

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7137

VIGILANCIA DEL VOLCÁN UBINAS, PERIODO 2020

Región Moquegua
Provincia General Sanchez Cerro



ABRIL
2021

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

Informe Técnico Nro. A7137

**INFORME TÉCNICO ANUAL:
VIGILANCIA DEL VOLCÁN UBINAS, PERIODO
2020**

EDICIÓN ESPECIAL POR VIII ANIVERSARIO DEL OVI

Equipo de Vigilancia Volcánica

Pablo Masías Álvarez
Fredy Apaza Choquehuayta
Beto Ccallata Pacsi
Rosa Anccasi Figueroa
Luis Cruz Mamani
Rosario Paxi Zamalloa
Edu Taipe Maquerhua

AREQUIPA – PERU

Abril - 2021

Contenido

RESUMEN	4
1 INTRODUCCION	5
1.1 Objetivos	5
1.2 Volcán Ubinas.....	5
1.3 Ubicación.....	5
1.4 Antecedentes	6
1.5 Técnicas de Vigilancia.....	8
1.6 Red de Vigilancia	8
2 ESTRUCTURACIÓN DE BASE DE DATOS	10
2.1 Deformación volcánica.....	10
2.1.1 Archivos de datos de Geodesia	11
2.2 Sismología volcánica.....	14
2.2.1 Archivos del área de Sismología volcánica	14
2.3 Química de gases volcánicos.....	18
2.4 Monitoreo visual y sensores remotos.....	18
2.4.1 Monitoreo visual	19
2.4.2 Sensores remotos.....	21
3 QUIMICA DE GASES Y AGUAS.....	25
3.1 Vigilancia de Gases Volcánicos.....	25
3.1.1 Red Escáner DOAS.....	25
3.1.2 Multigas:.....	25
3.2 Resultados de Vigilancia de flujos de SO ₂	25
3.3 Resultados de la medición con el sensor Multigas	26
3.3.1 Resultados del Vigilancia de fuentes termales.....	27
3.3.2 Resultados de Temperatura de la Fuente UBT	28
4 DEFORMACIÓN.....	30
4.1 Red de vigilancia Geodésica	30
4.2 Procesamiento	33
4.2.1 GNSS.....	33
4.2.2 InSAR	34
4.3 Resultados.....	34
4.3.1 Deformación Superficial del Volcán Ubinas	34
5 VIGILANCIA SÍSMICA.....	37
5.1 Red sísmica	37

5.2	Procesamiento y análisis	38
5.3	Resultados	40
5.3.1	Señales sísmicas representativas	40
5.3.2	Sismicidad en el volcán Ubinas	42
5.3.3	Energía sísmica diaria y acumulada.....	44
5.3.4	Localización de las señales sísmicas volcano – tectónicas (VT).....	45
5.3.5	Análisis del factor de calidad (Q) de sismos “Tornillo”	46
6	SENSORES REMOTOS.....	51
6.1	Red de Cámaras.....	51
6.2	Características de las Emisiones.....	53
6.2.1	Forma y ocurrencia.....	53
6.2.2	Dirección predominante	54
6.2.3	Imágenes representativas de emisiones fumarólica.....	54
6.3	Vigilancia satelital.....	56
6.3.1	Anomalías Térmicas	56
6.3.2	Imágenes Satelitales Ópticas.....	58
7	MONITOREO DE LAHARES.....	59
7.1	Red de estaciones de lahares.....	59
7.2	Registro de precipitaciones pluviales.....	60
7.3	Resultados del monitoreo de lahares	60
8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
9	CONCLUSIONES	63
10	BIBLIOGRAFÍA.....	65

RESUMEN

El volcán Ubinas está situado en el segmento de la zona volcánica Central de los Andes del sur del Perú. Es considerado un volcán activo debido a sus 26 episodios eruptivos, los que presentaron magnitudes de bajas a moderadas (VEI 1-3), en los últimos 500 años. El último episodio eruptivo registrado en el Ubinas corresponde al 19 de julio del 2019, considerado como actividad explosiva vulcaniana energética, clasificado dentro del índice de explosividad volcánica VEI 2. Este proceso demostró que es posible que cuerpos magmáticos de volumen significativo asciendan hacia la superficie en periodos de tiempo muy cortos.

Durante el año 2020, la actividad no ha presentado cambios significativos, la actividad se ha mantenido dentro de los parámetros fijados para el Ubinas, un volcán activo en periodo de baja actividad.

De la evaluación integral de los diferentes parámetros de monitoreo permanente del volcán se concluye que la actividad se mantuvo con características de un NIVEL VERDE; sin embargo, en el mes de agosto se oficializó el descenso de la actividad de **NIVEL NARANJA** a **NIVEL AMARILLA**, sugirido antes del inicio del 2020, el que se mantiene al cierre de este informe.

1 INTRODUCCION

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI), creado en el año 2013 en la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), es la encargada de realizar la vigilancia y el monitoreo volcánico permanente. La priorización del monitoreo de un volcán se realiza de acuerdo al grado de actividad, es así que los volcanes Sabancaya, Ubinas, Misti y Ticsani, son considerados los más activos, y el OVI enfoca sus esfuerzos en el monitoreo de estos volcanes. Teniendo como fin determinar la naturaleza y el comportamiento actual que presenta el volcán Ubinas, el OVI opera una red de vigilancia volcánica multidisciplinaria.

Durante el 2019 el volcán Ubinas presentó un comportamiento variable en su dinámica con cambios registrados en la tasa de ocurrencia de sismos tipo VT y LP, así como cambios registrados en los demás parámetros de monitoreo como, químicos, geodésicos, geofísicos, satelitales y en base a estudios geológicos. El análisis riguroso de la información obtenida del registro permanente y en tiempo real permitió clasificar y determinar su grado de actividad y así evaluar los tipos de peligros volcánicos; de forma que se pudo proporcionar alertas oportunas a la sociedad sobre una actividad volcánica y generar herramientas para la gestión de riesgo de desastres a beneficio de la población..

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), cumpliendo con su actividad de la vigilancia y seguimiento de la situación volcánica del Ubinas, presenta el informe del comportamiento y situación durante el año 2020. En este documento se compila toda la información registrada a través de las diferentes técnicas que compone la red de monitoreo.

1.1 Objetivos

- Emitir información actualizada de la evolución de la actividad volcánica para el año 2020.
- Correlacionar información de diferentes técnicas de vigilancia volcánica a fin de establecer parámetros permitan el pronóstico de la actividad volcánica.
- Brindar información veraz y oportuna de la actividad volcánica a la sociedad, autoridades, entidades públicas y en general.

1.2 Volcán Ubinas

El volcán Ubinas es considerado uno de los volcanes más activos de la cadena volcánica del sur del Perú, con 26 eventos volcánicos registrados desde el siglo XVI y con una recurrencia de 02 a 08 episodios eruptivos por siglo (Rivera et al, 2010).

1.3 Ubicación

Sudamérica está caracterizada por presentar cuatro segmentos de zonas volcánicas activas

conocidas como zona volcánica del Norte, Centro, Sur y Austral, se distribuye principalmente en todo el arco volcánico de la cordillera Andina (Figura 1.1). El volcán Ubinas se sitúa dentro de la Zona Volcánica Central (ZVC), emplazado en la cordillera occidental de los Andes peruanos, abarcando las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna. Políticamente, el volcán Ubinas se sitúa dentro de la jurisdicción del Distrito de Ubinas, Provincia General de Sánchez Cerro, Región de Moquegua, y está a 94 km al norte de la ciudad de Moquegua, como se ilustra en la Figura 1.1.

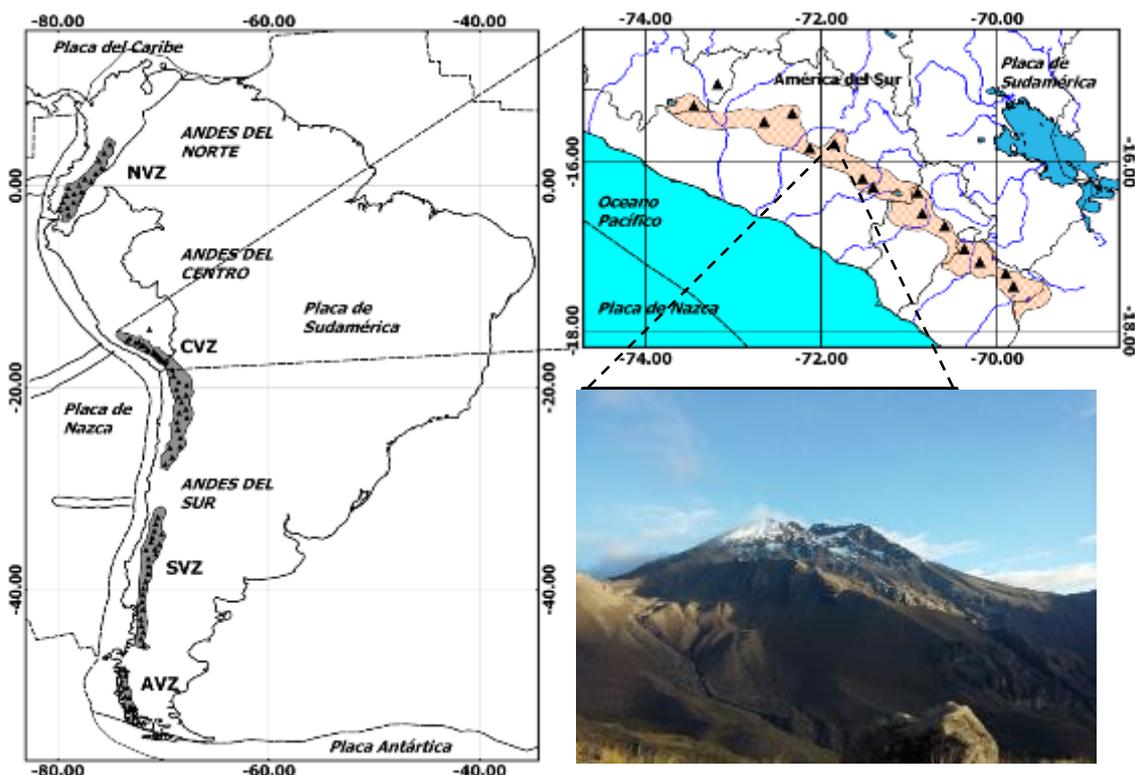


Figura 1.1. Mapa de ubicación del volcán Ubinas, dentro de la cadena volcánica de Sudamérica (izquierda), y en el sur del Perú (derecha).

1.4 Antecedentes

Desde el punto de vista de los acontecimientos asociados a la recurrencia de la actividad volcánica del Ubinas en los últimos 500 años, se ubican en el tiempo a través de los registros históricos recopilados por diferentes estudios como Alayza (1953). Una descripción breve de los periodos eruptivos y su actividad eruptiva histórica se realiza en 1966 (Hantke y Parodi). En 1991 se realizan los primeros estudios mediante imágenes de Satélite Landsat Thematic Mapper para posibles escenarios de erupción del Ubinas (De Silva y Francis, 1991). El primer estudio a detalle de la geología y vulcanología, así como su modo de evolución en el tiempo y las características de las erupciones se describen en la publicación de Rivera et al., 1998. Las primeras publicaciones sobre la estratigrafía, la petrología y geoquímica en base a productos volcánicos se encuentran en Thouret et al (2005). Estos estudios permitieron establecer la línea de tiempo de la actividad eruptiva y la tasa de recurrencia, y fue en base a estos estudios que se

realizan en el 2006 las primeras mediciones instrumentales de la temperatura de las fuentes termales del Ubinas, así como las mediciones EDM (Medición Electrónica de Distancias) que datan desde el 2009 (Masías et al, 2013); además, la publicación del mapa de peligros en base al estudio geológico y evaluación de peligros volcánicos (Rivera et al, 2011). Durante el proceso eruptivo del Ubinas (2013 – 2017), el OVI progresivamente continuó implementando la red de monitoreo, que actualmente conforma una amplia red multiparamétrica de vigilancia volcánica la que sirvió para el pronóstico de la erupción del año 2019.

1.5 Técnicas de Vigilancia

El volcán Ubinas, es considerado uno de los volcanes más activos del Perú (Rivera et al., 2010; 2014), con una recurrencia de 2 - 8 erupciones por siglo, y por la cercanía de centros poblados, evidencian un alto riesgo; por este motivo el INGEMMET – OVI, cumpliendo sus funciones, tiene como misión, el de realizar una vigilancia volcánica rigurosa empleando diferentes técnicas, que generan un conjunto de datos que permiten conocer cuando se aproxima un proceso eruptivo.

Conocer un proceso eruptivo implica el registro, procesamiento e interpretación de cambios y señales, tanto internos como externos, los cuales pueden ser registrados y detectados a través de un conjunto de equipos de alta sensibilidad, desde que asciende del interior hacia la superficie, generando distintos tipos de procesos los cuales están relacionados entre sí, como el incremento de la presión dentro de la cámara y/o conducto volcánico, la diversidad de señales sísmicas, deformación de la superficie volcánica, cambios en la temperatura del medio y en las fuentes termales en superficie, cambios en la composición química de los gases magmáticos y de las emisiones fumarólicas, cambios en el tipo y altura de emisiones fumarólicas, etc. Todos estos cambios son procesos que son monitoreados mediante el empleo de las diferentes técnicas, tales como: geofísica, geodésica, química y geológica, para obtener un panorama completo de cómo el sistema volcánico cambia en el tiempo.

1.6 Red de Vigilancia

El monitoreo de un volcán es una tarea de continua mejora en las diferentes técnicas de vigilancia, estudio e investigación. El Ubinas cuenta con una amplia red de vigilancia en continua implementación, compuesto por un conjunto de equipos por cada técnica de monitoreo empleado para obtener, registrar y medir diferentes parámetros vulcanológicos.

El 2020 ha sido un año atípico, debido a la pandemia del COVID-19, por lo que las misiones a campo se han limitado a trabajos de mantenimiento de la red y algunas comisiones cortas de toma de muestras y adquisición de datos in situ, quedando la red de monitoreo como se muestra en la Figura 1.2.

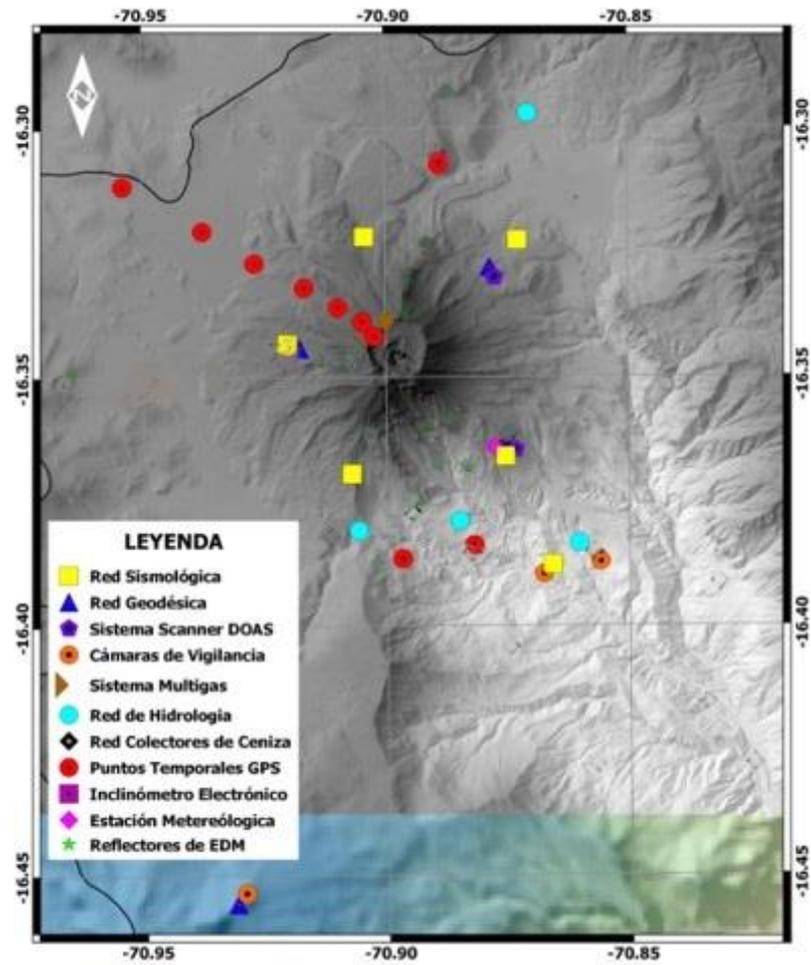


Figura 1.2. Mapa de distribución de la red de monitoreo y vigilancia de la actividad volcánica del Ubinas, durante el periodo 2020.

2 ESTRUCTURACIÓN DE BASE DE DATOS

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

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

2.1 Deformación volcánica

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

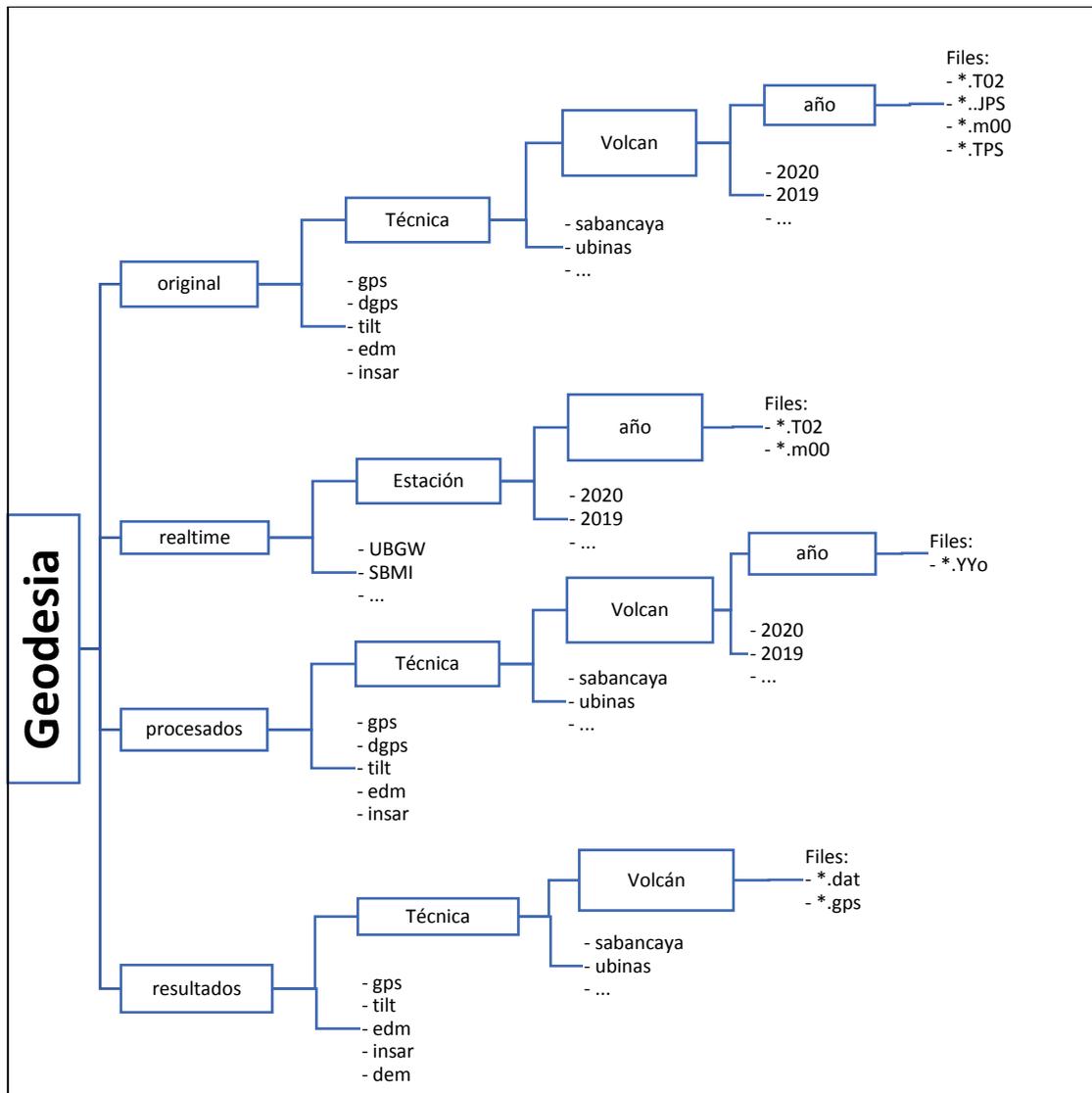


Figura 3.1. Diagrama de la base de datos de Geodesia.

2.1.1 Archivos de datos de Geodesia

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

2.1.1.1 Datos GPS

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

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

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

Y tienen la siguiente nomenclatura:

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

Por ejemplo: **SBSE0960.JPS**

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

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

Y tienen la siguiente nomenclatura:

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

Por ejemplo: **SBSE0960.20o**

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

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

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

Posiciones (*.gps)

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

Estación.gps (Por ejemplo: SBSE.gps)

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

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

Descripción de columnas del archivo resultados *.gps:

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

Líneas Base (*.dat)

Archivo de texto creado para almacenar y comparar la diferencia de la distancia entre dos estaciones GNSS de interés, que permite cuantificar la velocidad de desplazamiento de una

estación para un determinado periodo. La Fig. 3.3, muestra la estructura del archivo y presentan la siguiente nomenclatura:

mb_CodEstación1_GPS_CodEstación2_GPS.dat (Por ejemplo: **mb_SBSE_GPS_SBHO_GPS.dat**)

Globk Analysis GGVer 10.71.014 Fri Jan 22 15:34:36 EST 2021		
SBSE_GPS to SBHO_GPS Solution 1		
2016 10 6 11 59	1.93930	0.00230
2016 10 7 11 59	1.93930	0.00190
2016 10 8 11 59	1.93870	0.00190
2016 10 9 11 59	1.94030	0.00260
2016 10 10 11 59	1.93970	0.00190
2016 10 11 11 59	1.93870	0.00190
...		

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

Descripción de columnas del archivo resultados *.dat:

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

2.1.1.2 Datos EDM (*.dis)

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

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

<p>original CodVolcan_Idlugar_Fecha.extension UBQE_20200321.csv</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Norte</th> <th>Este</th> <th>Altura</th> <th>HA</th> <th>AV</th> <th>DI</th> <th>HORA</th> <th>FECHA</th> <th>ID</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>UPS0</td> <td>862544.241</td> <td>653254.234</td> <td>4536.234</td> <td>85°10'27"</td> <td>268°52'12"</td> <td>1356.234</td> <td>12:25:12</td> <td>2020-03-12</td> <td>UPS0</td> </tr> <tr> <td>UPS1</td> <td>862544.241</td> <td>653254.234</td> <td>4536.234</td> <td>85°10'27"</td> <td>268°52'12"</td> <td>1356.234</td> <td>12:25:12</td> <td>2020-03-12</td> <td>UPS1</td> </tr> </tbody> </table>	ID	Norte	Este	Altura	HA	AV	DI	HORA	FECHA	ID	UPS0	862544.241	653254.234	4536.234	85°10'27"	268°52'12"	1356.234	12:25:12	2020-03-12	UPS0	UPS1	862544.241	653254.234	4536.234	85°10'27"	268°52'12"	1356.234	12:25:12	2020-03-12	UPS1
ID	Norte	Este	Altura	HA	AV	DI	HORA	FECHA	ID																						
UPS0	862544.241	653254.234	4536.234	85°10'27"	268°52'12"	1356.234	12:25:12	2020-03-12	UPS0																						
UPS1	862544.241	653254.234	4536.234	85°10'27"	268°52'12"	1356.234	12:25:12	2020-03-12	UPS1																						
<p>procesado CodVolcan_Idlugar_reflector.extension UBQE_UPN0.edm</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fecha</th> <th>Hora</th> <th>DI</th> <th>DH</th> <th>DV</th> <th>AH</th> <th>AV</th> <th>temp</th> <th>press</th> <th>Catm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12-03-2020</td> <td>12:23:01</td> <td>1254.234</td> <td>1564.231</td> <td>0854.231</td> <td>018°12'24"</td> <td>198°25'45"</td> <td>10.90</td> <td>585.5</td> <td>00.00</td> </tr> <tr> <td>12-03-2020</td> <td>12:23:01</td> <td>1254.234</td> <td>1564.231</td> <td>0854.231</td> <td>018°12'24"</td> <td>198°25'45"</td> <td>10.90</td> <td>585.5</td> <td>00.00</td> </tr> </tbody> </table>	Fecha	Hora	DI	DH	DV	AH	AV	temp	press	Catm	12-03-2020	12:23:01	1254.234	1564.231	0854.231	018°12'24"	198°25'45"	10.90	585.5	00.00	12-03-2020	12:23:01	1254.234	1564.231	0854.231	018°12'24"	198°25'45"	10.90	585.5	00.00
Fecha	Hora	DI	DH	DV	AH	AV	temp	press	Catm																						
12-03-2020	12:23:01	1254.234	1564.231	0854.231	018°12'24"	198°25'45"	10.90	585.5	00.00																						
12-03-2020	12:23:01	1254.234	1564.231	0854.231	018°12'24"	198°25'45"	10.90	585.5	00.00																						
<p>resultados CodVolcan_tipo_flanco_num.extension UPS0.dis</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fecha</th> <th>DI</th> <th>temp</th> <th>error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5467.215</td> <td>2145.231</td> <td>12.23</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>5467.215</td> <td>2145.231</td> <td>12.23</td> <td>0.06</td> </tr> </tbody> </table>	Fecha	DI	temp	error	5467.215	2145.231	12.23	0.06	5467.215	2145.231	12.23	0.06																		
Fecha	DI	temp	error																												
5467.215	2145.231	12.23	0.06																												
5467.215	2145.231	12.23	0.06																												

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

Descripción de columnas del archivo resultado *.dis:

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

2.2 Sismología volcánica

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

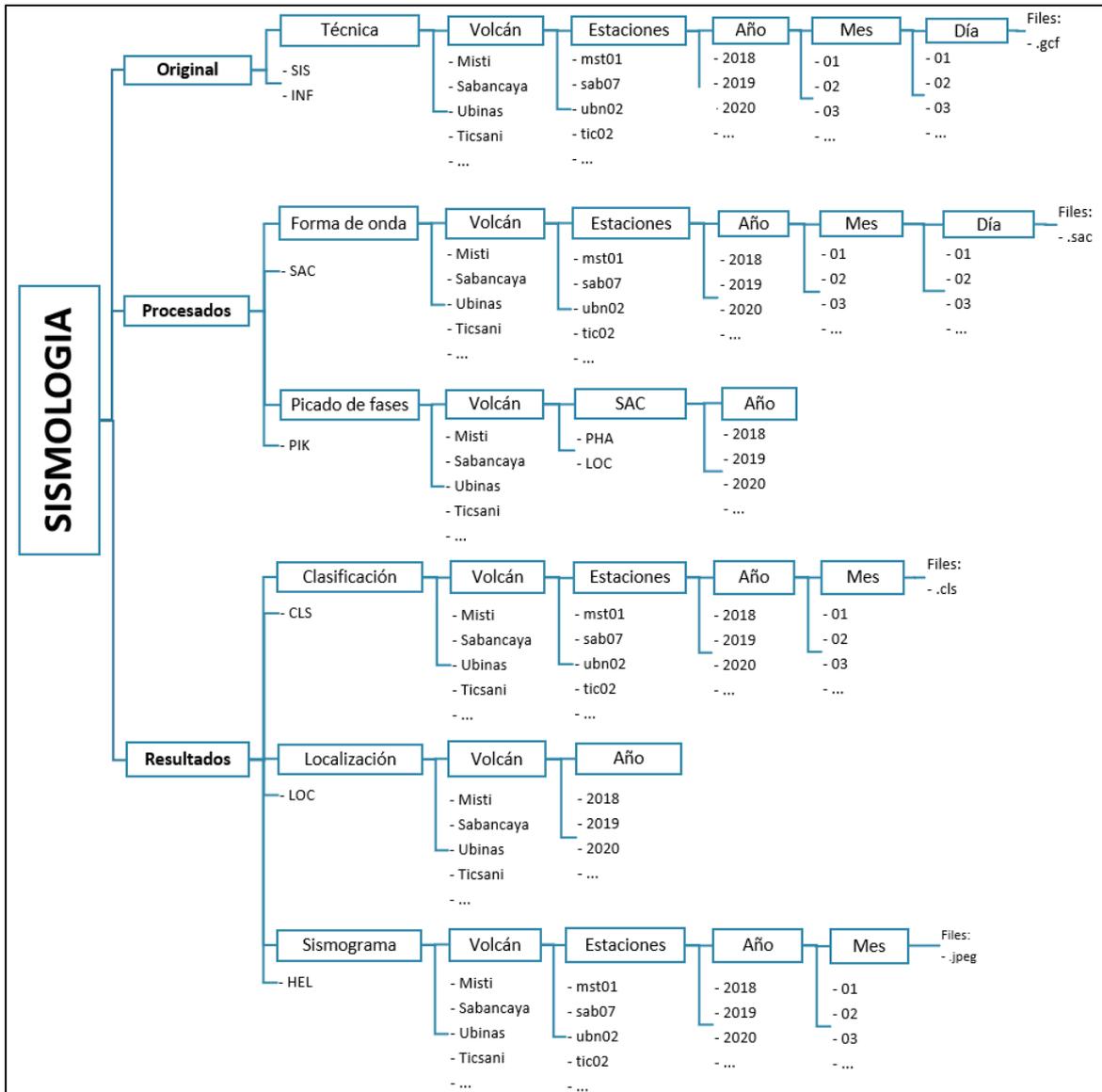


Figura 3.5. Estructura de la base de datos del área de Sismología volcánica.

2.2.1 Archivos del área de Sismología volcánica

2.2.1.1 Clasificación de señales sísmo – volcánicas

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

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

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

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

Y tiene la siguiente nomenclatura:

año mes día_hora.estación sísmica.componente.sac (Por ejemplo: 20190216_0300.sab07.z.sac)

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

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

El nombre del archivo presenta la siguiente nomenclatura:

año mes día_estación sísmica.cls (Por ejemplo: 20200317_sab07.cls)

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

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

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

Donde:

a. Tipo de señal sísmica (Tabla)

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

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

- b.** Fecha UTC (año-mes-día).
- c.** Hora UTC (hh:mm:ss.ss).
- d.** Frecuencia pico (Hertz).
- e.** Amplitud máxima (Cuentas).
- f.** Duración de la señal sísmica (Segundos).
- g.** Archivo SAC donde se ha clasificado la señal sísmica.
- h.** Energía sísmica liberada (Megajoules – MJ).
- i.** Calidad de la señal sísmica (claridad de la señal sísmica).
- j.** Desplazamiento reducido de ondas superficiales (cm²).
- k.** Desplazamiento reducido de ondas de cuerpo (cm²).

2.2.1.2 Localización de señales sismo – volcánicas

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

siguiente dirección:

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

El nombre del archivo de salida presenta la siguiente nomenclatura:

Locvolcán_año.txt (Por ejemplo: LocSab_2019.txt)

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Química de gases volcánicos

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

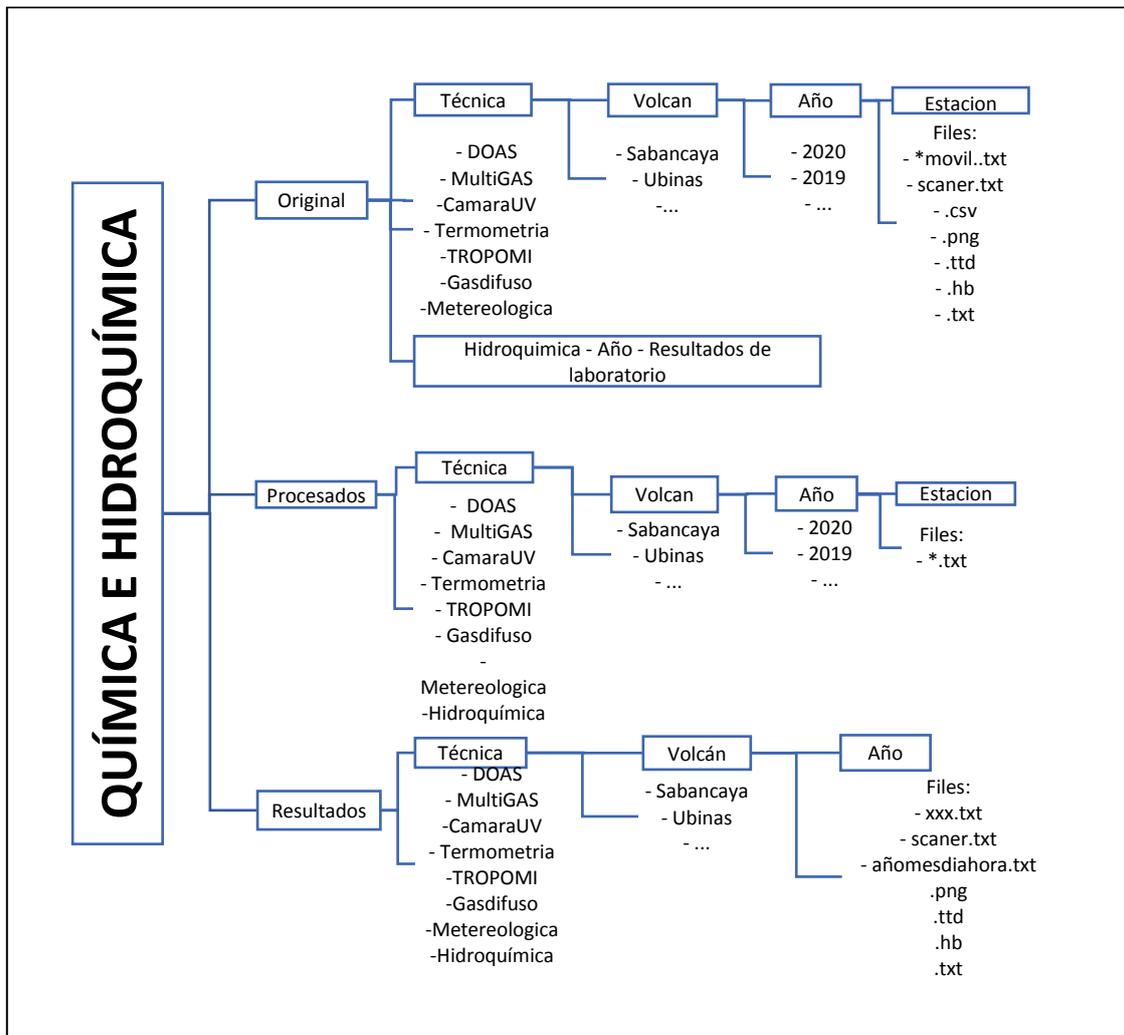


Figura 3.8. Diagrama de la base de datos del área de Química de gases volcánicos.

2.4 Monitoreo visual y sensores remotos

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

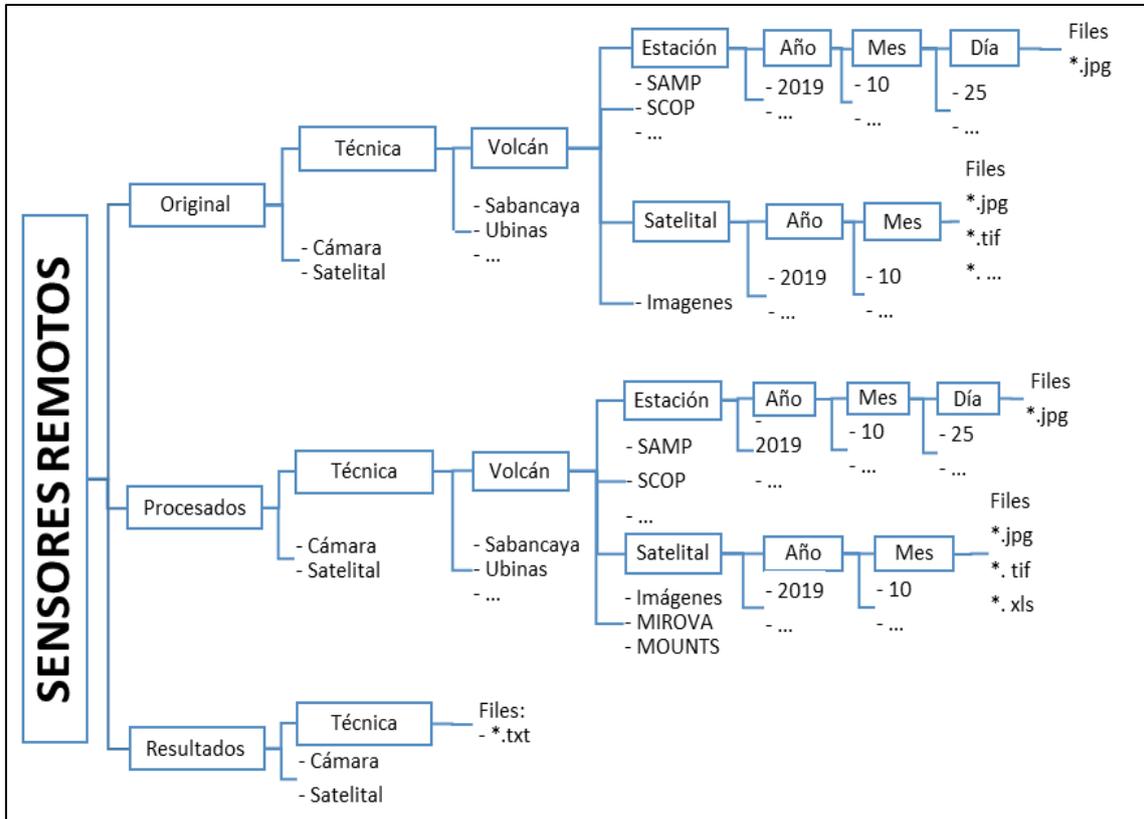


Figura 3.9. Estructura de la base de datos de Monitoreo visual y sensores remotos.

Algunas abreviaciones a tomar en consideración:

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

2.4.1 Monitoreo visual

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

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

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

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

Donde:

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

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

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

Por ejemplo:

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

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

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

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

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

\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Resultados\Cámara

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

AAAA_Cod.Volcán.vis (Por ejemplo: **2019_SAB.vis**)

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

2.4.2 Sensores remotos

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

Tabla 4.3. Codificación de satélites.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Luego, la imagen procesada tendrá la siguiente nomenclatura:

AAAAMMDD_HHMMSS_Código de volcán_Código de satelie_Azimut_Datum_Bandas.tif

Por ejemplo: **20200303_140304_SAB_LS8_50_WGS84_421.tif**

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

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

Por

ejemplo:

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

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

AAAAMMDD_HHMMSS_Código de volcán_Código Plataforma.jpg

Por ejemplo: **20200316_102305_SAB_MIR.jpg**

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

\\10.102.131.50\Monitoreo3\Visual\Resultados\Satelital

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

Año_código de volcán_IS.txt (Por ejemplo: **2020_SAB_IS.txt**)

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

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

Año_Código de volcán_Código Plataforma.vis (Por ejemplo: **2020_SAB_MIR.txt**)

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

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

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

Dónde:

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

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

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

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

Dónde:

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

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

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

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

Dónde:

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

3 QUIMICA DE GASES Y AGUAS

INGEMMET inicia 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 del gas magmático SO_2 , con equipos móviles. A partir del 2015, el INGEMMET realiza las mediciones del flujo del gas magmático SO_2 de manera continua y permanente con transmisión en tiempo real de datos hacia el OVI. En el 2019 se implementa el monitoreo de múltiples gases (CO_2 , SO_2 , H_2S y H_2O) mediante el Multigas.

3.1 Vigilancia de Gases Volcánicos

Durante el periodo 2020, este monitoreo, se realizó aplicando 2 métodos: (1) Scanner DOAS de la red NOVAC, y (2) Equipo Multigas, los que se (describen a continuación).

3.1.1 Red Escáner DOAS

Durante el 2020, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) operó dos (2) Escáner DOAS denominados UBD1 y UBD2 localizados a 3 km al sureste y noroeste del cráter respectivamente. Estos equipos cuentan con transmisión de datos en tiempo real hacia las instalaciones del OVI en la ciudad de Arequipa, donde se procesa e interpreta la información. La información provista por estas estaciones ha servido para elaborar los reportes de actividad del volcán.

3.1.2 Multigas:

Este equipo se utilizó en el Ubinas durante el 2020. Las mediciones se realizan pasando los gases por los sensores del equipo que detectan dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) ácido sulfhídrico (H_2S) y vapor de agua (H_2O). Este equipo se encuentra instalado en el cráter del volcán en el sector norte de la caldera.

3.2 Resultados de Vigilancia de flujos de SO_2

El flujo de SO_2 , por lo general, se mantuvo por debajo de las 2500 toneladas/día. Estos valores de los flujos del gas volcánico SO_2 , son equivalentes a un volcán activo, con un sistema abierto (Figura 2.1).

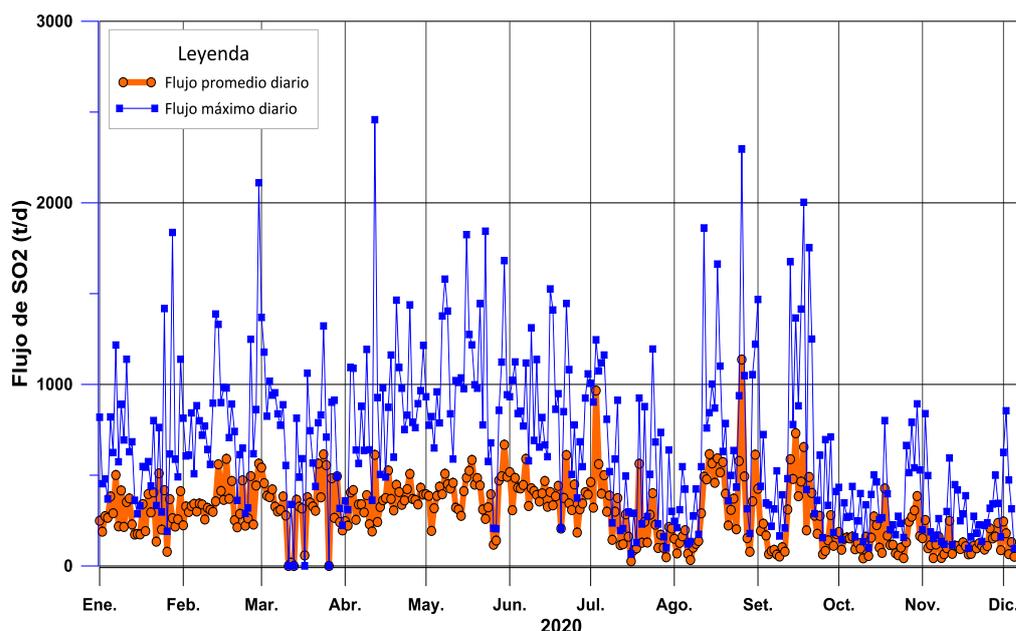


Figura 2.1. Mediciones de los flujos máximos diarios con el sistema NOVAC, escáner de las lecturas diarias, registradas en las estaciones UBD1, UBD2, para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO_2 , en la pluma.

3.3 Resultados de la medición con el sensor Multigas

Esta estación proporciona información acerca de los gases volcánicos CO_2 , SO_2 , H_2S y H_2O que contribuirá a la interpretación de la actividad volcánica. Para el periodo 2020 se registraron valores bajos de los gases CO_2 y SO_2 y valores muy bajos de H_2S y H_2O que corresponden a niveles bajos de actividad. Durante el 2020 se registraron datos de alrededor de 7,200 lecturas diarias.

La relación de los gases CO_2/SO_2 encontrada en el Ubinas en el año 2020, indica que no existe un cuerpo de magma cerca de la superficie y que los niveles de concentración de gases magmáticos son muy bajos por lo tanto la actividad del volcán es muy baja.

En la figura 2.2 se observa la concentración promedio diario de los gases CO_2 y SO_2 en el volcán Ubinas.

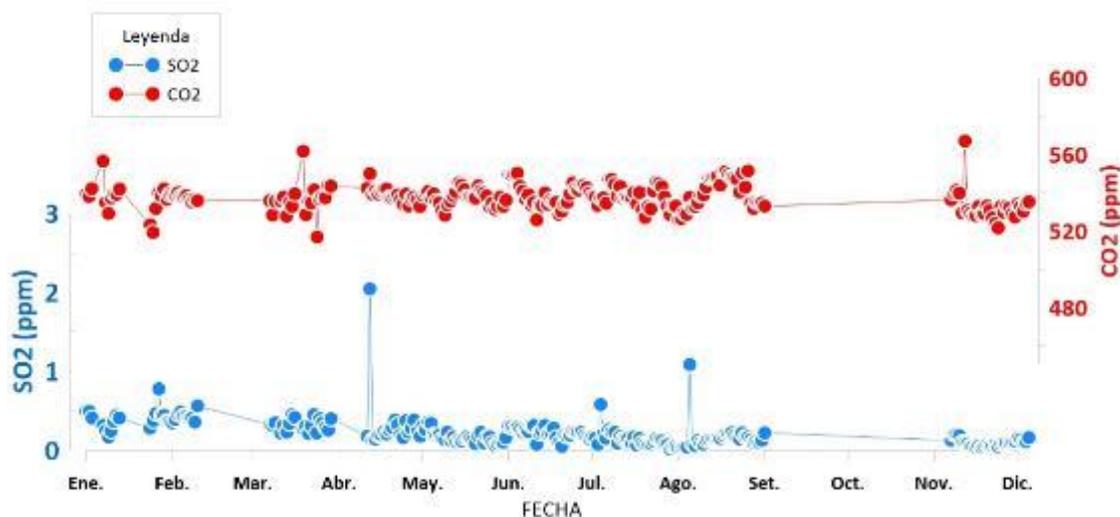


Figura 2.2. Registro de la concentración de los gases CO_2 , SO_2 , H_2S y H_2O , medidos con el equipo Multigas.

3.3.1 Resultados del Vigilancia de fuentes termales

Durante el 2020, el trabajo de monitoreo se centró principalmente en la fuente UBT, Ubicada a 6 km al sureste del cráter del volcán (ver Figura 2.3).

El muestreo se realizó de manera continua, siguiendo una periodicidad de 2 muestras por semana. Sin embargo, por motivos de la pandemia del Covid-19, este ritmo disminuyó a 2 muestras por mes a partir de mediados de mayo. Las Muestras que fueron colectadas por un personal capacitado y equipado para esta labor en la zona. En total se colectaron 40 muestras, hasta el mes de noviembre, las que fueron analizadas en el laboratorio de química analítica del INGEMMET, donde se analizaron los aniones y metales disueltos, utilizando las metodologías y equipos que se enumeran a continuación:

Metales disueltos - (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO_2 , B, Fe, S) por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca VARIAN, modelo 735-ES. Además (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Sr, Li, Fe, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn) por Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) marca Perkin, modelo Nexion 300D.

Aniones - (F^- , Cl^- , SO_4^{2-}) por Cromatografía Iónica marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS-5000. Además (CO_3^{2-} , HCO_3^-) por método Titrimétrico marca Thermo Scientific, modelo Orion Versa Star.

Los resultados muestran estabilidad, sin perturbaciones del sistema hidrotermal, un comportamiento normal durante periodos de calma en el volcán Ubinas (Figura 2.3).

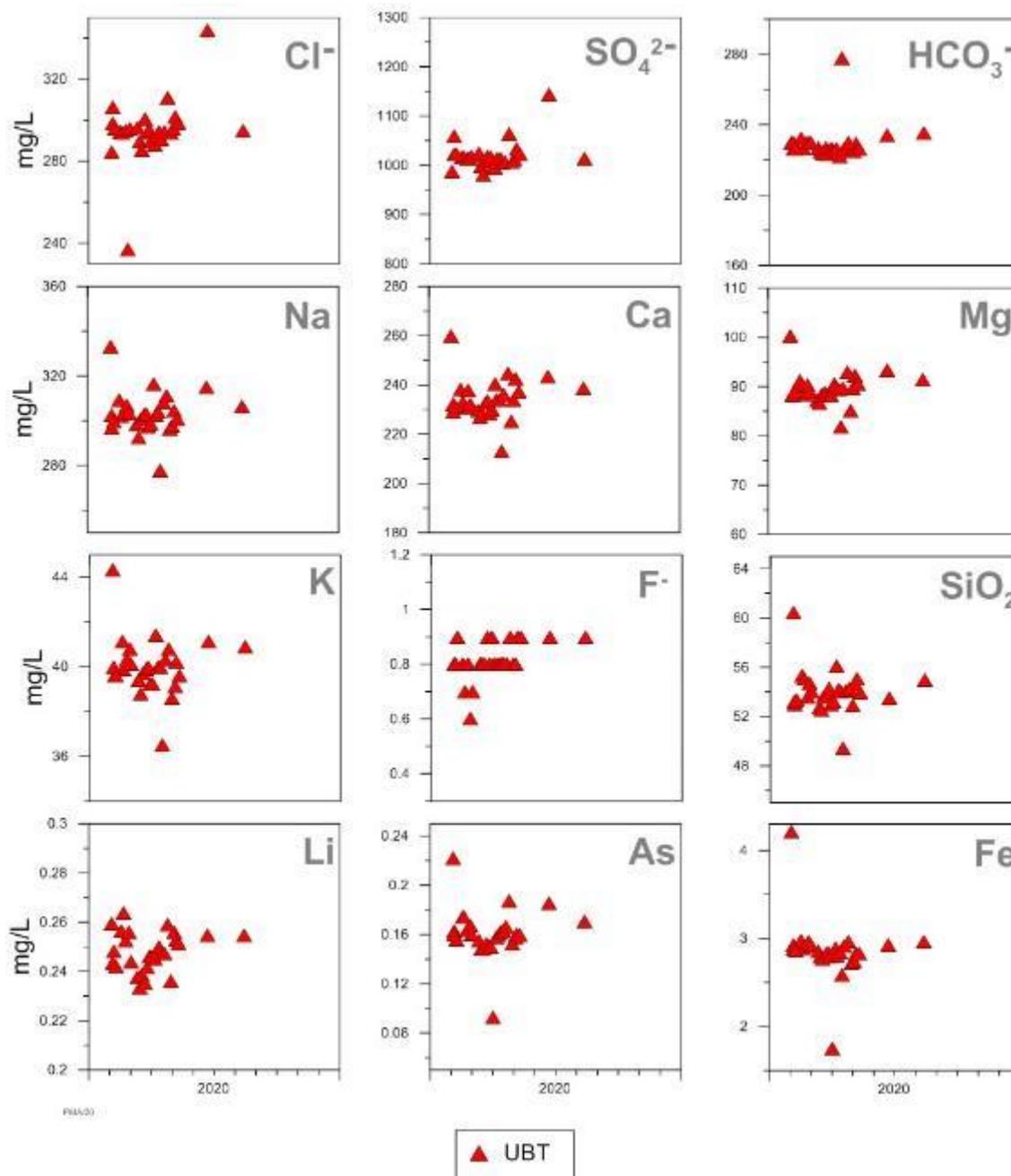


Figura 2.3. Resultados de la química del agua de la fuente termal del Ubinas, periodo 2020.

3.3.2 Resultados de Temperatura de la Fuente UBT

La temperatura del agua tuvo un comportamiento inusual, que vino de fines del 2019. Lo más frecuente es que la temperatura de la fuente UBT muestre cambios estacionales; sin embargo, al iniciar el verano, la temperatura se mantuvo estable, ascendiendo rápidamente a finales de marzo y superando levemente los 29 °C, desde donde se recupera el comportamiento estacional normal, con un registro de temperatura mínima de 28.1 °C en julio. Este comportamiento

anómalo al inicio del registro se pudo deber a que el sistema hidrotermal se mantuvo afectado por el proceso eruptivo de julio del 2019 (Figura 2.4).

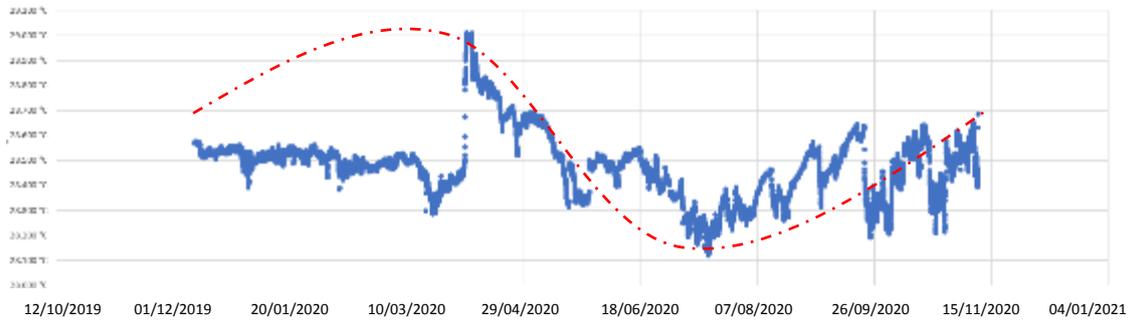


Figura 2.4. Resultados de la temperatura del agua de la fuente termal del Ubinas, periodo 2020.

4 DEFORMACIÓN

La vigilancia geodésica consiste en el estudio continuo de la deformación volcánica. Deformación volcánica es el término utilizado para describir los cambios en la forma de la superficie de un volcán. En muchos casos, las erupciones volcánicas son precedidas por pronunciadas deformaciones superficiales en respuesta al incremento de presión ejercida por el cambio de volumen de un reservorio magmático o al ascenso de un magma hacia la superficie (Dvorak y Dzurisin, 1997).

La deformación del suelo volcánico generalmente suele deberse al incremento o pérdida de presión que ejercen diferentes fluidos: el magma, gas o agua. Cuando la deformación se produce a causa del incremento de presión, al proceso se le denomina inflación. Muchas veces también se registra deformación cuando esta presión se pierde o es liberada, a este proceso se le denomina deflación (Figura 3.1).

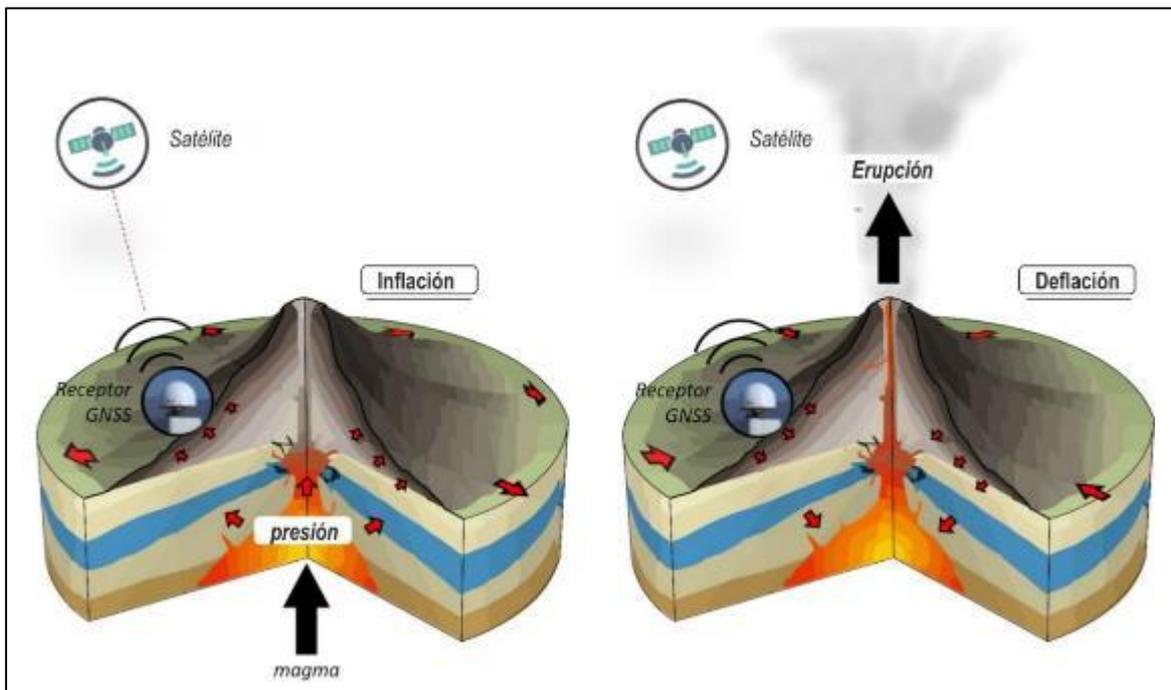


Figura 3.1. Esquema del proceso de deformación superficial en un volcán para el caso del ascenso de magma hacia la superficie. A la izquierda se observa un proceso de inflación y a la derecha un proceso de deflación.

4.1 Red de vigilancia Geodésica

Los cambios que suceden en la superficie volcánica suelen ser procesos cuyas magnitudes generalmente son de pocos milímetros a centímetros al año. Por ello, a lo largo del tiempo, con el desarrollo y evolución de la tecnología, el INGEMMET ha implementado diferentes metodologías que han permitido registrar tales magnitudes en el volcán Ubinas, empezando con técnicas de topografía y geotecnia *in situ* hasta la utilización de información satelital. Tales

metodologías se ilustran en la Figura 3.2 y se describen brevemente a continuación:

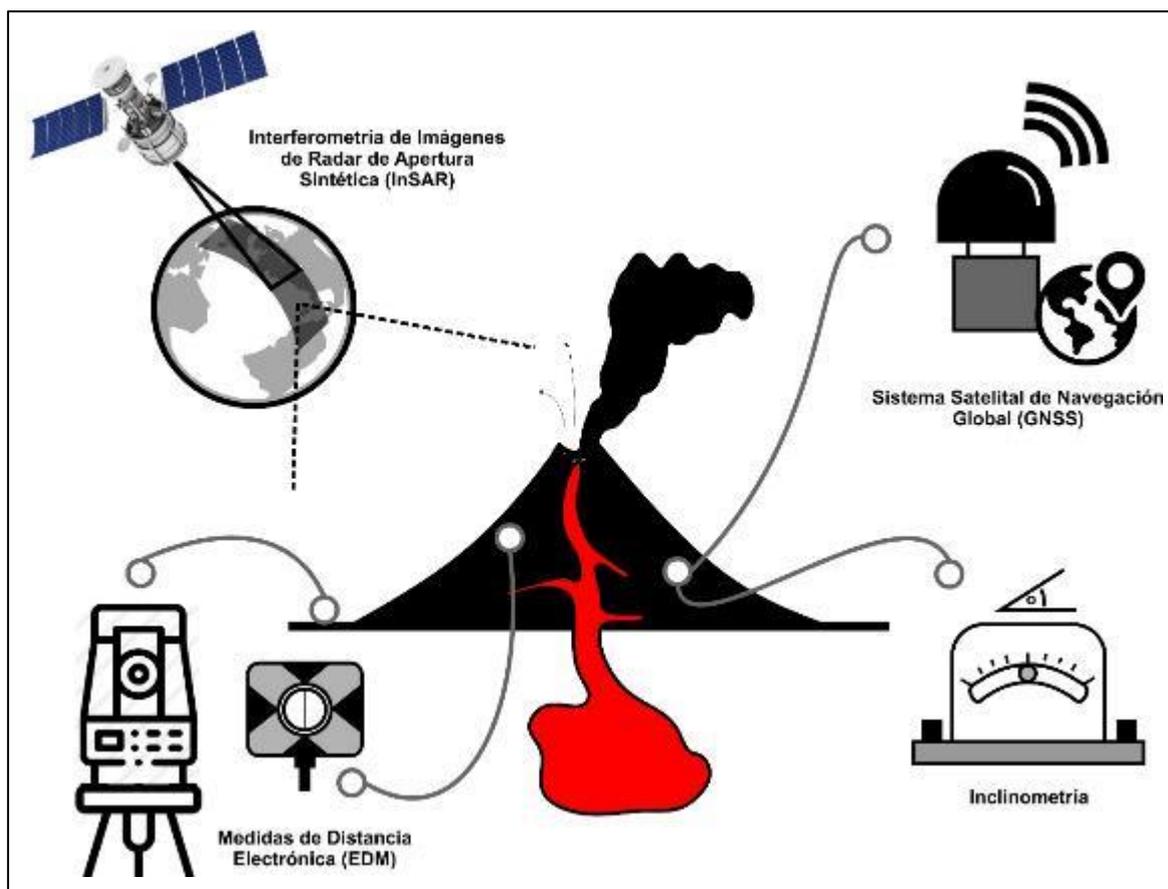


Figura 3.2. Esquema de las técnicas utilizadas para medir la deformación superficial alrededor del Volcán Ubinas.

La **Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)** y sus variantes permiten obtener mapas de deformación superficial de un área determinada mediante el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) colectadas por satélites que orbitan la Tierra. Si se adquieren imágenes utilizando una configuración adecuada en dos diferentes fechas, es posible estimar la deformación producida en el terreno mediante la sucesión de franjas de color. Durante el presente año, los datos obtenidos corresponden a los datos proporcionados por la plataforma COMET LiCS (<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>).

Las **Medidas de Distancia Electrónica (EDM)** realizan medidas de distancias entre dos puntos comparando las fases de ida y vuelta de un rayo láser emitido por una estación total hacia unos prismas reflectores instalados en los flancos del volcán. Durante el presente año, debido a la contingencia sanitaria mundial, este tipo de medidas no se han realizado.

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

en volcanes activos (Dvorak & Dzurisin, 1997). Durante el año 2020, debido a la contingencia sanitaria mundial, los datos obtenidos corresponden a las estaciones de operación permanente.

La red de estaciones de vigilancia geodésica que monitorean la deformación del suelo alrededor del volcán Ubinas, durante el año 2020, estuvo conformada por tres (03) estaciones GNSS de operación permanente (Figura 3.3): estación Huaynaubinas (UBHU), estación Para (UBPR) y estación Piscococha (UBGW); y una estación de referencia denominada Pucasaya (UBPS) desinstalada en el mes de marzo.

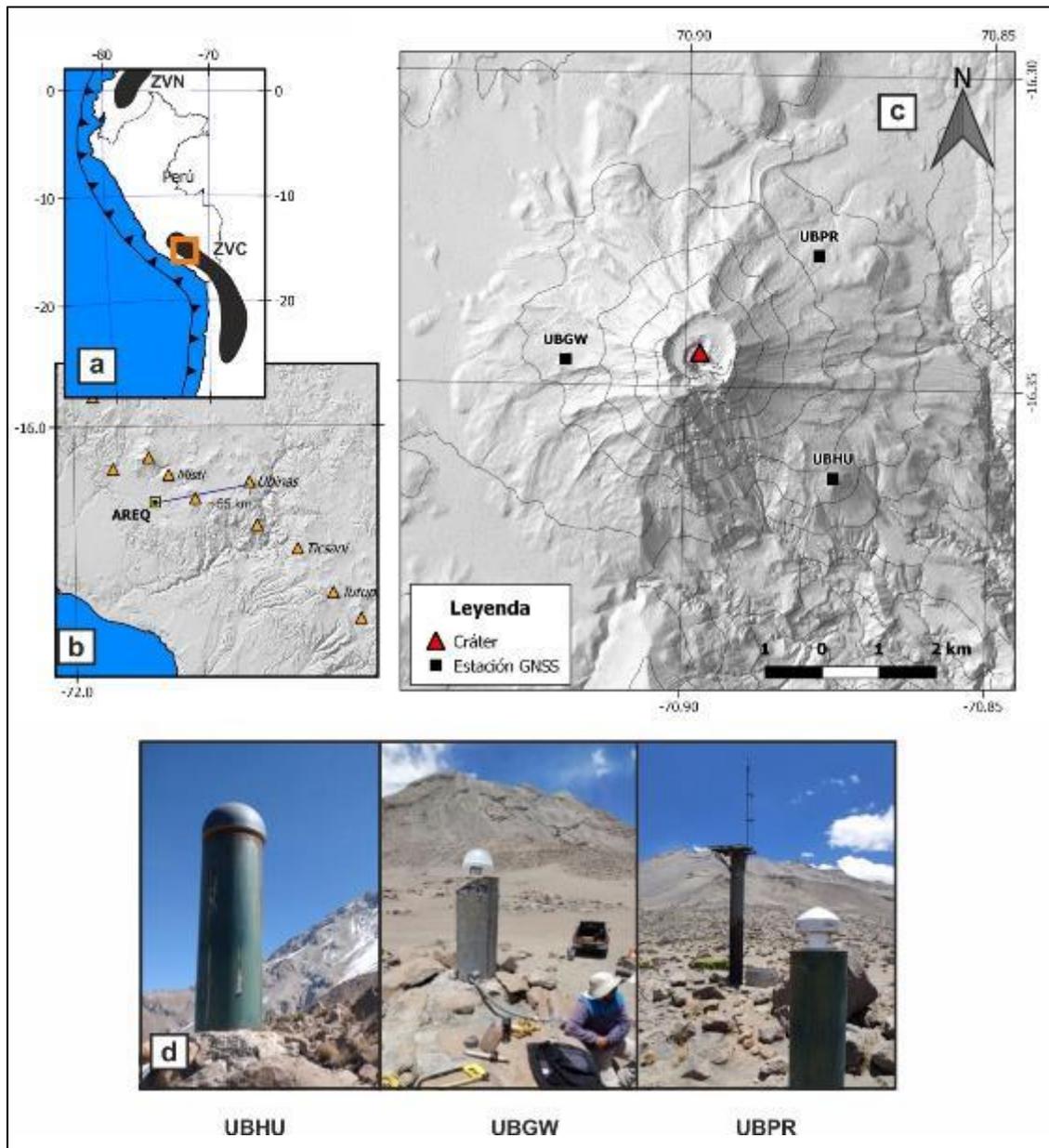


Figura 3.3. (a) Mapa de Ubicación del Volcán Ubinas (cuadro naranja) en relación a la ZVC. (b) Mapa de ubicación del Volcán Ubinas en relación al sur del Perú y distancia hacia la estación IGS AREQ ubicada en la ciudad de Arequipa. (c) Mapa de ubicación de la red de estaciones de vigilancia geodésica del Volcán Ubinas. (d) Fotografías de las antenas GNSS de las estaciones geodésicas alrededor del Volcán Ubinas.

Estas estaciones GNSS de operación permanente han sido instaladas con el apoyo inicial del Programa de Atención de Desastres Volcánicos (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Cada estación está compuesta por una antena y receptor geodésico enlazado a una red local de telecomunicaciones que permite el envío de la información al Observatorio Vulcanológico mediante antenas de radiofrecuencia y energía solar (Figura 3.4).

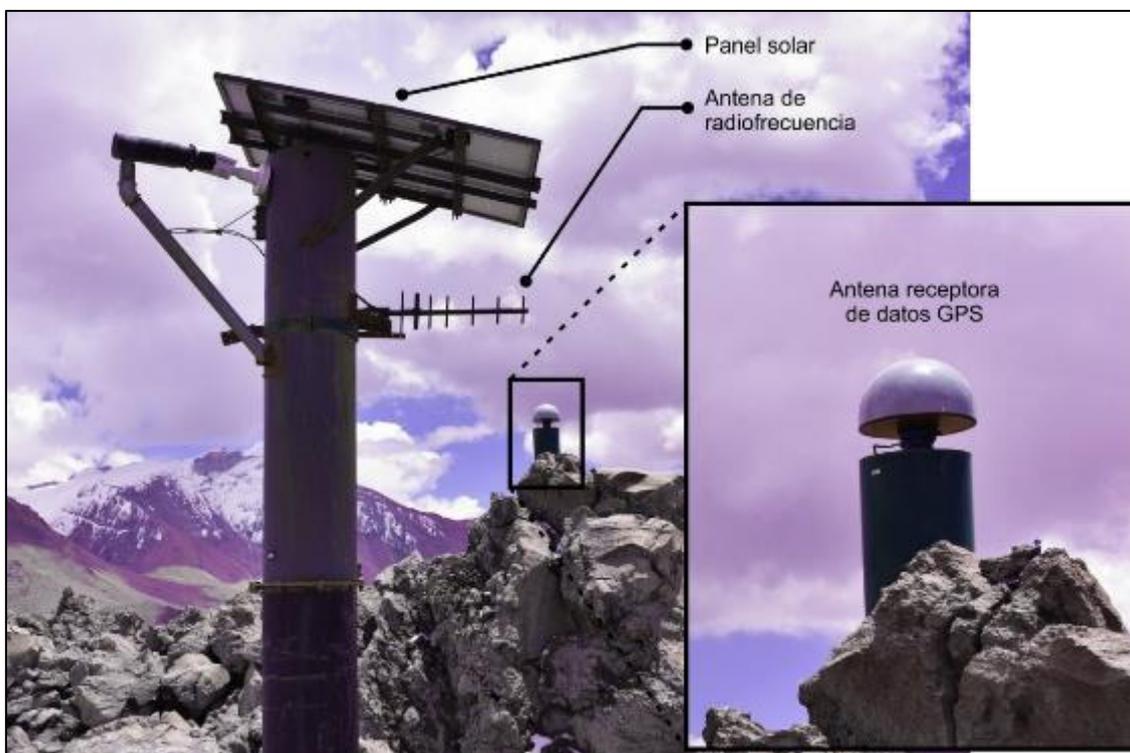


Figura 3.4. Antena receptora de una estación geodésica. En la imagen se ilustra la ubicación de los paneles solares encargados de la fuente de alimentación energética y la antena de radiofrecuencia encargada de la emisión de información hacia el Observatorio.

4.2 Procesamiento

4.2.1 GNSS

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

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

Para el análisis de deformación volcánica usando datos GPS, se estimaron los cambios de longitud de línea base y de las posiciones horizontales y verticales en cada estación.

4.2.2 InSAR

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

4.3 Resultados

4.3.1 Deformación Superficial del Volcán Ubinas

Durante el año 2020, el registro de la deformación superficial en el Volcán Ubinas evidenció magnitudes de deformación horizontal entre 1 y 2 mm/año y deformación vertical entre 1 y 3 mm/año (Figura 3.5). Los errores estimados son de 1 mm/año en ambas componentes (horizontal y vertical). Las magnitudes estimadas indican que no se ha registrado deformación superficial en el volcán Ubinas.

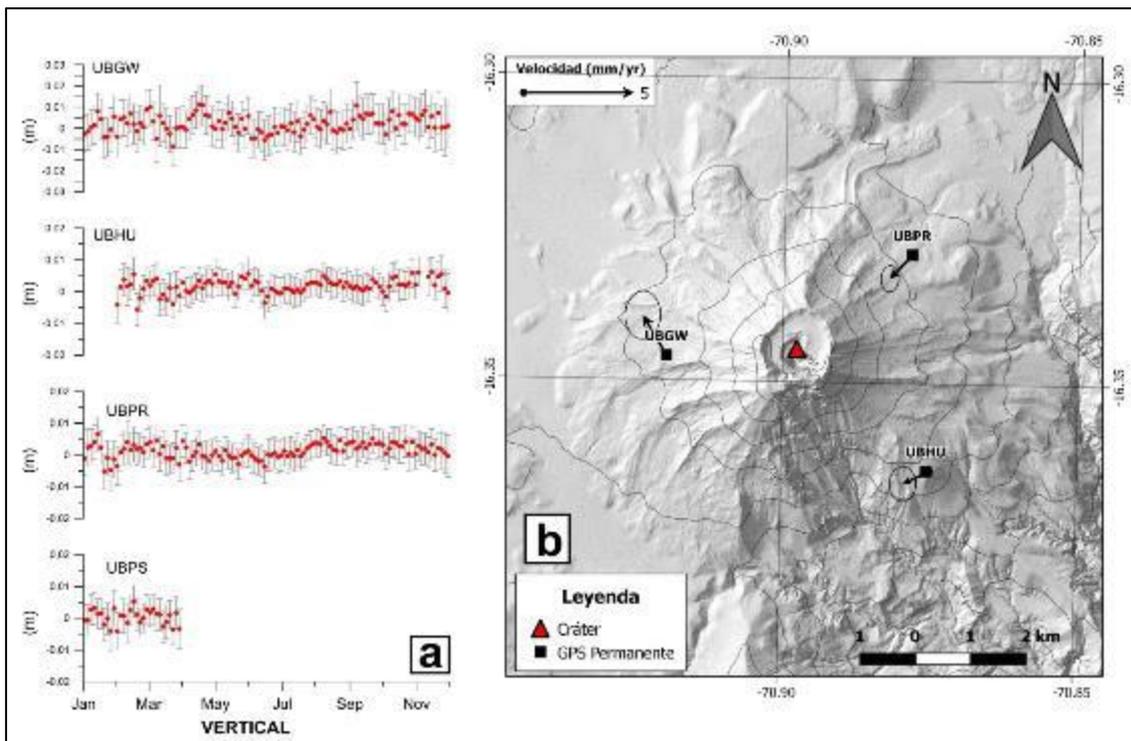


Figura 3.5. (a) Series temporales de la componente vertical y (b) mapa de vectores de velocidad de deformación horizontal en el Volcán Ubinas.

Los resultados del procesamiento de líneas base, muestran periodos de alargamiento con magnitudes menores a 4 mm (Figura 3.6). Estas magnitudes no representan un proceso de deformación superficial precursor de una erupción en el volcán Ubinas.

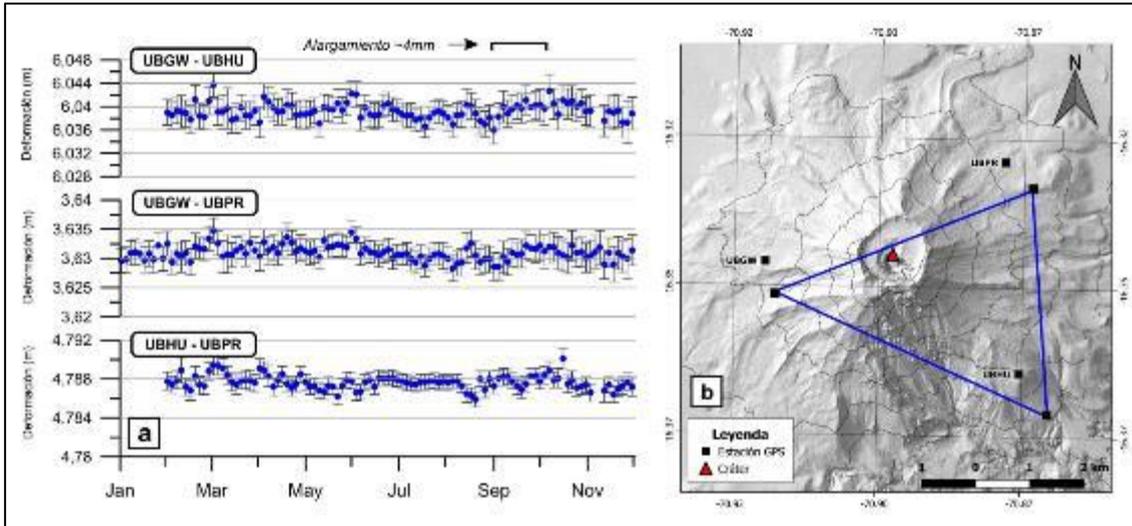


Figura 3.6. (a) Series temporales de líneas base del Volcán Ubina. (b) Mapa de las líneas base procesadas entre cada par de estaciones geodésicas alrededor del Volcán Ubina.

Los interferogramas obtenidos a través de LicSAR tampoco evidencian deformación alrededor del edificio volcánico. Las órbitas ascendentes no muestran variación en la zona de estudio y las órbitas descendentes presentan franjas asociadas al cambio de topografía (Figura 3.7).

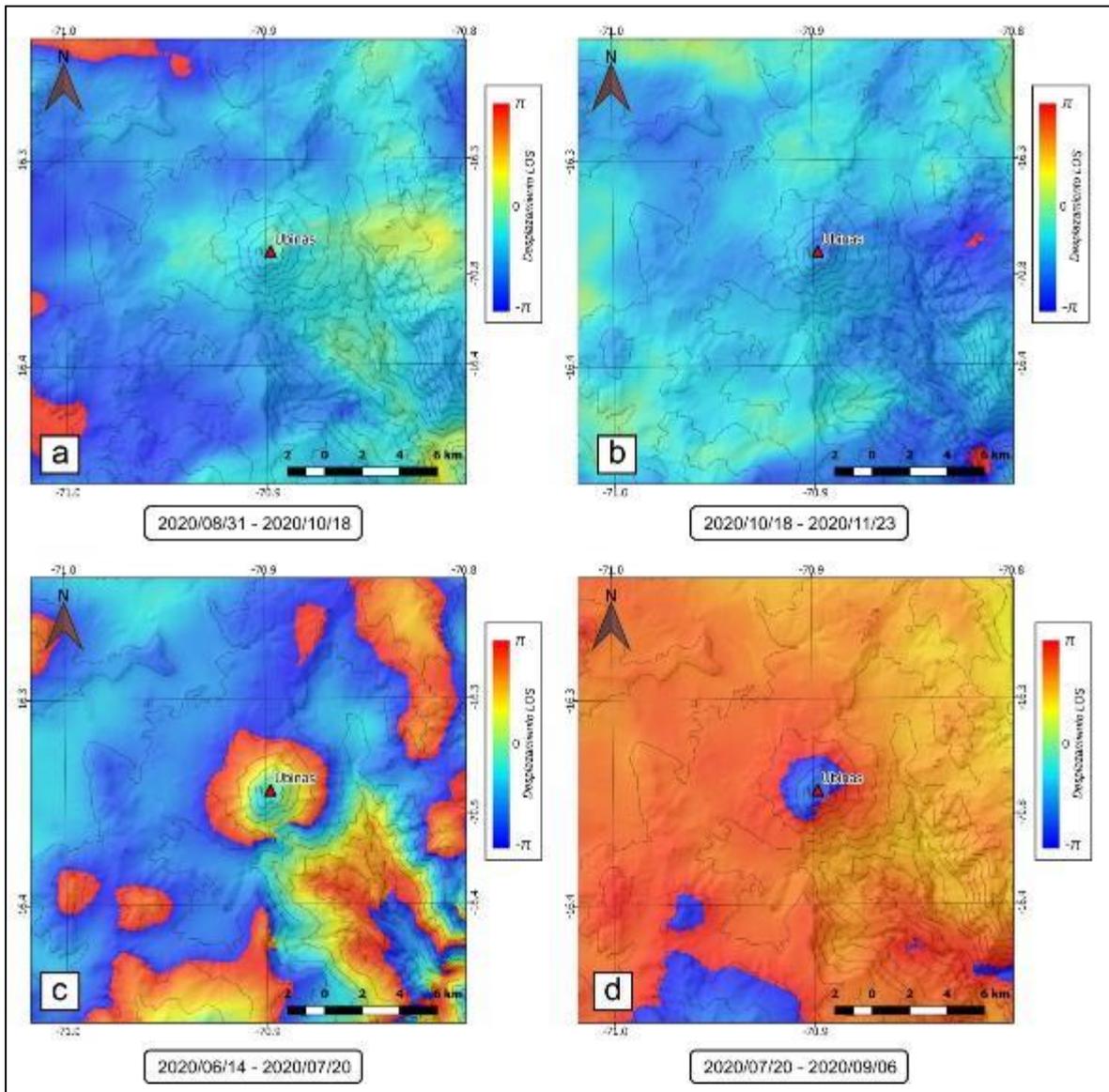


Figura 3.7. Interferogramas del volcán Ubinas en órbita ascendente (a y b) y órbita descendente (c y d).

5 VIGILANCIA SÍSMICA

5.1 Red sísmica

La red sísmica del volcán Ubinas que operó durante el año 2020, estuvo conformada por 7 estaciones sísmicas de banda ancha: 1 estación, con almacenamiento de data en su disco interno (UBN05) y 6 estaciones con transmisión de data vía telemetría (UBN02, UBN04, UBN08, UBN11, UBL01 y UBL02) hacia la oficina de INGEMMET en Arequipa. La Tabla 4.1 muestra las principales características de las estaciones que conforman la red sísmica del volcán Ubinas durante el 2020.

Tabla 4.1. Estaciones sísmicas desplegadas en el volcán Ubinas durante el 2020.

Estación	UTM-E	UMT-S	Elevación	Distancia desde el cráter (Km)	Dirección respecto al cráter
			(m.s.n.m)		
UBN02	299758	8189845	4432	3.3	sureste
UBN04	294925	8191824	4865	2.4	oeste
UBN05	296546	8194510	4783	2.6	norte
UBN08	296305	8189234	4655	3	suroeste
UBN11	299924	8194468	4509	3.7	noreste
UBL01	300646	8187161	3502	5.8	sureste
UBL02	302954	8186353	3429	7.8	sureste

La Figura 4.1, muestra el periodo de operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la red sísmica del volcán Ubinas en el periodo enero - diciembre del 2020. Las barras solidas horizontales representan los periodos de funcionamiento de las estaciones y las barras solidas verticales los periodos sin registro.

Las estaciones UBL01, UBN02 y UBN05, presentaron una operatividad continua de la información sísmica. Por el contrario, en las estaciones UBL02, UBN04, UBN08, UBN11 se observan algunos periodos sin registro, la estación UBL02 se instaló el 12 de marzo de 2020, para realizar el monitoreo de lahares por temporada de lluvias, las estaciones UBN04, UBN08 y UBN11, se tuvo problemas con la transmisión de datos y no se descargaron datos oportunamente por la emergencia nacional (COVID19). Las estaciones sísmicas antes mencionadas sirvieron para elaborar el presente informe Técnico.

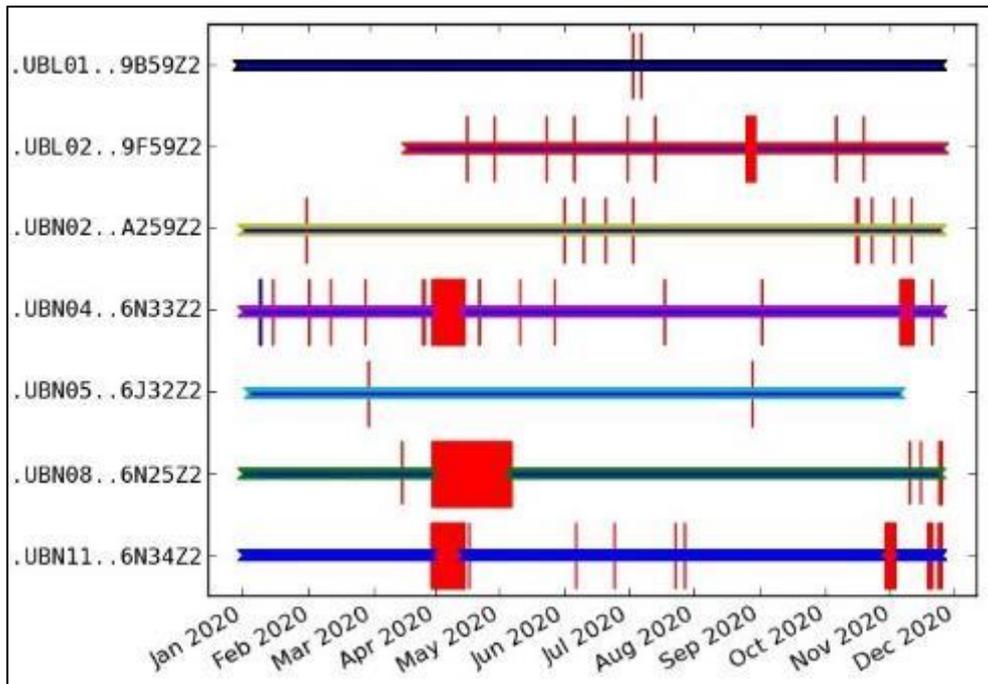


Figura 4.1. Operatividad de las estaciones sísmicas desplegadas en el volcán Ubinas durante el 2020.

5.2 Procesamiento y análisis

Los datos sísmicos son registrados en modo continuo, y archivados en ventanas de 60 minutos de duración, en formato (.GCF .mseed). Esta data en gabinete es automáticamente convertida al formato .SAC, con el cual se realizan la clasificación a través del programa Classification_OVI (Modificado por personal del OVI del programa Classification de Lesage, 2009). El programa Classification_OVI (Figura 4.2), que opera bajo plataforma MATLAB, permite hacer un análisis diario de la forma de onda, contenido espectral y espectrograma, además que se ha podido estimar la frecuencia principal, la amplitud máxima, la duración del evento, la energía y el desplazamiento reducido. Esta información es catalogada y almacenada en archivos *.cls.

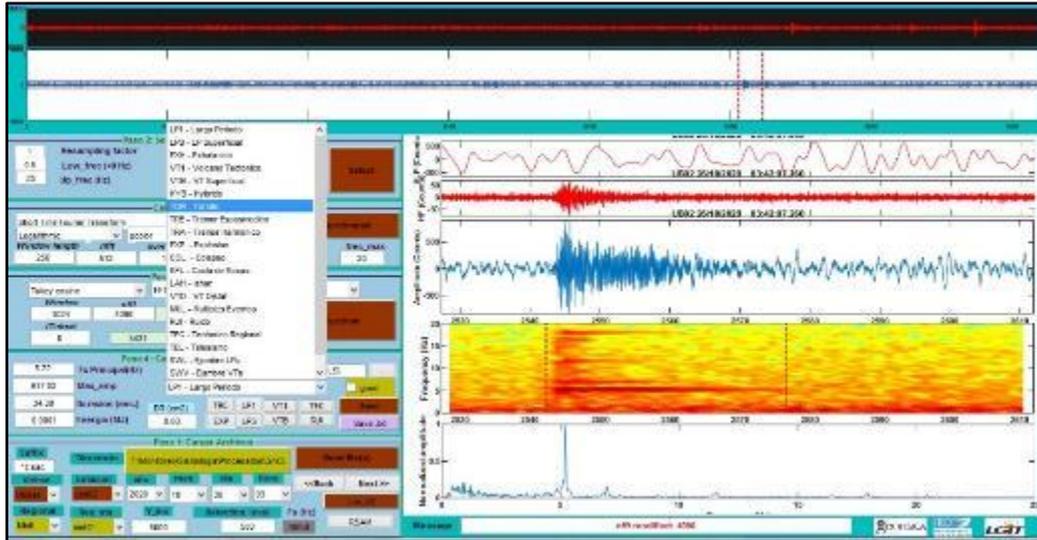


Figura 4.2. Ventana principal del Programa Clasificación_OVI.

Una vez identificada y clasificada la señal sísmica, se alimenta un fichero con extensión “*.cls”, que contiene la siguiente información:

- Tipo de evento (1)
- Fecha (2)
- Hora de inicio UTC (3)
- Frecuencia principal (4)
- Amplitud máxima (5)
- Duración del evento en segundos (6)
- Ubicación (7)
- Energía MJ. (8)
- Calidad (9)
- Desplazamiento reducido cuerpo (10)
- Desplazamiento reducido superficial (11)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
TOR	2020-10-26	03:42:22.23	5.22	917	31	20201026_0300.ubn02.z.sac	0.0001	0	0.08	0.23
RUI	2020-10-26	05:39:23.21	0.69	469	100	20201026_0500.ubn02.z.sac	0.0001	0	0.76	0.81
TEC	2020-10-26	06:05:28.01	0.90	2331	191	20201026_0600.ubn02.z.sac	0.0032	0	2.77	3.38

La data sísmica y los resultados, se guardan en la carpeta de monitoreo de la siguiente manera:

- Los datos sísmicos (formas de onda) se guardan en la carpeta, **M:\Sismologia\Procesados\SAC\Ubinas**
- El catálogo de los eventos sísmicos se guarda en la carpeta, **M:\Sismologia\Resultados\CLS\Ubinas**

5.3 Resultados

5.3.1 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).

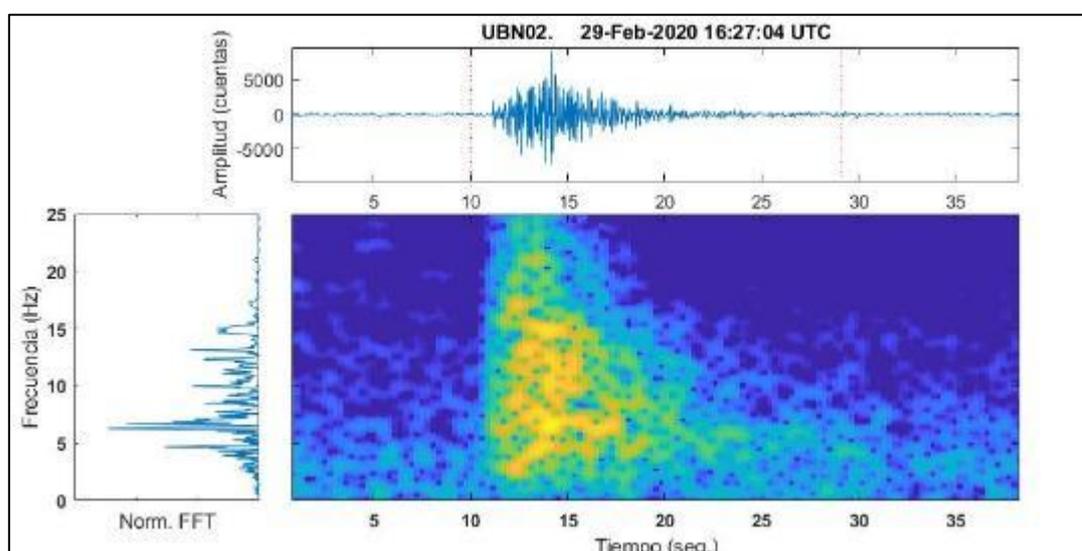


Figura 4.3. Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 29 de febrero de 2020, componente Vertical.

- **Sismos de periodo largo (LP).** Son eventos asociados a procesos de la dinámica de fluidos en el sistema hidrotermal del volcán. Los eventos LP (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).

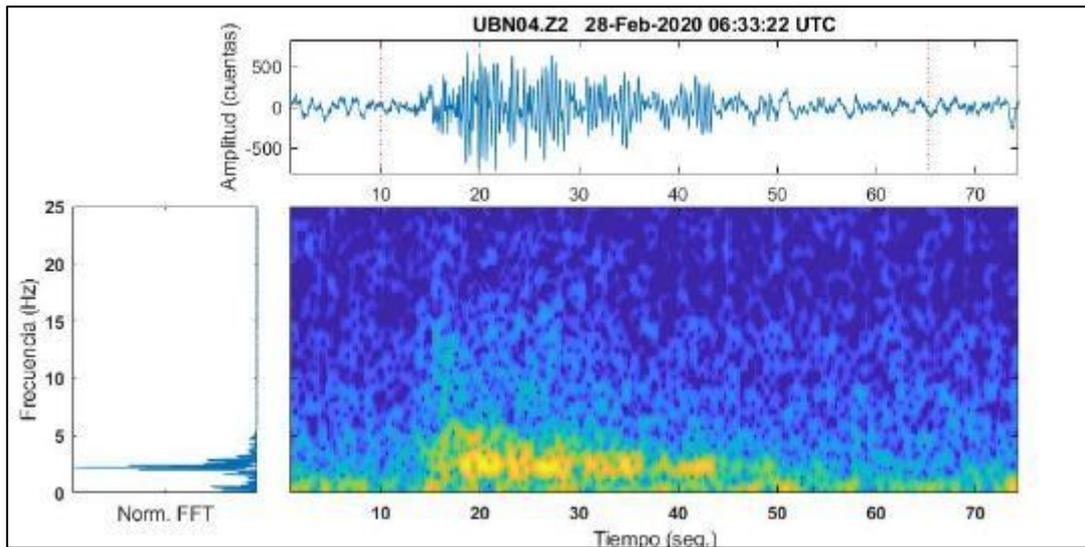


Figura 4.4. Evento Largo Periodo (LP), registrado el 28 de febrero de 2020, componente Vertical.

- **Sismos tipo tornillo (TOR).** Se caracterizan por su forma armónica, la cual ha sido interpretada como la oscilación de un resonador excitado por la interacción de mezclas de líquidos y gases en forma de burbujas a grandes presiones. La manera en que decae la amplitud del sismograma a lo largo del tiempo es lenta, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es lenta también. Su espectro muestra uno o pocos picos en las frecuencias de los armónicos que aportan la energía del sismo (Figura 4.5).

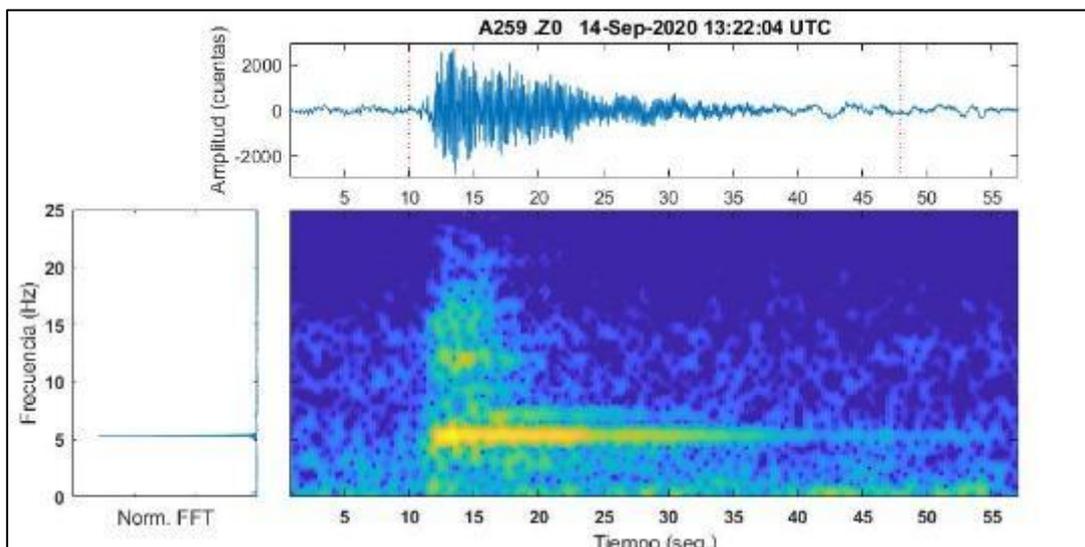


Figura 4.5. Evento Tornillo (TOR), registrado el 14 de septiembre de 2020, componente Vertical.

5.3.2 Sismicidad en el volcán Ubinas

La actividad sísmica registrada durante el año 2020, ha estado caracterizada por sismos de Largo Periodo (LP), volcano-tectónico (VT) y Tornillo (TOR).

5.3.2.1 Estadística general

La estadística general de los eventos sismo – volcánicos identificados durante el año 2020, ha permitido contabilizar un total de 1024 señales de origen netamente volcánico con un promedio de ocurrencia de 3 sismos por día.

La Tabla 4.2 y Figura 4.6, se presenta el total de los tipos de eventos sísmicos clasificados en el volcán Ubinas, donde se aprecia, claramente, que la actividad sísmica dominante fueron los sismos tipo Largo Periodo – LP (628 eventos), seguidos por sismos Volcano – Tectónicos (376 eventos), luego por los sismos de tipo Tornillo - TOR (20 eventos).

Tabla 4.2. Análisis estadístico del volcán Ubinas, periodo 2020.

Tipo de evento		N° de Eventos	Porcentaje (%)	Sismos/día
Volcano - Tectónico (VT1 y VTB)	VT	376	36.7	1.2
Largo Periodo (LP1, LPS y SWL)	LP	628	61.4	2.1
Tornillos	TOR	20	1.9	0.06
TOTAL		1024	100	3.3

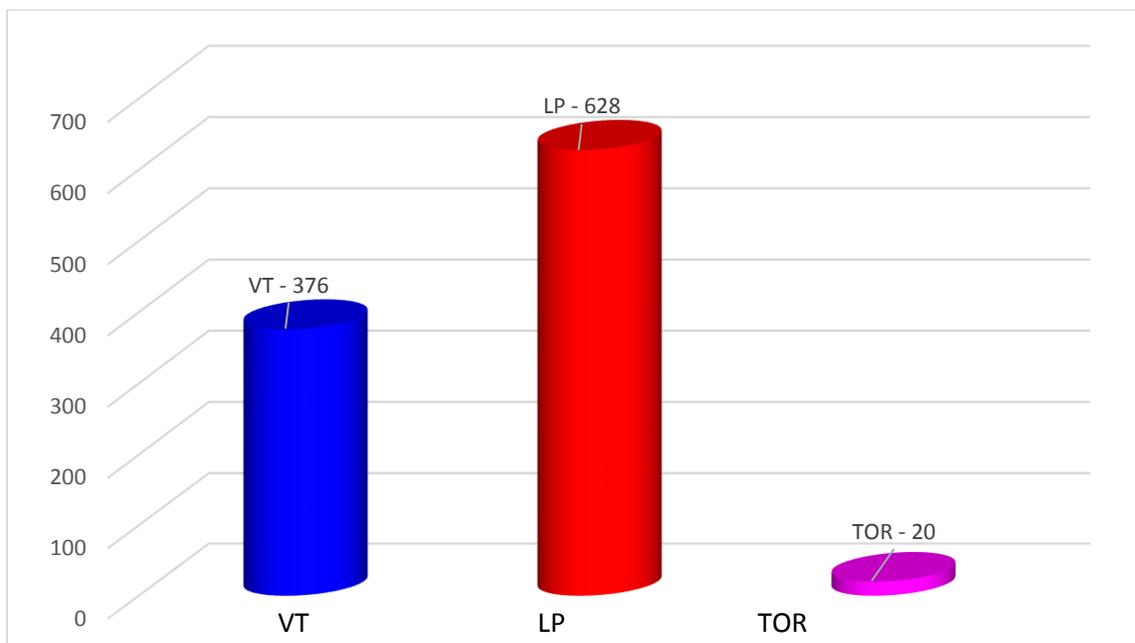


Figura 4.6. Histograma de la ocurrencia de los principales eventos sísmicos identificados en el volcán Ubinas durante el periodo enero – diciembre del 2020.

5.3.2.2 Estadística por tipo de evento

En la Figura 4.7, se muestra la evolución sísmica por tipo de eventos registrado en el volcán Ubinas durante el año 2020. Claramente se aprecia que estuvo dominada por sismos Largo Periodo – LP, los cuales se asocian a la dinámica de fluidos; el día 11 de febrero al 13 de marzo, se observa un ligero incremento en los sismos LP el cual está relacionado a la interacción hidrotermal por el periodo de lluvias, contabilizándose hasta 32 LPs, por otro lado, la ocurrencia de los sismos Volcano – Tectónicos – VT, los cuales se asocian a fracturamiento de material rocoso en el edificio volcánico, durante el año, este tipo de sismicidad se mantuvo en niveles bajos. Asimismo, se identificaron sismos de tipo Tornillo – TOR (asociaron a la sobre-presurización en el sistema hidrotermal), los cuales también se registraron en épocas de actividad baja durante este periodo analizado, llegándose a registrar en total 20 eventos durante el año.

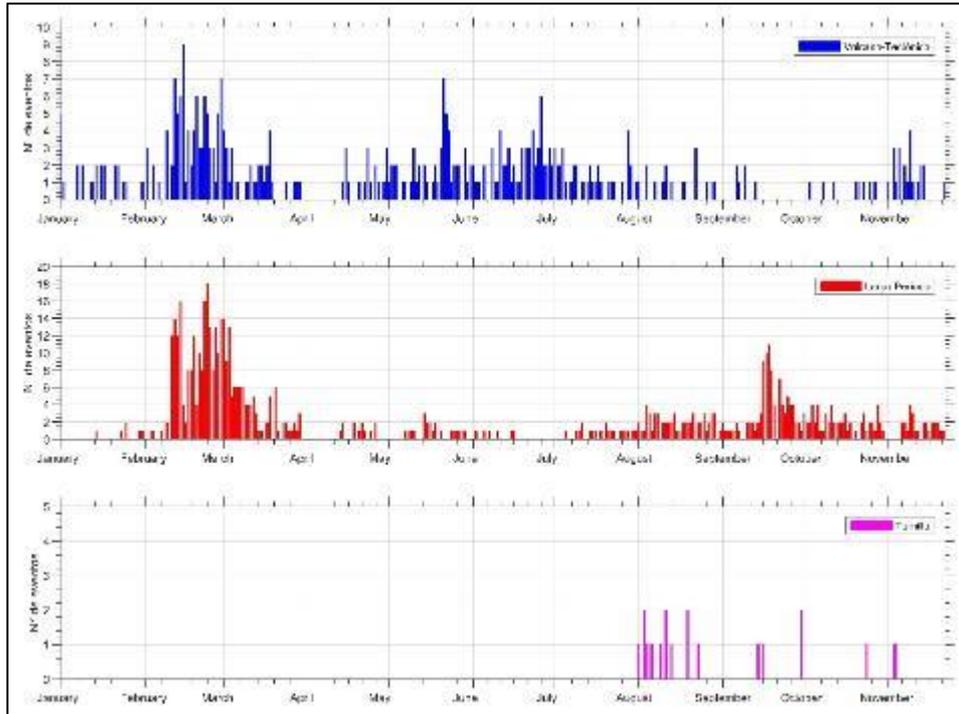


Figura. 4.7. Histograma de la actividad sísmica en el volcán Ubina durante el año del 2020.

5.3.3 Energía sísmica diaria y acumulada

El análisis de la energía sísmica liberada en el volcán Ubina durante el año 2020, se realizó principalmente mediante el registro de la estación de referencia UBN02 la cual cuenta con transmisión vía telemétrica. La Figura 4.8 muestra una relación del ligero incremento de la energía sísmica acumulada del 11 de febrero, el cual estuvo asociada principalmente al periodo de lluvias (proceso hidrotermal), Largo Periodo, Volcano – tectónicos y Tornillo. El valor final de la energía acumulada para el 2020 fue de 1.99 MJ considerablemente menor al calculado para el año 2019 (336.17 MJ).

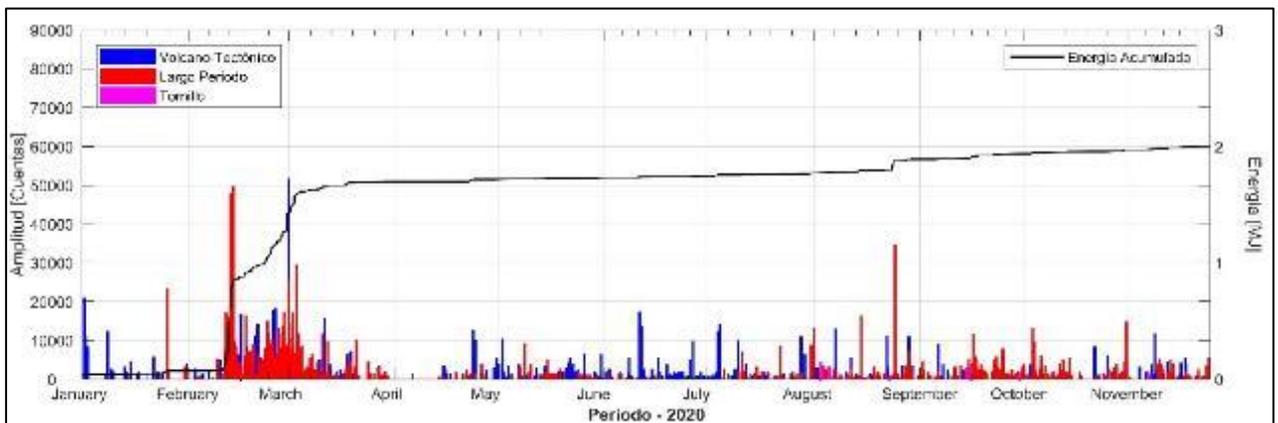


Figura. 4.8. Evolución de la actividad sísmica del volcán Ubina, correspondiente al 2020.

5.3.4 Localización de las señales sísmicas volcano – tectónicas (VT)

Durante el año 2020, de las 376 señales sísmicas de tipo VT, fue posible localizar 48 sismos, los cuales, presentaron claras llegadas de las fases P y S (Figura 4.12), además que se registraron entre 4 a más estaciones sísmicas. El modelo de velocidades empleado fue desarrollado por personal del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET – OVI (Tabla 4.3 y Figura 4.9).

Tabla 4.3. Modelo de velocidades usado para lo localización de los eventos sísmicos del volcán Ubina periodo 2020.

Vp (km/s)	Prof (km)	Vp/Vs
2.5	0.0	1.7
3.2	4.0	1.7
4.5	9.0	1.7
5.0	16.0	1.7
5.8	21.0	1.7

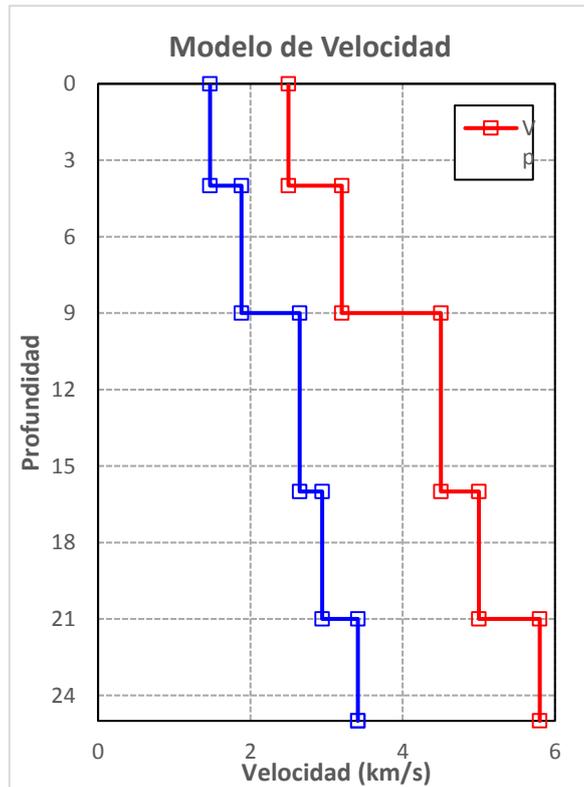


Figura 4.9. Modelo de velocidades usado para lo localización de los eventos sísmicos del volcán Ubina periodo 2020.

En la Figura 4.10, se muestra la distribución espacial y en profundidad de los 48 sismos que se localizaron entre enero y diciembre respectivamente. Los errores de localización son: < 2.5 Km en latitud, longitud y en profundidad. En general, estas señales se localizaron, predominantemente, hacia el Norte y Noroeste del cráter del volcán Ubina a profundidades que llegaron hasta los 1.0 km por debajo del nivel del mar, las magnitudes calculadas variaron entre 0.1 y 2.0 ML. Dichas señales se asociaron a fracturamiento de roca dentro del edificio

volcánico y/o posiblemente a causa de la actividad de fallas geológicas en la zona.

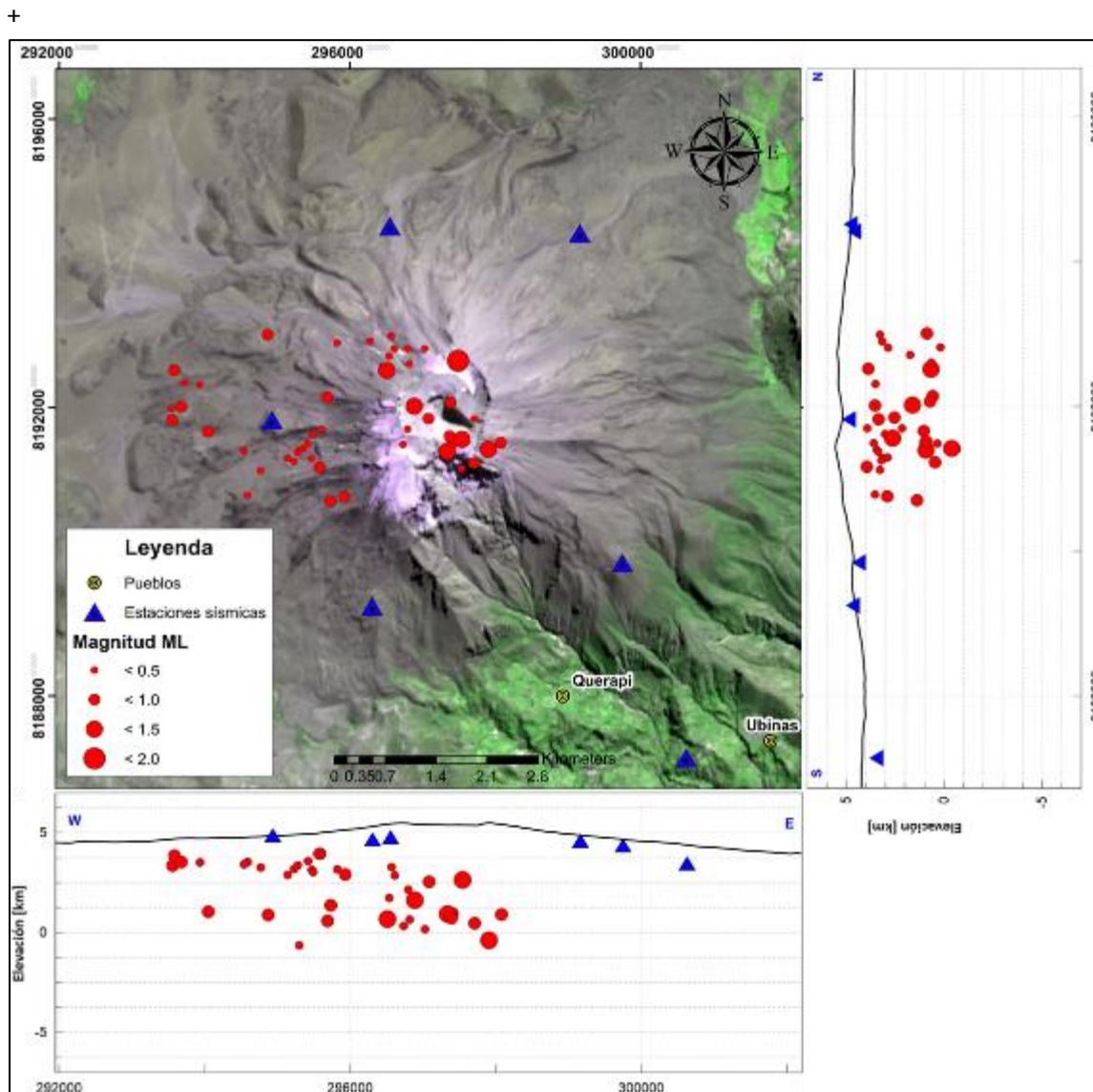


Figura 4.10 Distribución espacial de los 48 sismos volcánico – tectónicos localizados en los alrededores del volcán Ubinas.

5.3.5 Análisis del factor de calidad (Q) de sismos “Tornillo”

Durante el año 2020 se registró un total de 24 sismos “Tornillo” en el volcán Ubinas (Figura 4.11), a los cuales, se le aplicó un análisis espectral AR para la obtención del factor de calidad (Q) a fin de conocer su origen y significado de su ocurrencia. Para su análisis, se aplicó el algoritmo SOMPI a través del script Qsompv2 (desarrollado por personal del SGC y modificado por el OVI).

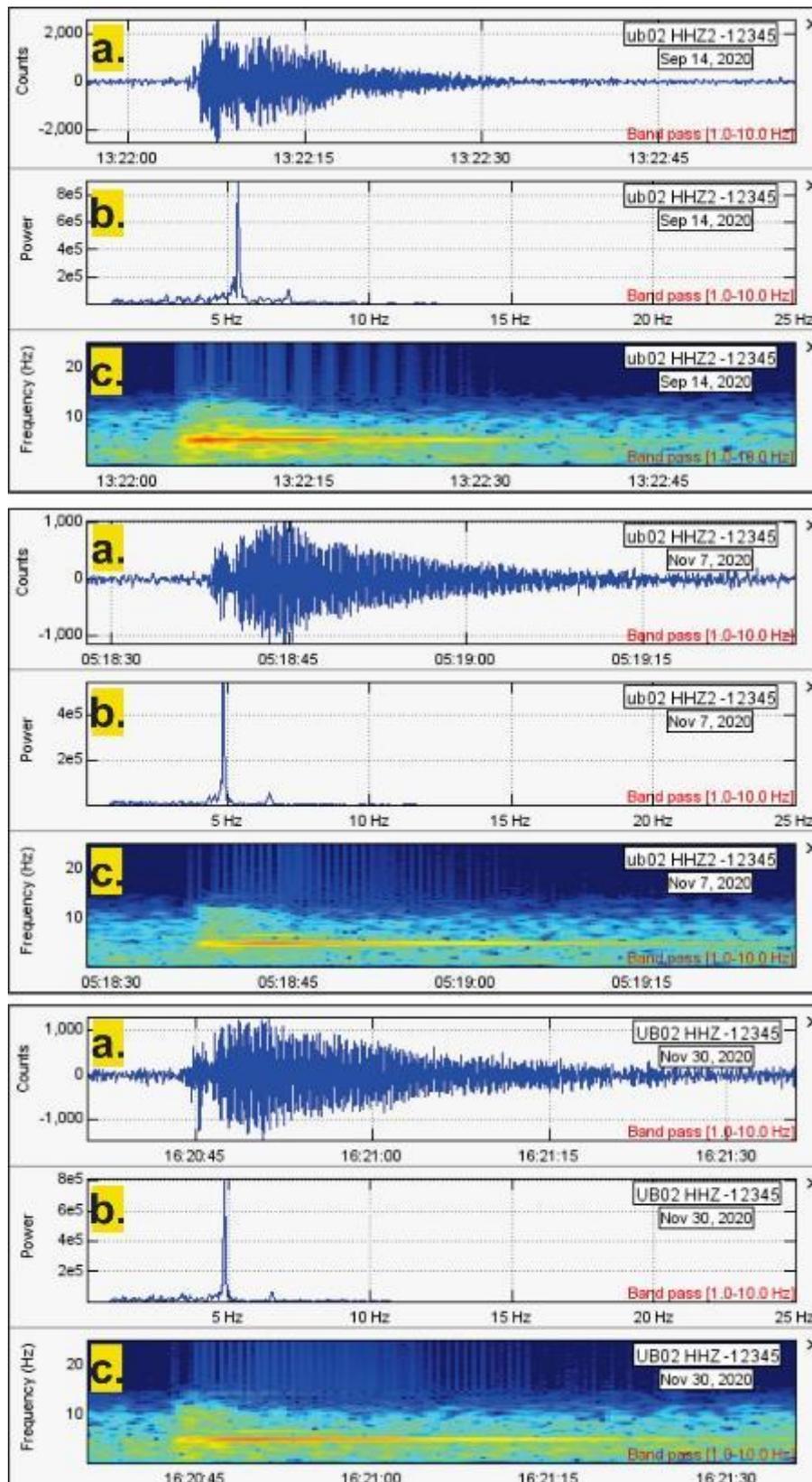


Figura 4.11. Sismos “Tornillo” registrados en el volcán Ubina el 14 de septiembre a las 13:22 UTC (imagen superior), 07 de noviembre a las 05:18 UTC (imagen central) y 30 de noviembre a las 16:20 UTC (imagen inferior). (a) Formas de onda; (b) contenido espectral y (c) espectrograma.

En la Figura 4.12, se muestra el análisis de la señal sísmica “Tornillo”, **(a)** Forma de onda del evento, las líneas rojas indican el tramo de señal seleccionada para el análisis; **(b)** Contenido frecuencial donde se puede observar que presenta una frecuencia dominante en 4.8 Hz y otra sub – dominante en 6.8 Hz y **(c)** Diagrama de iso-Q donde se identifica la mayor acumulación de elementos de onda (círculo rojo).

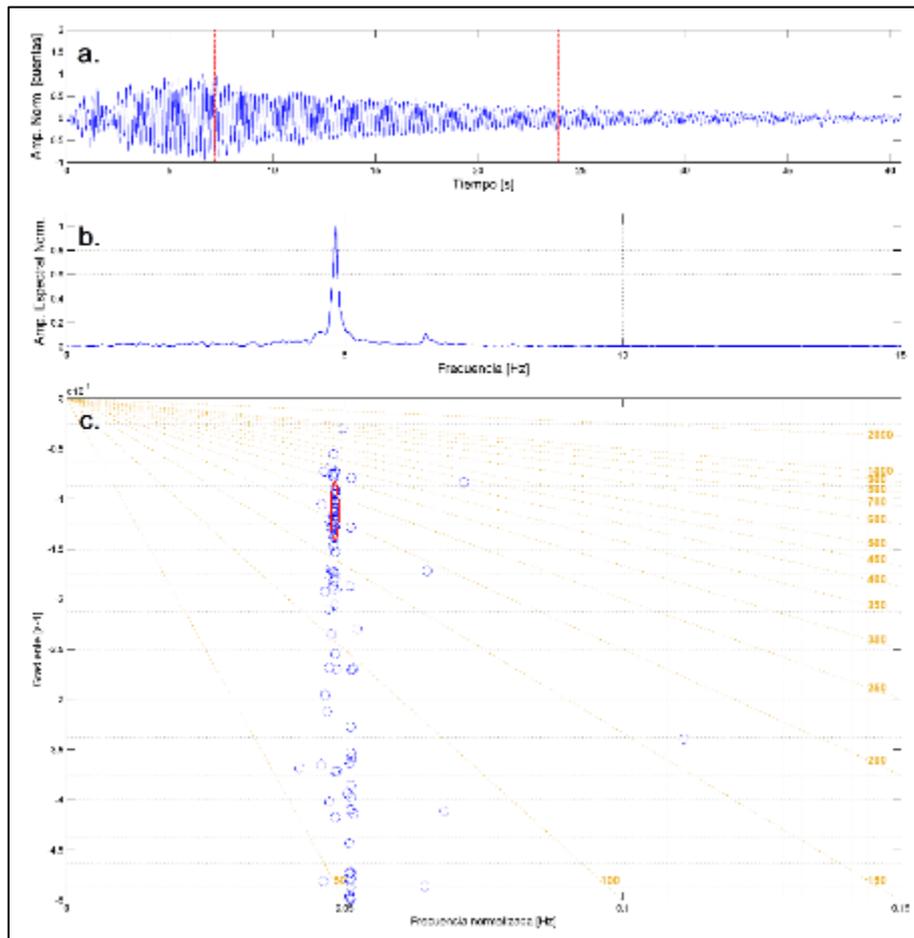


Figura 4.12. Análisis de la señal de tipo Tornillo registrada el día 07/11/2020 a las 05:18:03 hora UTC por la estación UB02 – componente vertical (Z).

En la Figura 4.13a se muestra la variación temporal del factor de calidad del resonador (Qr) y la frecuencia (f) de los sismos “Tornillo” correspondiente al periodo comprendido entre el 2014 y 2020. Es posible observar varios incrementos de Q con valores por encima de 150. Asimismo, las frecuencias dominantes de los tornillos no muestran una tendencia estable con respecto al tiempo. En todo el periodo analizado, los valores de Q, por lo general, son mayores a 100, predominando entre los 100 y 250, lo cual, sugiere una composición similar de los fluidos en gran parte del tiempo. La Figura 4.14b muestra las variaciones temporales de los últimos dos años (2019 -2020), en el análisis no se observaron patrones claro en la distribución temporal de los sismos. Los valores de Q,

para este periodo de tiempo, en su mayoría, se mantuvieron por encima de 150, y varían en promedio entre 150 y 200, con valores muy esporádicos cercanos a los 300. Los valores de la frecuencia se concentraron entre 2 y 6 Hz. De acuerdo con el análisis realizado del factor Q, y utilizando los diagramas de contornos propuestos por Kumagai & Chouet (2001), se muestra que la mayoría de los tornillos registrados durante el 2020 (recuadro rojo punteado), han sido generados por una mezcla de **Gases – Material particulado** y en mucha menor proporción por Gases + Líquido + Burbujas (Figura 4.13b); lo cual, sugiere que este tipo de actividad estaría asociada principalmente al dinamismo sistema hidrotermal, debido a la interacción de fluidos hidrotermales como H₂O, vapor de agua, gas CO₂ y ceniza o algún material particulado. Durante este año, en el volcán Ubinas, a pesar de las variaciones en el valor de Q y la frecuencia dominante, no se tienen reportes de emisiones con posible contenido de ceniza, por esta razón, se plantea que, en lugar de ceniza, se trate de otro material particulado que se mezcló con los fluidos hidrotermales, lo que explicaría estos valores altos de Q.

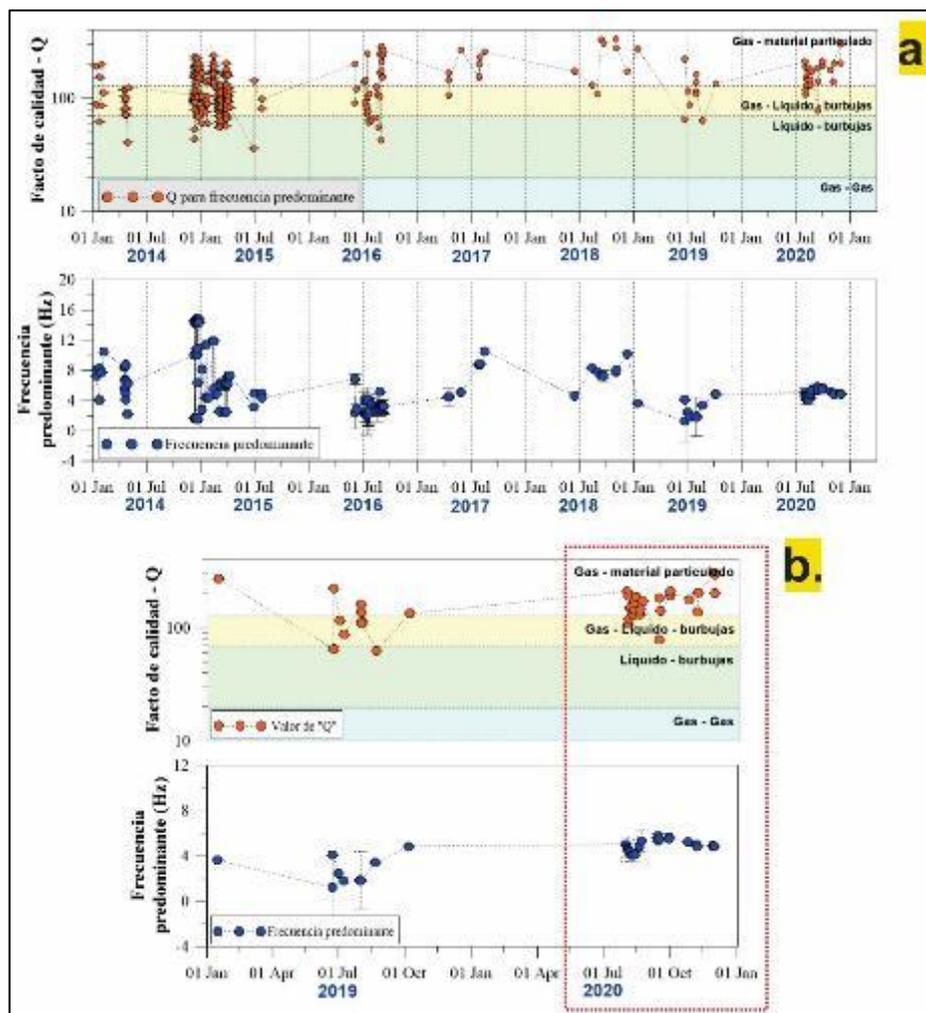


Figura 4.13. Evolución temporal del factor de calidad (Q) y la frecuencia para los sismos “Tornillo” en el volcán Ubinas correspondientes al periodo (a) 2014 – 2020 y (b) 2019 -2020.

En la Figura 4.14, se puede apreciar la concentración de agrupamientos de sismos tornillo en función a su factor de calidad (Q) y frecuencia (f) para el periodo comprendido entre los años 2014 y 2020. Los valores bajos (dos primeros círculos sombreados) cuyas frecuencias oscilan 1 y 3 Hz, están asociados a valores bajos de Q; de igual manera ocurre con los valores intermedios (tercer círculo sombreado) de frecuencias situadas entre 5 y 7 Hz, que corresponden a valores intermedios de Q y finalmente, los sismos cuyas frecuencias predominantes oscilan entre 10 y 12 Hz, se relacionan con los valores más altos de Q.

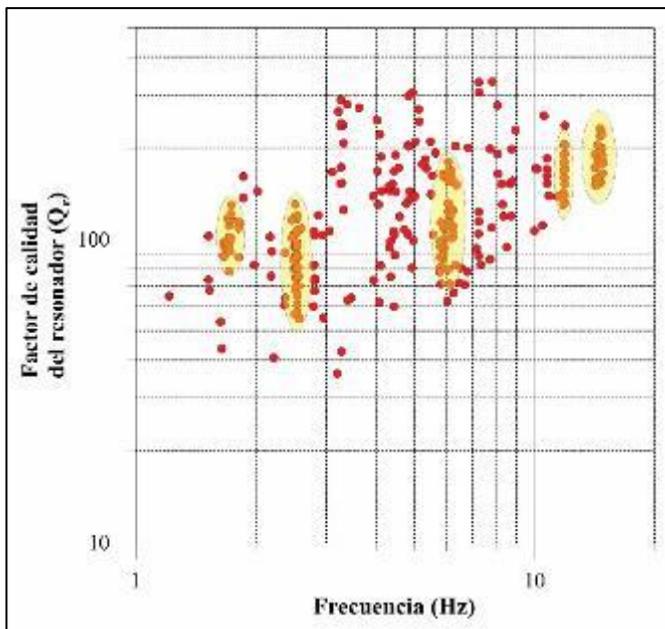


Figura 4.14. Relación de f vs. Q para los sismos “Tornillo” ocurridos en el volcán Ubina (Periodo 2014 -2020). Ambos ejes están graficados en escala logarítmica.

Nótese los diferentes agrupamientos de este tipo de sismicidad.

6 SENSORES REMOTOS

6.1 Red de Cámaras

El volcán Ubinas consta de 4 cámaras de monitoreo ópticas, que monitorean al volcán en tiempo real las 24 horas del día y se encuentran distribuidas en zonas aledañas y en poblados cercanos al volcán (Figura 5.1). En el Cuadro 5.1, se muestran las características de las cámaras de monitoreo del volcán Ubinas.

Cuadro 5.1. Estaciones de monitoreo y características técnicas de las cámaras de monitoreo del volcán Ubinas.

Estación	Cámara	Model	Tipo	Ubicación	Transmisión
UBLA	Axis	Q1765-LE	Óptica	Volcanmayo	Tiempo Real
UCGM	Axis	Q1765-LE	Óptica	Gloria Mocco	Tiempo Real
UPUK	Axis	Q1765-LE	Óptica	Pukasaya	Tiempo Real
USJT	Axis	Q1765-LE	Óptica	San Juan de Tarucane	Tiempo Real

El monitoreo del volcán Ubinas, mediante la visualización imágenes obtenidas de la red de cámaras de monitoreo (Figura 5.1), es plasmada en una base de datos, registrándose información como la altura, color, forma y dirección de las emisiones fumarólicas. Asimismo, se realiza el monitoreo de la ocurrencia de lahares producto de las lluvias y de la acumulación de las cenizas entorno al volcán, ya que podría afectar los cultivos y poblados del valle.

La actualización de la base de datos se realiza haciendo la revisión de imágenes de las diferentes cámaras:

- Las estaciones UPUK y USJT, son utilizadas para la obtención de los parámetros de altura de las emisiones y definir la dirección de desplazamiento.
- Las estaciones UBLA y UCGM, son usadas para el monitoreo de lahares producidos por la actividad volcánica.

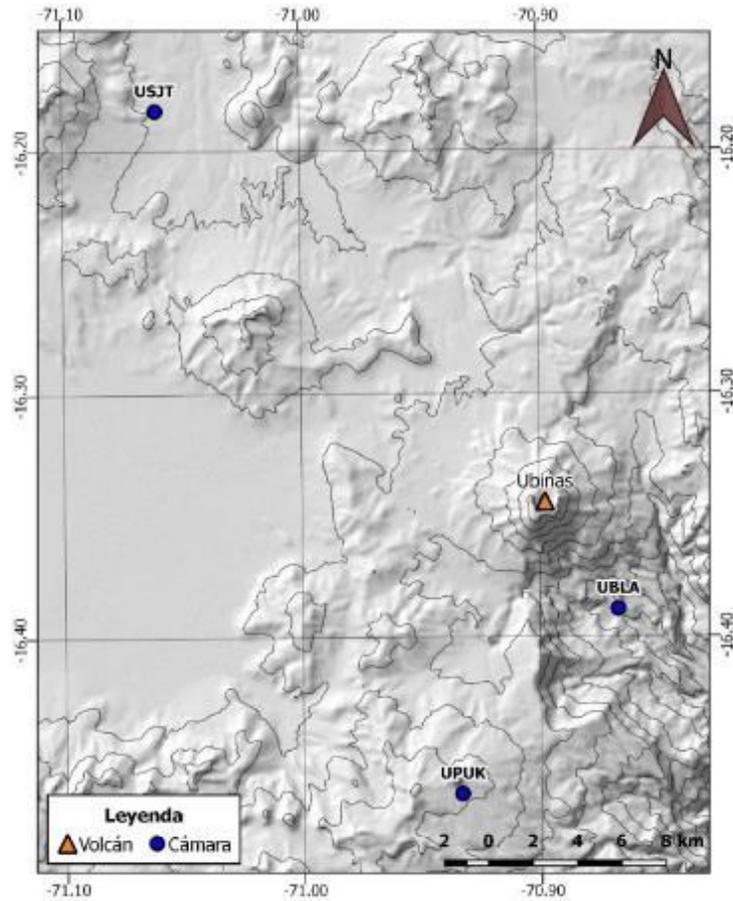


Figura 5.1. Localización de cámaras ópticas de monitoreo volcánico y vigilancia de lahares en el volcán Ubinas.



Figura 5.2. Imágenes representativas de la estación UPUK y UBLA (lahares) del volcán Ubinas.

6.2 Características de las Emisiones

6.2.1 Forma y ocurrencia

El volcán Ubinas, considerado como uno de los volcanes más activos del Perú, ha mostrado durante el año 2020 una actividad volcánica baja, determinada por emisiones entre los 100 y los 1000 metros de altura, observándose únicamente un evento de 2200 metros, el 27 de enero. Las emisiones del volcán Ubinas, se caracterizaron por la ocurrencia de emisiones blanquecinas que estarían vinculadas a mayor contenido de vapor de agua y gases volcánicos. Solo se observaron tres eventos particulares con presencia de ceniza gris claro, los días 30 de marzo, 01 de abril y 12 de junio, de 200, 100 y 600 metros de altura sobre el cráter, siendo estos eventos de muy poca duración, no llegando a sobrepasar los 7 minutos (Figura 5.3).

Los eventos de emisiones fumarólicas en el Ubinas, muestran una particularidad, solo permanecen por poco tiempo, desde 2 minutos hasta un máximo aproximado de 4 horas, es decir, no se muestran constantes durante todo el día.

En la Figura 5.3, se muestra el histograma de la altura de las emisiones y su duración en minutos durante el año 2020; donde, en los meses de enero a febrero y de marzo a junio, se observaron emisiones de mayor duración llegando a un máximo de 236 y 268 minutos, respectivamente, siendo sus emisiones principalmente blanquecinas (Figura 5.3). De julio en adelante, las emisiones no superaron los 80 minutos de duración y se presentaron con menor frecuencia.

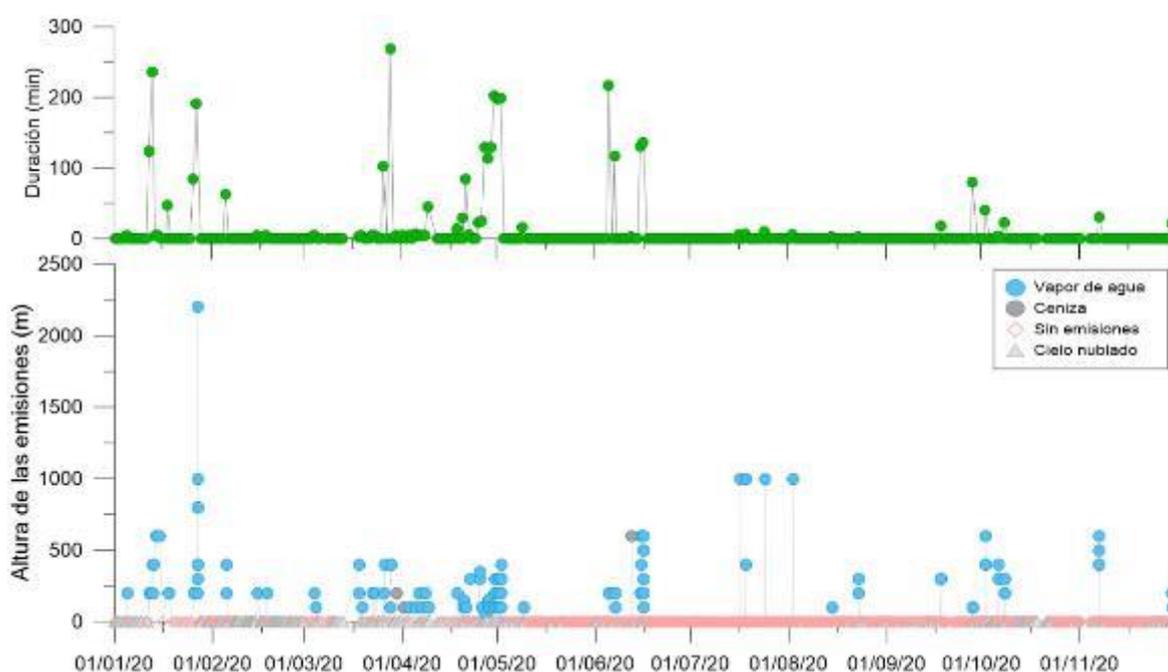


Figura 5.3. Variación de la altura y duración de las emisiones volcánicas del volcán Ubinas, durante el periodo enero a noviembre del 2020.

6.2.2 Dirección predominante

La dirección de dispersión de las emisiones volcánicas están influenciadas por el viento. Debido a que, en el año 2020, no se presentaron emisiones de alturas y volúmenes importantes, no fue necesario realizar el modelamiento de la dispersión de las emisiones. Por lo tanto, solo se analizaron las imágenes provenientes de las cámaras de monitoreo para la determinación de su dirección de dispersión.

Durante el año 2020, la dirección predominante ha sido noroeste (39%), noreste (26%), norte (7%), sureste (10%), suroeste (6%), este (6%) y sur (1%), como se muestra en la Figura 5.4.

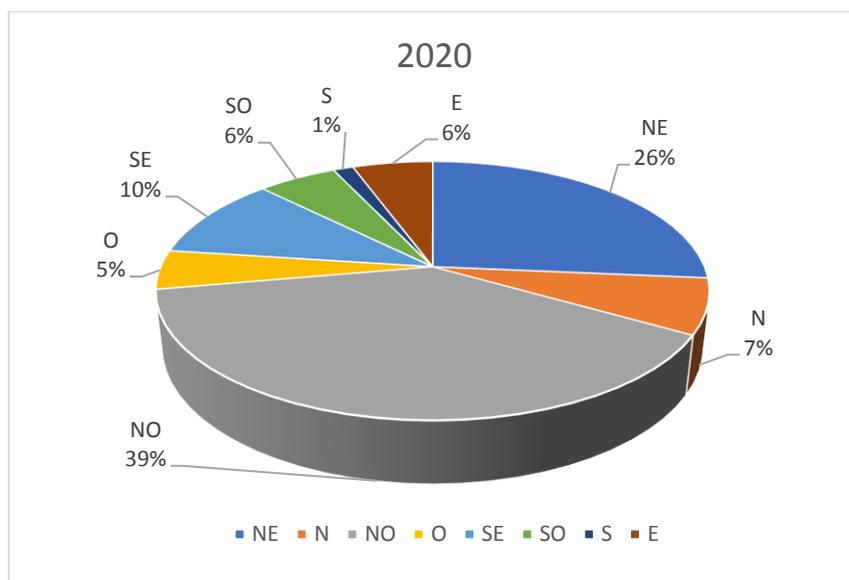


Figura 5.4. Dirección de dispersión de las emisiones volcánicas del volcán Ubinas durante el año 2020

6.2.3 Imágenes representativas de emisiones fumarólica

Las imágenes más representativas del volcán Ubinas, se muestran en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Imágenes representativas de las emisiones o plumas volcánicas más importantes ocurridas en el volcán Ubinas durante el año 2020.

6.3 Vigilancia satelital

6.3.1 Anomalías Térmicas

Una de las técnicas de monitoreo del volcán Ubinas, se realiza a través de la identificación de anomalías térmicas del volcán, por medio del análisis de Imágenes Satelitales.

El seguimiento de la actividad térmica del volcán Ubinas, desde el mes de enero a noviembre del año 2020, se realizó a partir de las imágenes satelitales Sentinel 2, nivel L2A, obtenidas de la Agencia Espacial Europea (ESA). La evaluación de estas imágenes se realizó usando la combinación de bandas B11, B12, B8A, que corresponde a la banda SWIR (Infrarrojo de Onda Corta), que es el equivalente térmico en este tipo de imágenes.

Mediante el análisis realizado, se logró identificar la ocurrencia de una pequeña anomalía térmica en el cráter del volcán Ubinas, la cual, ha mostrado un comportamiento variable y ha ido decreciendo en los últimos meses del año. La intensidad de la anomalía se ha cuantificado de menor a mayor valor, de I a V.

En la Figura 5.6.a, se muestra la serie temporal de la ocurrencia de esta anomalía del volcán Ubinas, durante el año 2020, observándose que, desde el 1 de enero hasta fines del mes de febrero, las imágenes satelitales mostraron poca visibilidad por la presencia de nubosidad, debido al periodo estacional de lluvias (*Triángulos grises*). Posteriormente, el 5 de marzo, es posible visualizar la anomalía térmica en el cráter, siendo de baja intensidad (IV). Desde el 09 de abril hasta el 08 de junio, la anomalía incrementa su intensidad (VI) y su frecuencia de ocurrencia, observándose de manera casi continua, esta intensidad determinada como de nivel VI, es la más alta observada durante el presente año. A partir del 13 de junio, la intensidad de la anomalía desciende ligeramente (V), hasta el 7 de agosto. Seguidamente, la anomalía desciende paulatinamente hasta que, en el mes de octubre, el día 11, ya no se observa la presencia de esta anomalía.

De igual forma, se hizo una comparación con la plataforma MOUNTS (Monitoring Unrest from Space), que hace el monitoreo de esta anomalía térmica, en la cual, a partir de un algoritmo cuantifica los puntos calientes por pixel, recordemos que un pixel en bandas multispectrales de Sentinel 2, la resolución espacial es de 20 metros. Como se muestra en la Figura 5.6.b, la anomalía térmica en el cráter del Ubinas, presenta mayor número de pixeles durante el mes de abril, alcanzando un valor máximo de 4 pixeles, el día 14. A continuación, en los meses de mayo y mediados de junio, la anomalía permanece en un valor constante de 2 pixeles, descendiendo en los siguientes días, hasta llegar a un pixel, el 18 de julio. Posteriormente, la plataforma de MOUNTS no ha reportado anomalías cuantificables en el cráter del volcán.

Asimismo, se hizo una correlación con la actividad superficial del volcán Ubinas, a través de la altura de las fumarolas y el color de las mismas. En la Figura 5.6.c, se muestra la altura de las emisiones a lo largo del año.

Haciendo una correlación con la ocurrencia de las anomalías térmicas en el cráter del Ubinas, se logró identificar que, durante los meses de marzo, abril, mayo y junio, donde se observa anomalías con mayor intensidad, las emisiones fueron más constantes en su ocurrencia y se identificaron emisiones con contenido de ceniza gris claro, los días 30 de marzo, 1 de abril y 12 de junio, con alturas de 200, 100 y 600 metros sobre el cráter. Estas emisiones fueron poco frecuentes durante este año.

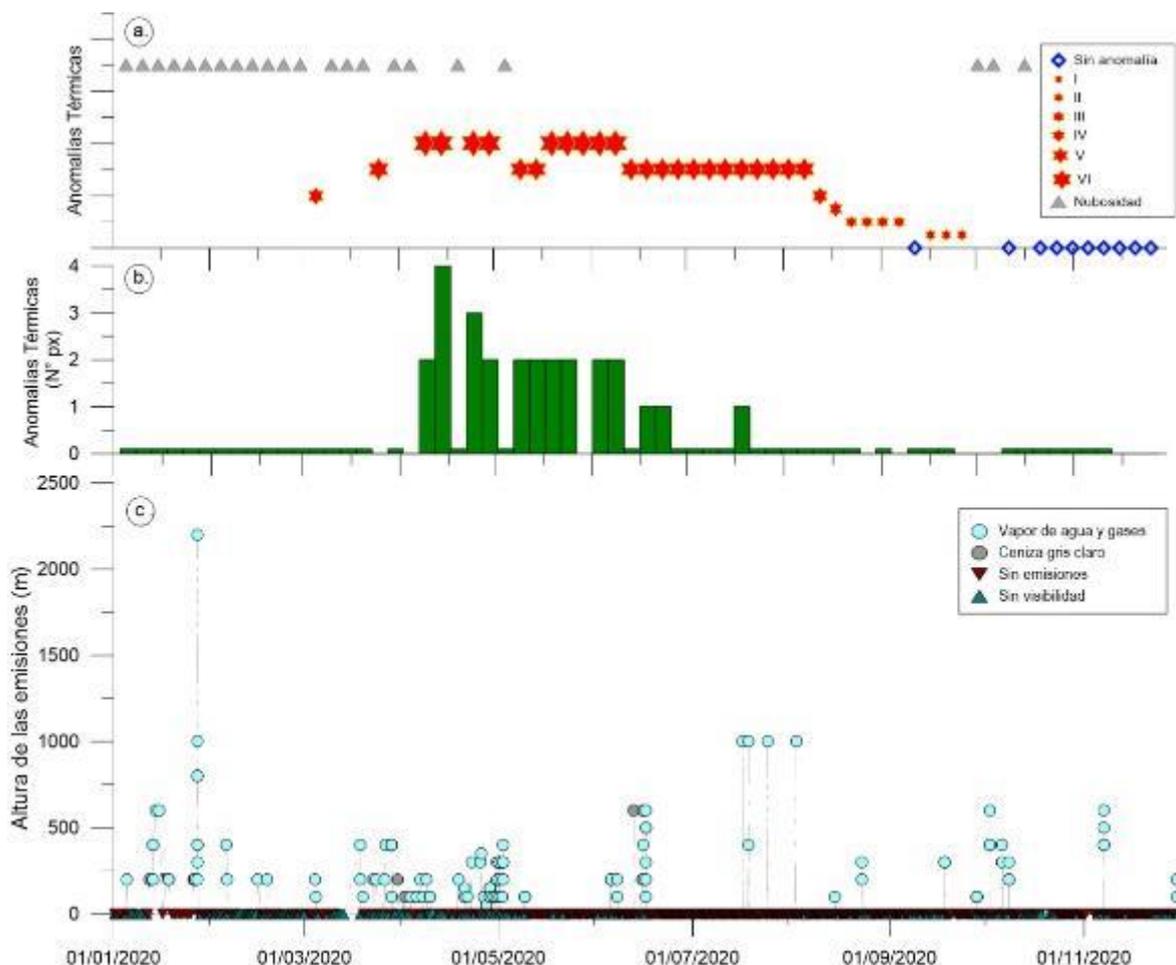


Figura 5.6. Gráfica de la ocurrencia de las anomalías térmicas a partir del análisis de Imágenes Satelitales Sentinel 2 (a.), Píxeles de puntos calientes de la anomalía identificada, mediante la Plataforma MOUNTS (b.) y su relación con la altura de las emisiones fumarólicas y su coloración (c.)

A partir del análisis realizado, podemos definir que, el periodo donde se observó mayor recurrencia de esta anomalía térmica, fue entre la quincena de marzo y la quincena de agosto del 2020. Reconociéndose, un periodo de anomalías con mayor intensidad (V y VI), comprendida entre los meses de abril, mayo y junio.

Es importante hacer el seguimiento de esta anomalía térmica, para poder identificar un posible incremento de actividad o un descenso de la misma, lo que nos indicaría cambios en la actividad del volcán.

En la Figura 5.7, se muestra algunas imágenes representativas de la evolución de esta anomalía térmica a lo largo del año.

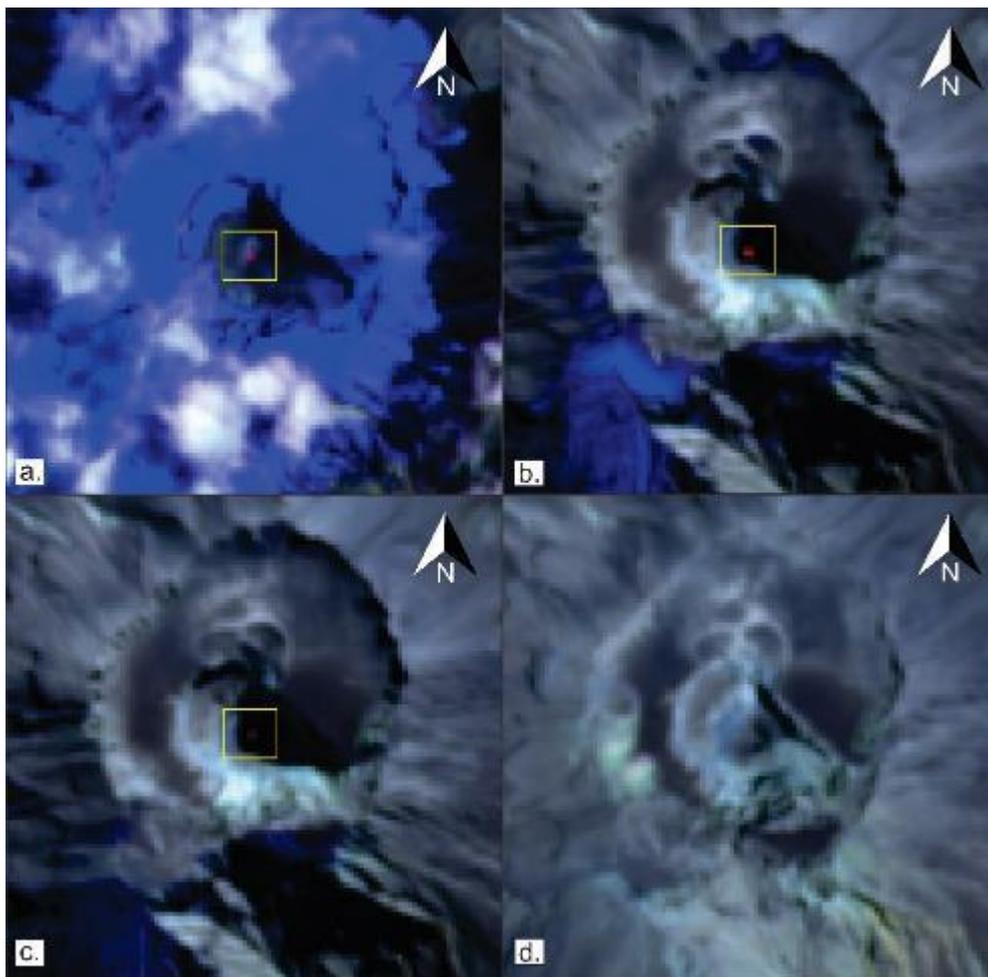


Figura 5.7. Evolución de las anomalías térmicas observadas en el cráter del volcán Ubinas durante el año 2020. Imágenes Satelitales Sentinel 2, del 05 de marzo (a.), 19 de mayo (b.), 18 de julio (c.) y 25 de noviembre del 2020 (d.). Los cuadros amarillos muestran la ubicación de la anomalía térmica.

6.3.2 Imágenes Satelitales Ópticas

El análisis morfológico del volcán Ubinas, se realizó mediante la evaluación de imágenes satelitales PlanetScope de resolución 3.0 metros, correspondiente a las fechas 13 de noviembre del 2019 y 13 de noviembre del 2020. Al comparar visualmente las imágenes, no se observó ningún cambio físico resaltante en ambas imágenes, como se muestra en la Figura 5.8, por lo tanto, no se observaron cambios morfológicos en la estructura volcánica durante el año 2020.

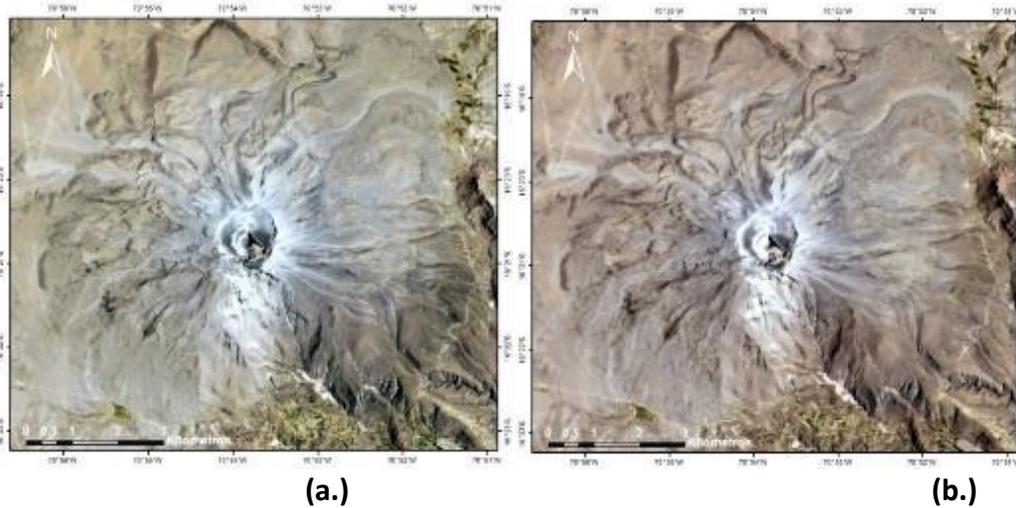


Figura 5.8. Interpretación visual de las características físicas del volcán Ubinas. Imagen Satelital Planetscope del 13 de noviembre del 2019 (a.) y 13 de noviembre del 2020 (b.)

7 MONITOREO DE LAHARES

7.1 Red de estaciones de lahares

Para el monitoreo de lahares ocurridos en el volcán Ubinas, se cuenta con dos estaciones, que comprende un sensor sísmico, una cámara de video y una estación meteorológica (Figura 6.1).

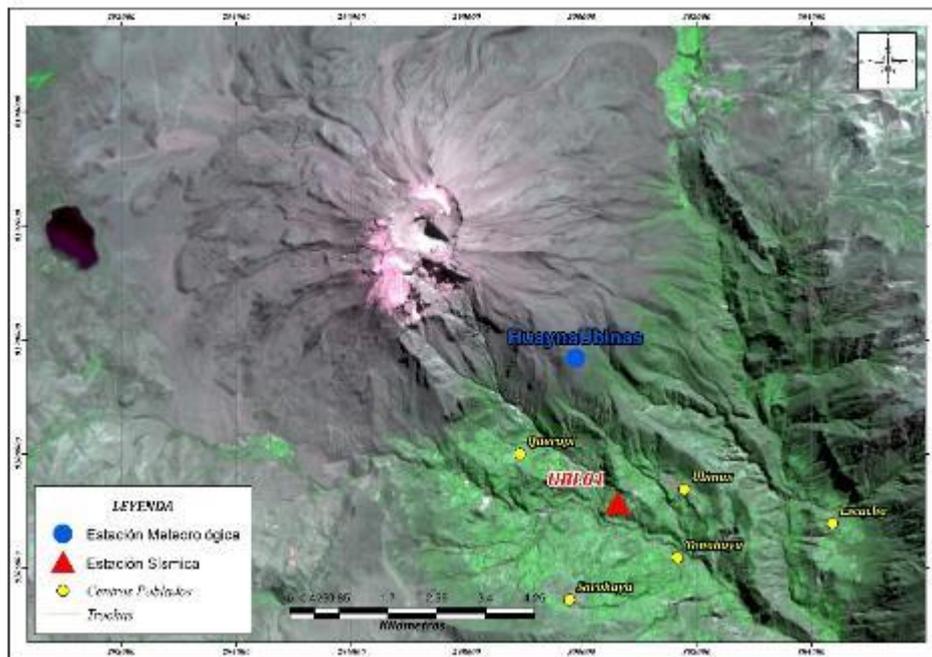


Figura 6.1. Mapa de ubicación de la estación meteorológica HuaynaUbinas y la estación sísmica-visual UBL01.

7.2 Registro de precipitaciones pluviales

Los datos de precipitaciones se obtuvieron de la estación meteorológica “HuaynaUbinas”. Los registros de precipitación, llegándose a registrar precipitaciones diarias de hasta 51.30 mm el 12 de febrero del 2020, (Figura 6.2).

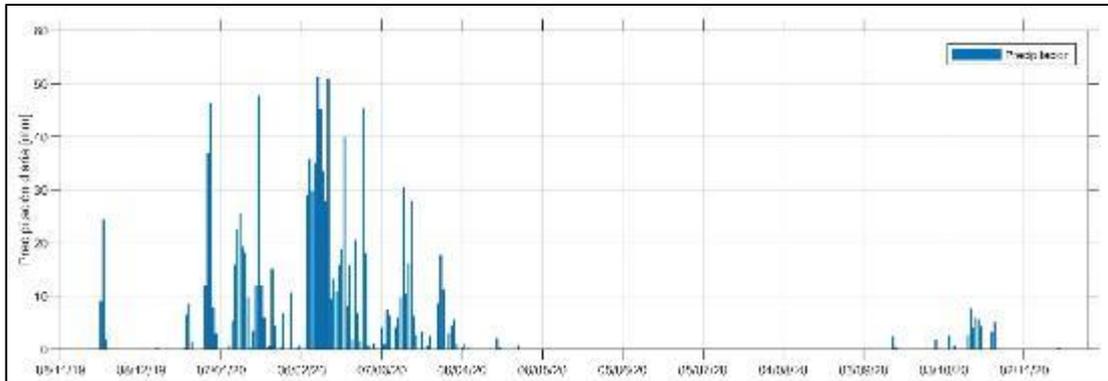


Figura 6.2. Precipitaciones registradas por la estación “HuaynaUbinas”, instalada en el volcán Ubinas.

7.3 Resultados del monitoreo de lahares

La identificación de lahares ocurridos en el volcán Ubinas se obtuvo de los registros sísmicos de la estación UBL01 (Figura 6.3), ya que el paso de los flujos de lodo genera vibraciones en el suelo, los cuales pueden ser identificados por los sismómetros. Se identificaron en total 9 lahares.

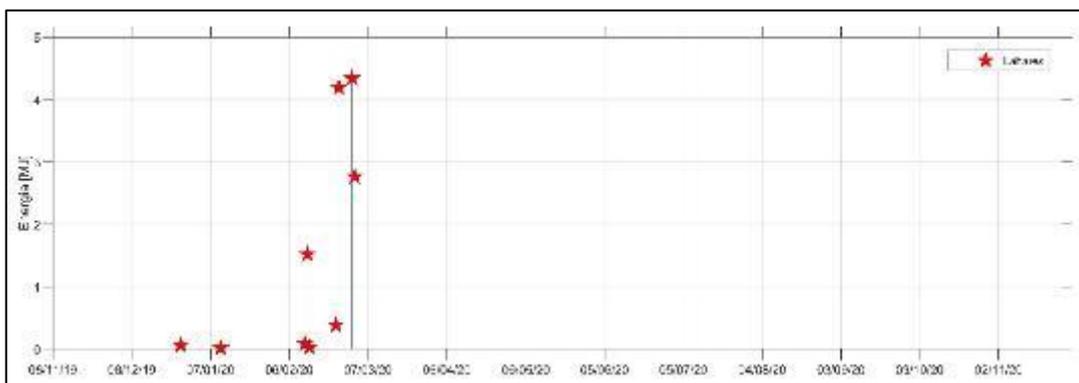


Figura 6.3. Lahares registrados en el volcán Ubinas.

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados muestran, un volcán activo a pocos meses después de un proceso eruptivo de IVE 2, ocurrido en un periodo corto. Durante el 2020 solo se pueden observar una “estabilización” de la actividad, sobre todo hacia los primeros meses, los cuales fueron registrados en los parámetros del monitoreo multidisciplinario (Figura 7.1).

Al comparar estos resultados con los umbrales esperados para una reactivación, estos fueron bajos, por lo que, se mantuvo una actividad compatible con un nivel de alerta color VERDE. Esta información fue transmitida a las autoridades en las distintas reuniones de la plataforma en el COER Moquegua.

La información de monitoreo permanente y en tiempo real fue transmitida a la población y autoridades través de 332 reportes diarios y 52 reportes semanales de actividad volcánica del volcán Ubinas.

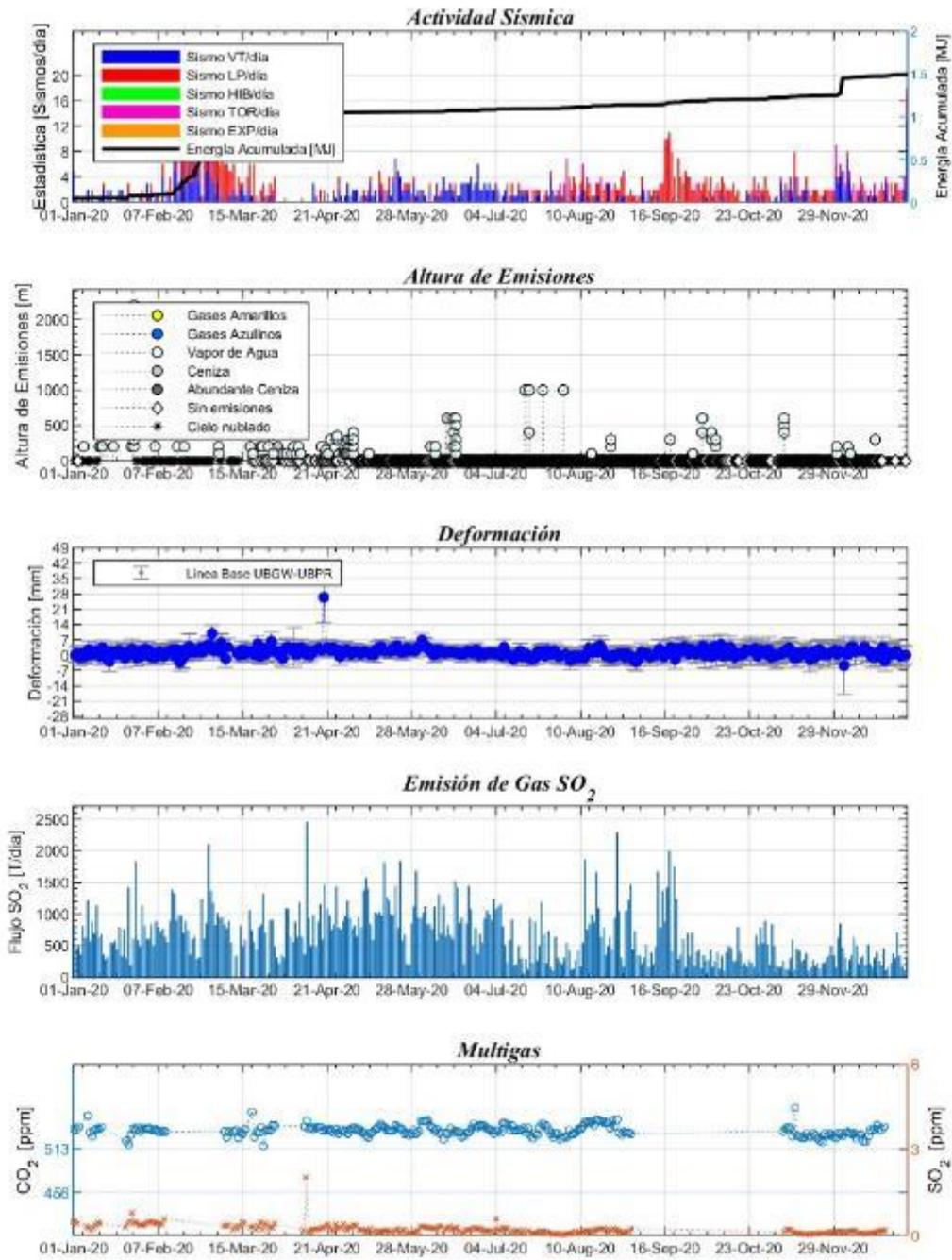


Figura 7.1. Imagen multiparamétrica del monitoreo volcánico realizada por INGEMMET, durante el 2020 en el volcán Ubinas.

9 CONCLUSIONES

- Después del proceso eruptivo del 2019, la actividad volcánica se ha mantenido en niveles muy bajos, no presentando cambios significativos durante todo el año 2020.
- Los flujos de SO₂ medidos durante el periodo 2020 se mantuvieron por debajo de los 2500 t/día durante todo el año, valores usuales en un volcán activo de sistema de conducto abierto.
- Los valores de gases volcánicos medidos con el equipo multigas evidencian que no existe un cuerpo o volumen de magma cercano a la superficie. Una relación CO₂-SO₂ mayor a 20 indica que los niveles de concentración de gases magmáticos en el volcán Ubinas durante el 2020 fueron muy bajos. .
- El volcán Ubinas, presenta una actividad baja, caracterizada por emisiones esporádicas de vapor de agua y gases, entre los 100 y 1000 metros de altura sobre el cráter, a excepción de un evento de 2200 metros, ocurrido el 27 de enero. Además, se observaron solo 03 emisiones con contenido de ceniza gris claro, los días 30 de marzo, 01 de abril y 12 de junio, con alturas de 200, 100 y 600 metros sobre el cráter. Estas emisiones tuvieron una duración máxima de 7 minutos. La dispersión fue en dirección noroeste y noreste con 39% y 26%, respectivamente.
- Asimismo, a través del análisis de las imágenes satelitales Sentinel 2, se evidenció la presencia de una anomalía térmica en el cráter del volcán Ubinas, la cual, presento mayor intensidad en los meses de abril, mayo y junio del 2020. Del mismo modo, se realizó la evaluación morfológica visual comparando imágenes satelitales PlanetScope del año 2019 y 2020, donde no se observaron cambios morfológicos resaltantes en el volcán.
- La deformación volcánica monitoreado a través de 03 estaciones GNSS, no evidenciaron cambios significativos que nos indiquen una nueva intrusión magmática.
- Se registraron 09 lahares, los cuales fueron identificados por la estación de monitoreo de lahares UBL01.
- De acuerdo al análisis de factor de calidad (Q) y las frecuencias dominantes, durante el año 2020, los valores de Q se mantuvieron en promedio entre 150 y 250 con frecuencias que oscilaron entre 4 y 5 Hz. De acuerdo a los diagramas de contornos de Kumagai y Chouet (2001) estos resultados sugerirían que la mayor parte de estos sismos fueron generados por una mezcla de gases y material particulado.
- En el volcán Ubinas, a pesar de las variaciones en el valor de Q y la frecuencia dominante, no se tienen reportes de emisiones con posible contenido de ceniza, por esta razón, se plantea que, en lugar de ceniza, se trate de otro tipo de material particulado que se mezcló con los fluidos hidrotermales, lo que explicaría los valores altos de Q.
- Este tipo de sismicidad se registra tanto antes y durante episodios eruptivos del volcán Ubinas, como fueron los del 2013 - 2017 y 2019, pero además también ocurrieron en periodos de calma.

RECOMENDACIONES

- ✓ Continuar y culminar con la apertura de las rutas de evacuación de los pueblos de Ubinas, Tonohuaya, Sacohaya, etc.
- ✓ Dar mantenimiento y tener preparado el refugio permanente para evacuaciones temporales, en caso ocurra un futuro proceso eruptivo
- ✓ Estar atentos a los reportes de monitoreo y a las recomendaciones de las autoridades.
- ✓ Tener el mapa de peligros del Ubinas como una herramienta de gestión para realizar planeamientos y obras de desarrollo en la zona aledaña al volcán Ubinas.
- ✓ Cambiar el nivel de alerta de color amarillo a color verde, ya que estas deben ser compatibles con el nivel de actividad volcánica del Ubinas en el momento, tener en cuenta que, los niveles de alerta son dinámicos y cada color responde a acciones concretas de las autoridades.



MCs. Pablo Jorge Masías Álvarez

INGEMMET

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

10 BIBLIOGRAFÍA

- Alayza, F. (1953) - Notas sobre el departamento de Moquegua. Boletín Sociedad Geográfica de Lima, 70(1-2): 24-56.
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D. & Battaglia, M., 2020. Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. Remote Sensing, 12(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>
- Bromley, G. R., Thouret, J. C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., ... & ASTER Team. (2019). In situ cosmogenic ³He and ³⁶Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. Bulletin of Volcanology, 81(11), 64.
- De Silva, S. L., and Francis, P., (1991). Volcanoes of the Central Andes.
- Dvorak, J. J., Y Dzurisin, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. Reviews of Geophysics, 35(3), 343-384. <https://doi.org/10.1029/97RG00070>
- Hantke, G., Parodi, I., 1966. The active volcanoes of Peru. Catalogue of the active volcanoes of the World. Part XIX, Colombia, Ecuador and Peru. Internat Assoc, Volcanol, pp. 65–73.
- Herring, T., King, R. W. & McCluskey, S., 2010. M. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology Technical Report, Cambridge.
- Kumagai, H. y Chouet, B. (2001). The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and geometry. Geophysical Research Letters, 28(17), 3325-3328. Doi: 10.1029/2001GL013025.
- Lesage, P., 2009. Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. Computers & Geosciences, 35(10), pp.2137-2144. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.01.010>
- 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, 112 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/303>
- Rivera M., Thouret J.C., Gourgaud A. (1998) - Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v.88, 53-71.
- Rivera, M., Mariño J., Thouret., (2011). Geología y evaluación de Peligros del volcán Ubinas, Boletín INGEMMET, N°46, Serie C, Lima.
- Rivera, M.; Thouret, J.C.; Mariño, J.; Berolatti, R. & Fuentes, J. (2010) - Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198(1-2): 19-34.
- Thouret J.C., Rivera M., Worner G., Gerbe M.C., Finizola A., Fornari M., Gonzales K., (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. Bull Volcanol; 67: 557 – 589.
-