

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6952

MONITOREO DE LOS VOLCANES UBINAS, TICSANI (MOQUEGUA), TUTUPACA, YUCAMANI Y PURUPURUNI (TACNA)

Región Moquegua, Tacna
Provincia Gral. Sánchez Cerro, Candarave
Distrito Ubinas, Calacoa y Candarave



OCTUBRE
2019

ÍNDICE

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
1. Capítulo I: Generalidades	7
1.1. Ubicación de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca Yucamani y Purupuruni	7
1.2. Accesibilidad a los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni	8
1.3. Objetivos del informe.....	8
2. Capítulo II: Monitoreo del volcán Ubinas	9
2.1. Introducción	9
2.2. Equipos empleados en el monitoreo del volcán Ubinas	9
2.3. Monitoreo visual	12
2.3.1. Operatividad de las cámaras del volcán Ubinas.....	12
2.3.2. Características de las emisiones.....	12
2.4. Monitoreo Geoquímico.....	18
2.4.1. Monitoreo de fuentes termales	18
2.4.2. Monitoreo del SO ₂ en las plumas volcánicas	20
2.5. Monitoreo geodésico del Ubinas	22
2.5.1. Implementación de la red de monitoreo de deformación del Ubinas.....	22
2.5.2. Adquisición y procesamiento de datos	23
2.5.3. Resultados del monitoreo GNSS en el volcán Ubinas	24
2.5.4. Resultados del monitoreo EDM del volcán Ubinas	26
2.6. Monitoreo sísmico del Ubinas.....	28
2.6.1. Sismicidad observada	28
2.6.2. Estadística por tipo de evento.....	30
2.6.3. Energía sísmica del Ubinas	31
2.6.4. Localización de eventos sísmicos tipo VT.....	31
2.6.5. Cambios de velocidad y cambios estructurales	33
2.7. Discusión	36
3. Capítulo III: Monitoreo del volcán Ticsani	37
3.1. Introducción	37
3.2. Equipos empleados en el monitoreo del volcán Ticsani	37
3.3. Monitoreo visual del Ticsani	38

3.4.	Monitoreo geoquímico del Ticsani.....	42
3.4.1.	Medición de temperatura en las fumarolas.....	42
3.4.2.	Monitoreo de fuentes termales del Ticsani	44
3.5.	Monitoreo Geodésico del Ticsani.....	45
3.5.1.	Mediciones GNSS en el Ticsani.....	45
3.5.2.	Mediciones Electrónica de Distancia – EDM en el Ticsani	46
3.6.	Monitoreo sísmico del Ticsani.....	47
3.6.1.	Actividad sísmica observada	48
3.6.2.	Estadística por tipo de evento.....	48
3.6.3.	Energía sísmica liberada	48
3.6.4.	Cambios de velocidad y cambios estructurales	50
3.7.	Estudios geo-eléctricos en el Ticsani.....	52
3.7.1.	Perfiles de Potencial Espontáneo (SP).....	52
3.8.	Discusión	53
4.	Capítulo IV: Monitoreo del volcán Tutupaca.....	54
4.1.	Introducción	54
4.2.	Monitoreo visual del Tutupaca	54
4.3.	Monitoreo geoquímico del Tutupaca.....	55
4.3.1.	Monitoreo de fuentes termales en el Tutpaca	55
4.4.	Monitoreo geodésico del Tutupaca	56
4.4.1.	Análisis de resultados de las mediciones GNSS	57
4.5.	Discusión	58
5.	Capítulo V: Monitoreo del volcán Yucamani	60
5.1.	Introducción	60
5.2.	Monitoreo visual del Yucamani.....	60
5.3.	Monitoreo geoquímico del Yucamani.....	63
5.3.1.	Muestreo de fuentes termales del Yucamani	63
5.3.2.	Las fumarolas del Yucamani	65
5.4.	Estudios geo-eléctricos en el Yucamani	65
5.4.1.	Resultados de las mediciones SP en el volcán Yucamani	67
5.5.	Discusión	67
6.	Capítulo VI: Monitoreo del volcán Purupuruni	69
6.1.	Introducción	69
6.2.	Observaciones de campo	69
6.3.	Muestreo geoquímico	70
6.4.	Resultados del análisis químico de las fuentes termales del Purupuruni.....	71

6.5.	Discusión	73
7.	CONCLUSIONES	74
8.	RECOMENDACIONES	75
9.	BIBLIOGRAFÍA	76

RESUMEN

Los Andes representan la cordillera continental más larga del mundo con más de 7,000 km a lo largo de la costa occidental de América del Sur. Esta cordillera se formó por la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa continental Sudamericana. Esta subducción actualmente se produce a una velocidad de 63 mm/año (Norabuena et al., 1998; Kendrick et al., 2003; Mamani et al., 2008). Este complejo sistema de subducción es la responsable de la ocurrencia de sismos y volcanes en nuestro país. El estudio de éstos fenómenos, su comprensión y entendimiento, permitirá a las instituciones científicas, proveer información a las autoridades y población para una correcta toma de decisiones.

Si bien, el INGEMMET dispone de información visual, geodésica, geoquímica, microsísmica de los volcanes peruanos desde hace varios años, en este trabajo se expone lo correspondiente al año 2018. Toda información presentada en éste trabajo es verificable en nuestra base de datos, la cual es actualizada permanentemente. Asimismo, la información generada en el análisis preliminar, es colgada en nuestra página web institucional: ovi.ingemmet.gob.pe.

El volcán Ubinas, recientemente, tuvo dos episodios eruptivos 2006-2009 y 2013-2017. Ambos episodios consistieron de pequeñas explosiones con emisiones de gases y ceniza que causaron daños a la salud de las personas y a los cultivos. Durante el 2018, éste volcán se mantuvo en calma y con las variables de monitoreo estables. Sin embargo, no es recomendable ascender a su cráter.

El volcán Ticsani, en los últimos años ha manifestado una intranquilidad volcánica, la cual ha sido comunicada a las autoridades. Ésta intranquilidad volcánica ha consistido de enjambres sísmicos y un calentamiento gradual del edificio volcánico, primero de 1 °C entre el 2006 y el 2012, y de 6 °C entre 2015 y 2017. En éste año, este calentamiento, aparentemente se detuvo, sin embargo, es recomendable seguir monitoreándolo para conocer su evolución.

En cuanto a los volcanes Tutupaca, Yucamani y Purupuruni, dada su lejanía, pues se encuentran en el departamento de Tacna, requieren de mayor logística, por lo tanto, sólo son evaluados una vez por año. Por lo pronto, dada su poca actividad volcánica, no requiere mucha atención.

INTRODUCCIÓN

Este informe, titulado “Monitoreo de los volcanes Ubinas, Ticsani (Moquegua), Tutupaca, Yucamani y Purupuruni (Tacna)”, es uno de los productos de la Actividad02 (Act02): Monitoreo geofísico, geodésico, geoquímico y visual de los volcanes activos en el sur del Perú. Esta actividad, se desarrolla en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), que opera bajo la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, dentro del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico- INGEMMET. Asimismo, esta actividad cumple una de las principales funciones del INGEMMET, que es el estudio de peligros geológicos, establecido en su ROF institucional. Además, está enmarcado en el Programa Presupuestal 0068 (PPR-068): Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres, para el 2018, con el Producto 3000558: Zonas geográficas con información sobre peligros por sismos, volcanes y fallas; con la unidad de medida tipo estudio.

En ese contexto, en este trabajo se presenta la información recabada durante el año 2018, en los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni. Parte de esta información llega a las instalaciones del OVI en Arequipa, ubicado en Barrio Magisterial 2B-Yanahuara. Otra parte de la información demanda de visitas in situ para su muestreo y recuperación de información almacenada en las memorias internas de los equipos de campo, tal como lo veremos en los siguientes capítulos.

1. Capítulo I: Generalidades

1.1. Ubicación de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca Yucamani y Purupuruni

Los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni pertenecen a la ZVC de los andes (Figura 1.1). Sus coordenadas y ubicación política se muestran en el Cuadro 1.1.

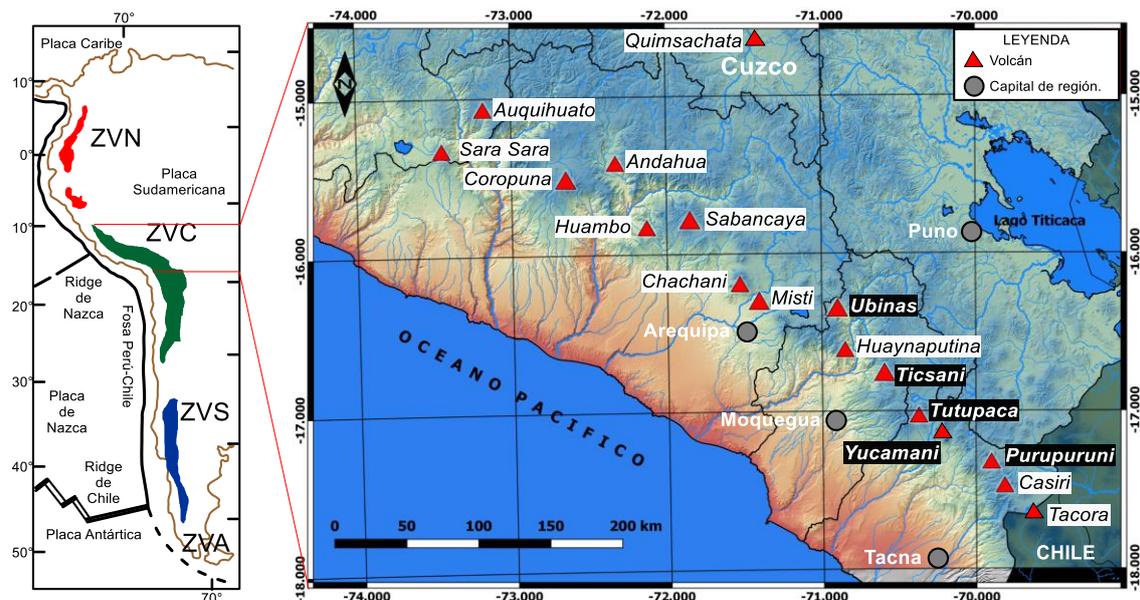


Figura 1.1. Zonas volcánicas de Sudamérica y volcanes activos y potencialmente activos del Perú.

Cuadro 1.1. Coordenadas y referencias de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni.

Volcán	Coordenadas		Región	Provincia	Distrito	Referencia
	Latitud	Longitud				
Ubinas	16,34°	70,89°	Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	68 km al este de Arequipa. 93 km al norte de Moquegua.
Ticsani	16.77°	70.60°	Moquegua	Mariscal Nieto	San Cristóbal	107 km al sureste de Arequipa 60 km al noreste de Moquegua
Tutupaca	17.02°	70.36°	Tacna	Candarave	Candarave	65 km al noreste de Moquegua 108 km noroeste de Tacna
Yucamani	17.18°	70.19°	Tacna	Candarave	Candarave	80 km al este de Moquegua 90 km al norte de Tacna
Purupuruni	17.28°	69.89°	Tacna	Tarata	Ticaco	112 km al este de Moquegua 87 km al noroeste de Tacna

1.2. Accesibilidad a los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni

Los accesos a los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni, cuentan con vías asfaltadas, en sus primeros tramos, luego, en los tramos finales, continúan con trochas carrozables que, en épocas de lluvia, se tornan en peligrosas y difíciles de transitar. Si bien, el acceso a los volcanes se puede dar desde diferentes ciudades, en este informe describiremos las rutas más frecuente empleadas por nuestras brigadas de campo.

Se puede acceder al volcán Ubinas, desde la ciudad de Arequipa, empleando la carretera asfaltada al distrito de Chiguata, y que luego continúa como carretera afirmada hacia el distrito de Ubinas, pasando por el pueblo de Salinas Moche y por las faldas del volcán. A la altura del caserío de Phara, antes de bajar hacia el valle de Ubinas, un desvío hacia el noroeste permite bordear al volcán por el sector oeste. Luego, a la altura de la laguna Piscococha, otro desvío hacia el este, conduce, mediante vehículo 4x4, hasta los 5000 msnm; desde donde se asciende a pie al borde de la caldera del Ubinas a 5400 msnm.

A los volcanes Ticsani, Tutupaca y Yucamani, se puede acceder desde la ciudad de Moquegua, mediante la carretera Binacional Ilo-Desaguadero. Sobre esta carretera, un desvío carrozable, a la altura del campamento de Humahalso del Proyecto Pasto Grande, parte hacia el norte, y conduce al distrito de San Cristóbal, pasando por las lagunas Toro Bravo y Camaña, y por el flanco este del volcán Ticsani; a partir de este último punto, una trocha permite ascender al Domo 3 del volcán (5000 msnm).

Retomando la carretera Binacional, y pasando el pueblo de Huaitire, una trocha, hacia el sur, conduce al distrito de Candarave. En su trayecto, se pasa por los volcanes Tutupaca y Yucamani.

Finalmente, el acceso al volcán Purupuruni es siguiendo la carretera asfaltada que une la ciudad de Tacna con el Penal de Challapalca-Puno, pasando el poblado de Tarata, se asciende al altiplano, la carretera pasa junto a los domos de lava del volcán.

1.3. Objetivos del informe

- Informar la situación actual de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni.
- Dar a conocer a la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, los trabajos que realiza la Actividad 02, en los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni durante el presente año.
- Recordar a las autoridades y población en general, que los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni, son activos y representan alto y mediano riesgo.

2. Capítulo II: Monitoreo del volcán Ubinas

2.1. Introducción

El Ubinas es considerado uno de los volcanes más activos del Perú. Su último proceso eruptivo ocurrió entre septiembre del 2013 y marzo del 2017. Esta erupción presentó su mayor apogeo en abril del 2014, y fue disminuyendo gradualmente con el tiempo. La última explosión se produjo el 24 de enero del 2017. Esta erupción se caracterizó por presentar pequeñas explosiones con eyección de bombas y emisiones de gases y ceniza que afectaron a la población a un radio de 30 km. Durante el 2018, la actividad volcánica del Ubinas fue mínima, tal como se describió en el informe anual correspondiente a ese año. Actualmente se encuentra en alerta color verde.

2.2. Equipos empleados en el monitoreo del volcán Ubinas

Durante el 2018, el INGEMMET ha centrado sus trabajos sobre la base de cuatro técnicas de monitoreo: visual, geoquímico, geodésico y sísmico. La Figura 2.1 muestra la ubicación de la red de instrumentos instalados en el volcán y cuyos datos fueron empleados para la elaboración de este informe.

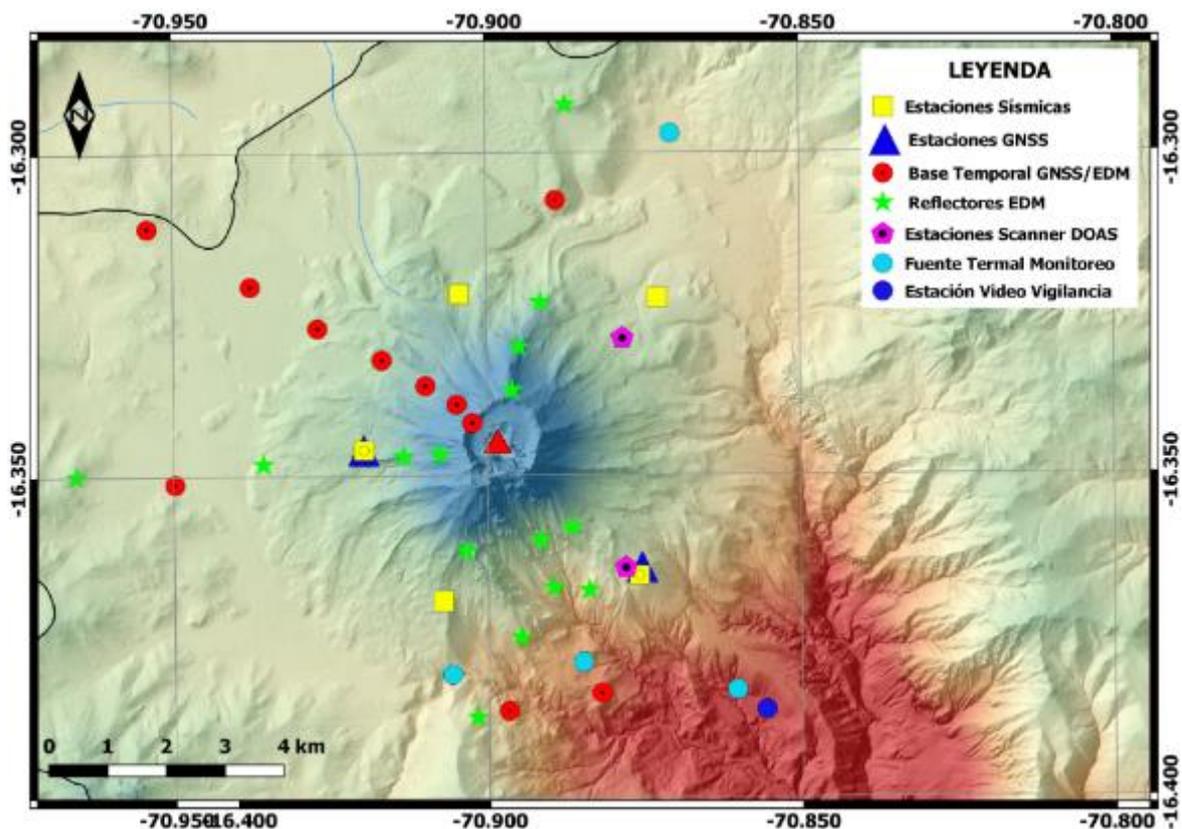


Figura 2.1. Red de instrumentos empleados para el monitoreo del volcán Ubinas.

Durante el 2018, el INGEMMET mantuvo ocho equipos con transmisión de información en tiempo real desde el volcán al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, en la

ciudad de Arequipa. El Cuadro 2.1, muestra el código de campo, las coordenadas geográficas y la referencia de éstos equipos.

Cuadro 2.1. Instrumentos empleados en el monitoreo del volcán Ubinas con transmisión en tiempo real.

Método	Instrumento	Código	Latitud	Longitud	Referencia
Visual	Cámara AXIS. Modelo 1765-LE	UBN1	16.18°	71.06°	Municipalidad de San Juan de Tarucani
		UBN2	16.38°	70.85°	Municipalidad de Ubinas
Geoquímica	Escáner DOAS	UBD1	16.38°	70.85°	Flanco noreste del volcán
		UBD2	16.32°	70.87°	Flanco suroeste del volcán
Geodesia	GPS CORS-JAVAD	UBHU	16.33°	70.86°	Permanente
	GPS CORS-Trimble, Net-R9	UBGW	16.36°	70.91°	
Sísmica	Sismómetro GURALP CMG-6TD	UBN02	16.36°	70.87°	Flanco suroeste del volcán
		UBN04	16.34°	70.91°	Flanco oeste

Por otro lado, gran parte de la información de monitoreo, es captada por equipos que no cuentan con sistemas de transmisión en tiempo real (Cuadro 2.2), por lo tanto, esta información es almacenada automáticamente en las memorias internas de los instrumentos de campo. El backup de ésta información y el muestreo de aguas termales, se realizan durante las brigadas de trabajo en campo.

Las fuentes termales CHI, ISP, PH1, PH2, HUA y CHF, son muestreadas dos veces por año, la fuente UBT, gracias al apoyo de la municipalidad de Ubinas, es muestreada 2 veces por semana. Las mediciones con EDM se realizan desde las bases UBHY, UBQE, UBPI y UBCH, con una frecuencia de seis veces al año. La estación de deformación UBGW y las estaciones sísmicas UBN05, UBN08 y UBN11, registran información en modo continuo. Finalmente, las estaciones GPS UPGB, UPG1, UPG2, UPG3, UPG4, UPG5 y UPG6, son medidas dos veces al año.

Cuadro 2.2. Instrumentos empleados en el monitoreo del volcán Ubinas sin transmisión de información en tiempo real.

Método	Instrumento/muestreo	Código	Latitud	Longitud	Referencia	Frecuencia de registro
Geoquímica	Muestreo in situ	UBT	16.38°	70.86°	Fuente termal	2/semana
		CHI	16.37°	70.88°		2/año
		ISP	16.38°	70.90°		
		PH1	16.32°	70.85°		
		PH2	16.32°	70.85°		
		HUA	16.45°	70.81°		
		CHF	16.38°	70.86°		
Geodesia	Prisma Topcon para medición con EDM	UPW0	16.34°	70.96°	Perfil Oeste	6/año
		UPW1	16.34°	70.90°		
		UPW2	16.34°	70.91°		
		UPW3	16.34°	70.92°		
		UPW4	16.34°	70.93°		
		UPN0	16.29°	70.88°	Perfil Norte	
		UPN1	16.33°	70.89°		
		UPN2	16.33°	70.89°		
		UPN3	16.32°	70.89°		
		UPS1	16.36°	70.90°	Puntos de monitoreo en el sector Sur	
		UPS2	16.36°	70.89°		
		UPS3	16.35°	70.88°		
		UPS4	16.37°	70.89°		
		UPS5	16.36°	70.88°		
	UPS6	16.36°	70.88°			
	UPS0	16.38°	70.90°			
	Estación base EDM-Trimble, P9	UBHY	16.38°	70.89°	Huayrapata	
		UBQE	16.38°	70.88°	Querapi	
		UBPI	16.35°	70.94°	Piscococha	
		UBCH	16.30°	70.88°	Chimín	
GPS CORS-Trimble, R7	URGN	16.33°	70.91°	Permanente	Continuo	
GPS-Trimble R6, R7	UPGB	16.31°	70.95°	Perfil NW	2/año	
	UPG1	16.34°	70.90°			
	UPG2	16.33°	70.90°			
	UPG3	16.33°	70.90°			
	UPG4	16.33°	70.91°			
	UPG5	16.32°	70.92°			
	UPG6	16.32°	70.93°			
Sísmica	Sismómetro GURALP CMG-6TD	UBN05	16.32°	70.90°	Flanco N.	Continuo (100 Hz)
		UBN08	16.36°	70.90°	Flanco SW.	
		UBN11	16.32°	70.87°	Flanco NE.	

2.3. Monitoreo visual

El INGEMMET dispone de información visual del Ubinas desde el año 2005. Los primeros datos, tales como: fecha y hora de inicio, altura, color, densidad, forma y dirección del desplazamiento de las columnas eruptivas, eran registrados por un observador en campo y comunicados mediante teléfono satelital al INGEMMET-Arequipa. Desde el año 2014, el registro visual se realiza con cámaras de vigilancia (UBN1 y UBN2). Éstas cámaras registran imágenes del volcán cada 30 segundos, las cuales son publicadas en la página web institucional, y consultadas por el COER Moquegua.

2.3.1. Operatividad de las cámaras del volcán Ubinas

Durante el 2018, la operatividad de las cámaras de vigilancia UBN1 y UBN2 (Figura 2.2), ha tenido una eficacia del 60 al 70%. La pérdida de información en ambos casos fue por problemas en el sistema de transmisión. La información de éstas cámaras es transmitida vía internet, desde su ubicación en las municipalidades hacia el INGEMMET-Arequipa. El servicio de internet es proporcionado por las municipalidades y por lo general, es poco eficiente.

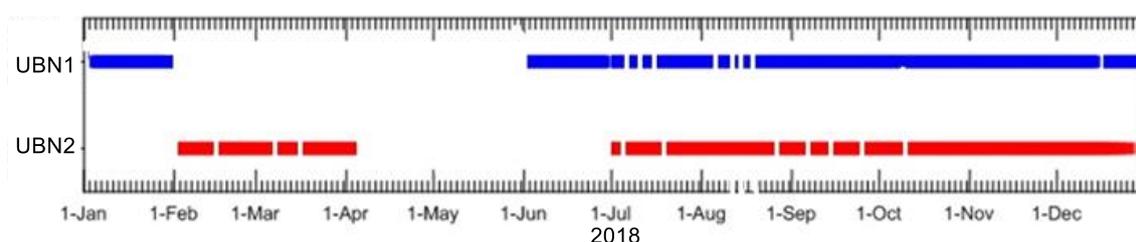


Figura 2.2. Operatividad de las cámaras de monitoreo visual del volcán Ubinas durante el 2018.

2.3.2. Características de las emisiones

➤ Forma y ocurrencia

Durante el año 2018, el volcán Ubinas presentó una actividad fumarólica esporádica (Figura 2.3), con emisiones de gases y vapor de agua de color blanco y azulino. Estas emisiones, generalmente se producen y concentran en el interior del cráter del volcán; rara vez sobrepasan los bordes de la caldera, y si lo hacen, son fácilmente dispersados por el viento.

Durante el primer trimestre, a pesar de los problemas de transmisión y la escasa visibilidad a consecuencia de la nubosidad propia del periodo de lluvias (noviembre a marzo), las columnas fumarólicas se elevaron hasta los 650 m sobre el cráter, según se indica en el Reporte Semanal N° RSUBN-08-2018/OVI-DGAR-INGEMMET (19 al 25 de febrero del 2018). En el segundo trimestre, las emisiones cesaron drásticamente, sin embargo, se registró una altura máxima de 900 m sobre el cráter según el RSUBN-13-2018/OVI-DGAR-INGEMMET (26 de marzo al 01 de abril del 2018). El tercer trimestre

presentó emisiones muy pequeñas, de hasta 600 m sobre el cráter, tal como se indica en el RSUBN-39-2018/OVI-DGAR-INGEMMET (24 al 30 de setiembre-2018), y en el último trimestre, las emisiones fueron más frecuentes y llegaron a un máximo de 1200 m sobre el cráter.

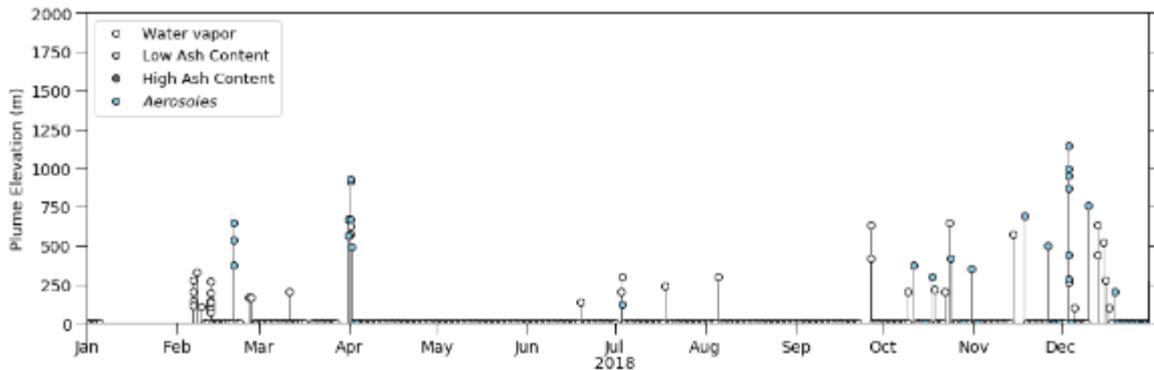


Figura 2.3. Histograma de las emisiones fumarólicas durante el año 2018 en el volcán Ubinas.

La dirección predominante de las emisiones fumarólicas durante el 2018, fue hacia el sur y sureste del cráter del volcán (Figura 2.4), en menor medida, hacia el noroeste y mucho menor al este. Estas emisiones, por lo general, se extendieron en un radio de 3 km del cráter del volcán Ubinas

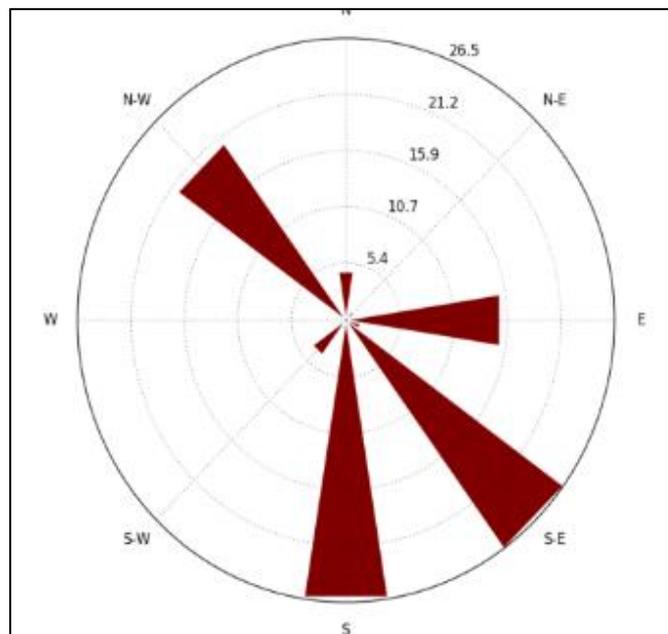


Figura 2.4. Diagrama de rosas de las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas registradas durante el año 2018.

Las Figuras 2.5 a 2.8, muestran las imágenes más representativas del 2018.



Figura 2.5. Emisiones de gases de color blanco de 1000 m sobre el cráter, aproximadamente, registrado el 20 de febrero del 2018 (izquierda) y el 11 de marzo del 2018 (derecha), respectivamente.



Figura 2.6. Emisiones tenues de gases en el cráter del volcán, registrados el 31 de marzo-2018 (izquierda) y el 01 de abril-2018 (derecha), respectivamente.

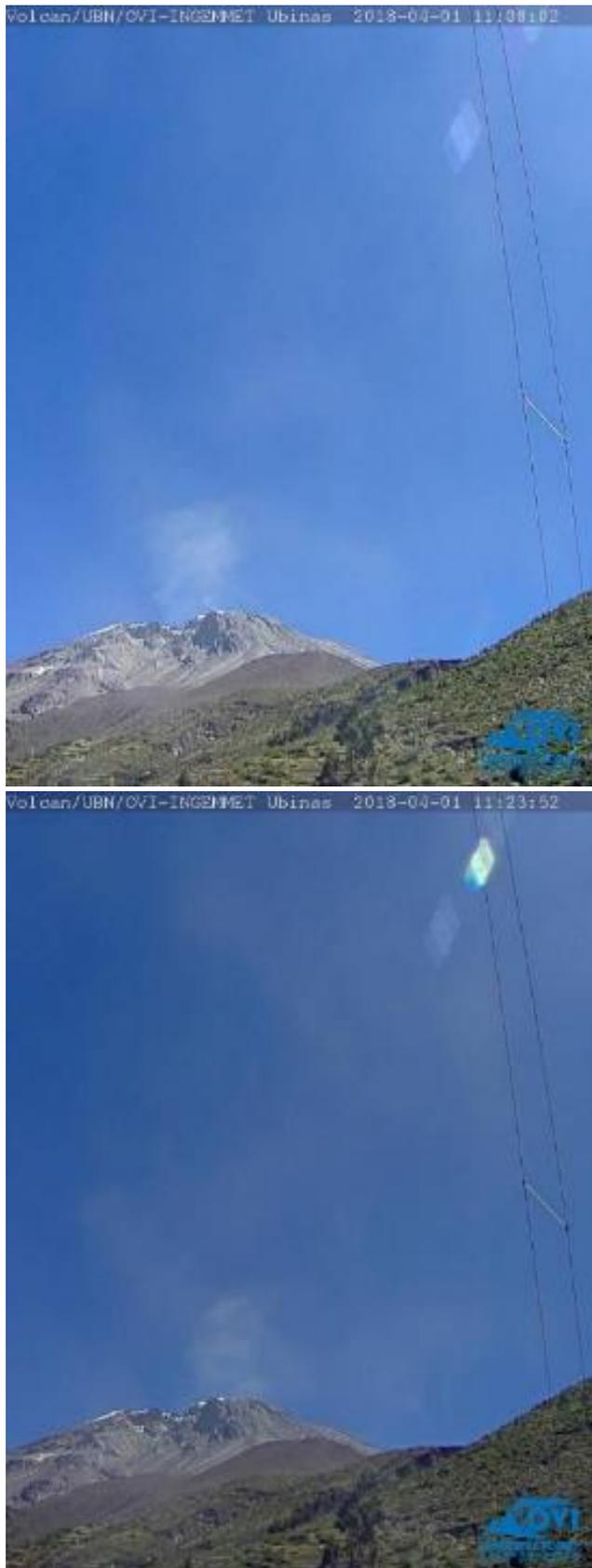


Figura 2.7. Emisiones tenues de gases de color blanquecino registrados el 01 de abril- 2018.

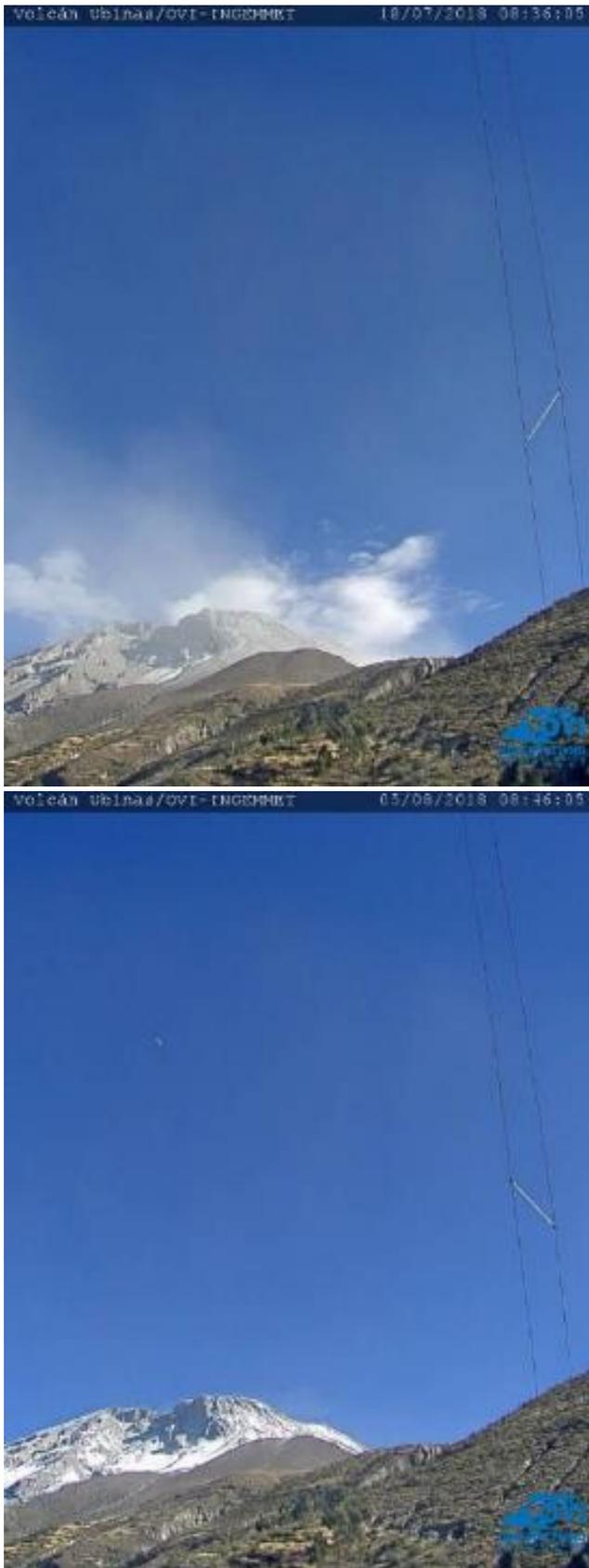


Figura 2.8. Desborde de gases de color blanquecino registrado el 18 de julio-2018 (izquierda), e imagen con presencia de gases en el cráter del volcán registrado el 05 de agosto del 2018 (derecha).

2.4. Monitoreo Geoquímico

El magma tiene una composición multi-fase rico en sólidos (cristales y fragmentos de roca), líquidos (silicatos) y gases (H, O, S y Cl). Los elementos más abundantes del magma son el O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na y K. Y, entre los compuestos: la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3) y el óxido de calcio (CaO), el más abundante es la sílice (50-70%). En cuanto más sílice tenga el magma, más viscoso será éste, por lo tanto, más explosivo.

El INGEMMET inició el análisis de las fuentes termales asociadas al volcán Ubinas en el año 2005 (Masías et al., 2013). En el 2013 se iniciaron las mediciones del flujo de SO_2 , con escáneres manuales. Desde el 2015, el INGEMMET realiza las mediciones del flujo de SO_2 de manera continua y con transmisión en tiempo real.

2.4.1. Monitoreo de fuentes termales

Para el año 2018, se programaron dos Comisiones de Servicio (febrero y julio), para recabar muestras de las fuentes: Ubinas termal (UBT), Ispaypuquio (ISP), Chillihua (CHI), Huarina (HUA), Phara 1 (PH1), Phara 2 (PH2) y Chiflo (CHF). En febrero-18, un lahar cubrió las fuentes de CHF y HUA, por tanto, durante este año, estas fuentes, no se pudieron muestrear. La Figura 2.9 muestra los resultados del análisis de doce de éstos iones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na, Ca, Mg, K, F^- , SiO_2 , Li, As y Fe) desde el 2013 al 2018. Éstos análisis se realizaron en el laboratorio de Química de INGEMMET. Por otro lado, la fuente UBT, gracias al apoyo de la municipalidad de Ubinas, se muestrea dos veces por semana, esto permite disponer de información con mayor detalle (Figura 2.10), así, en este año, se obtuvieron 110 muestras de agua de UBT.

En general, Un exceso de cationes sobre aniones, provoca un descenso del pH, por lo tanto, el medio es más ácido (más explosivo), y viceversa. El ión cloruro (Cl^-), es uno de los aniones inorgánicos principales del agua natural y residual, un contenido elevado del cloruro puede dañar conductores y estructuras metálicas, y perjudicar el crecimiento vegetal. El cloruro en el Ubinas se mantiene estable en alrededor de 300 mg/L. El ión sulfato (SO_4^{2-}), durante el 2018, se ha mantenido por debajo de su media (940 mg/L), con valores entre 820 y 850 mg/L. El K, ha presentado valores por debajo de su media (40 mg/L), entre 30 y 40 mg/L. El F^- , y el SiO_2 , presentan una tendencia creciente de 0.5 mg/L/año y 10 mg/L/año, respectivamente. Los iones HCO_3^- , Na, Ca, Mg, Li, Fe, por su parte, mantienen valores estables de 240, 290, 290, 0.3 y 3.0 mg/L, respectivamente, desde los últimos años.

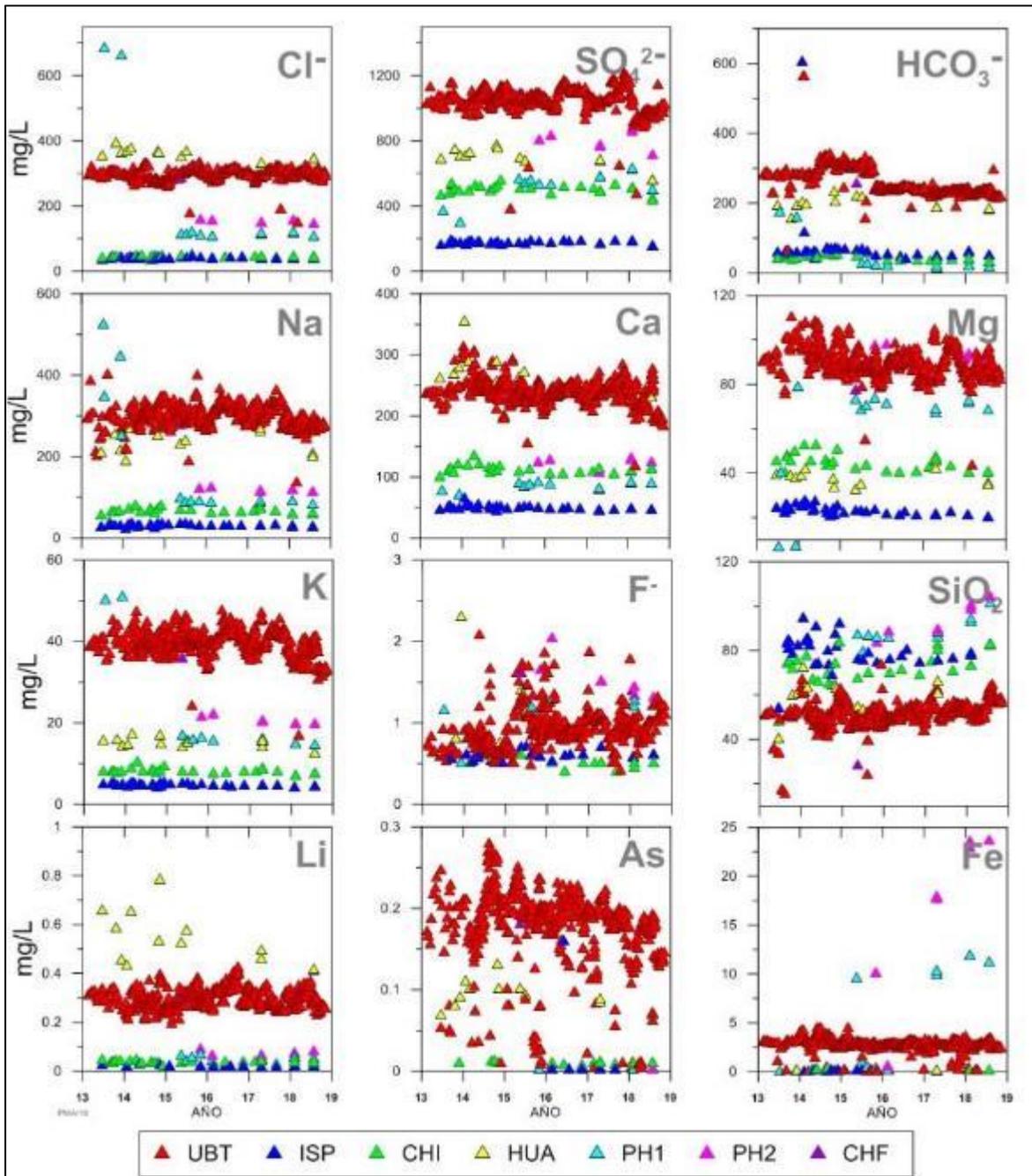


Figura 2.9. Comparación de los análisis químicos de las aguas de las fuentes UBT, ISP, CHI, PH1 y PH2, de los años 2013 al 2018.

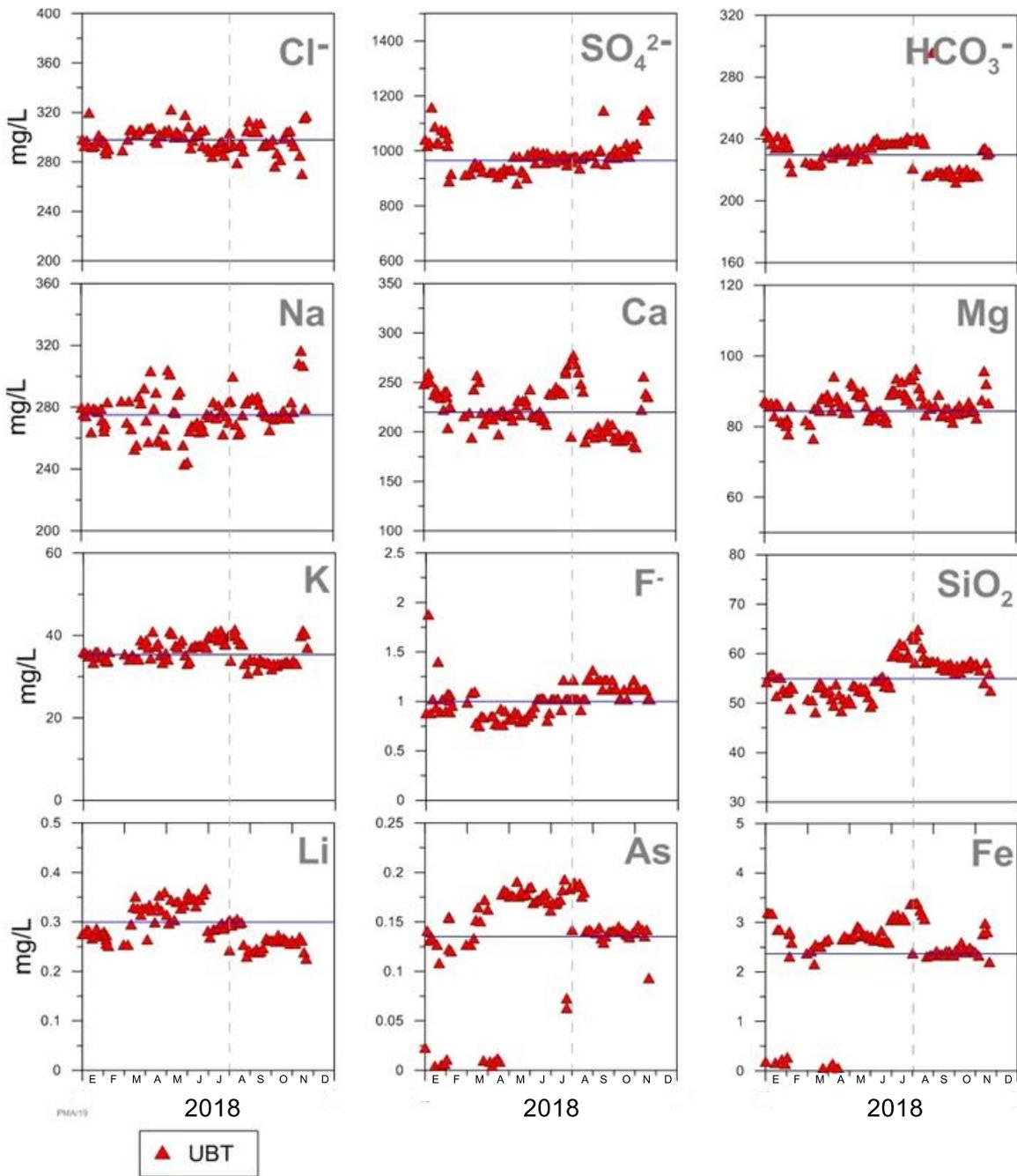


Figura 2.10. Resultado del análisis de los iones Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na , Ca , Mg , K , F^- , SiO_2 , Li , As y Fe , de la fuente UBT del volcán Ubinas durante el 2018.

2.4.2. Monitoreo del SO_2 en las plumas volcánicas

El INGEMMET realiza mediciones de SO_2 , en el Ubinas, desde el 2013. Para ello, emplea la técnica de espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS): se mide las emisiones UV/ visible del espectro electromagnético, y se compara las radiaciones del sol, a cielo limpio y en la pluma volcánica, donde se encuentra el SO_2 , en un espectro de 280 a 420 nm a una resolución de 0.6 nm.

Durante el 2018, el INGEMMET mantuvo operativa, dos Escáner DOAS (UBD1 y UBD2). Éstas se ubican a 3 km del cráter (Figura 2.1), y cuentan con transmisión de datos en

tiempo real a la oficina de INGEMMET en Arequipa. Las informaciones provistas por estas estaciones (Figura 2.11), han servido para elaborar los reportes semanales de la Plataforma de Defensa Civil al COER-Arequipa.

En resumen, los flujos de SO₂ del Ubinas se produjeron de la siguiente manera:

De enero a mayo, las mayores emisiones tenían valores de 1000 Tn/día a 1500 Tn/día.

- 1225 Tn/día (RSUBN-04-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1358 Tn/día (RSUBN-10-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1180 Tn/día (RSUBN-12-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1356 Tn/día (RSUBN-13-2018/OVI-DGAR-INGEMMET), y
- 1475 Tn/día (RSUBN-15-2018/OVI-DGAR-INGEMMET).

De junio a agosto, era más frecuente ver valores por encima de las 2000 Tn/día:

- 3440 Tn/día (RSUBN-23-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 2664 Tn/día (RSUBN-24-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 2475 Tn/día (RSUBN-27-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 2262 Tn/día (RSUBN-30-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 2639 Tn/día (RSUBN-31-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)

En setiembre y octubre, los mayores flujos de SO₂, descendieron a valores entre 1000 y 2000 Tn/día.

- 1842 Tn/día (RSUBN-35-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1067 Tn/día (RSUBN-36-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1800 Tn/día (RSUBN-37-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 1037 Tn/día (RSUBN-41-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)

En setiembre y octubre, los mayores flujos de SO₂, descendieron a valores entre 1000 y 2000 Tn/día.

- 2262 Tn/día (RSUBN-30-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)
- 2639 Tn/día (RSUBN-31-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)

En noviembre nuevamente ascendieron.

- 2275 Tn/día (RSUBN-46-2018/OVI-DGAR-INGEMMET)

Y en diciembre, bajaron por debajo de las 1000 Tn/día.

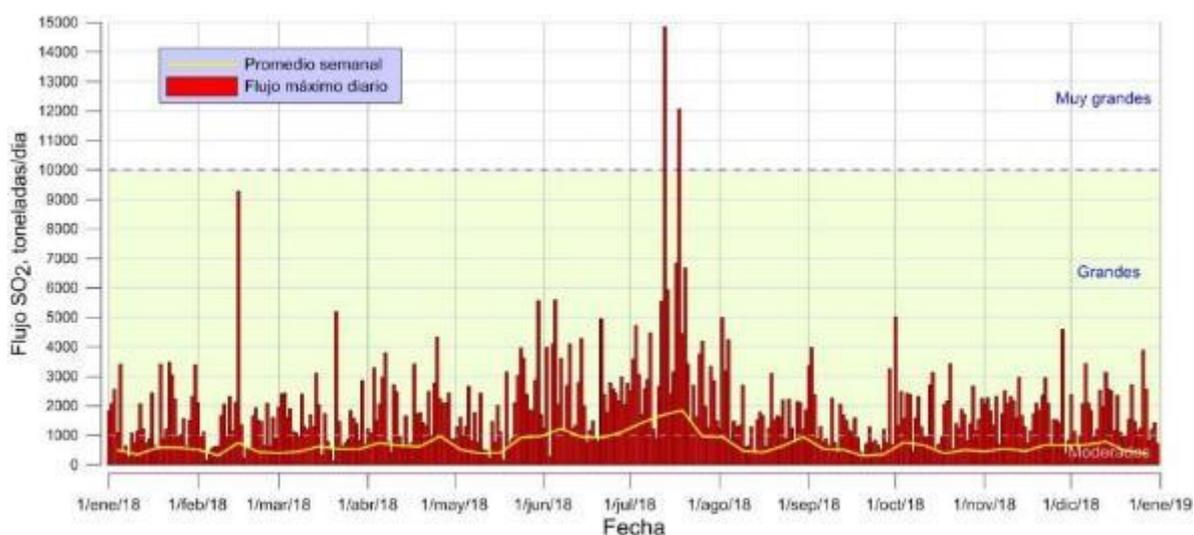


Figura 2.11. Mediciones de SO₂ con escáner DOAS (color rojo), y los promedios semanales (línea en color amarillo), durante el 2018, en el volcán Ubinas.

2.5. Monitoreo geodésico del Ubinas

El monitoreo de la deformación volcánica es una de las herramientas más importantes para estudiar volcanes activos. Los desplazamientos de la superficie volcánica de sistemas volcánicos están asociados a movimientos de magmas ocurridos bajo la superficie y apoyan otras observaciones (sismicidad, análisis de gases, etc.), con el fin de mejorar la evaluación en caso de crisis volcánicas. Sin embargo, dada la naturaleza de los sistemas volcánicos, un proceso de deformación del edificio volcánico no es signo inequívoco de una erupción en corto plazo, existiendo sistemas volcánicos que han mostrado nula o muy pequeñas variaciones en su morfología superficial durante procesos eruptivos (Fournier et al., 2010).

En este contexto, desde el 2015, el INGEMMET realiza mediciones geodésicas en el volcán Ubinas, a fin de detectar cambios en la superficie de este volcán.

2.5.1. Implementación de la red de monitoreo de deformación del Ubinas

Durante el 2018, el INGEMMET, ha mantenido dos estaciones “Global Navigation Satellite System (GNSS) o comúnmente llamado GPS, distribuidos en los flancos oeste (UBGW) y en el flanco sureste (UBHU) del Ubinas (Figura 2.12). La estación de referencia base para eliminar los efectos por la tectónica es la estación de referencia AREQ (IGS), ubicado fuera del edificio. Los puntos GNSS en el volcán fueron instalados sobre un pilar de concreto fundado sobre un afloramiento macizo de roca, con alturas de 1.2 m. Para discriminar los efectos multicamino (multyipath).

Además, se cuenta con una red de 04 puntos GNSS (UBCH, UBPI, UBQE, UBHY), para realizar mediciones en campañas de campo, un perfil de puntos GNSS en el sector noroeste, y bases de mediciones y reflectores EDM (Figura 2.12), distribuidos en torno al volcán.

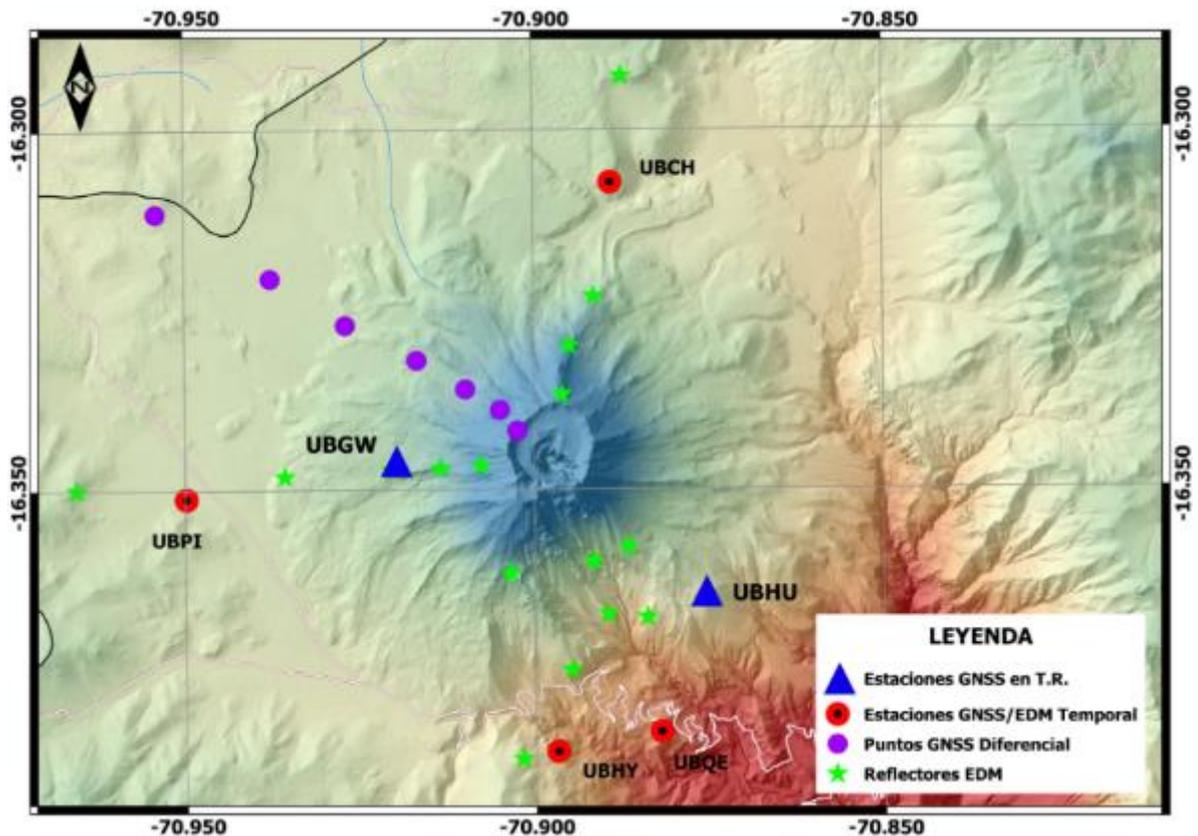


Figura 2.12. Distribución de la red de monitoreo geodésico para el volcán Ubinas, periodo 2018.

2.5.2. Adquisición y procesamiento de datos

El uso de diferentes marcas de equipos GNSS, implican el uso de software de procesamiento propios de cada marca, haciéndose tediosa la tarea de procesamiento. El INGEMMET, emplea el software científico GAMIT/GLOBK V. 10.6.1, para el procesamiento de datos. Este software trabaja bajo la plataforma Linux y es versátil para cualquier tipo de equipo. Los desplazamientos horizontales son modelados mediante el software dMODELS (Battaglia et al., 2013).

La información de deformación se obtiene como un archivo diario de 24 horas, con un intervalo de muestreo de 15 segundos. La velocidad de la placa tectónica se reduce empleando datos de la estación IGS AREG, en la que se incorporan efemérides precisas, correcciones atmosféricas, etc.

La operatividad de las estaciones GPS (UBHU y UBGW), se muestra en la Figura 2.13.

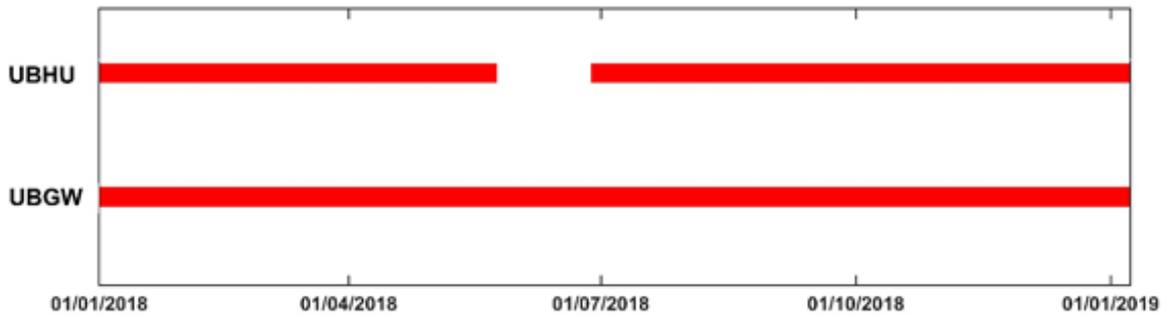


Figura 2.13. Operatividad de las estaciones UBHU y UBGW durante el año 2018, en el volcán Ubinas.

2.5.3. Resultados del monitoreo GNSS en el volcán Ubinas

➤ Series temporales y deformaciones asociadas

La Figura 2.14, presenta los resultados de las mediciones de deformación, en forma de series temporales, obtenidas durante el 2018 en las estaciones UBGW y UBHU (Figura 2.1). Las componentes horizontales (N-S y E-W), presentan tendencias anuales (líneas de color verde) de 1 mm al norte y 4.5 mm al este en la estación UBGW, y de 1 mm al norte y 7 mm al este en la estación UBHU. Asimismo, éstas componentes horizontales, presentan dos subtenencias (líneas en color rojo): la primera, entre los meses de enero al 15 de setiembre, de 3.3 mm al norte y 7.4 mm al este en la estación UBGW y de 3 mm al norte y 13.5 mm al este en la estación UBHU, seguido de un retorno, entre los meses de octubre a diciembre, de 2.5 mm al sur y 0 mm al oeste en la estación UBGW y de 2 mm al sur y 1 mm al oeste en la estación UBHU.

Por otro lado, la componente vertical muestra una tendencia inflacionaria anual (líneas de color verde) de 12 mm en la estación UBGW y de 10 mm en la estación UBHU. Ésta tendencia anual presenta dos segmentos: la primera entre enero y febrero de -15 mm y de -5.5 mm en las estaciones UBGW, UBHU respectivamente, y de +27 mm y de +12 mm en las estaciones UBGW, UBHU respectivamente, entre los meses de marzo a diciembre.

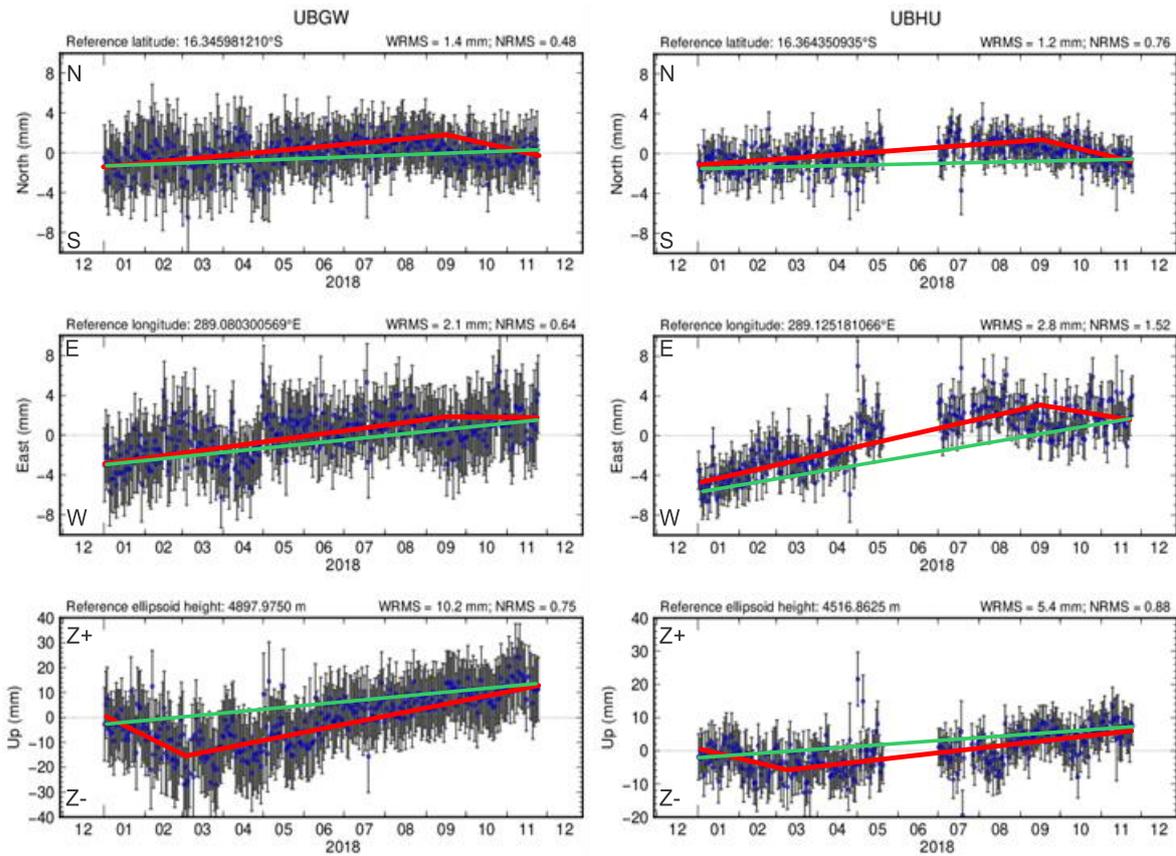


Figura 2.14. Series temporales de las estaciones UBGW y UBHU que registraron la deformación del volcán Ubinas durante el 2018.

➤ Línea base GNSS

Otra metodología empleada para detectar cambios en la superficie del volcán Ubinas, es medir la distancia entre las estaciones UBGW y UBHU. Durante el 2018, la variación de distancia entre estos dos puntos fue de ± 3 mm (Figura 2.15), cifra insignificante para los 5.8 km que separan a ambas estaciones.

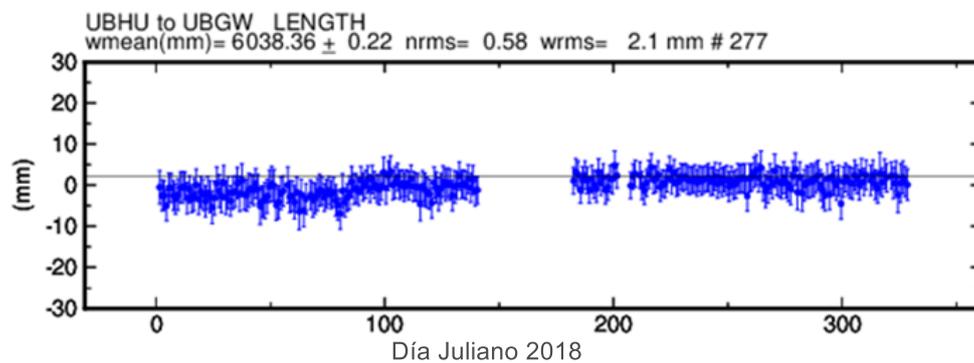


Figura 2.15. Distancia entre las estaciones UBGW y UBHU que monitorean la deformación del volcán Ubinas durante el periodo 2018.

➤ Vectores de desplazamiento

Se ha realizado el cálculo de los vectores de desplazamiento (Figura 2.16), sobre el periodo de mayor desplazamiento obtenido en las series de tiempo (Figura 2.15), o sea, al periodo de enero al 15 de setiembre. En el Cuadro 3.1 se muestran las velocidades de desplazamiento para cada estación.

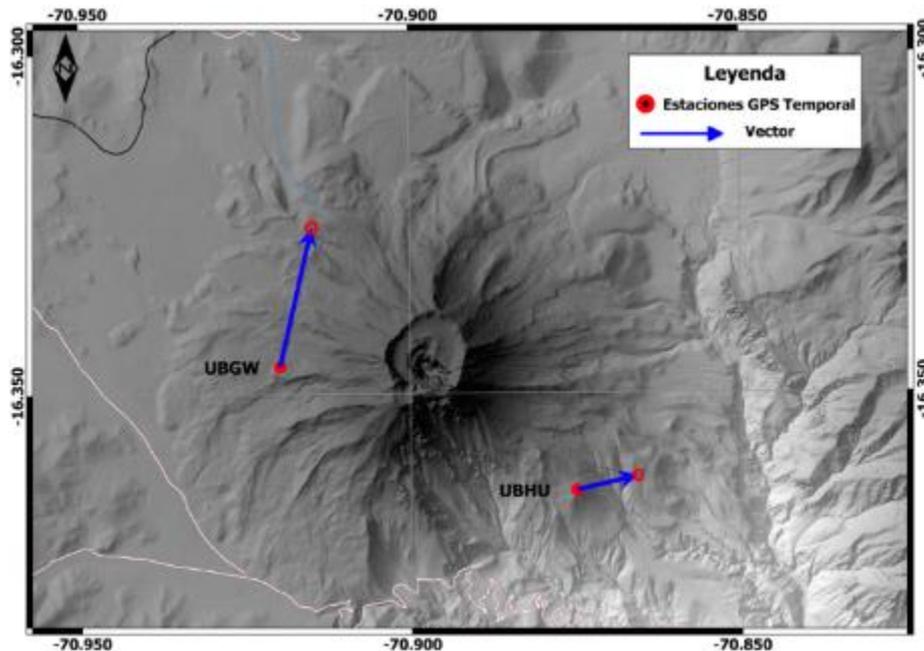


Figura 2.16. Vectores de desplazamiento horizontales observados en las estaciones UBGW y UBHU del volcán Ubinas y sus elipses de error. Las velocidades calculadas corresponden al periodo entre enero a mediados de setiembre.

Cuadro 2.3. Velocidades de desplazamiento para las estaciones GNSS UBGW y UBHU.

PUNTO GNSS	ESTE (mm/yr)	NORTE (mm/yr)	ALTITUD (mm/yr)	Δ (mm/yr)	ESTE (mm/yr)	Δ (mm/yr)	NORTE (mm/yr)	Δ (mm/yr)	ALTITUD (mm/yr)
UBGW	7.4	3.3	24.5	3	1	5			
UBHU	13.5	3.0	7.0	1	1	2			

2.5.4. Resultados del monitoreo EDM del volcán Ubinas

La “Electronic Distance Measuring” (EDM), es una técnica empleada para la medición topográfica de distancias. Su principio se basa en emitir un haz laser desde un dispositivo robotizado hacia un prisma convenientemente ubicado, el retorno del haz laser al dispositivo, permitirá calcular la distancia y el ángulo entre estos dos elementos. Mediciones realizadas en el tiempo dará indicios de deformación de la superficie terrestre.

Durante el 2018, se realizaron 02 mediciones EDM en el Ubinas: octubre y noviembre. La Figura 2.17 muestra los resultados de estas mediciones efectuadas en las cuatro estaciones: Piscococha (UBPI), Chimin (UBCH), Huayrapata (UBHY) y Querapi (UBQE).

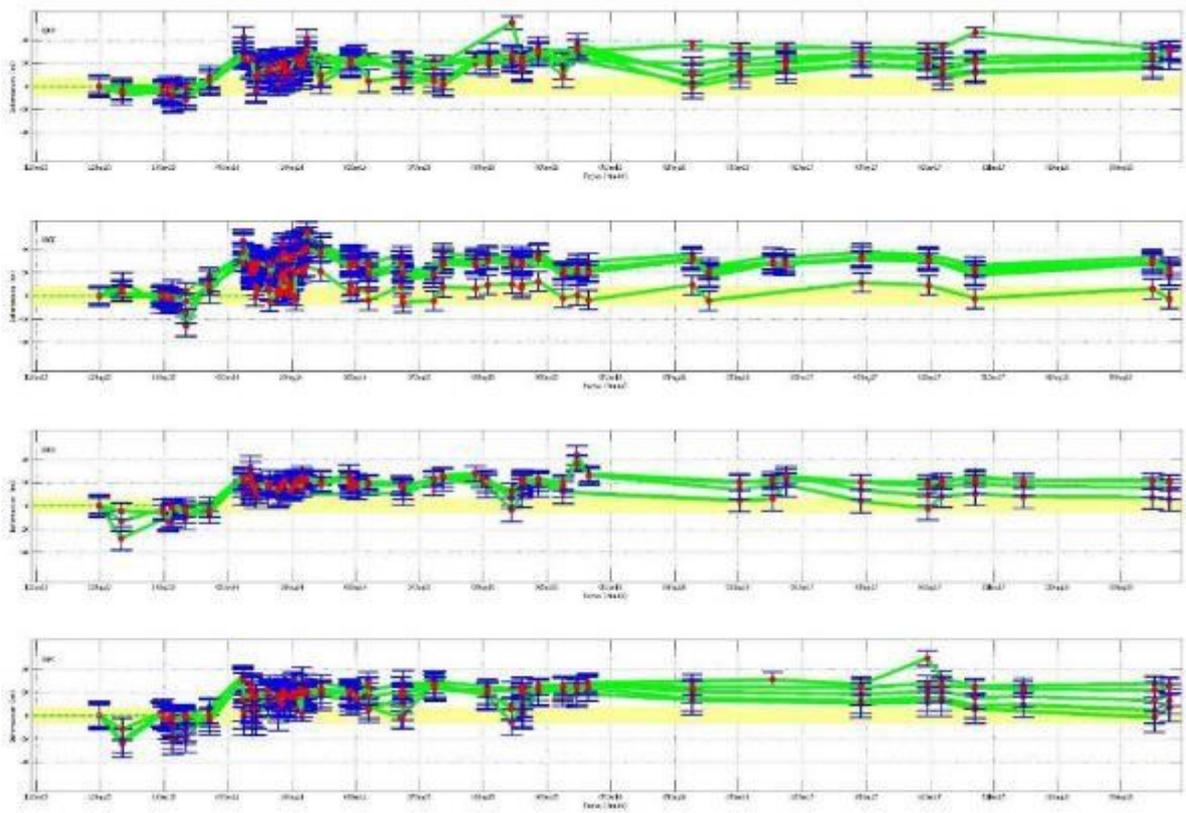


Figura 2.17. Serie temporal de las mediciones EDM, en las cuatro estaciones base de medición, observados durante 2018.

2.6. Monitoreo sísmico del Ubinas

La Red de Monitoreo Sísmico del Volcán Ubinas que operó durante el año 2018, estuvo conformada por 05 estaciones sísmicas: 03 estaciones, con almacenamiento de data en su disco interno (UBN05, UBN08 y UBN11) y 02 estaciones con transmisión de data vía telemetría (UBN02 y UBN04) hacia la oficina de INGEMMET Arequipa.

La Figura 2.18, muestra la operatividad de los sensores sísmicos, que funcionaron durante el 2018, en el Volcán Ubinas. Las estaciones UBN02, UBN04 y UBN05, registraron ininterrumpidamente durante el año, mientras que la estación UBN11 interrumpió su registro entre febrero y abril, debido a problemas en el almacenamiento de información. La estación UBN08 fue desinstalada el 31 de marzo y trasladado al volcán Sabancaya, pues éste se encuentra en erupción.

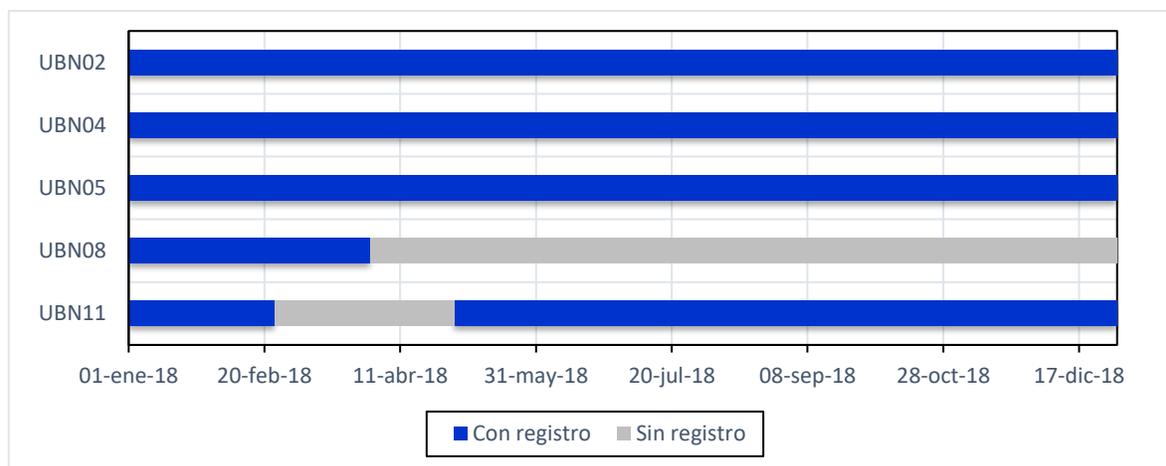


Figura 2.18. Operatividad de las estaciones sísmicas desplegadas en el volcán Ubinas durante el 2018.

2.6.1. Sismicidad observada

Durante el 2018, la sismicidad del Ubinas estuvo representada por:

- Sismos tipo Volcano Tectónicos (VT; Figura 2.19a), asociados al fracturamiento de rocas en el interior del cono volcánico. Éstos sismos, presentaron frecuencias dominantes de 6.5 Hz, una duración de 18 segundos y energía promedio de 0.0001 MJ.
- Sismos tipo Largo Periodo (LP; Figura 2.19b), asociados al movimiento de fluidos volcánicos dentro del volcán. Presentaron frecuencias dominantes de 2.9 Hz, una duración promedio de 18 segundos y energía media de 0.0002 MJ.
- Sismos tipo tremor (TRE); la Figura 2.20, muestra un tremor espasmódico de origen volcánico, con frecuencias de 5.3 Hz en promedio y una duración hasta 5 minutos de registro, asimismo, la Figura 2.21, es un ejemplo de un tremor asociado a la ocurrencia de un lahar registrado el 16 de febrero. Esta señal se caracteriza por tener

frecuencias pico entre 3.1 y 5.2 Hz, una duración máxima de aproximadamente 01 hora y 12 minutos.

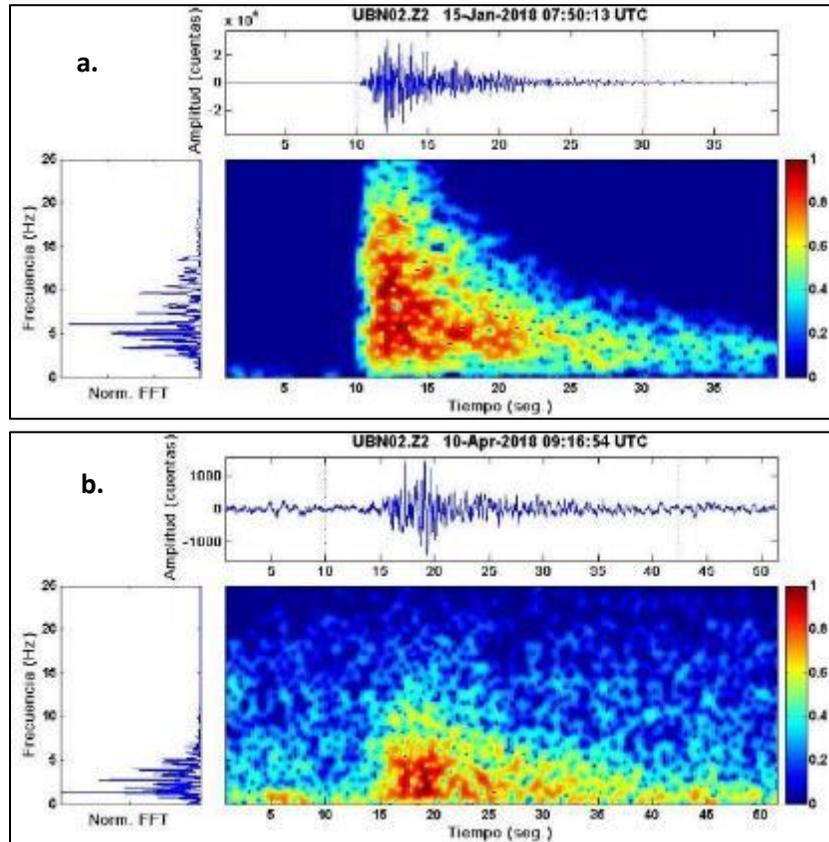


Figura 2.19. Señales sísmicas registradas en el volcán Ubina; **a.** Evento sísmico Volcano tectónico - VT; **b.** Evento sísmico Largo Periodo - LP.

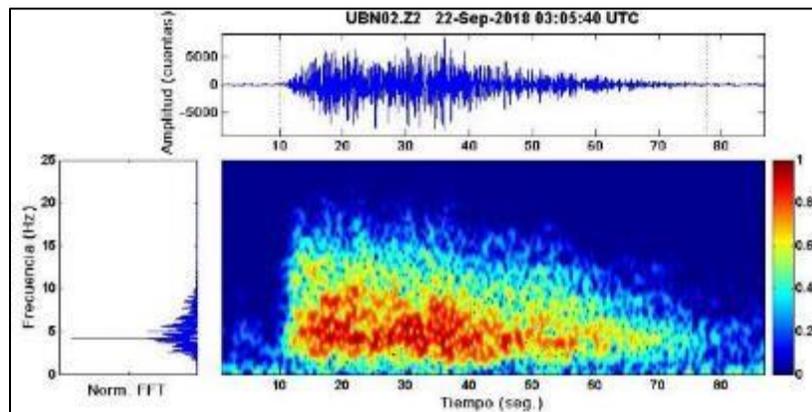


Figura 2.20. Evento sísmico Tremor espasmódico – TRE.

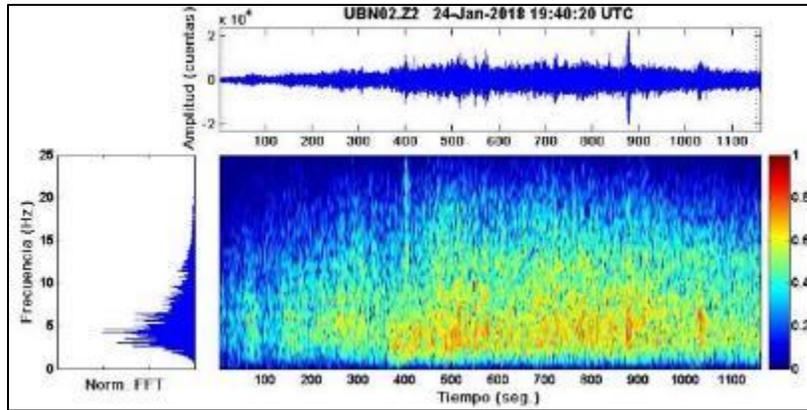


Figura 2.21. Evento sísmico Lahar – LAH, registrado el 24 de enero del 2018.

2.6.2. Estadística por tipo de evento

En la Figura 2.22, se muestra la evolución de la sismicidad del volcán Ubinas para el año 2018. Se observa una producción de sismos VT a una tasa de ocurrencia de 2 VT/día, excepto en enero, noviembre y diciembre donde la tasa de ocurrencia es 4 VT/día. La tasa de ocurrencia de los LP se dio a razón de 4 LP/ día en los meses enero y febrero y de 3 LP/día durante el resto del año. También se identificaron algunos sismos de tipo TOR, los cuales se registraron esporádicamente con un total de 10 sismos durante todo el año. Finalmente, llamó la atención, el 13 de diciembre, cuando se registró 01 pequeña explosión (EXP), con una energía de 0.2 MJ.

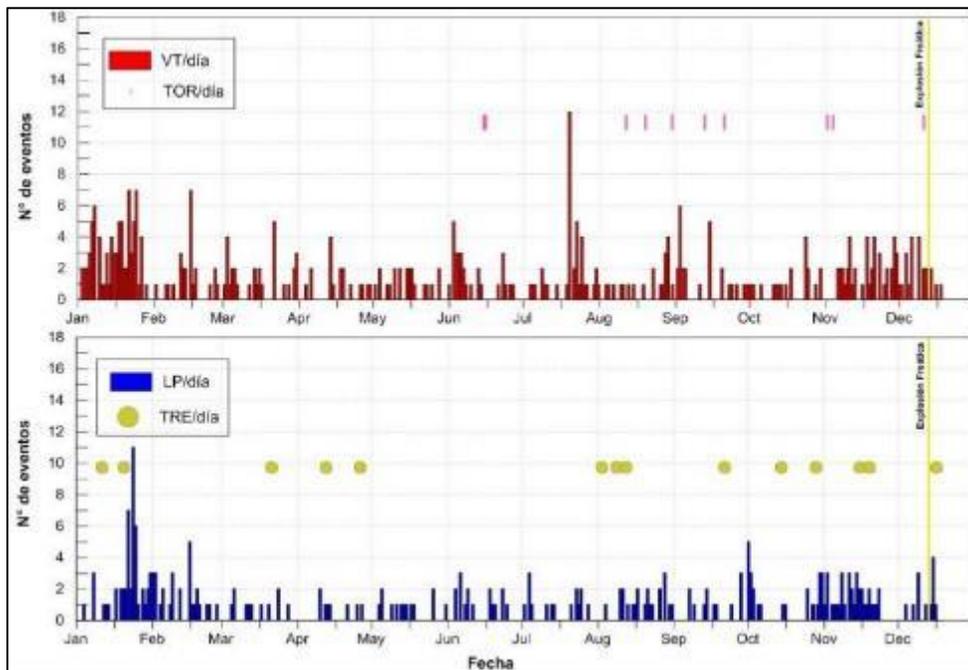


Figura 2.22 Histograma de la actividad sísmica en el volcán Ubinas durante el año 2018.

2.6.3. Energía sísmica del Ubinas

Para el análisis de la energía sísmica liberada en el volcán Ubinas durante el año 2018, se empleó los registros de la estación UBN02, por su mayor regularidad y mejor calidad de registro. El valor final de la energía acumulada para el 2018 fue de 3.8 MJ (Figura 2.23); cifra considerablemente menor al calculado para el año 2017, que fue de 212 MJ.

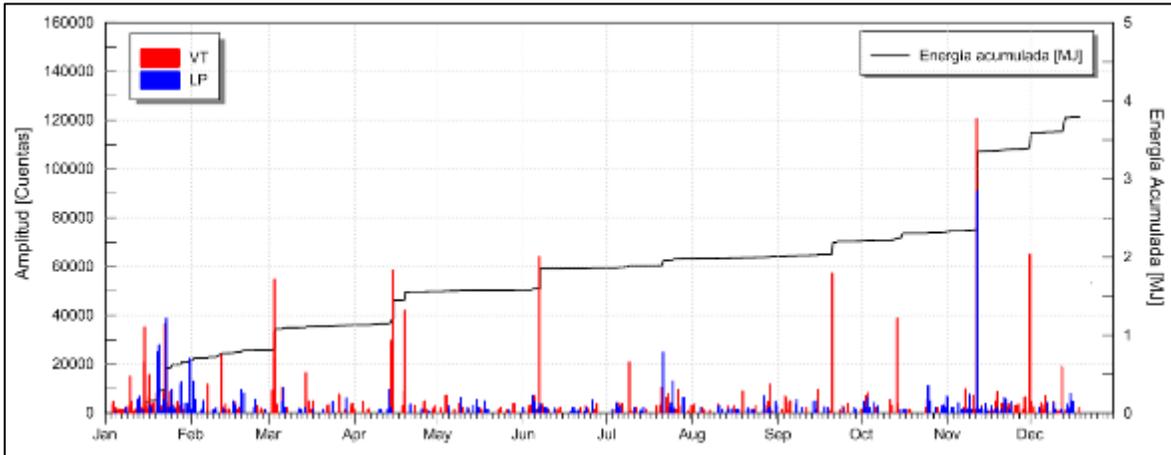


Figura 2.23. Evolución de la actividad sísmica (Energía, sismos Volcano Tectónico y Largo Periodo) del volcán Ubinas, correspondiente al 2018.

2.6.4. Localización de eventos sísmicos tipo VT

Durante el año 2018, se han registrado un total de 1777 eventos VT, de los cuales, solo se han localizado 34. Estas señales sísmicas elegidas para la localización, se caracterizaron por presentar fases P y S claras (Figura 2.24) y errores mínimos en la localización ≤ 2.0 km, además, es importante que fueran registrados en más de tres estaciones sísmicas. La localización de estas señales se realizó mediante el algoritmo HYPO-71 y el software Seisan.

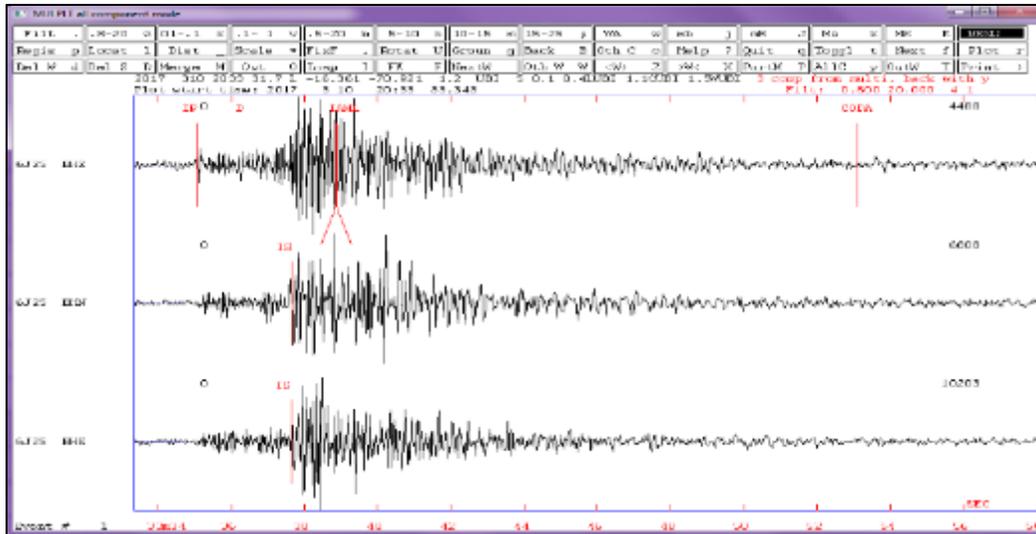


Figura 2.24. Ejemplo de sismo VT con fases claras para la localización.

La ubicación geográfica de los 34 sismos tipo VT localizados para este informe (Figura 2.25), se distribuyen principalmente, en los sectores noreste y sureste del cono volcánico. Las magnitudes de éstos sismos van de -0.7 y 1.9 MI. Asimismo, esta sismicidad se encuentra a profundidades menores a 10 km; los cuales son más profundos a los sismos calculados en el 2017.

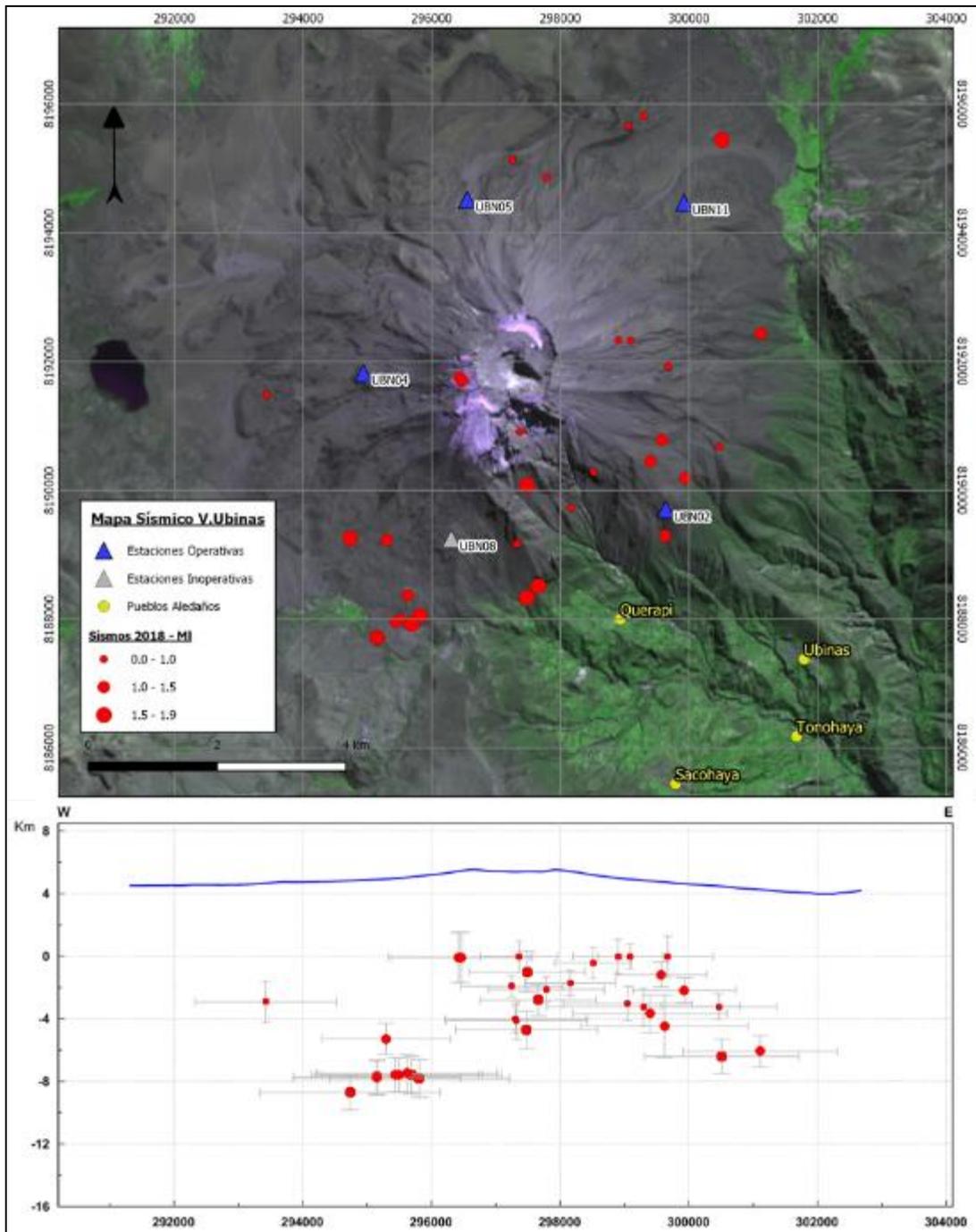


Figura 2.25. Parte superior: Mapa de localización de sismos tipo VT. Parte inferior: Corte esquemático en profundidad de la localización de sismos VTs.

2.6.5. Cambios de velocidad y cambios estructurales

➤ Método de Ruido Sísmico

Con la premisa que las funciones de cross-correlación (FCC) del ruido sísmico ambiental convergen en las funciones de Green entre dos estaciones sísmicas; usando la correlación

de tiempo $C(\tau)$ entre dos señales $\phi(t)$ registradas en dos estaciones A y B al mismo tiempo, conoceremos la respuesta de impulso $G(t)$ entre A y B como si uno de los dos fuera una fuente. Así, se podría usar fuentes artificiales donde se pueda emplear un sensor sísmico.

$$\partial_{\tau} C_{AB}(\tau) = \partial_{\tau} \int \varphi_A(t) \varphi_B(t + \tau) dt \propto G^+(A, B, \tau) - G^-(A, B, -\tau)$$

En sismología volcánica, el ruido sísmico se utiliza principalmente con dos objetivos: realizar estudios de tomografía y monitorear cambios de velocidad (dv/v). Los cambios de velocidad observados en ambientes volcánicos son debidos principalmente a intrusión magmática, siendo estos cálculos útiles a la hora de pronosticar erupciones volcánicas.

➤ **Cálculo de las funciones de cross-correlación del volcán Ubinas**

Para estimar los cambios de velocidad, primero se calculan las FCC y se verifica que estos sean continuos en el tiempo, para evitar efectos de estacionalidad. Para ello se calculan las FCC en cada estación, entre la componente vertical y una horizontal, para diferentes bandas de frecuencia: 0.1-1, 0.2-1, 0.3-1, 1-3, 3-5 y 5-8 Hz, ya que cada una de estas frecuencias contiene información a diferente profundidad el interior del volcán. En la Figura 2.26, se muestra el resultado de las FCC de la estación UBN02 en el rango de frecuencias de 0.1-1Hz (10s-1s).

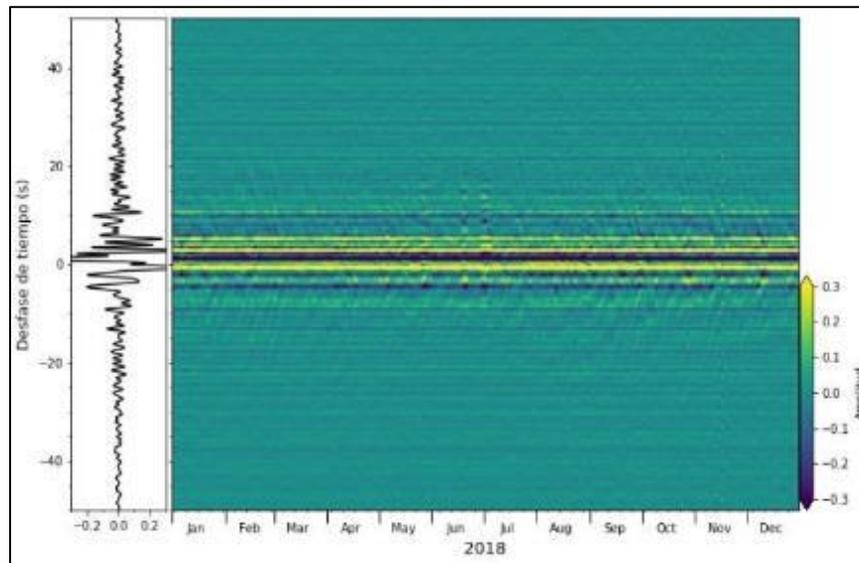


Figura 2.26. Funciones de cross-correlación (FCC) diarias calculadas en la banda de frecuencias 0.1 - 1 Hz, entre las componentes Z-E de la estación UBN02 durante el 2018 y su respectiva forma de onda promedio (lado izquierdo).

➤ **Cambios de velocidad del volcán Ubinas**

Para estimar los cambios de velocidad sísmica, usamos el método Stretching que opera en el dominio del tiempo (Lobkis and Weaver, 2003). Los cambios de velocidad aparentes y los coeficientes de correlación(CC) se estiman comparando dos formas de onda: la señal de

referencia y las funciones de correlación actual. En nuestro caso, la traza de referencia es la forma de onda resultado de promediar la FCC.

Durante el presente año, se ha continuado con los cálculos de los cambios de velocidad (dv/v) y de de-correlación de la forma de onda. La Figura 2.27a, muestra que durante este año las velocidades sísmicas en el interior del volcán han variado entre $\pm 0.2\%$, sin embargo, no se han identificado cambios significativos relacionados a procesos magmáticos en el interior del volcán. Por su parte, la actividad tectónica parece haber perturbado las propiedades físicas del volcán, ya que, los dos sismos importantes de $M_w > 7.0$ ocurridos durante este año (14-01-2018 a 09:18:45 UTC y 24-08-2018 a 09:04:08 UTC), coinciden con disminuciones de la velocidad del orden -0.15% . La serie temporal de los coeficientes de correlación (CC), muestra valores estables a lo largo del año con cifras constantes por encima de 0.95, lo que indica que las estructuras internas del volcán no han cambiado durante este año. Sin embargo, se puede observar pequeñas variaciones del CC que disminuyen hasta cerca de 0.8 (a finales de mayo y finales de junio), posiblemente estén asociados a cambios abruptos en las condiciones atmosféricas a nivel regional o la activación temporal de ciertas fuentes.

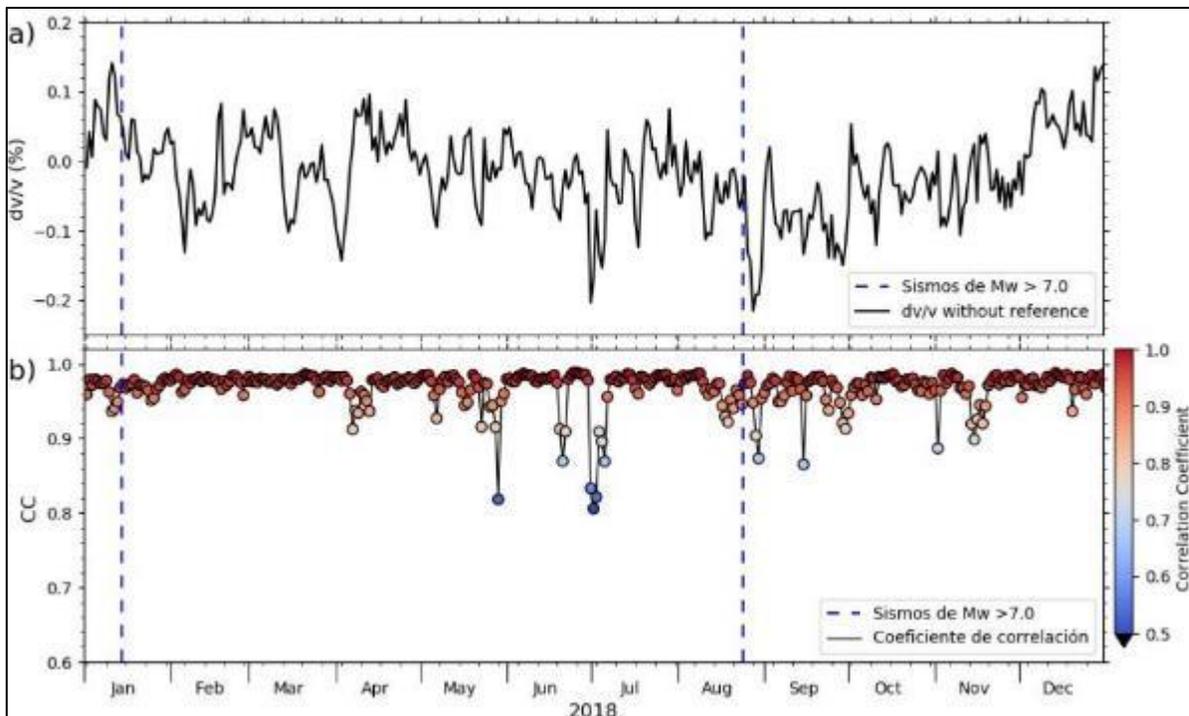


Figura 2.27. a) Cambios de velocidad (dv/v) calculados para las FCC de las componentes Z-N de la estación UBN02 [0.1- 1 Hz]. b) Serie temporal de los coeficientes de correlación (CC) con su respectivo código de color.

2.7. Discusión

Durante el 2018, el volcán Ubinas continuó con un estado de calma, con escasas y débiles emisiones fumarólicas. Las emisiones que se presentaron, no superaron los 1500 m sobre el cráter y eran rápidamente dispersadas por el viento. En las visitas al cráter del volcán se constató que éste se saturaba de gases azulinos y fuerte olor a azufre.

El muestreo de fuentes termales se realizó con normalidad. Salvo dos fuentes que no fueron muestreadas al ser cubiertas por material del lahar del 24 de enero-2018. Por otro lado, los escáneres DOAS instalados en torno al volcán, han operado sin mayores contratiempos.

En cuanto a la evaluación de la geodesia no se observó deformación, sin embargo, los vectores de desplazamiento, muestran un comportamiento anómalo en la deformación probablemente corresponda a una intranquilidad debido a cambios en la dinámica interna del volcán.

la sismicidad se ha mantenido constante, con un promedio de 2 sismos por día. Se registraron eventos relacionados al paso de fluidos (sismos Largo Periodo), seguidos de eventos tipo Volcano Tectónicos, Híbridos, Tornillos y esporádicos episodios tremóricos y 01 Explosión de baja energía (probablemente freática); La energía sísmica registrada se muestra constante durante el año. Por otro lado, la localización de sismos tipo VT muestran una actividad superficial predominante (profundidad máxima - 10 Km) sobre los flancos suroeste y sureste principalmente.

El monitoreo permanente de los cambios de velocidad y de de-correlación del volcán Ubinas durante el año 2018, no ha presentado cambios significativos asociados a procesos magmáticos. Sin embargo, se ha podido observar pequeñas perturbaciones en el volcán asociados a dos grandes terremotos de $M_w > 7.0$ ocurridos en el país durante este año, lo que indicaría que el volcán mantiene un sistema hidrotermal activo, susceptible a ser perturbado por actividad tectónica. Esto sugiere la posibilidad de existencia de un remanente de magma en el interior del edificio volcánico, cercano a la superficie, éste estaría perturbando parcialmente el sistema hidrotermal, sin embargo, mucho menos que durante el proceso eruptivo.

Está claro que las variables monitoreadas en el volcán Ubinas se mantuvieron estables durante el 2018. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que se trata del volcán más activo del Perú, los dos procesos eruptivos recientes de este volcán (2006-2009 y 2013-2017), tuvieron un periodo de calma muy corto entre uno y otro. El Ubinas tiene un sistema volcánico hermético, el único lugar por donde emite fumarolas es el actual cráter activo. El último proceso eruptivo se presentó sin mayores signos precursores. El conducto volcánico, debería estar abierto y la próxima erupción no presentaría signos precursores tampoco. La erupción del 2013-2017 fue mucho más violenta que la erupción 2006-2009, por lo tanto, sugerimos que la próxima erupción será más violenta que las dos erupciones anteriores.

Es importante evitar el ascenso al cráter del Ubinas. Existen experiencias, por ejemplo, en el volcán Galeras-Colombia, donde murieron vulcanólogos que ingresaron al volcán, pensando que éste se encontraba en calma, durante un proceso eruptivo.

3. Capítulo III: Monitoreo del volcán Ticsani

3.1. Introducción

El volcán Ticsani, está constituido por tres domos alineados y dos cráteres semi-destruidos. En sus proximidades afloran manantiales con altas temperaturas, presenta emisiones fumarólicas en zonas próximas a la cumbre y frecuente actividad sismo-volcánica. Se estima su última erupción en hace menos de 400 años. Actualmente habitan en riesgo, ante una reactivación de este volcán, más de 5000 personas, en un radio menor de 12 km.

Durante el 2018, se programaron tres comisiones de servicio al Ticsani (Cuadro 1), las informaciones recabadas en estas oportunidades, fueron empleadas en la elaboración de este informe.

Cuadro 3.1. Tareas por comisión de servicios al volcán Ticsani durante el 2018.

Comisión de servicios	Trabajos por disciplina				
	Geoquímica	Geodesia	Sismología	Visual	Potencial Espontáneo
09-10 marzo	Backup de data de temperatura. Muestreo de fuentes termales.		Backup de data. Reinstalación de sensor sísmico.	Toma de imágenes	Medición de perfil de reiteración
24-may	Backup de data de temperatura. Muestreo de fuentes termales.	Mediciones de GPS y EDM	Backup de data.	Toma de imágenes	
17-18 noviembre	Backup de data de temperatura. Muestreo de fuentes termales.	Mediciones de GPS y EDM	Backup de data.	Toma de imágenes	

3.2. Equipos empleados en el monitoreo del volcán Ticsani

La Figura 3.1 muestra la ubicación de los equipos empleados para el monitoreo del volcán Ticsani durante el 2018.

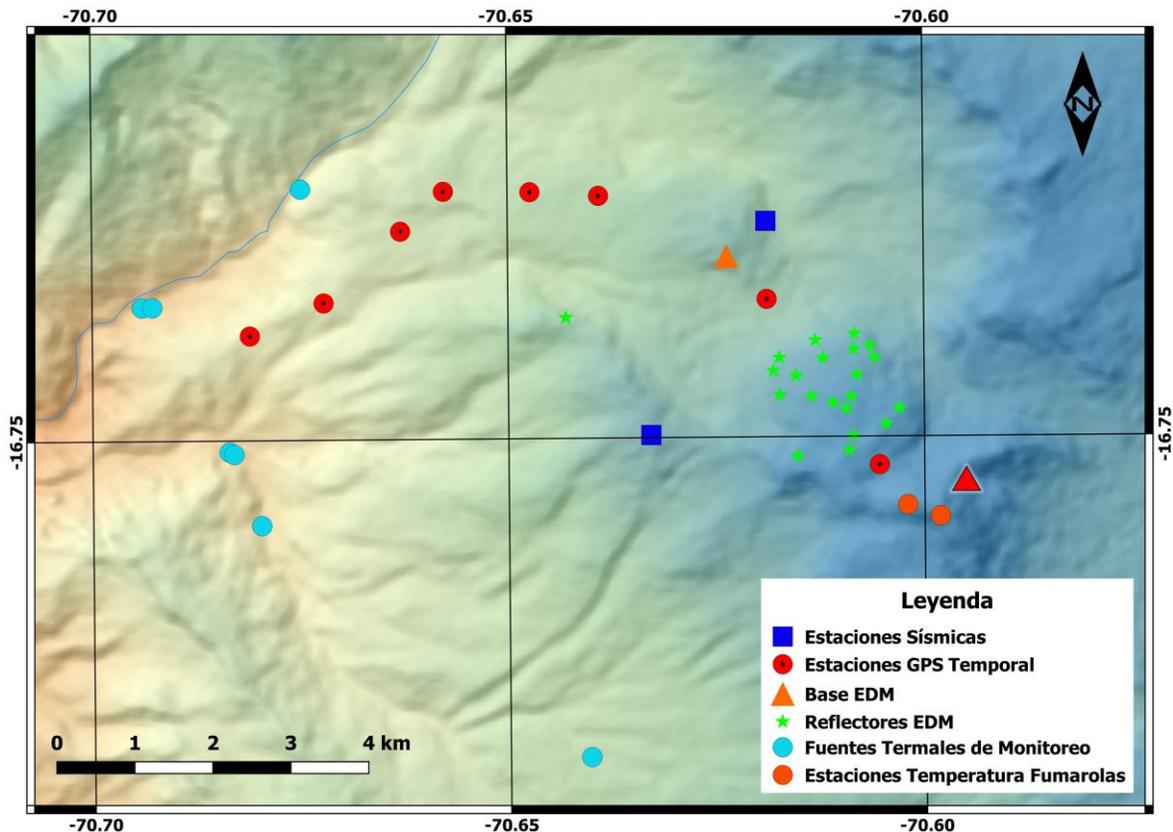


Figura 3.1. Distribución de estaciones y puntos de medición volcánica en el Ticsani durante el 2018.

3.3. Monitoreo visual del Ticsani

El INGEMMET dispone de información visual del Ticsani, desde el 2007 (Figura 3.2). El monitoreo visual del Ticsani, se realiza mediante comparación de fotografías, las cuales se toman durante las comisiones de servicio.

- Durante la comisión de marzo-2018 (Cuadro 3.1), el clima fue desfavorable. La presencia de neblina, no permitió obtener buenas imágenes. Sin embargo, se pudo observar que el lugar, por donde emanan las fumarolas, en el sector noroeste, no estuvo cubierto de nieve, como sí lo estaba todo el volcán (Figura 3.3). Por otro lado, se comprobó que el sector sur de la cumbre del volcán continúa con sus emisiones fumarólicas en extenso campo de 100m x 100 m aproximadamente (Figura 3.4).
- Las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7, corresponden a imágenes obtenidas durante la comisión de servicios del 17 de noviembre del 2018.

En general, las emisiones fumarólicas que presenta el volcán Ticsani no son muy altas, su altura es de algunas decenas de metros sobre la superficie, son de color blanquecino y tienen un fuerte olor a huevo podrido, lo que induce a pensar que se trataría de azufre.



Figura 3.2. Comparación de fotografías del flanco noreste del volcán Ticsani, entre 2007 y 2018.



Figura 3.3. Lugares de emisión fumarólica que no fueron cubiertos por la nieve, cerca de la cumbre del volcán TICSANI (Foto del 10 de marzo-2018).



Figura 3.4. Campo fumarólico ubicado al sur de la cumbre del volcán TICSANI (Foto del 10 de marzo-2018).



Figura 3.5. Campos fumarólicos ubicados al noreste de la cumbre del volcán TICSANI (flecha roja). Estos campos no fueron cubiertos por la nieve.



Figura 3.6. Campos fumarólicos al sur de la cumbre del volcán Ticsani, fotografías del 17 de noviembre del 2018.



Figura 3.7. Fumarola principal de los campos fumarólicos al sur de la cumbre del volcán Ticsani, fotografías del 17 de noviembre del 2018.

3.4. Monitoreo geoquímico del Ticsani

El INGEMMET cuenta con información de la temperatura de las fumarolas del Ticsani y del análisis de las aguas termales, desde el 2006.

3.4.1. Medición de temperatura en las fumarolas

En el 2018, las mediciones de la temperatura de las fumarolas del volcán Ticsani, se realizaron en 2 zonas próximas a la cumbre del volcán, en las estaciones TCS-F1 y TCS-F2 (Figura 3.1). El registro de la temperatura es de manera continua, con equipos Data logger, marca Tinytag, modelos Aquatic2 y TGP-4520.

Como se observa en la Figura 3.8, los registros de la temperatura de los años 2006 a 2013 tienen una tasa de calentamiento de 1°C por año. Entre los años 2015 y 2017, esta tasa de calentamiento se incrementó sorpresivamente a razón de 6°C por año. Hecho que fue informado a las autoridades de la Región Moquegua y pueblos aledaños al volcán. Sin embargo, la temperatura media anual de la estación TCS-F1 ha presentado una ligera disminución de 29.27°C correspondiente al 2017 a 27.2°C , calculado en el 2018.

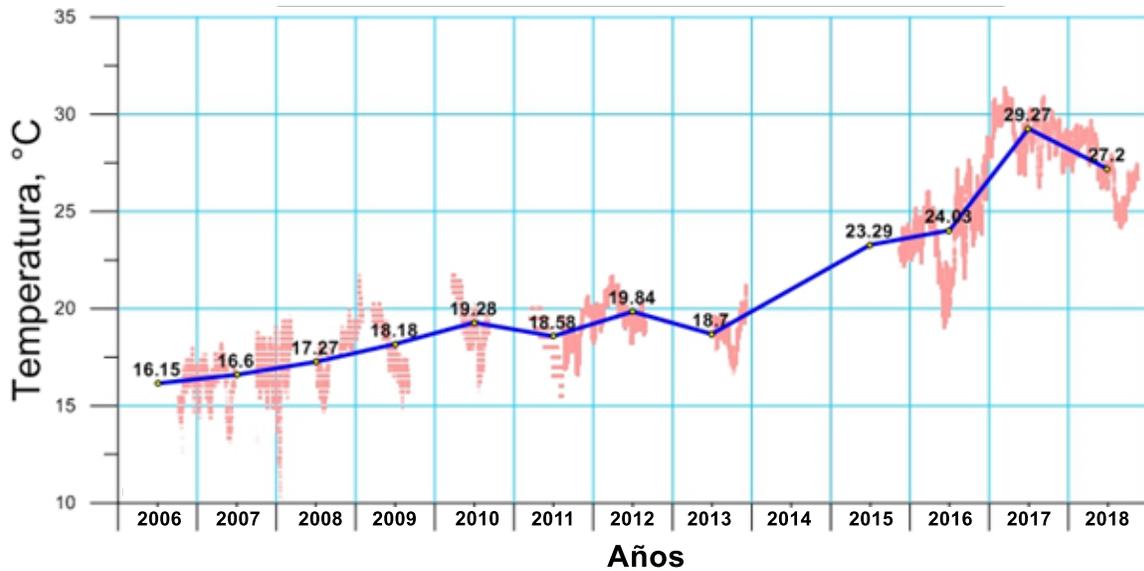


Figura 3.8. Temperatura registrada en la estación TCS-F1, del volcán Ticsani (Periodo: 2006 al 2018). La línea azul representa el promedio anual.

Por otro lado, la Figura 3.9, muestra los valores de temperatura registrados por un dispositivo llamado “Gradiente Térmica”, instalado en la estación TCS-F2. Con este dispositivo, que cuenta con 04 termómetros, desplegados a diferentes profundidades: -10 cm, -30 cm, -50 cm y -70 cm; se pretende discriminar fuentes térmicas de origen exógeno. En esta figura, se puede apreciar una variación de la temperatura entre los meses de enero, febrero y marzo, en los cuatro termómetros. Estas variaciones estarían asociadas a procesos de infiltración durante los periodos de lluvia. Sin embargo, el resto del año, la temperatura recupera su valor. En ese sentido, la temperatura medida en la estación TCS-F2, durante el 2018, tiene un comportamiento similar a la registrada en los años 2016 y 2017.

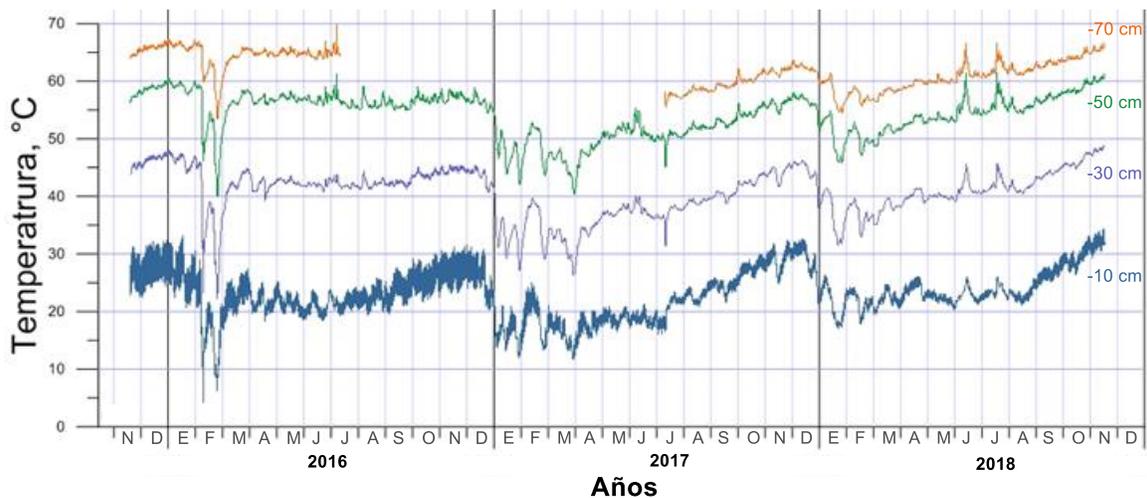


Figura 3.9. Temperatura registrada a diferentes profundidades (Gradiente de Temperatura), en la estación TCS-F2, del volcán Ticsani.

3.4.2. Monitoreo de fuentes termales del Ticsani

Durante el 2018, se obtuvieron un total de 29 muestras correspondientes a 10 fuentes termales: PU1, PU2, PA1, HIB, CUF, CU4, TX1, RFT, SQ1 y SEC (Figura 3.1). La Figura 3.10 muestra los resultados de los análisis de las fuentes muestreadas y su relación con años anteriores. En general, no se observan cambios significativos que nos indique alguna perturbación en el sistema hidrotermal del Ticsani.

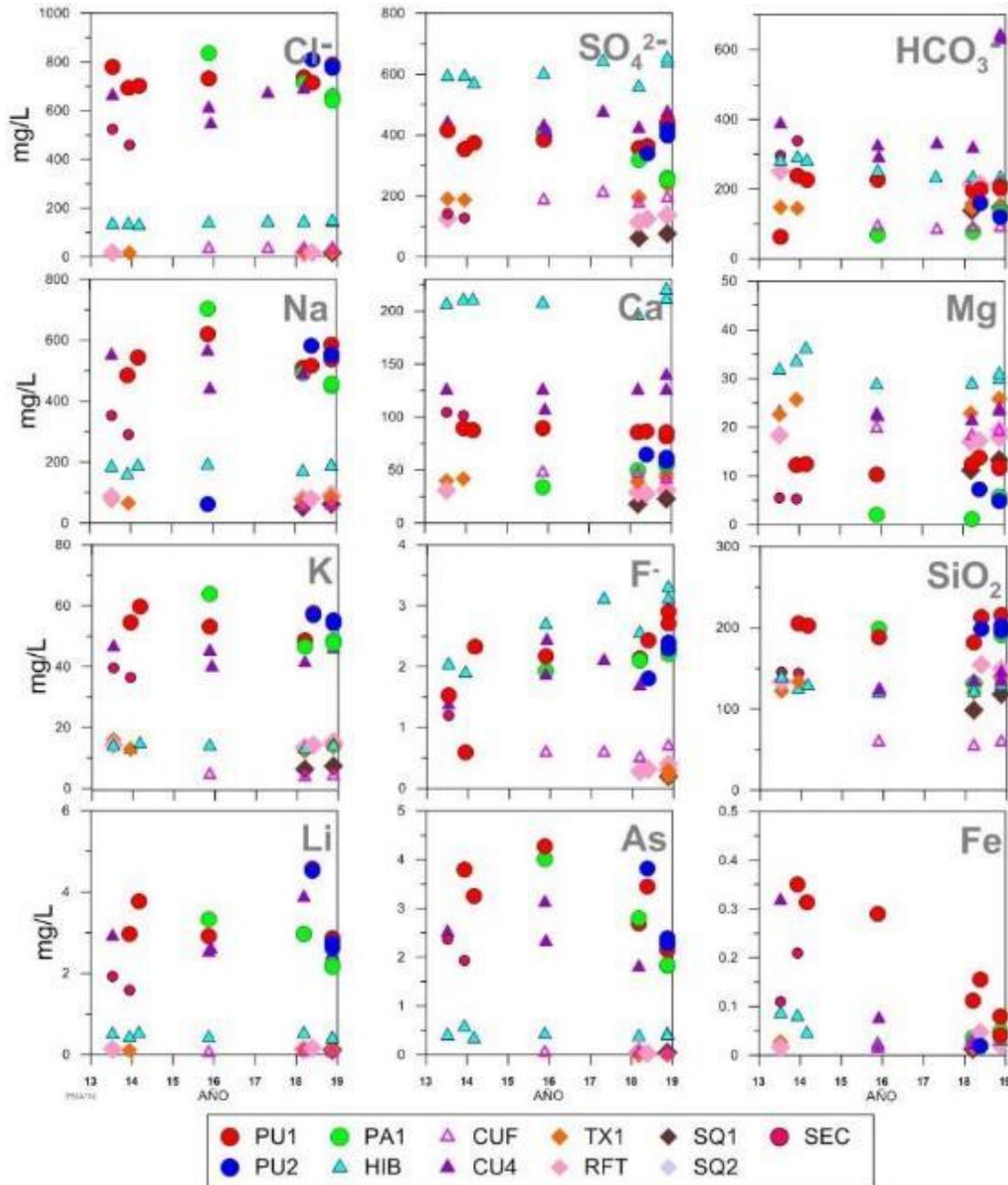


Figura 3.10. Resultado del análisis químico de las aguas de las fuentes PU1, PU2, PA1, HIB, CUF, CU4, TX1, RFT, SQ1 y SEC, del Ticsani, para el 2018.

3.5. Monitoreo Geodésico del Ticsani

Para el monitoreo de la deformación de la superficie del volcán Ticsani, el INGEMMET emplea 2 técnicas: Medición Electrónica de Distancias (EDM) y el Sistema Satelital Global de Navegación (GNSS o GPS). En este año, se efectuaron mediciones EDM y GPS (Figura 3.11), durante las comisiones de mayo y noviembre.



Figura 3.11. Equipos para mediciones GNSS (GPS) y EDM en el volcán Ticsani, empleados durante el año 2018.

3.5.1. Mediciones GNSS en el Ticsani

En el 2018, se realizaron 07 mediciones GNSS, en los puntos de un perfil ubicado en el flanco noroeste del Ticsani y 01 medición en un punto ubicado al sur del Domo3 (Figura 3.12).

La Figura 3.12 muestra la magnitud, dirección y velocidad de los puntos: TXCA, TXFH, TXFF, TXFG, TXFE, TXFC, TXGN y TXDO. En general, todos estos puntos, comparados con mediciones del 2017, presentan una velocidad de desplazamiento de 6 a 11 mm, hacia el este, y de 5 a 8 mm al norte. Por otro lado, la componente vertical del punto TXDO, presentó un alzamiento de 13 mm, mientras la componente horizontal se desplazó entre 6 mm y 8 mm, hacia el este.

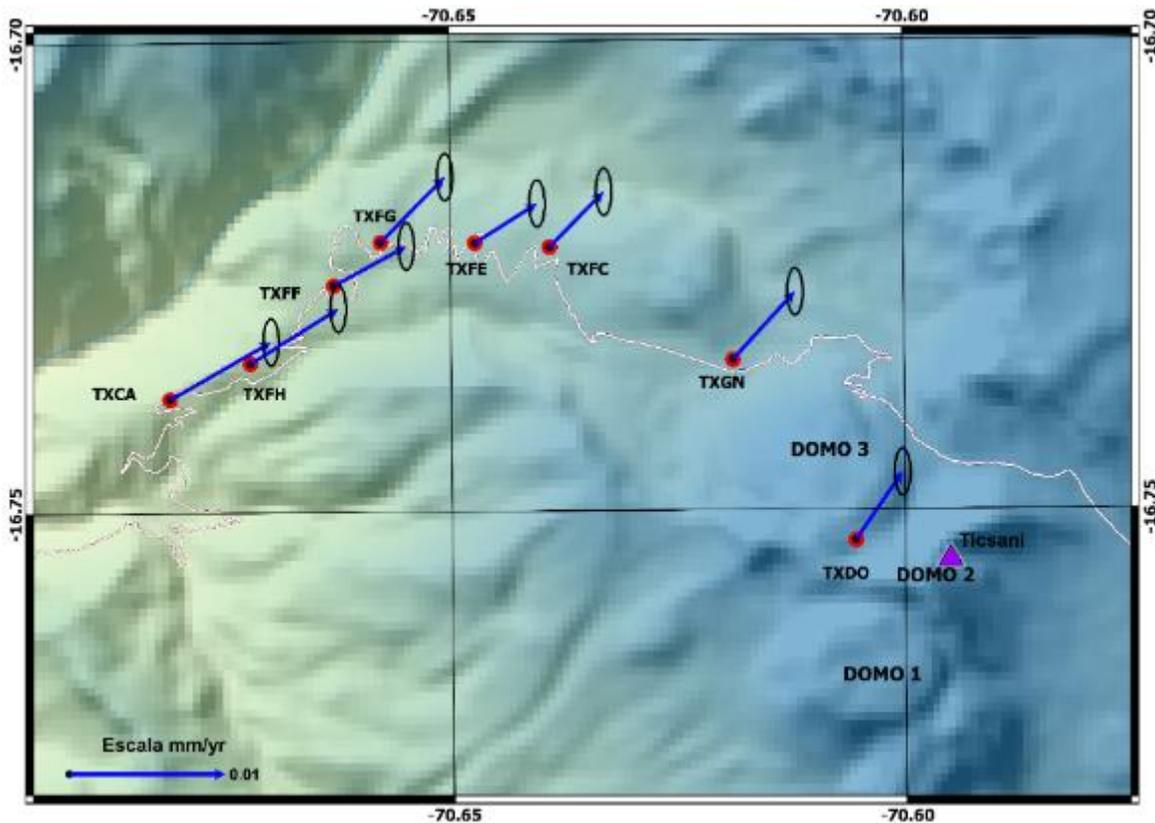


Figura 3.12. Mapa de los vectores de velocidad, obtenidos a partir de los puntos GNSS en el volcán Ticsani, calculados para el 2018.

3.5.2. Mediciones Electrónica de Distancia – EDM en el Ticsani

Las mediciones EDM en el Ticsani, se realizan desde la estación “BASE CAMPAYA” (TSCA), ubicado en el pueblo de Calacoa hacia los 21 prismas que se encuentran en el DOMO3 (Figura 3.1). El procesamiento, análisis e interpretación se realiza con el software TBC (Trimble Bussines Center) de la marca TRIMBLE, que permite obtener soluciones en las tres componentes.

Durante el año 2018 se obtuvieron dos mediciones EDM. Los resultados de éstas mediciones (Figura 3.13), muestran una tendencia negativa, respecto del 2017, lo cual significaría una deflación del domo, sin embargo, considerando el error instrumental sumado a la distancia de medición (>2 km), se asume que la tendencia de la serie se encuentra dentro valor promedio de la línea base EDM.

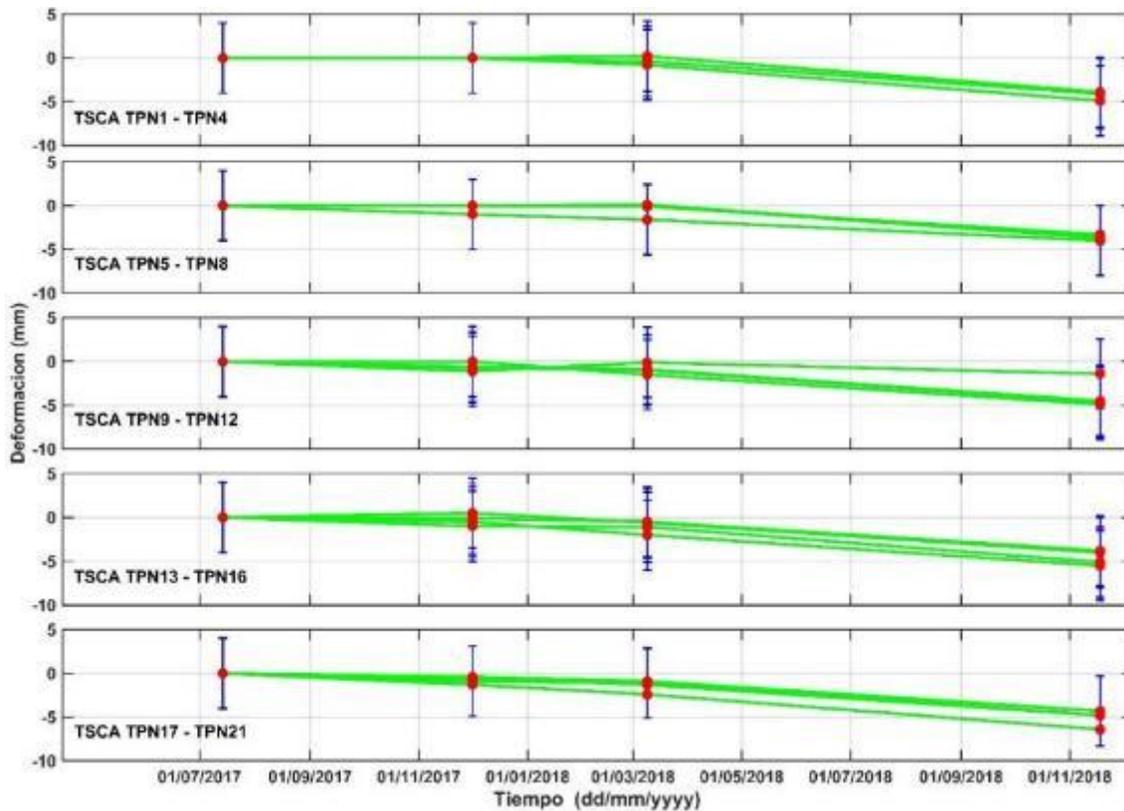


Figura 3.13. Serie temporal de las mediciones Electrónicas de Distancia EDM, en el domo 3 (D3) del volcán Ticsani.

3.6. Monitoreo sísmico del Ticsani

Los equipos empleados para el monitoreo sísmico del Ticsani, durante el 2018, fueron 03 estaciones sísmicas de banda ancha: 02 con almacenamiento de data en su disco interno (TIC01 y TIC03) y 01 con transmisión de data en tiempo real, vía telemetría (TIC02), hacia la oficina del INGEMMET Arequipa. La estación TIC01 fue trasladada a la ubicación de TIC03. La Figura 3.14, muestra la operatividad de éstas estaciones. Las barras sólidas horizontales representan los periodos de funcionamiento de las estaciones y las barras verticales, los periodos sin registro.

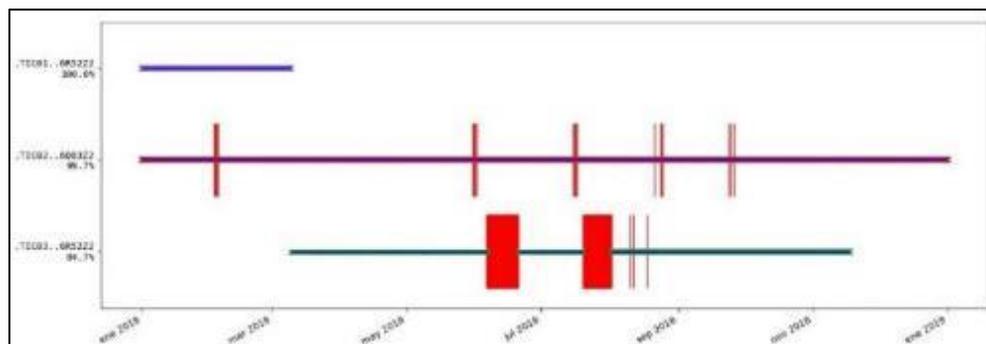


Figura 3.14. Operatividad de las estaciones sísmicas desplegadas en el volcán Ticsani durante el 2018.

3.6.1. Actividad sísmica observada

Durante el 2018, en el volcán Ticsani, sólo se registraron sismos tipo Volcano-Tectónicos (VT). Los VT, son sismos generados por el rompimiento de corteza en el interior del volcán. Los VT se caracterizan por tener fases P y S claras, y por contener altas frecuencias (> 5Hz). Un ejemplo de ellos se presenta en la Figura 3.15.

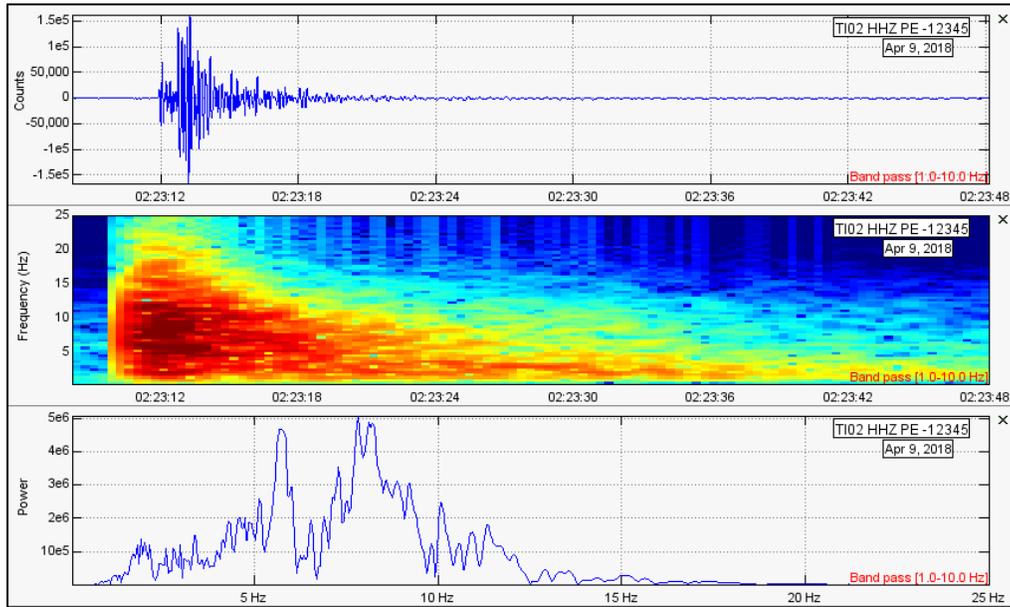


Figura 3.15. Ejemplo de un evento volcano-tectónico VT, registrado el 09 de abril de 2018 en la estación TIC02, componente Vertical.

3.6.2. Estadística por tipo de evento

Los VT registrados en el Ticsani, se presentaron con una tasa de ocurrencia de 23 VT por día, llegando a registrarse un máximo de 480 VT, entre el 16 y 18 de noviembre de 2018 (Figura 3.16), según reza el reporte RSTCS-46-2018/OVI-INGEMMET. Durante el 2018, se han registrado algunos enjambres de sismos tipo VT, según se muestra en los reportes semanales (ovi.ingemmet.gob.pe).

3.6.3. Energía sísmica liberada

La máxima emisión de energía liberada por el Ticsani ocurrió el 17 de noviembre-2018, con 0.06 MJ (Figura 3.16), día en que ocurrió un enjambre sísmico (RSTCS-46-2018/OVI-INGEMMET).

Por otro lado, el cálculo de la energía sísmica acumulada durante el 2018, es de 1.2 MJ (Figura 3.17). Esta cifra es bastante baja, comparada a los calculados en años anteriores.

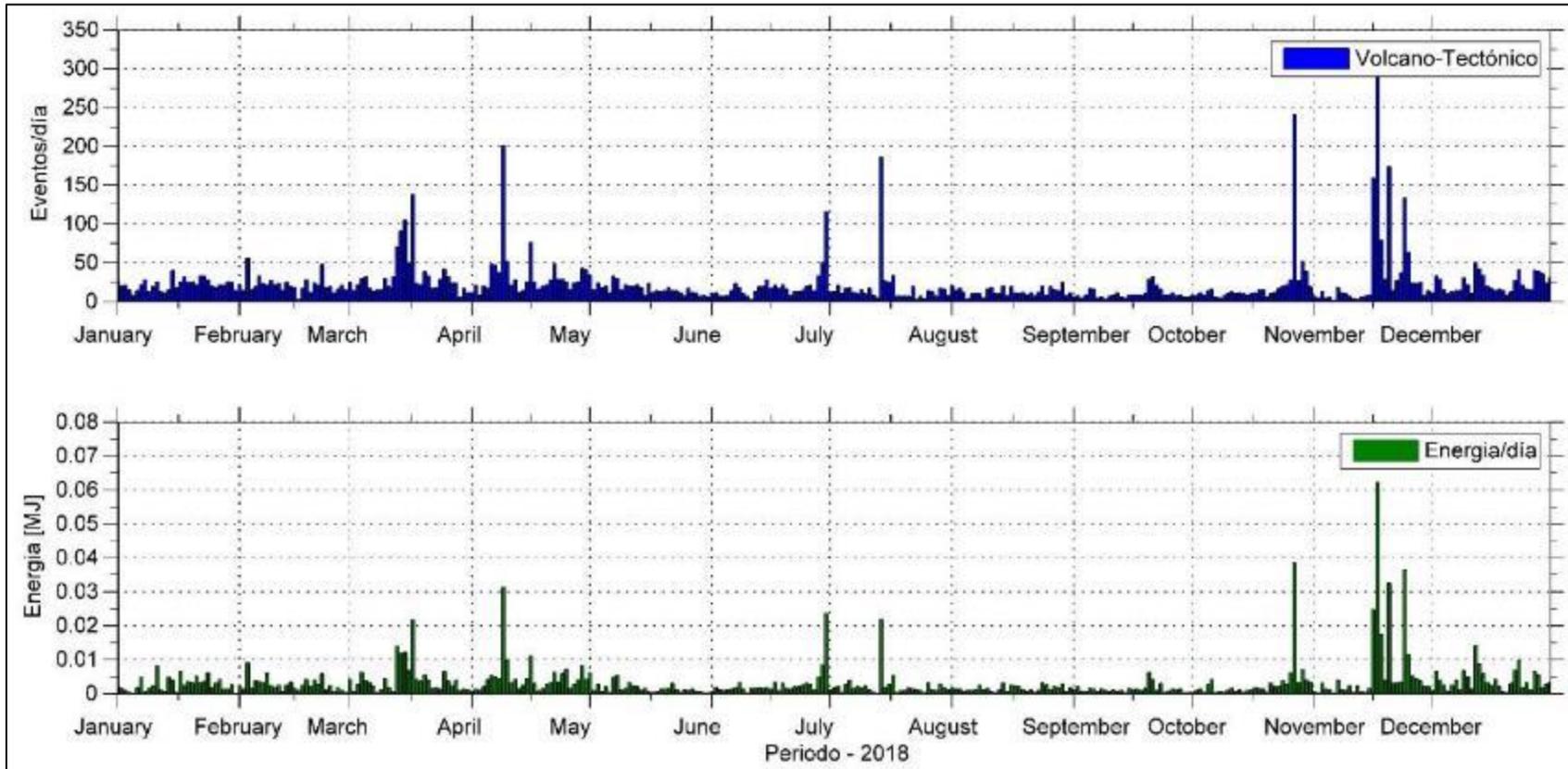


Figura 3.16. Histogramas mostrando la actividad sísmica del volcán Ticsani, registrado durante el periodo enero a diciembre de 2018. VT: sismo Volcano-Tectónico, asociado al fracturamiento de rocas.

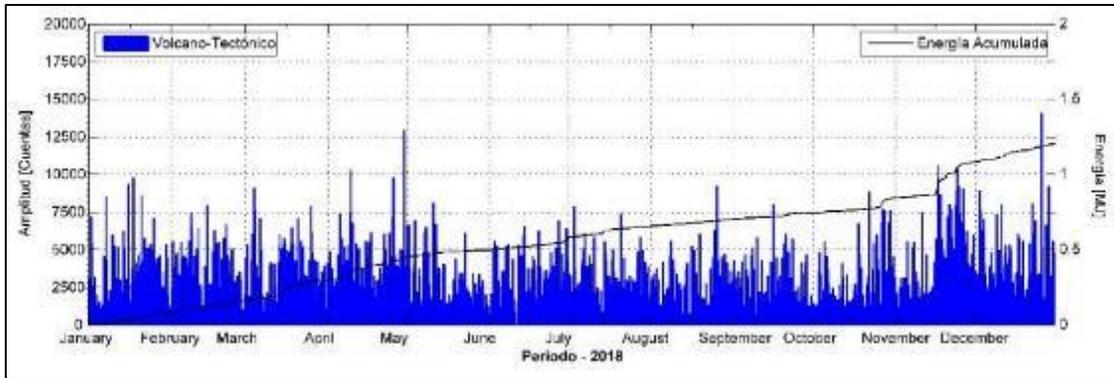


Figura 3.17. Energía sísmica liberada del volcán Ticsani para el periodo enero a diciembre de 2018.

3.6.4. Cambios de velocidad y cambios estructurales

➤ **Método de Ruido Sísmico**

En sismología volcánica, el ruido sísmico se utiliza con dos objetivos: realizar estudios de tomografía y monitorear cambios de velocidad (dv/v). Los cambios de velocidad en ambientes volcánicos se deben, principalmente, a intrusión magmática.

➤ **Cálculo de las funciones de cross-correlación del volcán Ticsani**

Para estimar los cambios de velocidad, primero se calculan las funciones de correlación (FCC) y se verifica su continuidad en el tiempo. Para ello se calcula las FCC en la estación TIC02, entre la componente vertical y una componente horizontal en diferentes bandas de frecuencia. En la Figura 3.18, se muestra el resultado de las FCC de TIC02 en el rango de frecuencias de 0.1-1Hz (10s-1s) durante el 2018.

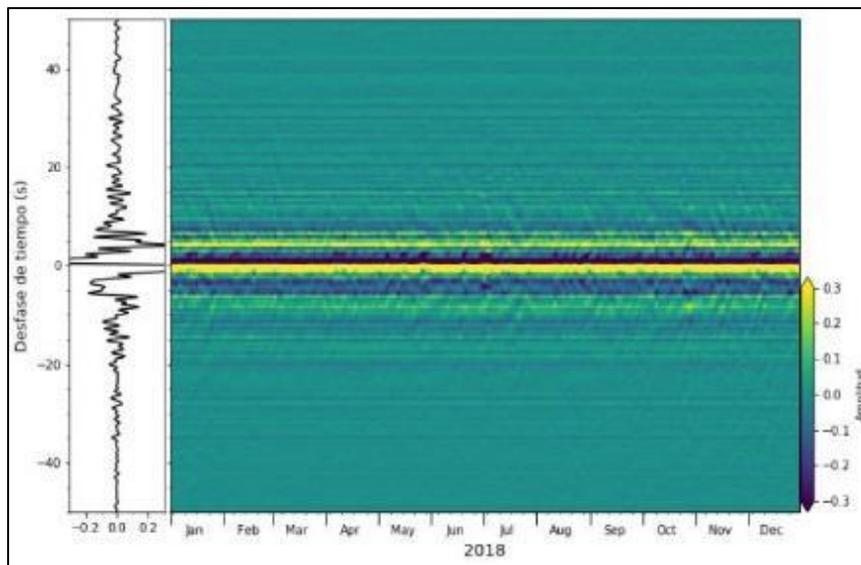


Figura 3.18. Funciones de cross-correlación (FCC) diarias calculadas en la banda de frecuencias 0.1 - 1 Hz, entre las componentes Z-E de la estación TIC02 durante el 2018 y su respectiva forma de onda promedio (lado izquierdo).

➤ Cambios de velocidad y estructurales del volcán Ticsani

Para estimar los cambios de velocidad sísmica, usamos las FCC empleando el método Stretching que opera en el dominio del tiempo (Lobkis and Weaver, 2003). Los cambios de velocidad aparentes y los coeficientes de correlación(CC) se estiman comparando dos formas de onda: la señal de referencia y las funciones de correlación actual. En nuestro caso, la traza de referencia es la forma de onda resultado de promediar la FCC.

Durante el presente año, se ha continuado con el monitoreo de cambios de velocidad (dv/v) y de de-correlación de la forma de onda ($1-CC$; cambios estructurales) del Ticsani. La Figura 3.19, muestra que durante este año las velocidades sísmicas en el interior del volcán han variado entre el -0.15% y $+0.15\%$, sin embargo, no se han identificado cambios significativos relacionados a procesos magmáticos en el interior del volcán. Por su parte, la actividad tectónica ha perturbado claramente las propiedades físicas del volcán, ya que, los dos sismos importantes de $M_w > 7.0$ ocurridos durante este año (14-01-2018 a 09:18:45 UTC y 24-08-2018 a 09:04:08 UTC), coinciden con disminuciones de la velocidad del orden -0.2% .

La serie temporal de los coeficientes de correlación (CC), muestra una serie muy estable a lo largo del año con valores constantes por encima de 0.92 (Figura 3.5.6b), lo que indica que las estructuras internas del volcán (fracturas, fallas, cavidades, etc.) no han cambiado durante este año. Sin embargo, se pueden observar pequeñas variaciones del CC que disminuyen hasta cerca de 0.75 (a finales de mayo y finales de junio), y posiblemente estén asociados a cambios abruptos en las condiciones atmosféricas a nivel regional o la activación temporal de algunas fuentes.

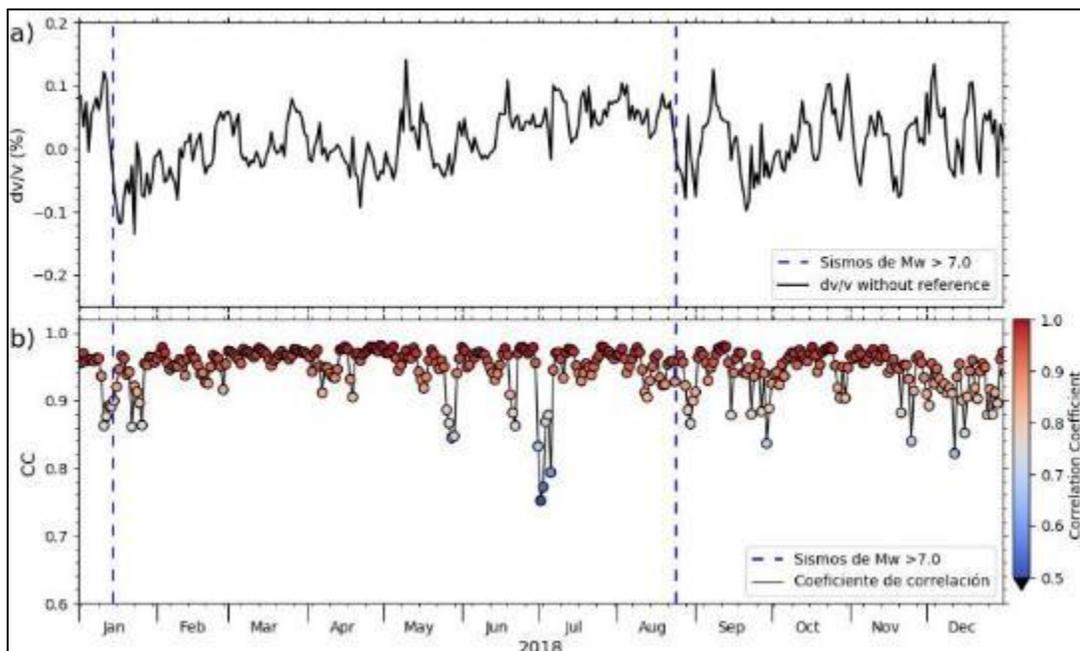


Figura 3.19. a) Cambios de velocidad (dv/v) calculados para las FCC de las componentes Z-E de la estación TIC02 [0.1- 1 Hz]. b) Serie temporal de los coeficientes de correlación (CC) con su respectivo código de color.

3.7. Estudios geo-eléctricos en el Ticsani

En este año, se realizaron mediciones de Potencial Espontáneo a lo largo de un perfil de 1.14 km (Figura 3.20). Este perfil consta de 57 mediciones realizados el 09 de marzo-2018, sobre el sector norte de la cumbre del Ticsani. El punto inicial (la cumbre del Ticsani) coincide con el inicio de los perfiles radiales establecidos en años anteriores (Lazarte, 2018). El paso de muestreo de éstas mediciones fue cada 20 metros de distancia.



Figura 3.20. Mediciones de SP en el sector norte del volcán Ticsani.

3.7.1. Perfiles de Potencial Espontáneo (SP)

La Figura 3.21, muestra el perfil de SP (línea en color naranja) y su relación con la topografía (línea en color azul), sobre el cual ha sido medido. Los primeros 350 metros presentan una respuesta del terreno ascendente, de 0 mV a 400 mV; quizás asociado a la proximidad a los campos fumarólicos en la cumbre del volcán. Posteriormente, hasta los 920 m, los valores de SP son estables, sin mayores variaciones. Finalmente, en los últimos 200 m, se observa una variación entre 62 mV y 693 mV. Estas variaciones estarían asociados al sistema hidrotermal del Ticsani.

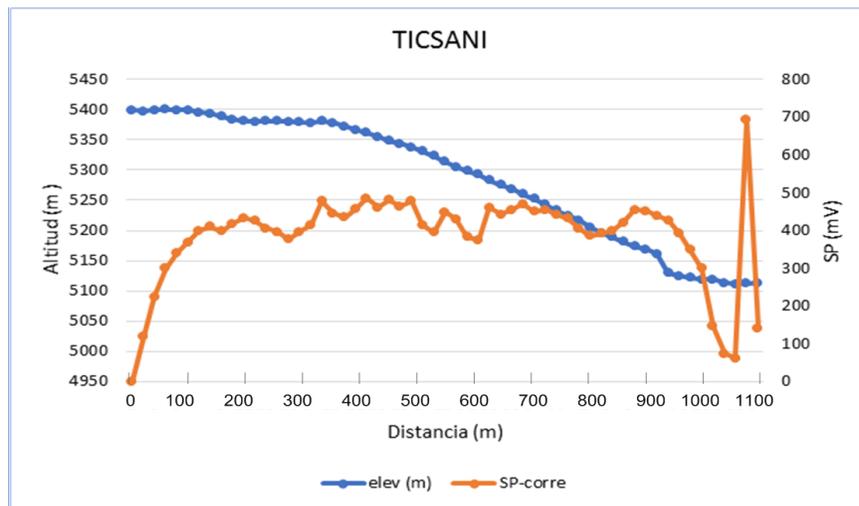


Figura 3.21. Resultados de las mediciones de SP en el sector norte del volcán Ticsani.

3.8. Discusión

- El volcán Ticsani es un volcán activo. Presentó su último proceso eruptivo hace menos de 400 años. En las últimas décadas, éste volcán ha presentado síntomas de intranquilidad volcánica, consistente de sismicidad inusual y al calentamiento de su edificio volcánico.
- El INGEMMET mantiene en operación dos modernas estaciones sísmicas de banda ancha en el Ticsani. La estación TIC01 fue trasladada a la ubicación de TIC03, en el domo 2, el 09 de marzo-2018, con la finalidad de registrar sismos asociados a movimientos de fluidos. Ésta estación sólo registró sismos tipo VT.
- Los registros de la temperatura de las fumarolas, realizados con la estación TSC-F1, ha presentado una disminución, en su media anual, de 2.27°C, entre el 2017 y el 2018. Si bien esta disminución no es concordante con el incremento de temperatura experimentado entre el 2013 y 2017, se puede atribuir este descenso de temperatura a fuentes externas, tales como la infiltración de agua meteórica. Como se puede apreciar en la gradiente térmica de la estación TSC-F2, estas variaciones pueden afectar hasta los 70 cm de profundidad.
- Las observaciones de campo, permiten visualizar zonas no cubiertas por nieve, a diferencia de su entorno. Este fenómeno se explicaría porque dicha zona estaría caliente y no permitiría la conservación de nieve en la superficie.
- El análisis de las mediciones GPS realizadas en el volcán Ticsani, han permitido confeccionar mapas con vectores de velocidad. Éstos vectores indican un desplazamiento hacia el NE. Sin embargo, es necesario replicar estas mediciones en todo el edificio volcánico para conocer cuál es la tendencia de deformación del edificio volcánico.
- En general, asumimos que el sistema hidrotermal del Ticsani no ha presentado variaciones significativas.

4. Capítulo IV: Monitoreo del volcán Tutupaca

4.1. Introducción

El volcán Tutupaca se encuentra ubicado en la región Tacna, provincia de Candarave. El monitoreo de este volcán se basa, únicamente en observaciones y mediciones de campo. En esta ocasión, se muestran los resultados obtenidos durante la comisión de servicios del 08 de marzo del 2018.

4.2. Monitoreo visual del Tutupaca

En este año, no se pudo apreciar las emisiones fumarólicas que generalmente brotan en la cumbre del Tutupaca, debido a la presencia de nubes (Figura 4.1). Sin embargo, en las laderas del llamado “anfiteatro” (Figura 4.2), se notaron emisiones color blanquecino, con fuerte olor a huevo podrido. De manera similar a las observadas en años anteriores.



Figura 4.1. Vista del volcán Tutupaca desde el noreste.



Figura 4.2. Vista del borde este del anfiteatro del volcán Tutupaca. Las flechas rojas indican la ubicación de las emisiones fumarólicas.

4.3. Monitoreo geoquímico del Tutupaca

El monitoreo geoquímico del volcán Tutupaca, se centra, únicamente en el muestreo de fuentes termales efectuadas en la comisión de servicios de marzo del 2018.

4.3.1. Monitoreo de fuentes termales en el Tutupaca

Durante este año, se obtuvieron muestras de tres fuentes termales: TU46, TU12 y TU23. No se concretó el muestreo en las otras dos fuentes: TU03 y TU34, debido a la crecida de los ríos, que impidieron el acceso. Las fuentes termales se encuentran en un radio menor a los 12 km del volcán.

La Figura 4.3 exhibe la ubicación de las fuentes termales muestreadas para este informe, de igual manera, la Figura 4.4, presenta los resultados de los análisis de las aguas muestreadas durante el 2018. En general, los resultados de las muestras obtenidas durante este año, guardan relación con los resultados de los análisis obtenidos en años anteriores.

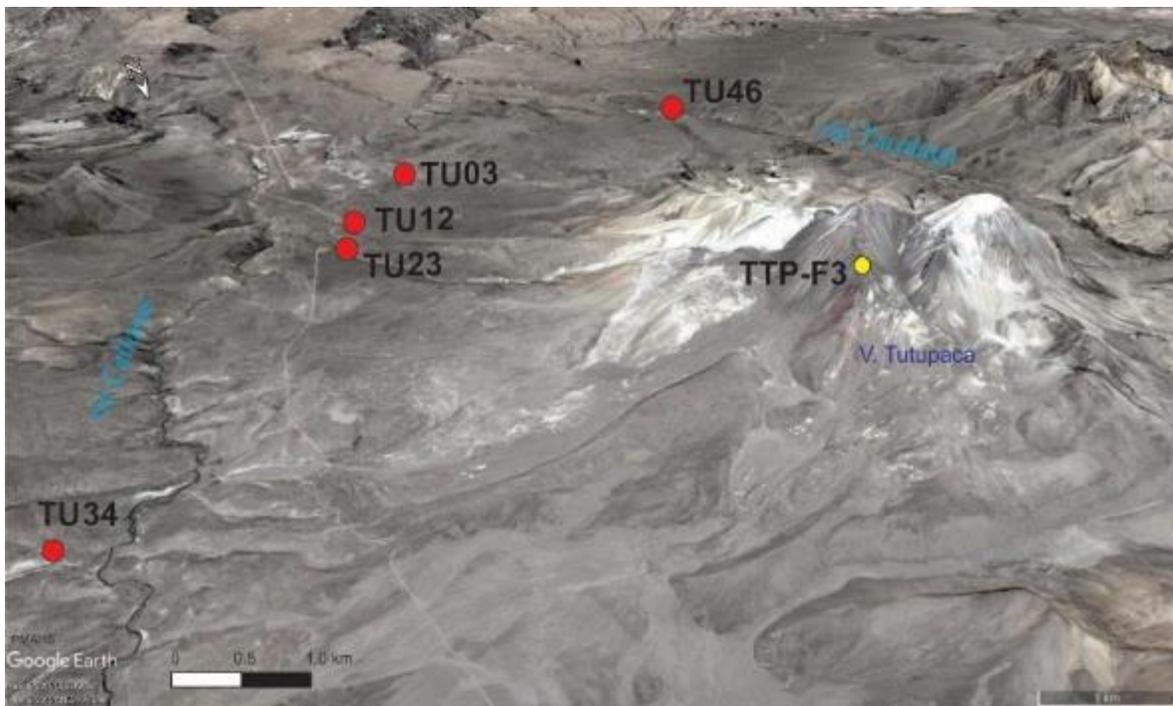


Figura 4.3. Mapa de ubicación de las fuentes termales monitoreadas en el volcán Tutupaca.

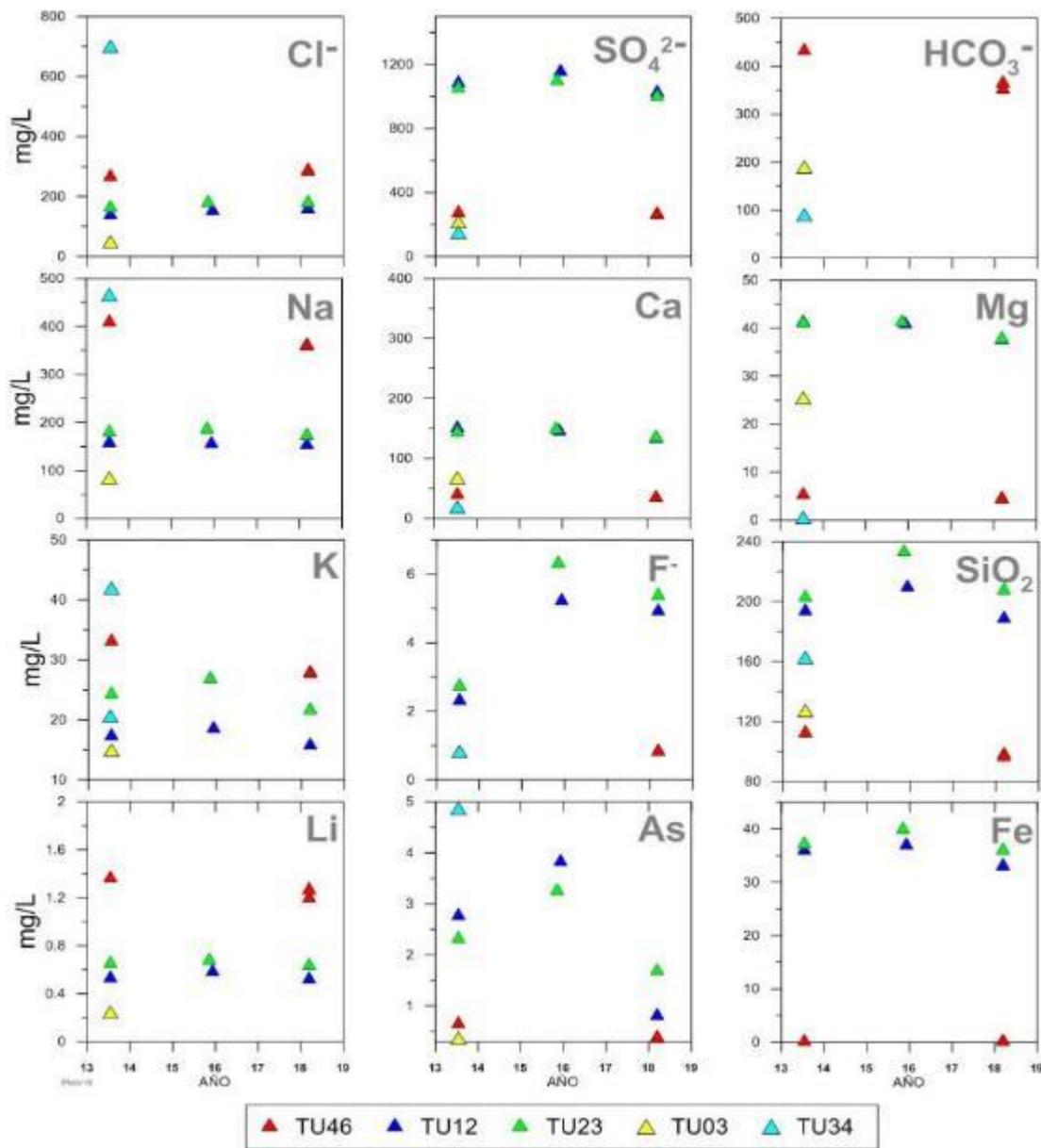


Figura 4.4. Concentración de aniones de las aguas del Tutupaca, entre el 2013 y el 2018.

4.4. Monitoreo geodésico del Tutupaca

El INGEMMET tiene información de deformación del Tutupaca desde agosto del 2012. La programación de mediciones GPS en el Tutupaca, es de una vez por año. Durante el 2018, el INGEMMET realizó mediciones GNSS, en cuatro puntos (TUP1, TUP2, TUP4 y TUP5), distribuidos en el flanco noreste (Figura 4.5) del volcán. El procesamiento, análisis e interpretación se realizó a través del empleo en software TBC (Trimble Business Center) de la marca TRIMBLE, que permite obtener soluciones de las posiciones en las tres componentes.

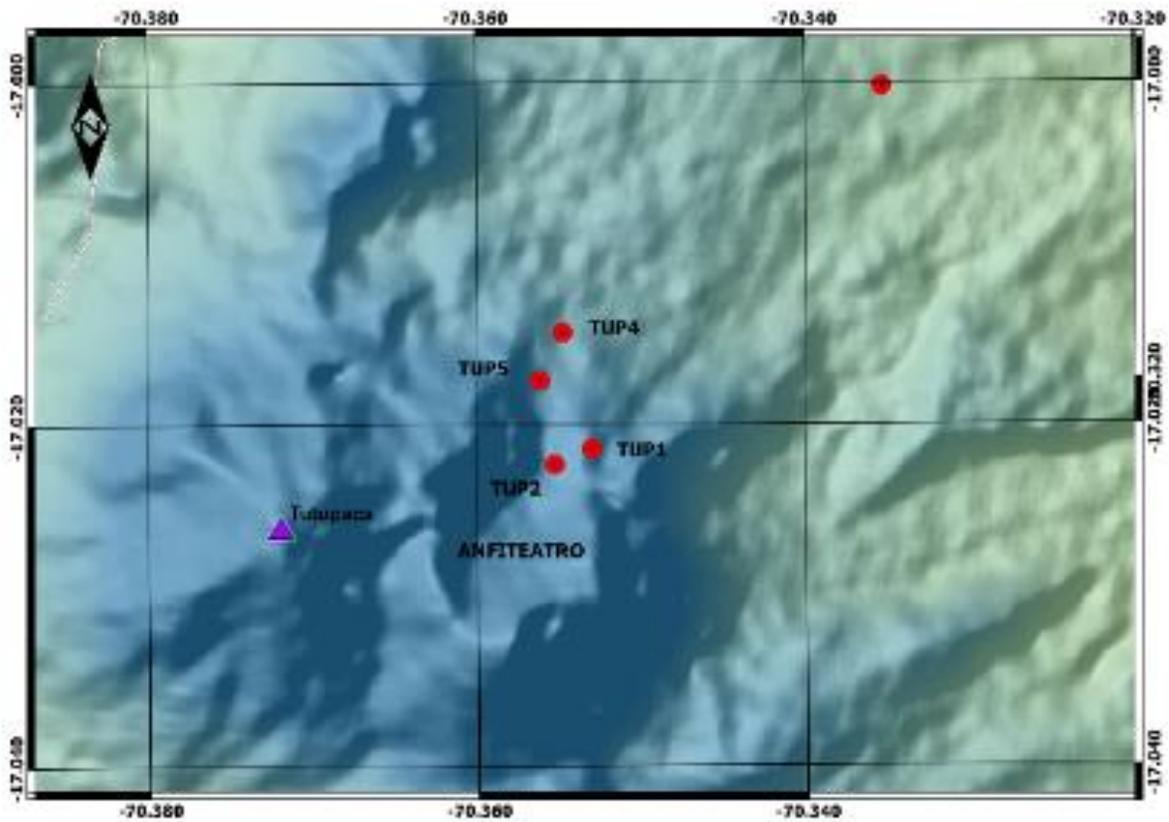


Figura 4.5. Distribución de puntos de monitoreo GNSS en el volcán Tutupaca para el 2018.

4.4.1. Análisis de resultados de las mediciones GNSS

El análisis de las mediciones en los 04 puntos, ha permitido confeccionar un mapa de velocidades (Figura 4.6), donde se aprecia que todos los puntos, se desplazan, a la misma velocidad y dirección, o sea, entre 11 mm y 29 mm, por año, hacia el noreste. Probablemente, esto se deba a la presencia de dos principales fallas geológicas que atraviesan longitudinalmente el anfiteatro: la “Falla Blanco”, ubicada en la parte inferior y la “Falla Azufre Chico”, que cruza longitudinalmente por medio del anfiteatro (Manrique, 2013).

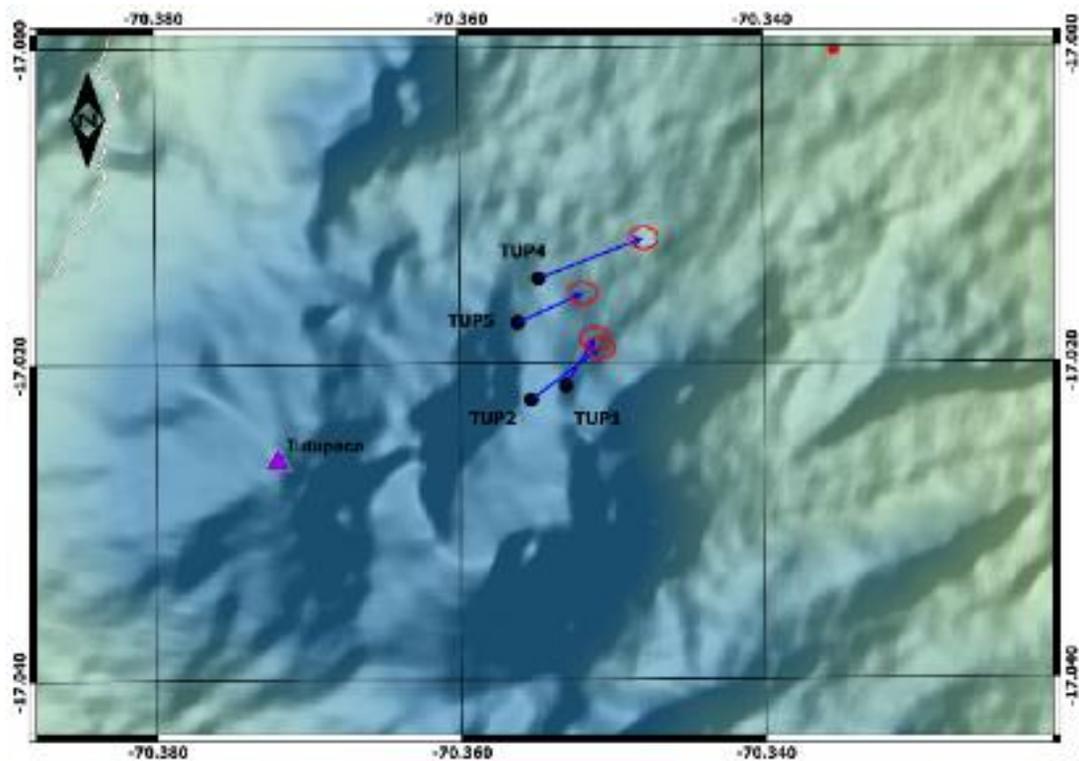


Figura 4.6. Mapa de velocidades de los puntos GNSS temporales en el volcán Tutupaca, los vectores indican la magnitud de los desplazamientos de cada punto en evaluación.

4.5. Discusión

Depósitos de material volcánico revelan que el volcán Tutupaca (Tacna), ha presentado erupciones plinianas a subplinianas en tiempos históricos; los más representativos corresponden a los años 1787 y 1802 d.C., con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) igual a 3 (Samaniego et al., 2015). Actualmente, el Tutupaca presenta pequeñas emisiones fumarólicas y fuentes de agua termal.

Una próxima erupción del Tutupaca, podría afectar a poblados ubicados dentro de un radio de 40 km, como Chilligua, Humahalso, Huaytire, Churilaca, Candarave, Camilaca, Cairani, etc. De igual forma, infraestructura de centros mineros como Toquepala, Cuajone y Quellaveco, y represas como Cularjahuira y Camilaca, serían afectados. La carretera interoceánica, la carretera binacional, los campamentos de Pasto Grande, etc., serán seriamente afectados. Ni que decir de la flora y fauna de la región.

Recientes estudios geológicos indican que el volcán Tutupaca, tendría erupciones muy violentas, similares a la producida por el volcán Mont Sant Helens- USA. Las limitaciones logísticas, la erupción de los volcanes Ubinas (2006-2009 y 2013-2017) y Sabancaya (2016-actualidad), no han permitido darle la importancia que debiera.

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, realiza una Comisión de Servicios por año a este volcán con una brigada multidisciplinaria conformada por geoquímicos que muestrean y analizan las aguas termales, y geodestas que miden la deformación de la superficie de este volcán.

5. Capítulo V: Monitoreo del volcán Yucamani

5.1. Introducción

El volcán Yucamani se encuentra ubicado en la región Tacna, provincia de Candarave. Considerado como uno de los 8 volcanes activos, pertenece a la Zona Volcánica Central de los Andes (De Silva & Francis, 1991). El monitoreo de este volcán se restringe a una visita anual para comprobar su estado. Así en el mes de marzo-2018, una brigada del INGEMMET inspeccionó este volcán. Los resultados de esta inspección se detallan en este informe.

5.2. Monitoreo visual del Yucamani

Las Figuras 5.1 a 5.4 muestran imágenes de los flancos SW, S, SE y NE del volcán Yucamani. El día 7 de marzo, la brigada del INGEMMET, ascendió a la cumbre del Yucamani. El día prometía ser soleado y con buena visibilidad, sin embargo, durante el ascenso al volcán, el clima cambió abruptamente, imposibilitando la visión al interior del cráter del Yucamani. Durante el descenso, por el sector noreste, a pesar de la neblina y la granizada, se pudo divisar un alineamiento de emisiones gaseosas de color blanquecino, que se elevaban algunos metros sobre la superficie del suelo (Figura 5.5). Este alineamiento, correspondería a la “Falla Yucamani” (Fidel & Huamaní, 2001).



Figura 5.1. Vista del flanco suroeste del volcán Yucamani (08 de marzo-2018).



Figura 5.2. Vista del flanco sur del Yucamani (09 de marzo-2018).



Figura 5.3. Vista del flanco sureste del Yucamani (09 de marzo-2018).



Figura 5.4. Vista del flanco noreste del Yucamani (09 de marzo-2018).



Figura 5.5. Emisiones fumarólicas en el sector noreste del volcán Yucamani (7 de marzo-2018).

5.3. Monitoreo geoquímico del Yucamani

El INGEMMET dispone de información geoquímica del Yucamani desde el 2007. Dada su poca actividad volcánica, el muestreo de las fuentes termales asociadas a este volcán se realiza en forma esporádica.

5.3.1. Muestreo de fuentes termales del Yucamani

Durante el 2018 se muestrearon 4 fuentes termales: YU1, YU2, YU4 y YU8 (Figura 5.6). Éstas fuentes termales se encuentran en el cauce del río calientes, en un radio menor a los 13 km del volcán.



Figura 5.6. Ubicación de las fuentes termales monitoreadas en el río Calientes.

La Figura 5.7 muestra una de las fuentes muestreadas para este informe. La Figura 5.8, presenta los resultados del monitoreo de las fuentes termales en la zona de Calientes. En general, se observa que no hay cambios significativos en los componentes iónicos de éstas aguas.



Figura 5.7. Vista del volcán Yucamani desde el sector norte.

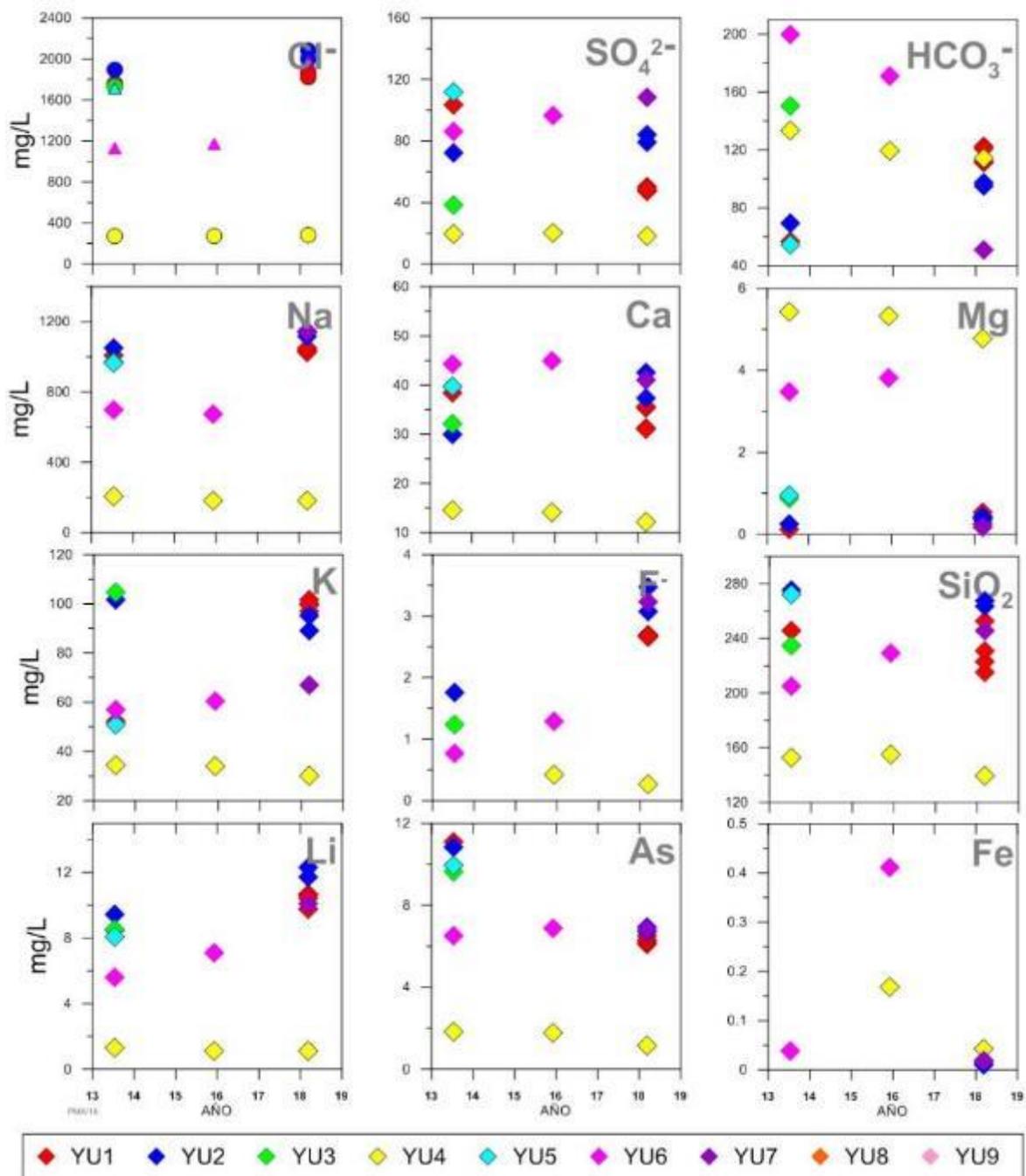


Figura 5.8. Gráfica de las concentraciones de analitos presentes en las aguas del Yucamani, entre el 2013 y el 2018.

5.3.2. Las fumarolas del Yucamani

Durante los últimos años, se ascendió al Yucamani a fin de encontrar emisiones fumarólicas, sin éxito. En este año, descendiendo por la zona noroeste, se divisó un alineamiento de emisiones gaseosas de algunos metros de altitud (Figura 5.9). Se logró medir 25°C en los intersticios por donde emanaban las emisiones a diferencia de los 9° C que era la temperatura del ambiente.



Figura 5.9. Ubicación de las emisiones fumarólicas del volcán Yucamani.

5.4. Estudios geo-eléctricos en el Yucamani

Durante la comisión de servicios del 07 de marzo-2018, se realizó un perfil con mediciones de Potencial Espontáneo (Figura 5.10 y 5.11). En total se realizaron 45 mediciones con una frecuencia de muestreo de 20 m, a lo largo de 900 m lineales. El punto de inicio de este perfil fue el sector noreste de la cumbre de este volcán, y se descendió sobre terreno arenoso, sin bloques de rocas.



Figura 5.10. Preparación del equipo de medición de Potencial Espontáneo en el volcán Yucamani.



Figura 5.11. Ubicación del perfil de SP, en el sector norte del volcán Yucamani.

5.4.1. Resultados de las mediciones SP en el volcán Yucamani

La Figura 5.12 muestra la correlación entre las mediciones SP realizadas en el volcán Ticsani (curvas en color naranja) y la topografía sobre la cual se realizó (curvas en color azul). En general, se observa una diferencia de potencial de -747 mV entre el inicio y el final del perfil. Si bien, el relieve topográfico se muestra llano, la respuesta del SP presenta dos tendencias. La primera, dentro de los primeros 500 m, sobre los 5000 msnm y la segunda, los últimos 900 m, correspondiente a las cotas bajas. Sin embargo, la señal de SP continúa descendiendo, lo que podría indicar que aún no se ha identificado el límite del sistema hidrotermal del Yucamani, y que éste estaría mucho más abajo.

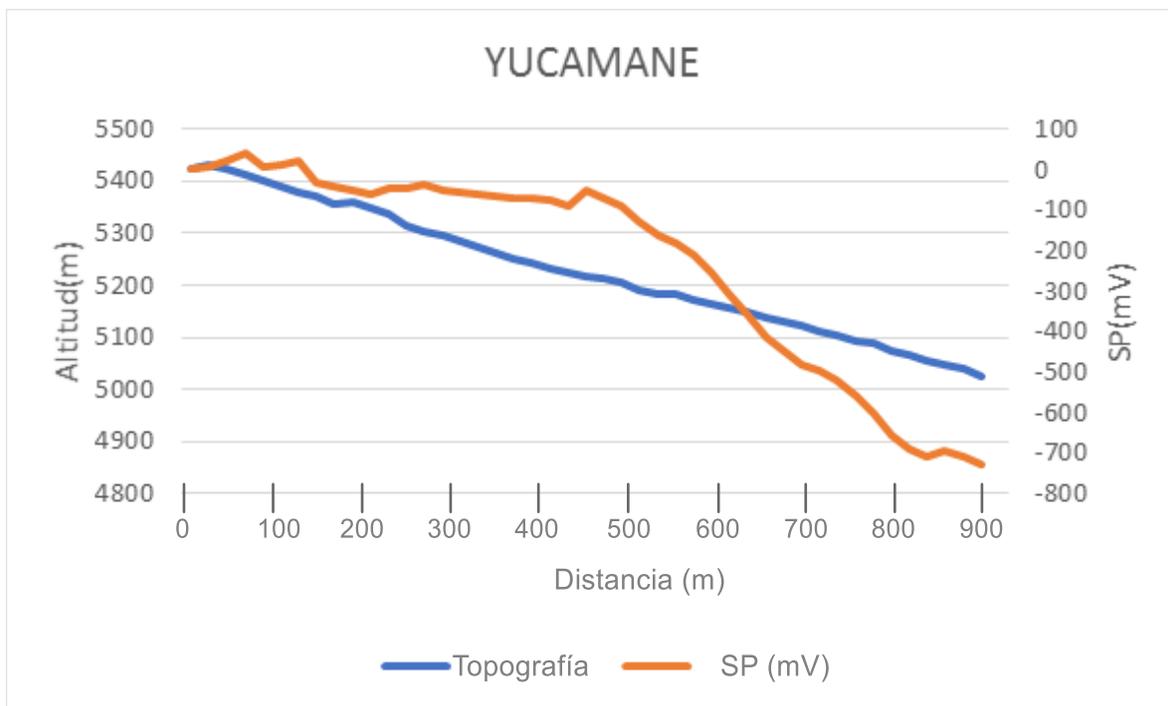


Figura 5.12. Resultados de las mediciones de SP en el sector noreste del volcán Yucamani.

5.5. Discusión

En el volcán Yucamani, es un volcán activo con manifestaciones geotermales tanto en el edificio volcánico como en los alrededores de éste. El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, ha realizado una comisión de servicios a este volcán durante el 2018. En éste año, una brigada multidisciplinaria conformada por geoquímicos y geofísicos, identificó un alineamiento de emisiones fumarólicas en el sector norte del volcán. Por este alineamiento, emanaban gases de color blanco y se apreció mayor temperatura.

Es recomendable seguir con las mediciones de monitoreo en este volcán.

Actualmente el monitoreo muy discreto y esporádico, es por esta periodicidad por lo que, posiblemente no se encuentren cambios leves en su actividad. En términos generales no se ha encontrado cambios significativos.

Para mejorar este monitoreo es necesario colocar equipos de registro continuo, que nos den un poco más de detalle de su actividad.

La exploración de puntos calientes de emisión de gases y caracterización del sistema hidrotermal, debe continuar, para la instalación de una estación que nos indique, en un futuro, el posible ascenso de un cuerpo magmático. En los trabajos realizados por INGEMMET, como el mapa de peligros, se ha determinado que, de darse un nuevo proceso eruptivo, las zonas afectadas podrían ejercer un gran perjuicio social y económico en la región.

6. Capítulo VI: Monitoreo del volcán Purupuruni

6.1. Introducción

El volcán Purupuruni se encuentra ubicado en la región Tacna, provincia de Tarata. Pertenece a la Zona Volcánica Central de los Andes (De Silva et al., 1991). Existe muy poca información sobre éste volcán. La información que se presenta en éste informe, es el resultado de una comisión de servicios que se realizó el 11 de marzo-2018.

6.2. Observaciones de campo

Durante la inspección del 11 de marzo-2018, no se pudieron apreciar emisiones fumarólicas en el volcán Purupuruni. Las Figuras 6.1 y 6.2, muestran vistas de los flancos este y sur del Purupuruni, respectivamente.



Figura 6.1. Vista del flanco ESTE del Purupuruni (11 de marzo-2018).



Figura 6.2. Vista del flanco sur del Purupuruni (11 de marzo-2018).

6.3. Muestreo geoquímico

Durante esta brigada de campo, se tomaron muestras de fuentes termales BOR y CLC (Figura 6.3).

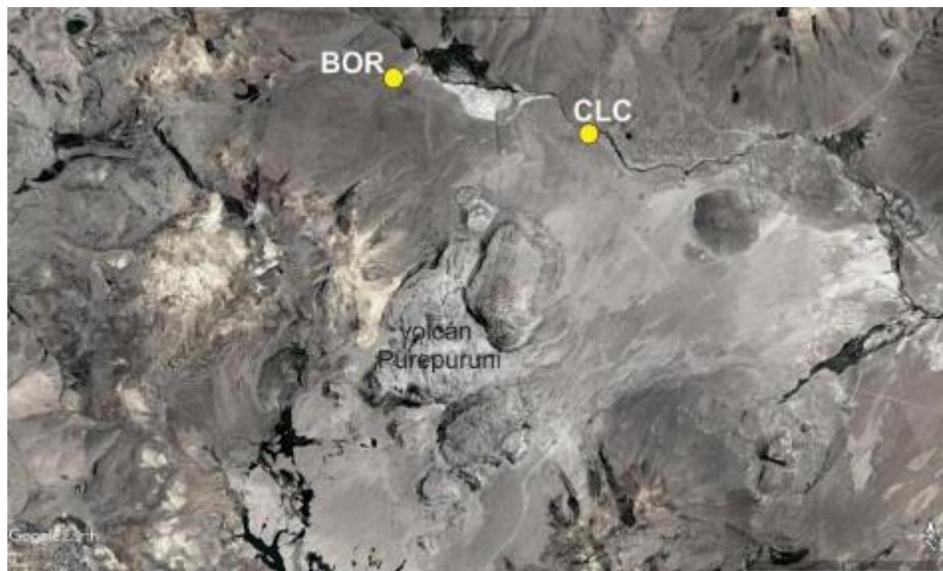


Figura 6.3. Ubicación de las fuentes termales BOR y CLC, muestreadas en las inmediaciones del volcán Purupuruni.

6.4. Resultados del análisis químico de las fuentes termales del Purupuruni

Las Figura 6.4 y 6.5, muestran los resultados de las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios de las fuentes BOR y CLC. Podemos observar que las aguas de ambas fuentes se encuentran en la zona de aguas maduras. Con altos contenidos de Cl y Na+K. Las temperaturas de éstas aguas se encuentran entre 30.5°C.

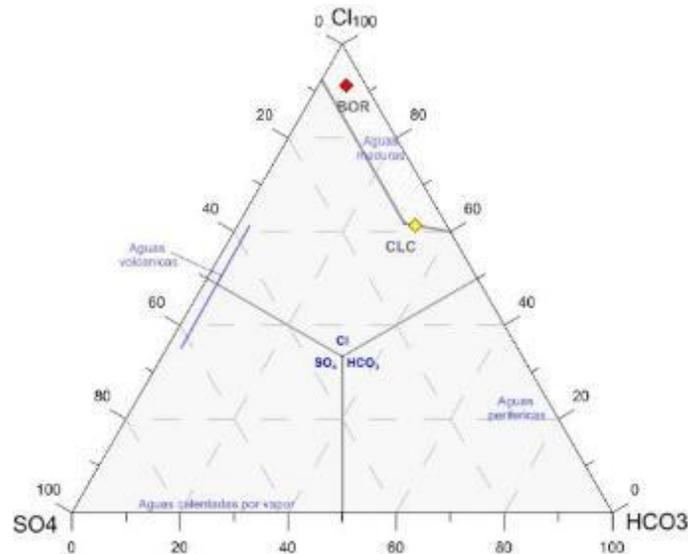


Figura 6.4. Diagrama ternario de SO_4 , HCO_3 y Cl , para las muestras de las fuentes BOR y CLC del volcán Purupuruni, marzo-2018.

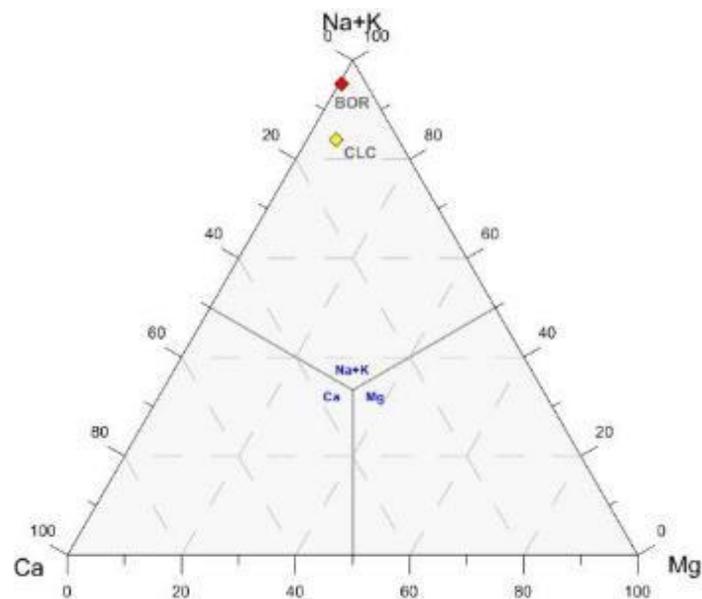


Figura 6.5. Diagrama ternario de Ca , Mg y Na-K , para las muestras de las fuentes BOR y CLC del volcán Purupuruni, marzo-2018.



Figura 6.6. Medición de temperatura de la fuente CLC en el Purupuruni.



Figura 6.7. Muestreo en la fuente BOR del volcán Purupuruni.

6.5. Discusión

En este volcán es necesario realizar mayores estudios a fin de determinar la existencia de un sistema hidrotermal. Esto nos puede dar más luces sobre la posibilidad que se trate de un volcán activo.

7. CONCLUSIONES

- Mediante este informe se da a conocer si han ocurrido cambios en la actividad de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca y Yucamani, durante el 2018, comparándolo con los parámetros de actividad registrados años anteriores.
- Se han realizado las primeras mediciones con el fin de establecer una línea base en el volcán Purupuruni.
- La actividad volcánica del Ubinas se mantiene dinámica, durante el 2018 no tubo manifestaciones eruptivas a excepción de la explosión freática de diciembre. Sin embargo, durante 2018 fue el segundo más activo del Perú, después del Sabancaya.
- La actividad del Ticsani, Tutupaca y Yucamani, fue típica de un volcán activo, no mostrando cambios significativos que indique una inmediata reactivación.
- En general la actividad de los volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamani y Purupuruni durante el 2018, tuvieron un comportamiento, que se puede asociar con un nivel de aleta de actividad volcánica de color verde.

8. RECOMENDACIONES

Debido a que la actividad eruptiva del volcán Ubinas, en los últimos 11 años se ha caracterizado por el ascenso de magma desencadenando procesos eruptivos prolongados, con incrementos de actividad periódicos y repetitivos. Mientras que los volcanes Ticsani, Tutupaca y Yucamani tuvieron actividad reciente, se debe considerar:

- Continuar con el monitoreo del volcán de forma permanente y periódica, a fin de establecer continuidad en los registros de datos para establecer el comportamiento de la actividad en diferentes periodos y probablemente establecer una recurrencia de la actividad.
- Instalar sistemas de detección de cuerpos calientes en los cráteres.
- Continuar la implementación de sistemas de monitoreo a fin de acercarnos al ideal propuesto para cada volcán según la evaluación de requerimientos de monitoreo.
- Optimizar la recolección sistemática de productos emitidos.
- Tener en cuenta los mapas de peligros de estos volcanes Ubinas, Ticsani, Tutupaca y Yucamani para la elaboración de los planes de contingencia, ante el inicio de un nuevo proceso eruptivo en alguno de estos volcanes.
- Mantenerse informados del seguimiento de la actividad en estos volcanes a través de los reportes emitidos por el INGEMMET (<http://ovi.ingemmet.gob.pe/>)
- Mejorar los sistemas de monitoreo para alcanzar el ideal propuestos para los volcanes activos del Perú.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Battaglia, M., Cervelli, P.F., Murray, J.R., (2013b). dMODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 254.
- De Silva V. & Francis, P., (1991)- *Volcanoes of the Central Andes*. Springer, Berlin, p 34-35.
- Fidel, L., Morche, W., Nuñez, S. (1997) – Riesgo volcánico en el sur del Perú, INGEMMET. *Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo geológico*, 16, 71p.
- Fidel, L. & Huamaní, A. (2001) – Riesgo volcánico en el sur del Perú, INGEMMET. *Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo geológico*, 26, 121p.
- Fournier, J., Pritchard, M., Riddick, S., (2010)- Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and global synthesis. <https://doi.org/10.1029/2009GC002558>.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, B., Brooks, B., (2003)- The Nazca-South America Euler vector and its rate of change.
- Lobkis, O.I., Weaver, R.L., 2003. Coda-wave interferometry in finite solids: Recovery of P-to-S conversion rates in an elastodynamic billiard. *Phys. Rev. Lett.*, 90(25): 254302.
- Mamani, M., Sempere, T., Wörner, G., (2008a)- Geochemicals variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 S to 18 S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, I., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S., Ocola, L., and Ellis, M., (1998), Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence across the Central Andes, *Science* 279, 358-362.