabancaya, Misti, Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, etc., los cuales, se encuentran localizados en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna.

En el presente informe técnico anual de la actividad de los volcanes Misti y Coropuna, correspondiente al año 2019, se compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia multiparamétricas instaladas en los alrededores de los edificios volcánicos.

1.1 Objetivos

- Realizar el monitoreo multidisciplinario de los volcanes Misti y Coropuna, integrando toda la información generada por las diferentes disciplinas.
- Buscar patrones relacionados con el comportamiento de la actividad de los volcanes.
- Informar sobre las características de la actividad volcánica en el Misti y Coropuna durante el año 2019.

1.2 Volcán MISTI

El volcán Misti, es el volcán de mayor riesgo en el Perú; a sus faldas se sitúa la ciudad de Arequipa con más de un millón de habitantes, el centro de la ciudad se sitúa a tan solo 17 km del cráter del volcán. La actividad observada en el volcán Misti, corresponde a un volcán activo, por ello el INGEMMET en cumplimiento de sus funciones, viene realizando el monitoreo multi-parámetro de este volcán.

1.2.1 Ubicación

El volcán Misti se encuentra ubicado a 17 km al E de la ciudad de Arequipa, (Figura 1.1), en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur peruano. Política y territorialmente, el Misti está situado en la provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, en las siguientes coordenadas UTM:

Longitud: 243116 Este
Latitud: 8196974 Sur
Altitud: 5825 msnm



Figura 1.1. Ubicación del volcán Misti.

1.2.2 Antecedentes

Diversas crónicas y recopilaciones efectuadas por Zamácola y Jauregui (1804), Barriga (1951), Chávez Chávez (1992), entre otros, así como recientes dataciones radiométricas de depósitos recientes del Misti (Thouret et al., 2001), dan cuenta de actividad histórica del volcán Misti. Algunas descripciones permiten identificar que se trató de erupciones volcánicas del Misti, lo cual se confirma también con varios depósitos emplazados sobre las caídas y flujos piroclásticos de la erupción de hace 2050 años.

Estudios realizados en el Perú el año 2000, con el método de potencial espontáneo del volcán Misti permitieron estudiar la estructura y circulación de fluidos de gases en el suelo y fumarolas, estableciendo una zona hidrotermal en la estructura volcánica por la cual los fluidos circulan en el interior del volcán (Ramos, 2000). Por otro lado, se realizaron estudios sobre la geología del volcán Misti (Thouret et al., 2001). Finizola, en el año 2004, delimita la zona hidrotermal donde los fluidos son identificados con el método de potencial espontáneo, en dicho estudio la concentración del CO₂ en el suelo del edificio volcánico fue analizado por cromatografía. En el volcán Misti se realizaron también estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales asociadas al volcán Misti (Masías, 2008).

Desde el año 2006 el INGEMMET viene realizando el seguimiento de la actividad del volcán Misti empleando diferentes técnicas.

1.2.3 Técnicas de Vigilancia

Desde el año 2006 el INGEMMET, venía 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.

En el 2012, se realiza la instalación de una estación multiparámetro en el flanco oeste del volcán incoando así el monitoreo continuo del macizo, hoy en día, el volcán Misti, es vigilado a través de las siguientes técnicas y/o disciplinas:

- Vigilancia química de gases y aguas.
- Vigilancia geodésica.
- Vigilancia de la actividad sismo – volcánica.
- Vigilancia a través de sensores remotos.

1.2.4 Red de Vigilancia

Durante el 2019, la red de vigilancia multiparamétrica del volcán Misti estuvo conformada por los siguientes equipos (Figura 1.2):

- 01 escáner de gases SO₂ MovilDOAS.
- 01 estaciones GPS.
- 02 estaciones sísmicas.
- 01 cámaras de video vigilancia

- 3 Fuentes termales

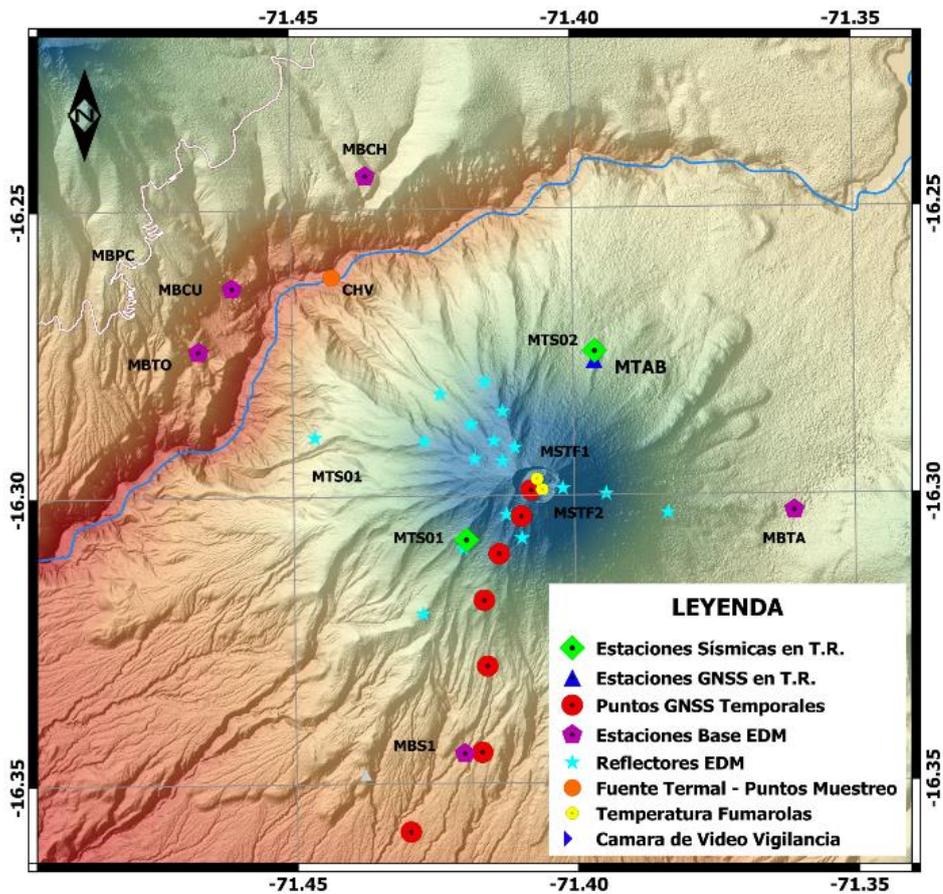


Figura 1.2. Red de vigilancia multiparamétrica del volcán Misti, 2019.

1.3 Volcán Coropuna

El volcán Coropuna, es uno de los volcanes de mayor riesgo en el Perú; debido a que presenta un gran casquete glaciar y a sus faldas se sitúa el valle de Viraco con más de unas 15 mil habitantes. La actividad observada en el volcán Coropuna, corresponde a un volcán activo, por ello el INGEMMET en cumplimiento de sus funciones, viene realizando el monitoreo multiparámetro de este volcán.

1.3.1 Ubicación

El volcán Coropuna se ubica en el departamento de Arequipa, provincia de Castilla, a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y a 110 km de la Costa Pacífica (ver figura 1.3), geográficamente entre las siguientes coordenadas:

Longitud: 750938 Este
Latitud: 8283070 Sur
Altitud: 6405 msnm

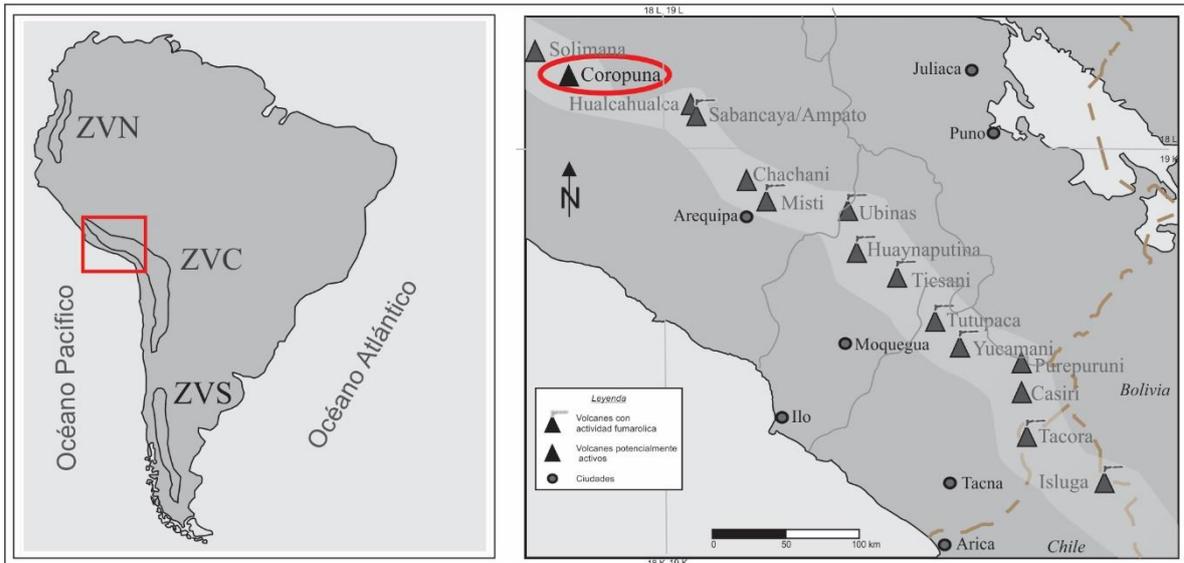


Figura 1.3. Ubicación del volcán Coropuna.

1.3.2 Antecedentes

En la región del volcán Coropuna se han realizado estudios de carácter geológico, tectónico, geofísico, etc.; los cuales se mencionan a continuación:

En Misti y Coropuna han ocurrido varias erupciones volcánicas en los últimos 10 Ka (Thouret et al, 2002; Úbeda et al, 2012)

Las masas de hielo conforman un casquete glaciar que en 2007 sumaba una superficie de 47 km² (Úbeda, 2011; Úbeda, 2012)

El Observatorio realiza un informe acerca de la actividad de los volcanes Misti y Coropuna (Ramos, 2018) determinando que se encuentran con niveles bajos de actividad.

1.3.3 Técnicas de Vigilancia

Desde el año 2006 el INGEMMET, venía realizando el monitoreo periódico del volcán Coropuna, 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.

En el 2012, se realiza la instalación de una estación multiparámetro en el flanco oeste del volcán incoando así el monitoreo continuo del macizo, hoy en día, el volcán Coropuna, es vigilado a través de las siguientes técnicas y/o disciplinas:

- Vigilancia química de aguas.
- Vigilancia geodésica.

1.3.4 Red de Vigilancia

Durante el 2019, la red de vigilancia multiparamétrica del volcán Coropuna estuvo conformada por los siguientes equipos (Figura 1.4):

- 02 estaciones GPS.
- 6 Fuentes termales

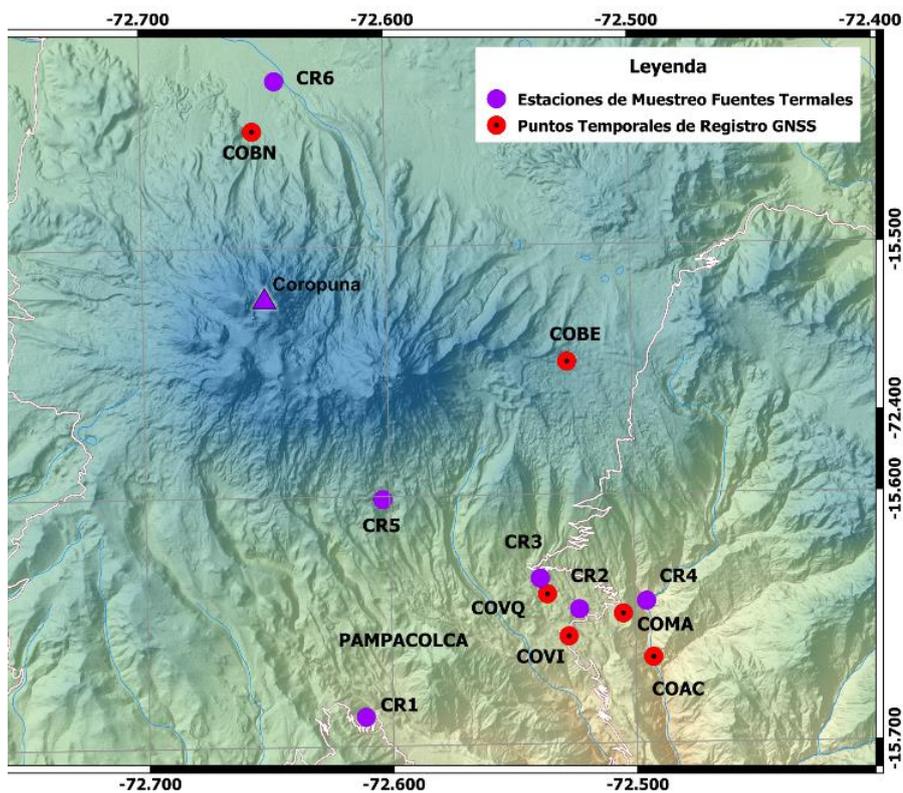


Figura 1.4. Red de vigilancia multiparamétrica del volcán Coropuna, 2019.

2 VIGILANCIA QUÍMICA

2.1 Vigilancia de Gases Volcánicos del volcán Misti

La vigilancia de gases volcánicos, durante el 2019, se realizó aplicando el método DOAS mediante el uso del equipo móvil DOAS, que se describen a continuación.

2.1.1 Móvil DOAS:

Este equipo es utilizado en el Misti desde 2018, las mediciones se realizan pasando por debajo de la pluma volcánica, por lo general, en un vehículo.

Durante el 2019 se realizaron campañas donde la dirección de la pluma coincidió con la dirección del viento y por ende se obtuvieron buenos resultados.

En el mes de junio se registró valores de alrededor de 30 Ton/día considerado como un valor pequeño, lo cual indica que es un volcán activo y presenta emisiones de gases volcánicos. A continuación, se observa el recorrido y las mediciones realizadas en el flanco este y norte del volcán.

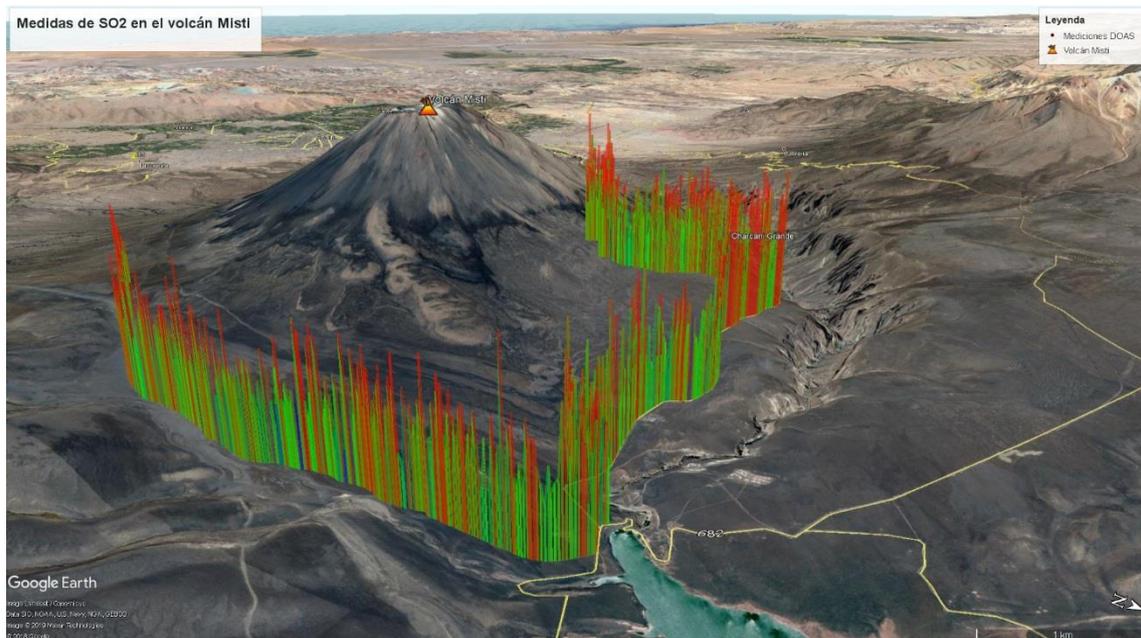


Figura. 2.1.- Registro de mediciones de SO₂ En el volcán Misti.

2.2 Vigilancia de Fuentes Termales en el volcán Misti

La vigilancia de fuentes termales consiste en la identificación y seguimiento de la composición química del agua en el tiempo, así como de parámetros físicos como la temperatura.

Las fuentes son muestreadas en los emanantes, las muestras son transportadas al laboratorio de para su análisis en el laboratorio de química de INGEMMET, en la ciudad de Lima, siguiendo la siguiente metodología:

Metales disueltos - (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO₂, 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⁻, SO₄⁼) por Cromatografía Iónica marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS-5000. Además (CO₃⁼, HCO₃⁼) por método Titrimétrico marca Thermo Scientific, modelo Orion Versa Star.

Los resultados son procesados e interpretados en el OVI, para obtener información del sistema hidrotermal.

2.2.1 Fuentes de Agua

Las fuentes termales vigiladas durante el 2019, fueron 4: CHV, JES, UMA y TUX (Figura 1.1b), las que se ubican en un radio de 27 km del cráter del Misti. El muestreo se realizó por duplicado en marzo (JES) y junio del 2019 (CHV, UMA, TUX, JES).

2.2.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales del Misti

Al comparar los resultados del 2019 con datos de la base de datos de monitoreo (2013-2019), podemos observar que, no se han presentado cambios significativos de la componente magmática en el sistema hidrotermal, que nos indiquen el inicio de un nuevo proceso eruptivo (Figura 2.2).

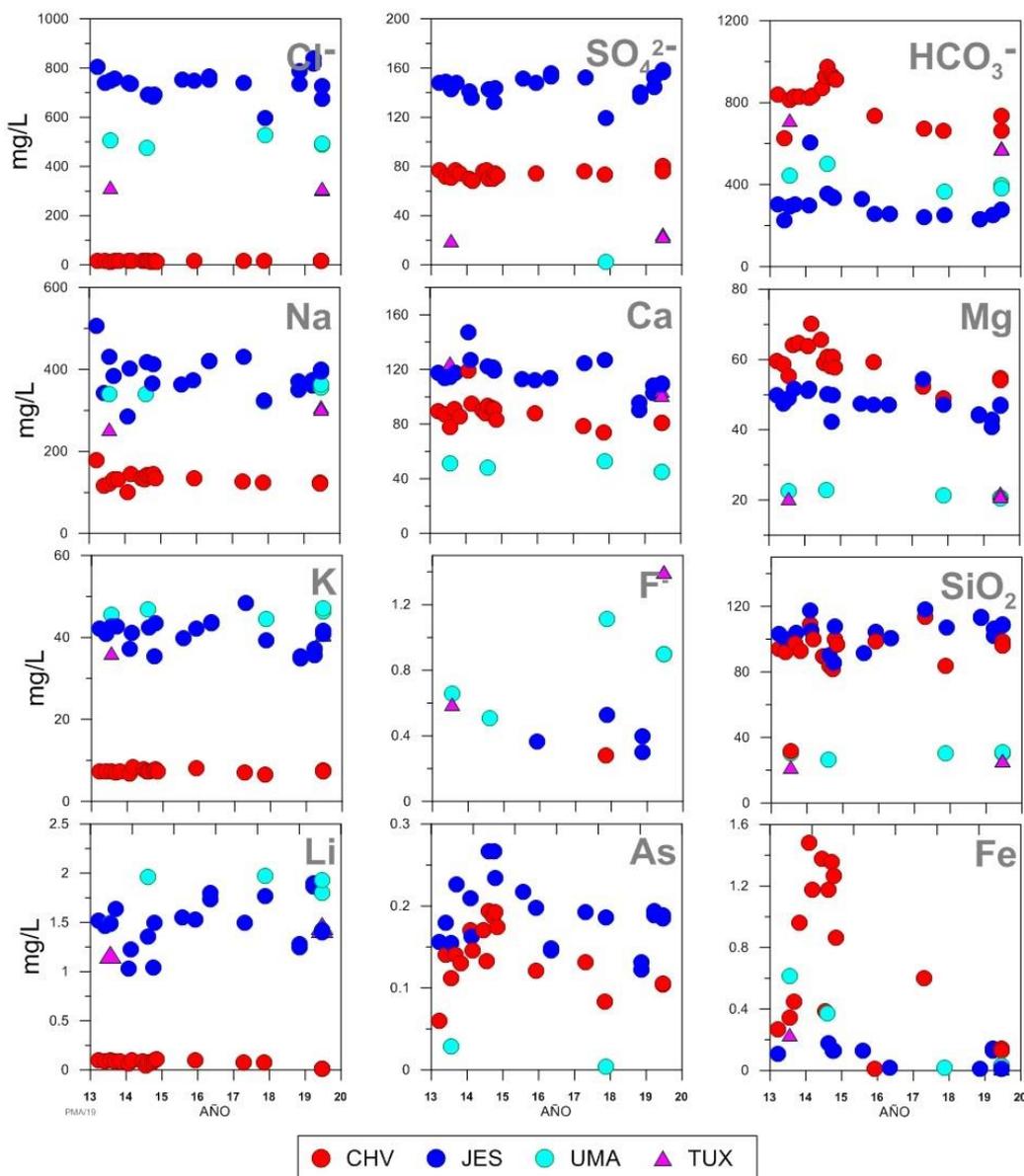


Figura 2.2. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CHV, JES, UMA y TUX, en el volcán Misti.

2.3 Vigilancia de Fuentes Termales en el volcán Coropuna

2.3.1 Fuentes de Agua

Las fuentes termales vigiladas durante el 2019, fueron 6: CR1, CR2, CR3, CR4, CR6 y CR7 (Figura 1.1b), las que se ubican en un radio de 18 km de la cumbre del cono activo. El muestreo se realizó por duplicado en junio del 2019.

2.3.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales del Coropuna

Al comparar los resultados del 2019 con datos de la base de datos de monitoreo (2013-2019), podemos observar que, no se han presentado cambios significativos de la

componente magmática en el sistema hidrotermal, que nos indiquen el inicio de un nuevo proceso eruptivo (Figura 2.3).

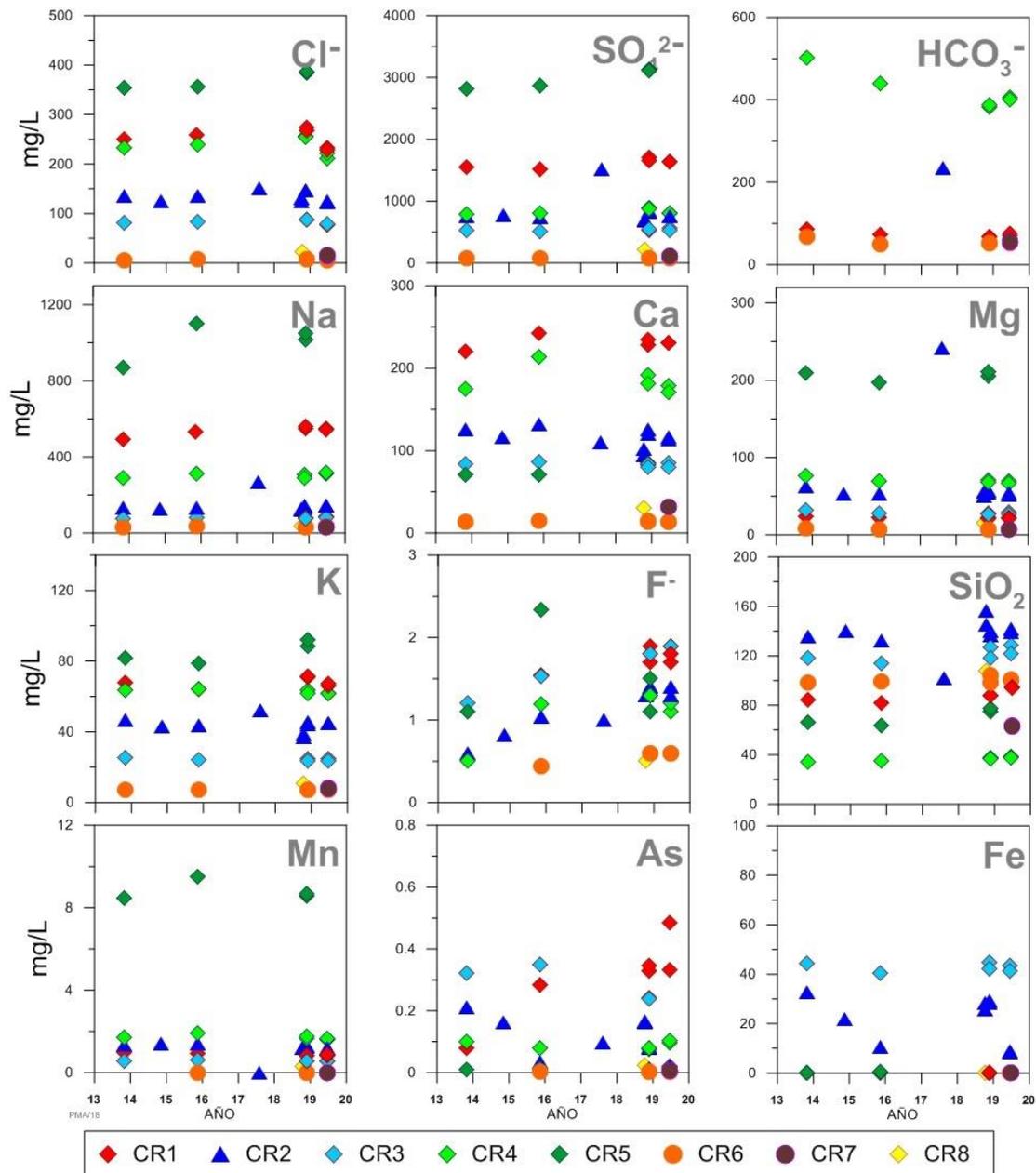


Figura 2.3. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6 y CR7, en el volcán Coropuna.

3 VIGILANCIA GEODÉSICA

La vigilancia geodésica consiste en el estudio continuo de la deformación superficial del volcán. En muchos casos, las erupciones volcánicas son precedidas por pronunciadas deformaciones superficiales en respuesta al incremento de presión en el reservorio magmático o al ascenso de un magma intrusivo. Volcanes con reservorios magmáticos superficiales, generalmente han mostrado un ciclo de procesos de deformación: una inflación gradual antes de la erupción, luego una significativa deflación durante la erupción y finalmente una rápida inflación inmediatamente después de la erupción. Por lo tanto, los patrones de deformación superficial (inflación y deflación) pueden proporcionar información importante dentro de la estructura volcánica y sobre el estado de actividad del volcán (Dvorak Y Dzurisin, 1997; Dzurisin, 2003).

3.1 Red de Vigilancia volcán Misti

La red de monitoreo geodésico del volcán Misti, durante el año 2019, estuvo conformada por una (01) estación GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de operación continua (MTAB). Esta estación está ubicada aproximadamente 2.5 kilómetros al noreste del cráter del volcán Misti y se ha mantenido operativa desde mayo de 2017. La fase portadora y los demás observables registrados por esta estación, están muestreados a intervalos de 30 segundos utilizando todos los satélites visibles por encima de 10° de máscara de elevación. Estos datos llegan al observatorio diariamente mediante antenas de radiofrecuencia.

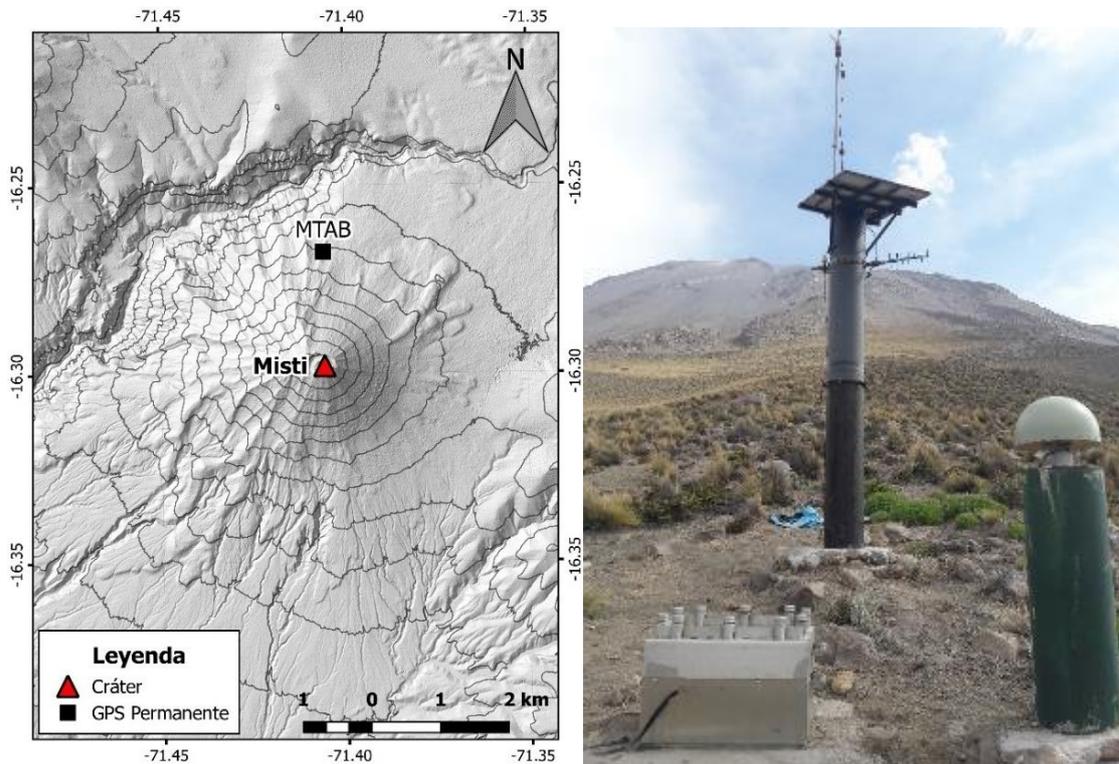


Figura 3.1. A la izquierda, red de vigilancia geodésica del volcán Misti durante el 2019. A la derecha fotografía de la estación permanente MTAB.

3.2 Resultados del Vigilancia GPS

El procesamiento de los datos GPS se trabajó utilizando el programa científico GAMIT/GLOBK v.10.7 (Herring et al., 2010). Tanto GAMIT como GLOBK, son un conjunto de módulos, librerías y subprogramas compilados bajo un mismo entorno, trabajando de manera contigua bajo una metodología. Para el análisis de deformación volcánica, se utilizó los resultados del procesamiento de las posiciones horizontales y verticales. A partir de estos resultados, se estimaron las velocidades medias de deformación. Así mismo, se procesó la longitud de línea base con la estación GPS instalada por el IGS en el distrito de Characato, Arequipa (AREQ), aproximadamente a unos 20 km de distancia.

Las soluciones finales se estimaron utilizando las órbitas finales del IGS (Servicio Internacional GNSS). Las cuasi-soluciones se combinaron utilizando las soluciones globales diarias calculadas por el MIT. Las posiciones diarias y velocidad media se estimaron ajustando las soluciones finales a las posiciones y velocidad de la estación AREQ definida bajo el marco de referencia de Sudamérica (SOAM). Este ajuste permite eliminar los patrones de estacionalidad y la influencia tectónica de la placa Sudamericana. Así mismo se aplicaron las correcciones por inestabilidad del monumento (random walk), el error instrumental (white noise) y flicker noise utilizando las aproximaciones de Williams et al. (2004).

3.3 Resultados GPS

La velocidad y error de los datos GPS se muestran en la Tabla 3.1. Los valores RMS ponderados de la componente horizontal resultan $\approx 1\text{mm}$, mientras que para la componente vertical es de 4.03mm . La velocidad media de las componentes horizontales está graficada mediante un vector de desplazamiento (Figura 3.2), este vector representa la magnitud y dirección de la velocidad de deformación de la estación GPS MTAB. La deformación de la estación MTAB a través del tiempo se puede observar en las series temporales de posición para cada una de sus tres componentes (Figura 3.2): norte-sur (N), oeste-este (E) y vertical (U).

Tabla 3.1. Resumen de las velocidades GPS calculadas por la estación GPS de operación continua MTAB durante el 2019. Los valores están en milímetros por año (mm/año).

	Velocidad Este (Ve)	Velocidad Norte (Vn)	Velocidad Vertical (Vu)
MTAB	-2 ± 1	-2 ± 1	1 ± 3

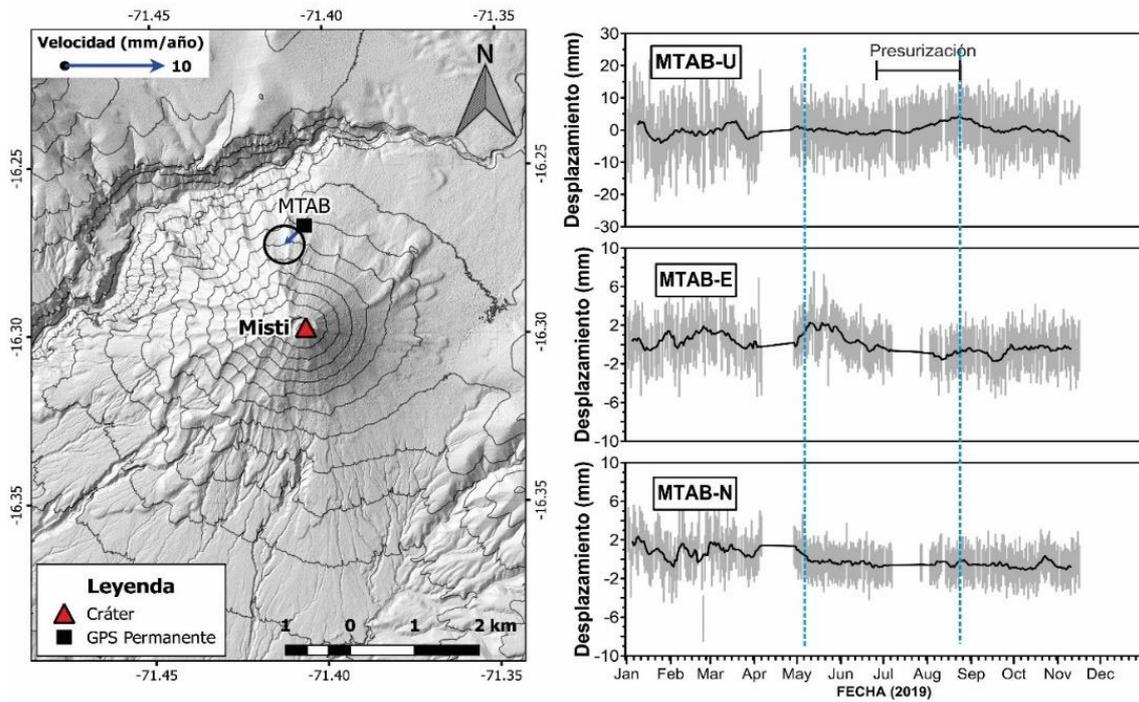


Figura 3.2. Resultados de la estación GPS MTAB durante el 2019. A la izquierda, vector de desplazamiento que representa la velocidad horizontal media durante el año. A la derecha, series temporales de posición vertical (MTAB-U) y horizontal (MTAB-E, MTAB-N) este y norte respectivamente.

La magnitud y dirección del desplazamiento horizontal registrado por la estación GPS MTAB, durante el 2019, no se asocia a algún proceso de inflación o deflación magmática. Este desplazamiento puede deberse a cambios abruptos en las condiciones atmosféricas, entre los meses de mayo y agosto, que puedan haber perturbado el gradiente de presión interna del volcán o a la activación temporal de alguna fuente hidrotermal. Adicionalmente la línea base procesada entre la estación MTAB y AREQ no muestra cambios significativos relacionados a procesos magmáticos (Figura 3.3).

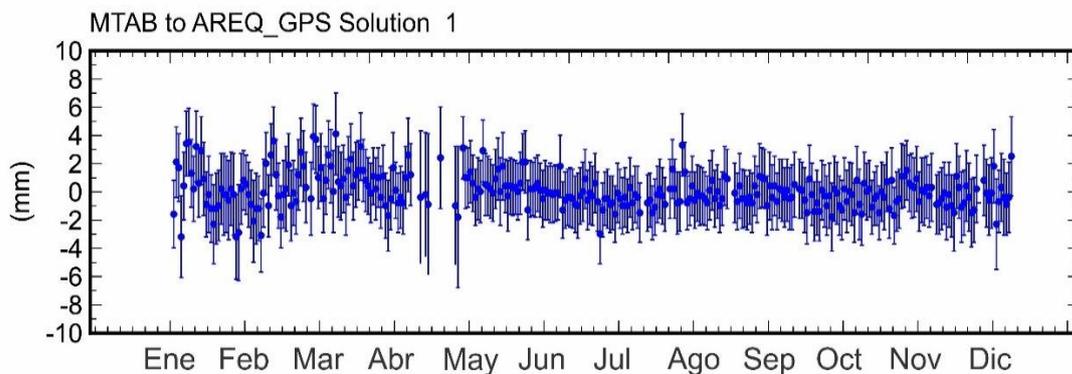


Figura 3.3. Resultados de la longitud de línea base entre las estaciones GPS MTAB y AREQ durante el 2019.

Estos resultados muestran que el volcán se encuentra en una etapa estable. Los resultados de la vigilancia de la deformación volcánica en el Misti no han mostrado indicios de ascensos de

magma que produzcan un proceso eruptivo.

3.4 Red de Vigilancia volcán Coropuna

La red de vigilancia geodésica del volcán Coropuna, durante el año 2019, estuvo conformada por dos (02) estaciones GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de operación por campaña durante el mes de junio. Estas estaciones estuvieron ubicadas aproximadamente a 7 kilómetros al este (COBE) y 9 kilómetros al sureste del cráter más alto del Coropuna (Figura 3.4). La fase portadora y los demás observables registrados por estas estaciones, estuvieron muestreados a intervalos de 15 segundos utilizando todos los satélites visibles por encima de 10° de máscara de elevación.

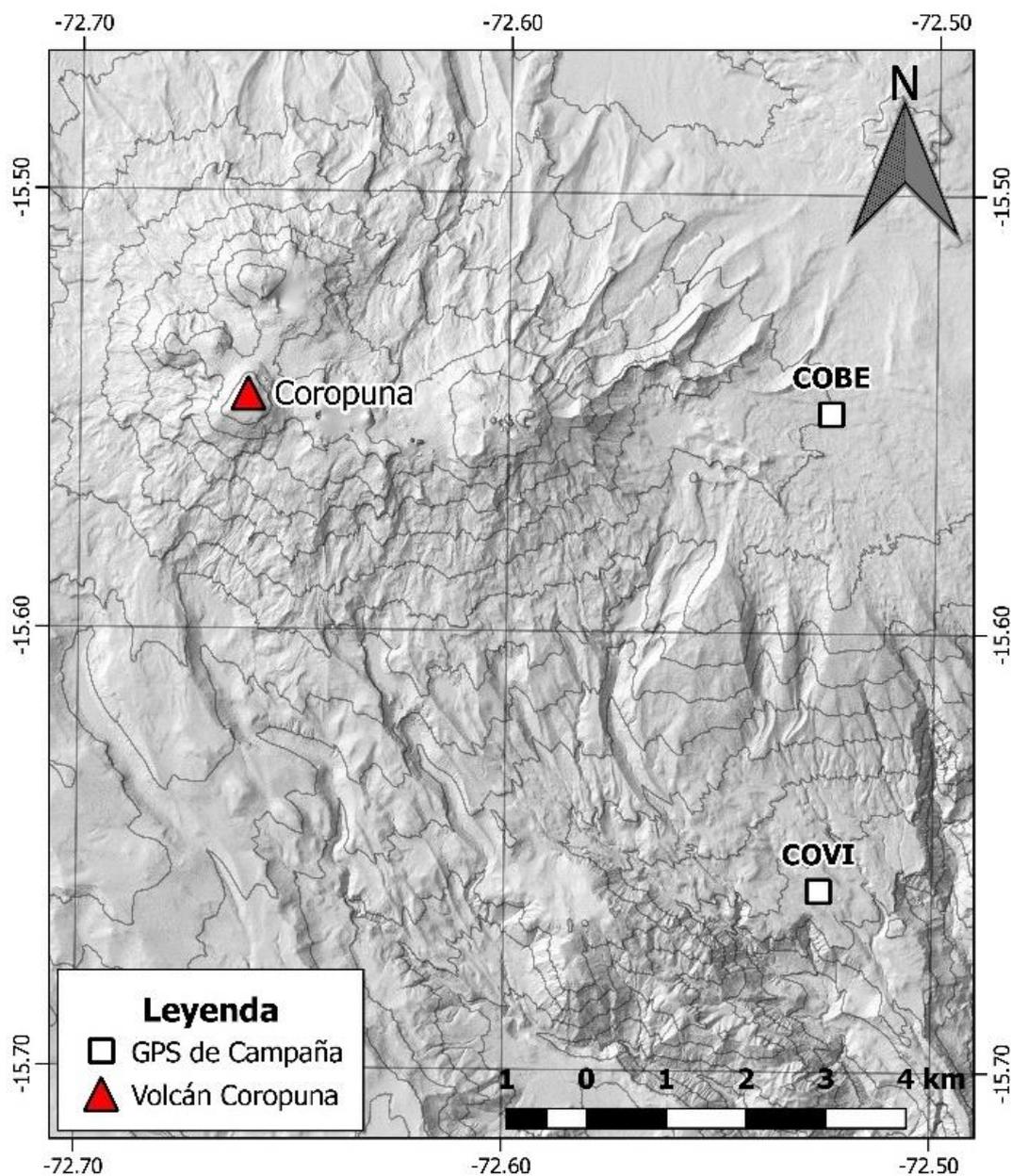


Figura 3.4. A la izquierda, red de vigilancia geodésica del volcán Coropuna durante el 2019. A la derecha fotografía de las estaciones GPS de campaña.

3.5 Procesamiento

3.5.1 GPS

El procesamiento de los datos GPS se trabajó utilizando el programa Trimble Business Center v. 3.51. Para el análisis de la deformación volcánica, se utilizó los resultados del procesamiento de las posiciones horizontales y verticales. Las soluciones finales se estimaron utilizando las órbitas finales del IGS (Servicio Internacional GNSS). Las posiciones precisas en cada componente se obtuvieron del procesamiento de la línea base entre ambas estaciones. La velocidad de deformación se estimó mediante regresión cuadrática con los resultados desde el 2012. Esta velocidad se reestimó con la velocidad angular de un polo de Euler calculado para el sur del Perú.

3.5.2 Deformación volcánica del Coropuna

La velocidad y error de los datos GPS se muestran en la Tabla 3.2. La velocidad media de las componentes horizontales está graficada mediante un vector de desplazamiento (Figura 3.5), este vector representa la magnitud y dirección de la velocidad de deformación de las estaciones GPS COBE y COVI.

Tabla 3.2. Resumen de las velocidades GPS calculadas por las estaciones GPS de campaña (COBE y COVI) hasta el 2019. Los valores están en milímetros por año (mm/año).

	Velocidad Este (Ve)	Velocidad Norte (Vn)	Velocidad Vertical (Vu)
COBE	-0.05 ± 1	-0.04 ± 0.1	0.4 ± 0.3
COVI	0.006 ± 1	0.03 ± 0.1	0.2 ± 0.3

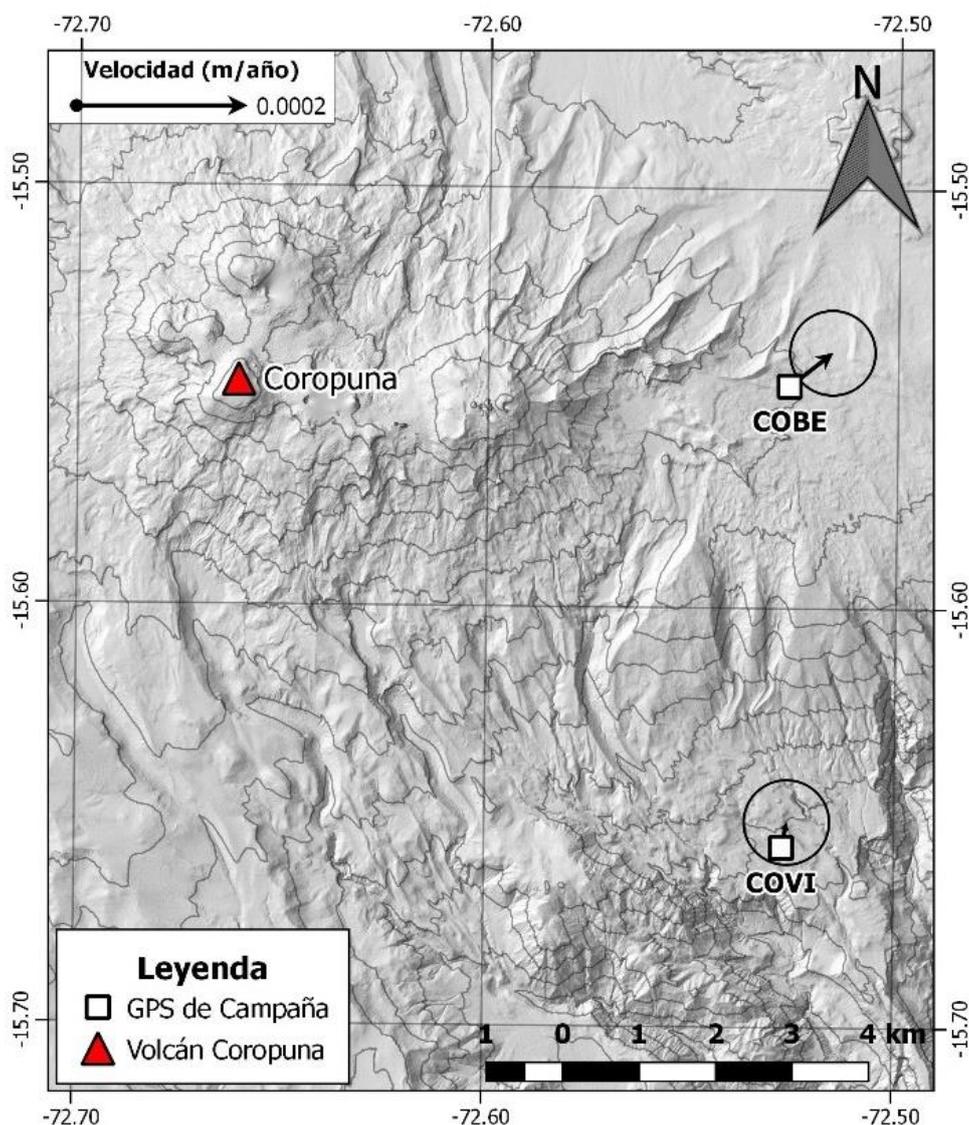


Figura 3.5. Resultados de las estaciones GPS COBE y COVI mediante vectores de desplazamiento que representan la velocidad horizontal media anual hasta el 2019.

La magnitud y dirección del desplazamiento horizontal registrado por las estaciones GPS COBE y COVI, hasta el 2019, no se asocia a algún proceso de inflación o deflación magmática. Estos resultados muestran que el volcán se encuentra en una etapa estable. Los resultados de la vigilancia de la deformación volcánica en el Coropuna no han mostrado indicios de ascensos de magma que produzcan un proceso eruptivo.

Estos resultados muestran que el volcán se encuentra en una etapa estable. Los resultados de la vigilancia de la deformación volcánica en el Misti no han mostrado indicios de ascensos de magma que produzcan un proceso eruptivo.

4 VIGILANCIA SÍSMICA

4.1 Red Sísmica volcán Misti

La red sísmica del volcán Misti durante el 2019, se desarrolló con dos estaciones sísmicas en tiempo real MST01 y MST02, la primera se tomó como estación de referencia, estas estaciones cuentan con un sensor sísmico de banda ancha, marca GURALP, modelo CMG-6TD. Las especificaciones de dicha estación se muestran en la tabla 2.1, los datos son registrados a 100 muestras por segundo por canal, en un rango de frecuencias de 30s a 100Hz.

Tabla 4.1. Equipos de vigilancia sísmica, distribuidos en diferentes sectores del volcán.

Estación	Fecha de instalación	Lugar	Sector	Componente
<i>MST01</i>	<i>15/03/2013</i>	<i>Flanco suroeste</i>	<i>Campamento Pirámide</i>	<i>3C</i>
<i>MST02</i>	<i>10/11/2017</i>	<i>Flanco norte</i>	<i>Aguada Blanca</i>	<i>3C</i>

Cada estación sísmica en tiempo real está conformada por 01 sensor sísmico y 01 digitalizador integrados, 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 2.1a y 2.1b). Estos instrumentos están debidamente protegidos de las inclemencias del tiempo y están instalados dentro de casetas metálicas, para la prevención ante posibles actos vandálicos.



Figura 4.1. Estaciones sísmicas con transmisión en tiempo real, **a).** Estación de sismología volcánica MST01, ubicada en el flanco sur y **b).** Estación de sismología volcánica MST02, ubicada en el flanco norte

4.2 Operatividad

La figura 4.2 muestra la operatividad de las estaciones (MST01 y MST02) del volcán Misti para el 2019. Las barras verticales en color rojo indican periodos en los cuales, no se registró información, debido a la falta de alimentación eléctrica; sobre todo, en los periodos de lluvia, en los cuales, el cielo permaneció nublado, por lo que el panel solar no recargó la batería de 12 voltios.

La estación en tiempo real MST02, durante el 2019 solo opero hasta el 21 de junio del 2019.

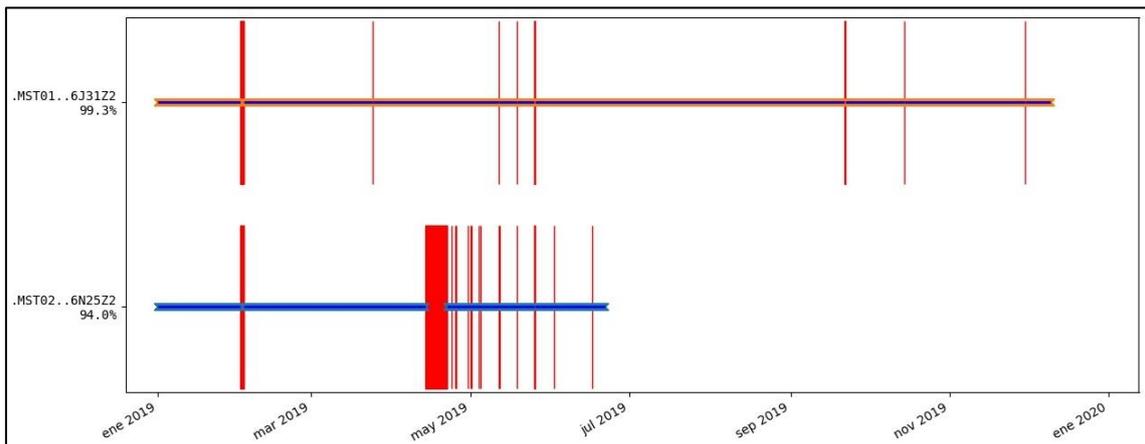


Figura 4.2. Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la red de vigilancia sísmica del volcán Misti – durante el 2019.

4.3 Procesamiento y Análisis

En general, el análisis de la actividad sísmica del volcán Misti registrada durante el año 2019, ha sido baja, con una ocurrencia de 10 sismos volcánicos por día en promedio. Sin embargo, también se han observado incrementos puntuales de varias decenas de sismos volcánicos. No obstante, esta sismicidad es propia a la de un volcán ACTIVO. Por ejemplo, en la figura 4.6, se observa la ocurrencia esporádica de eventos tipo TORNILLO durante el 2019, señal típica de un volcán activo.

4.4 Resultados

4.4.1 Señales sísmicas representativas

- **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 (Figura 4.3), Se caracterizan por tener claras llegadas de las ondas P y S y por el contenido de altas frecuencias (> 5Hz).

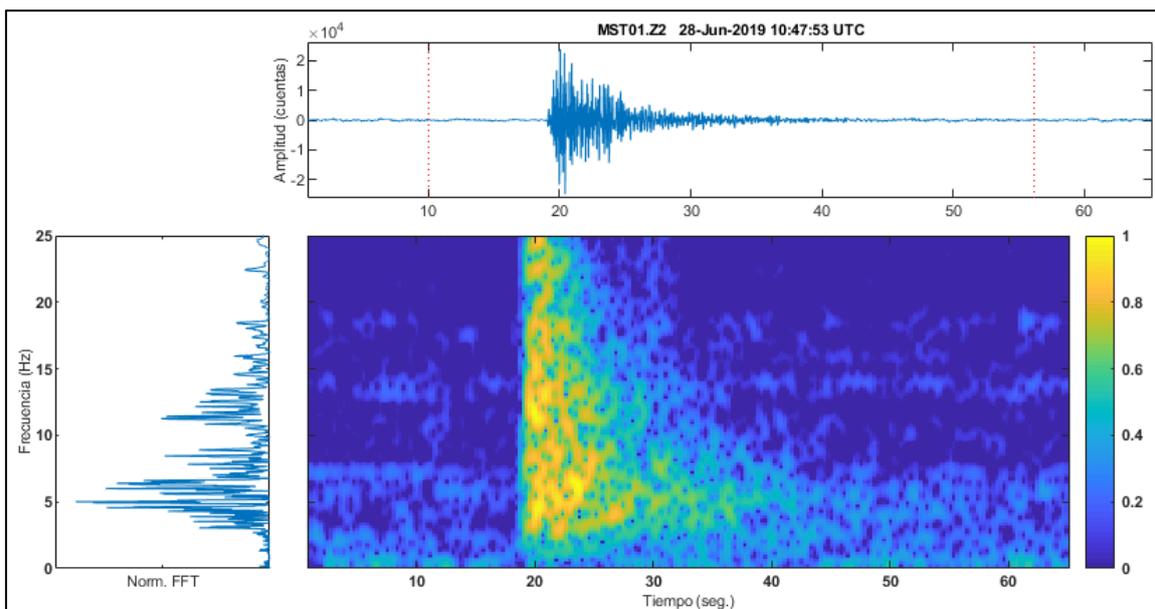


Figura 4.3. Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 28 de junio de 2019, componente Vertical.

- **Sismos de periodo largo (LP).** Son eventos asociados a procesos de la dinámica de fluidos en el sistema hidrotermal del volcán. Los eventos LP (Figura 4.4), se caracterizan por que no presentan llegadas legibles de la fase S y el contenido espectral principal, es bajo (entre 1-4 Hz).

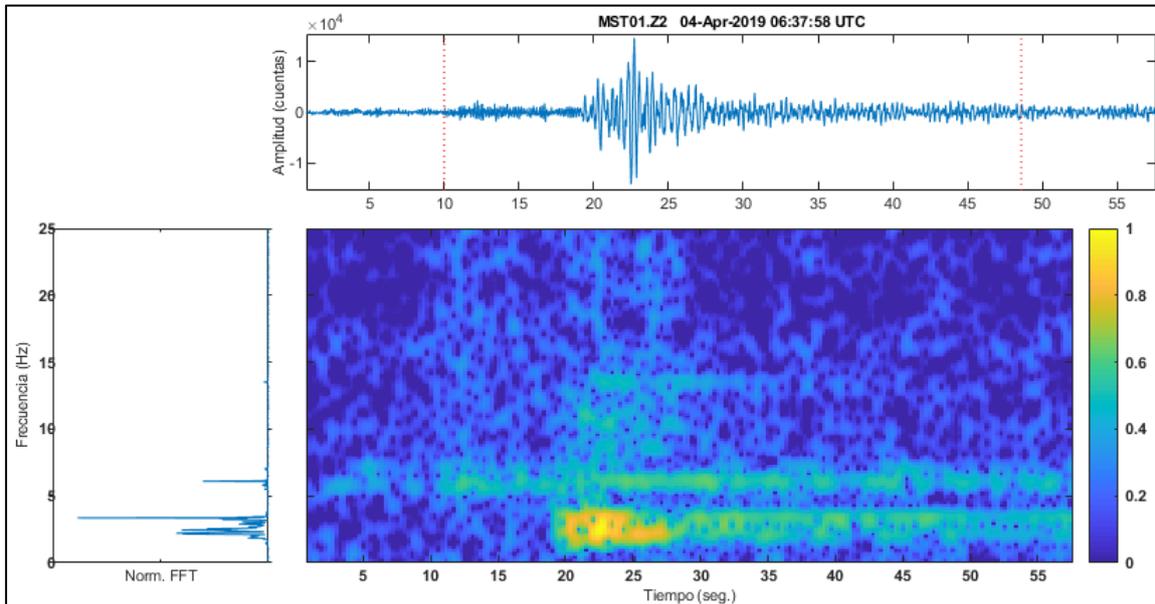


Figura 4.4. Evento Largo Periodo (LP), registrado el 04 de abril de 2019, componente Vertical.

- **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 (Figura 4.5).

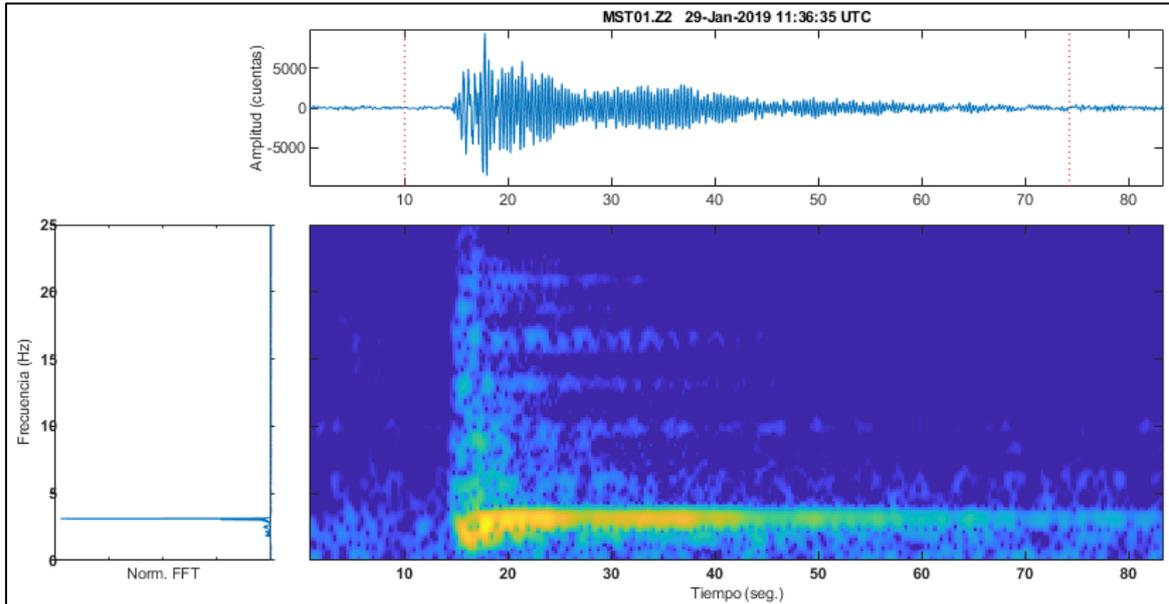


Figura 4.5. Evento Tornillo (TOR), registrado el 29 de enero de 2019, componente Vertical.

4.4.2 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 10 eventos por día, llegando a registrarse un máximo de 55 eventos el 21 de abril de 2019 (figura 4.6). Seguidamente, a una tasa esporádica, tenemos a los LP. Durante el 2019 se registraron eventos tipo Tornillo en menor proporción. Finalmente, se observa el registro de eventos de muy baja energía diaria, registrándose un máximo de 0.043 MJ el 01 de noviembre de 2019, ver figura 4.7.

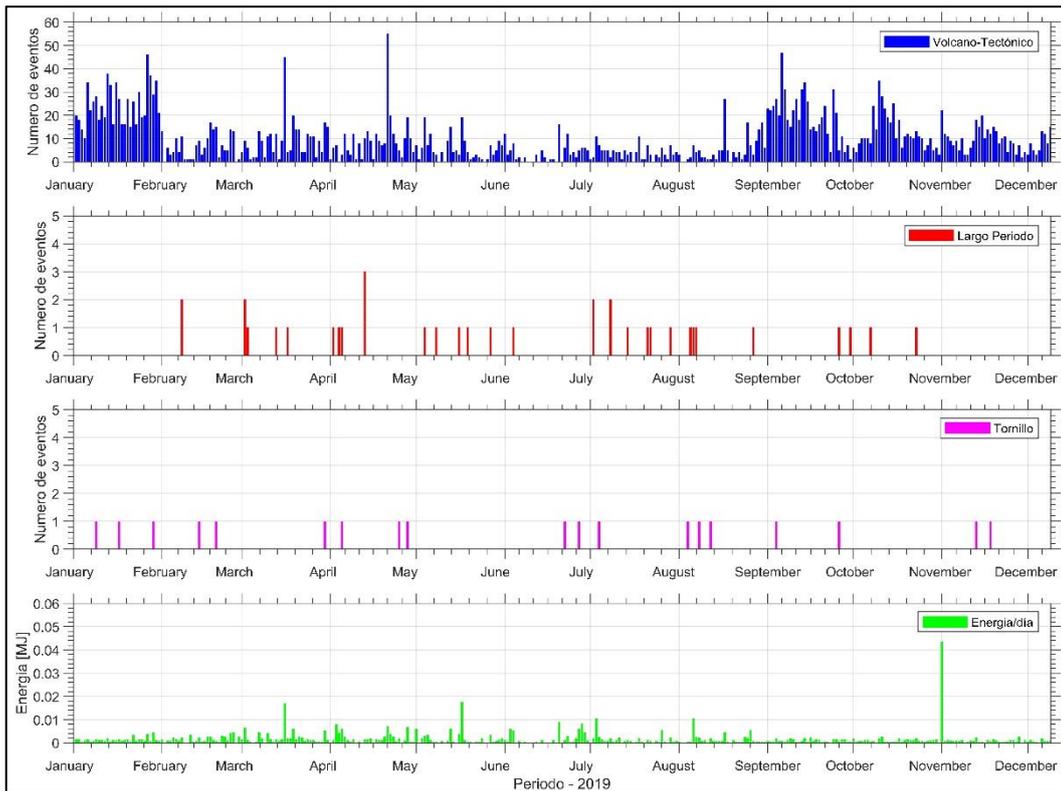


Figura 4.6. Evolución temporal de la actividad sísmica de volcán Misti por tipo de evento identificado para el periodo – 2019.

4.4.3 Energía sísmica liberada

La leve actividad sísmica del volcán Misti registrada durante el 2019, 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 0.55 MJ de energía (figura 4.7). Siendo esta energía, mínima, en comparación con el volcán Sabancaya (en alerta naranja).

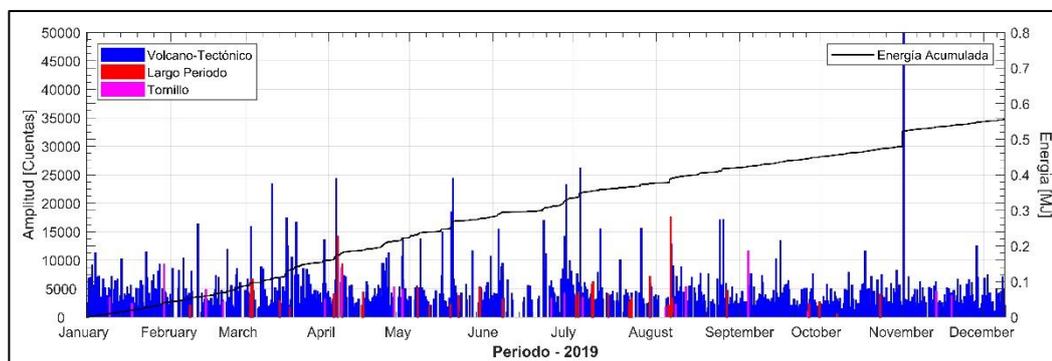


Figura 4.7. Energía sísmica liberada del volcán Misti para el 2019. VT: sismo Volcano-tectónico, asociado al fracturamiento de rocas y LP: sismo de largo periodo.

5 SENSORES REMOTOS

5.1 Red de Cámaras volcán Misti

El volcán Misti está constantemente monitoreado con una cámara óptica localizada en la oficina del INGEMMET – OVI, a una distancia aproximada de 18.3 Km del cráter del volcán y de cuya codificación se encuentra en la **Tabla 5.1**, desde aquí se viene reportando su actividad.

Tabla 5.1. Cámaras de video vigilancia, tipo coordenadas y códigos

Nombre de la cámara	tipo	Dirección respecto al volcán	Código
Oficina OVI	óptica	SO	MOVI

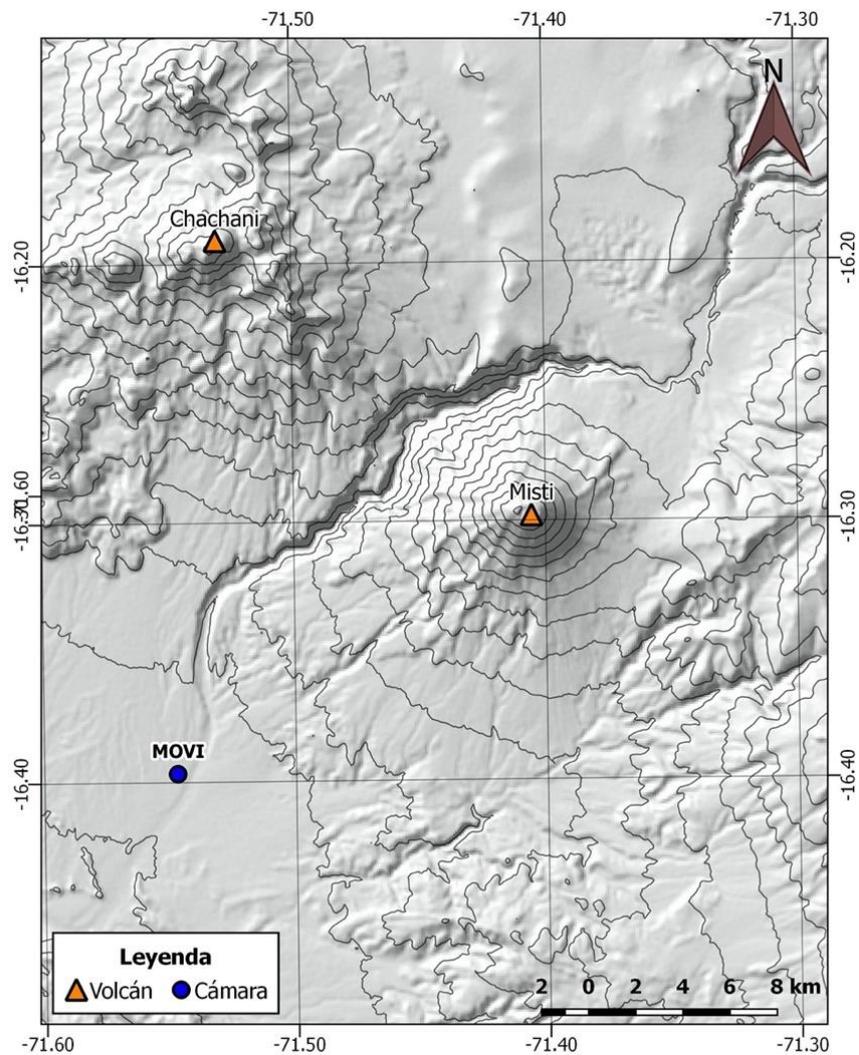


Figura 5.1. mapa de localización de la cámara óptica en el volcán Misti

5.2 Características de las Emisiones

5.2.1 Forma y ocurrencia

Actualmente la actividad del volcán Misti ha mostrado una leve actividad con emisiones de gases tenues y presentándose de forma esporádica, las alturas de las mismas no sobre pasan los 1000 metros sobre el nivel del cráter (**Figura 5.**). La coloración observada de las emisiones es blanca indicando que las emisiones presentan aerosoles y vapores de agua.

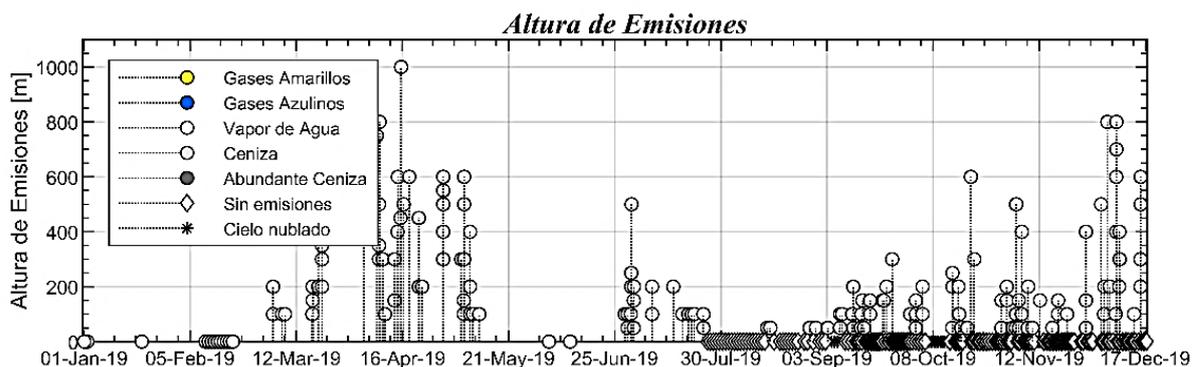


Figura 5.2. Altura de las emisiones del volcán Misti en el 2019

Durante el inicio del primer trimestre las emisiones fueron muy esporádicas y difíciles de observar debido a la nubosidad de la época (**Figura 5.44**), más para el mes de marzo las emisiones alcanzaron los 500 metros sobre el cráter sin presentar cambios significativos (**Figura 5.25**).

En el segundo trimestre, específicamente en el mes de abril y mayo el Misti presentó mejor visibilidad observándose emisiones muy leves con dirección Este (E), las cuales alcanzaron como máximo 1000 metros sobre el cráter (**Figura 5.636** y **Figura 5.7**), los siguientes días hasta finalizar este trimestre no se presentaron emisiones.

El tercer trimestre se observaron emisiones de aerosoles de gases y vapor de agua con alturas de hasta 300 metros sobre el cráter, no registrándose cambios sobre la estructura del volcán.

Para el último trimestre el volcán Misti no ha presentado mayores cambios en su actividad, con emisiones de aerosoles y vapor de agua que no sobre pasan los 600 metros sobre el cráter como se puede observar en las **Figura 5.84** y **Figura 5.959**.

Toda esta actividad ha permitido mantener la alerta Verde en este Volcán para el presente año 2019.

5.2.2 Dirección predominante

Las direcciones de dispersión de las diferentes emisiones se ven influenciadas por la dirección de los vientos, los cuales son monitoreados por el SENAMHI. Basados en esta información y los datos de registro de las imágenes de las cámaras, se ha podido determinar la dirección preferencial de las emisiones (**Figura 5.3**) siendo esta NNE – SSO y NO – SE

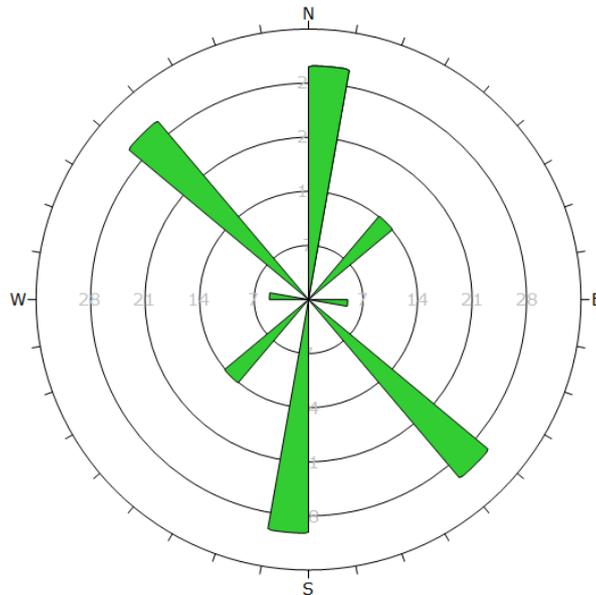


Figura 5.3. Diagrama de rosetas que muestra la dirección de las emisiones preferencialmente NNE – SSO y NO - SE

5.2.3 Imágenes representativas de emisiones fumarólicas

De la Figura 5.4 a la Figura 5.959 se muestran vistas de las emisiones del volcán Misti más representativas en cuanto a sus características de color y altura para el año 2019.



Figura 5.4. Vista 22 de febrero del 2019, Misti y nubes que durante la época de verano cubren el volcán no permitiendo la visualización de la cima del volcán y las emisiones.



Figura 5.2. Vista del 5 de marzo del 2019 donde se registran emisiones aerosoles de gases y vapor de agua con altura de 500 msc.



Figura 5.63. Vista del 15 de abril del 2019 donde se registran emisiones aerosoles de gases y vapor de agua con altura de hasta 1000 msc.



Figura 5.7. Vista del 06 de mayo del 2019 donde se registran emisiones aerosoles de gases y vapor de agua con altura de hasta 600 msc.



Figura 5.84. Vista del 20 de octubre del 2019 donde se registran emisiones aerosoles de gases y vapor de agua con altura de hasta 600 msc y dirección Norte.



Figura 5.95. Vista del 04 de noviembre del 2019 donde se registran emisiones aerosoles de gases y vapor de agua con altura de hasta 500 msc. En dirección NE.

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Volcán Misti

Durante el año 2019, en el volcán Misti presentó niveles bajos de actividad con leves emisiones de gases sobre la cumbre del volcán.

De la Fig. 6.1, se puede apreciar el comportamiento de cada parámetro en función del tiempo (a. sismicidad y la energía sísmica acumulada; b. Altura de las emisiones y c. Deformación; a lo largo del 2019, la sismicidad estuvo principalmente predominada por sismos de baja frecuencias, los cuales, se asociaron al movimiento de fluidos (gases, líquidos), lo cual, concuerda con la actividad superficial, que se caracterizó por la presencia de fumarolas de gases de hasta 800m de altura, la dirección predominante de estas emisiones fueron hacia Norte, Noroeste, Sur y Sureste, en cuanto al monitoreo de la composición de aguas, destacan la estaciones CHV, JES, UMA y TUX, donde se puede apreciar que no existen variaciones importantes. Respecto al monitoreo geodésico, los resultados indican que no existen cambios importantes que estuvieron asociados a incrementos en la actividad del volcán.

Por lo tanto, del análisis y correlación de todos estos parámetros, se concluye que el volcán Misti aún continúa dentro de niveles bajos de actividad.

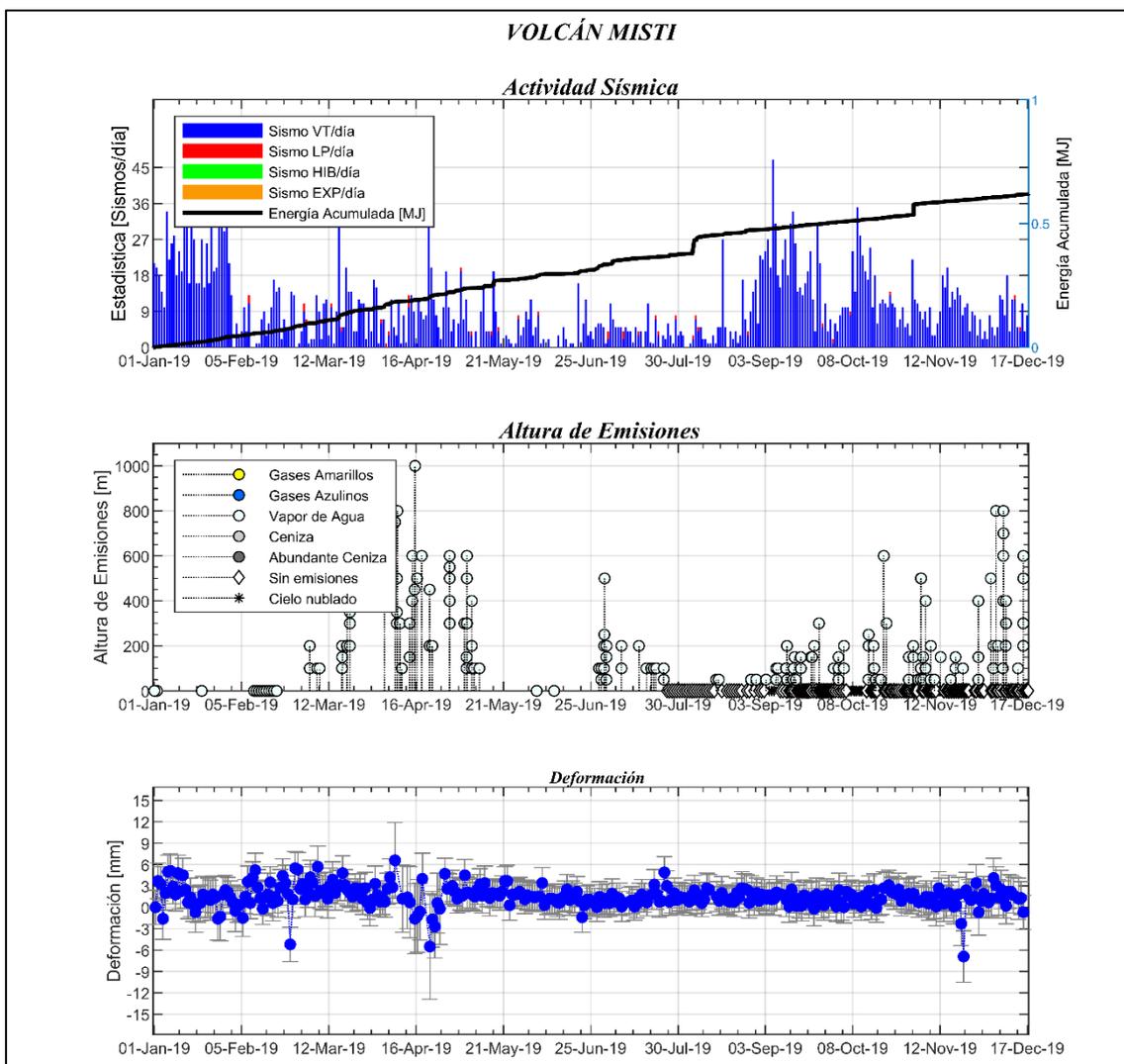


Figura 6.1. Parámetros de vigilancia del volcán Misti, 2019

6.2 Volcán Coropuna

Durante el año 2019, en el volcán Coropuna presento niveles bajos de actividad, los parámetros estudiados muestran que el monitoreo de la composición de aguas, de las fuentes CR1, CR2, CR3, CR4, CR5 y CR6, donde se puede apreciar que no existen variaciones importantes. Respecto al monitoreo geodésico, los resultados indican que no existen cambios importantes que estuvieron asociados a incrementos en la actividad del volcán.

Por lo tanto, del análisis y correlación de todos estos parámetros, se concluye que el volcán Coropuna aún continua dentro de niveles bajos de actividad.

7 CONCLUSIONES

- La evaluación sismo volcánica para el volcán Misti, muestra que la principal actividad registrada durante el 2019, estuvo dominado por los sismos tipo Volcano Tectónicos – VT, seguidos de eventos Largo Periodo – LP y esporádicamente eventos tipo Tornillo (señal típica a la de un volcán activo). No obstante, esta sismicidad corresponde un volcán activo, los valores de la energía liberada demuestran que dicha actividad, es muy baja.
- Podemos mencionar que existe una relación de los procesos de deformación y los cambios en la actividad volcánica, a través de observaciones continuas y mayor número de equipos mediante la técnica GNSS en cada volcán, pero esta es muy compleja de establecer con una única estación caso Misti y con estaciones temporales caso Coropuna.
- El monitoreo permanente de los cambios en la morfología del volcán Misti mediante equipos GNSS, deben de complementarse con un cierto número de equipos que permitan realizar un diagnóstico de la dinámica y del estado del volcán.
- La evaluación temporal de los cambios en la dinámica superficial del volcán Coropuna durante el 2019, donde los resultados claramente no corresponde a cambios en la superficie del volcán, lo que significa que no hay efecto volcánico en los resultados GNSS, los desplazamientos corresponden al efecto del movimiento tectónico generado por la placa Sudamericana.
- Las emisiones fumarólicas del volcán Misti, observados durante el 2019, estuvieron constituidas principalmente por vapor de agua, alcanzaron alturas máximas de hasta 1000 m sobre el cráter. La dirección predominante de estas emisiones fue hacia el sur.
- El monitoreo de fuentes termales no muestra cambios significativos en el sistema hidrotermal de los volcanes Misti y Coropuna.

8 RECOMENDACIONES

- Considerando la peligrosidad del volcán Misti respecto de la ciudad de Arequipa, es necesario ampliar y mejorar nuevas estaciones de evaluación del volcán.
- Es conocido que el volcán Misti y Coropuna son volcanes activos, por lo tanto, es necesario implementar y practicar planes de contingencia ante una probable reactivación del volcán. Para ello se debe tener en cuenta el mapa de peligros de ambos volcanes.
- Mejorar las vías de acceso a cada volcán.
- Con la seguridad de contar con un monitoreo eficiente y adecuado de los volcanes Misti y Coropuna, es de necesidad intensificar los planes de turismo para el desarrollo de Arequipa.
- Implementar por lo menos con una estación de monitoreo GNSS permanente adicional.
- Es de importancia ampliar los puntos de evaluación sean de monitoreo temporal y/o continua, con el objetivo de evaluar las condiciones de cambio en la dinámica interna del volcán.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Barriga, V. (1951), Los Terremotos de Arequipa (1582 – 1868) Editorial La Colmena S.A.
2. Chávez, J. (1992). La erupción del Volcán Misti. Pasado Presente y Futuro. Imprenta Zenit Arequipa
3. 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.
4. Dzurisin, D. (2003). A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle. *Reviews of Geophysics*, 41(1).
5. Herring, T.; Floyd, M.; King, R. & McClusky, S. (2010). Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology.
6. Masías, P. (2008). Estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales y frías asociadas al volcán Misti, Póster, 75 Congreso Iberoamericano de Química, Cusco.
7. Masías, 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.
8. 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.
9. Ramos D. (2018) Evaluación de la actividad de los volcanes Misti y Coropuna, Informe Técnico N°A6950-INGEMMET
10. 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.
11. Thouret et al. (2002). Late Pleistocene and Holocene tephrosatigraphy and chronology in southern Perú. *Sociedad Geológica del Perú*, 93: 45-61.
12. Úbeda, J. et al (2012). Glacial and volcanic evolution on Nevado Coropuna (Tropical Andes) based on cosmogenic ³⁶Cl surface exposure dating. *EGU2012-3683-2*.
13. Úbeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales). PhD Thesis. Universidad Complutense de Madrid. 594 pp.
14. Williams, S.; Bock, Y.; Fang, P.; Jamason, P.; Nikolaidis, R.; Prawirodirdjo, L. & Johnson, D. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).
15. Zamacola y Jáuregui, J.D. (1804). Apuntes para la historia de Arequipa: Primer festival del libro arequipeño: Arequipa, Edición 1958, 15 pág.