



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



FAMILIAS SÍSMICAS Y EL PRONÓSTICO DE ERUPCIONES: CASO DEL VOLCAN UBINAS, 2019

Informe Técnico N°004-2023/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Marzo, 2023

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Familias sísmicas y el pronóstico de erupciones: caso del volcán Ubinas, 2019

Autores

Jose Del Carpio
Javier Vilca
Hernando Tavera

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**FAMILIAS SÍSMICAS Y EL PRONÓSTICO DE ERUPCIONES:
CASO DEL VOLCAN UBINAS, 2019**

Arequipa-Perú
Marzo, 2023

RESUMEN

El volcán Ubinas, el más activo del Perú, ha presentado en este siglo, tres nuevas erupciones, siendo la más importante la ocurrida en el año 2019, debido al volumen de tefra emitida y al área cubierta por los productos de dicha erupción (> 250 km de radio).

En el presente estudio se analizó las características espectrales de las señales sísmicas registradas en el entorno del volcán Ubinas para el periodo comprendido entre enero y julio del 2019; es decir, antes y después de la erupción del volcán. En este periodo se ha observado que entre los meses de febrero y abril, se registraron señales que por sus características corresponden a familias sísmicas de tipo LP, asociadas con los primeros ascensos de magma y la perturbación del sistema hidrotermal en el interior del volcán Ubinas, puesto en evidencia con el registro de señales VT+Tremor. Estos procesos se desarrollaron cuatro meses antes del registro de señales sísmicas de tipo VTs ligadas a la ruptura de rocas cerca de la superficie del cráter, para luego pasar a la fase explosiva o erupción del volcán Ubinas, ocurrida el 19 de julio de 2019.

Las formas de onda y características espectrales de las señales sísmicas registradas, previos al inicio de la erupción del volcán Ubinas, podrían ser consideradas como precursoras ante la posibilidad de desarrollarse un nuevo proceso eruptivo.

1-. INDICE

1.- INTRODUCCIÓN

2. CONTEXTO VULCANOLÓGICO

2.1. Historia Eruptiva del volcán Ubinas

3. METODOLOGÍA

3.1. Análisis automático de eventos sísmicos repetitivos

3.2. Clasificación de señales sismo-volcánicas

3.3. Detección de sismos con STA/LTA

3.4. Cálculo de la energía sísmica

3.5. Métodos estadísticos

3.6. Cálculo de hipocentros

3.7. Datos

4. RESULTADOS

4.1. Selección de señales sísmicas y clusterización

4.2. Parámetros hipocentrales

4.3. Ascenso de fluidos volcánicos

4.4. Entropía de Shanon y Kurtosis

5. DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos 19 años, el volcán Ubinas, ubicado en la provincia de General Sánchez Cerro (Moquegua), ha presentado tres nuevos procesos eruptivos (2006-2009, 2013-2017 y 2019) con Índices de Explosividad Volcánica de 2, en una escala que va del 0 al 8. La más importante de estas erupciones, por la cantidad de ceniza emitida, por el radio de alcance (> 250 km del cráter) y afectación a más de 30 mil pobladores del sur peruano; además de terrenos de cultivo, medio ambiente y otros, ocurrió en el año 2019 (Del Carpio y Rivera, 2019; COEN-INDECI, 2019).

Antes y durante la actividad eruptiva de 2013-2017 del volcán Ubinas, el análisis de la actividad sísmica registrada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) permitió identificar la ocurrencia de diferentes tipos de eventos sísmo-volcánicos: (A) Tornillos y Volcano-tectónicos, (B) tremor e (C) Híbridos, todos previo al inicio de la fase explosiva (Del Carpio et al., 2016). Estas características previas al proceso eruptivo, permitió realizar el pronóstico de la erupción del 2019 (Del Carpio et al., 2019). El 18 de junio se registró un enjambre de sismos de tipo Volcano-tectónicos (VTs) y horas después, señales de tipo Largo Periodo (LP) e Híbridos (HB) que evidenciaban el movimiento y ascenso del magma hacia la superficie. Días después, el número de estos registros se incrementó notablemente hasta el 19 de julio, fecha en que se produjo la fase explosiva de la erupción (Del Carpio et al., 2019).

En la actualidad, la detección y análisis automático de señales sísmicas ha permitido identificar la ocurrencia de “clusters de sismos o familias sísmicas”, siendo muy útiles para el pronóstico de erupciones volcánicas (Green y Neuberg, 2006; Umakoshi et al., 2008; Arámbula-Mendoza et al., 2011; Thelen et al., 2011; Buurman et al., 2013; Rodgers et al., 2013). En este sentido, se han desarrollado varios algoritmos para identificar dichas familias, como por ejemplo, la correlación cruzada de formas de onda y el método de doble diferencia (Waldhauser & Ellsworth, 2000), así como el detector de eventos sísmicos repetitivos - REDPy (Hotovec-Ellis y Jeffries, 2016). En general, las familias sísmicas o clusters agrupan a sismos idénticos o casi idénticos en sus formas de onda y características espectrales (Hamaguchi & Hasegawa, 1975). En ambientes volcánicos, los clusters sísmicos son registrados durante el ascenso y formación de domos de lava (Rowe et al., 2004; Power y Lalla, 2010), erupciones basálticas (Battaglia et al., 2003; Saccorotti et al., 2007) y algunas veces durante periodos no eruptivos (Roman y Power, 2011; Passarelli et al., 2018).

Antes de la ocurrencia de las últimas erupciones del Ubinas, el análisis de los registros sísmicos ha evidenciado el incremento del número y energía de las señales sísmicas asociadas al fracturamiento y al movimiento de fluidos volcánicos (gases, magma, etc.) hacia la superficie terrestre. Para un mejor análisis de este proceso, se ha iniciado el uso del algoritmo REDPy, para la identificación de familias sísmicas mediante la técnica de correlación cruzada (cross-correlation). Sobre una línea de base para el número de

sismos ocurridos en el volcán Ubinas, se identificaría la aparición de familias de sismos LP o Híbridos, ambos asociados a la llegada de magma al cráter y la consecuente erupción volcánica. En este escenario, tal como sugiere Thelen et al (2011), se espera la disminución de la presión interna del volcán y la ocurrencia de eventos sísmicos de tipo VT de alta frecuencia como la etapa final del proceso eruptivo.

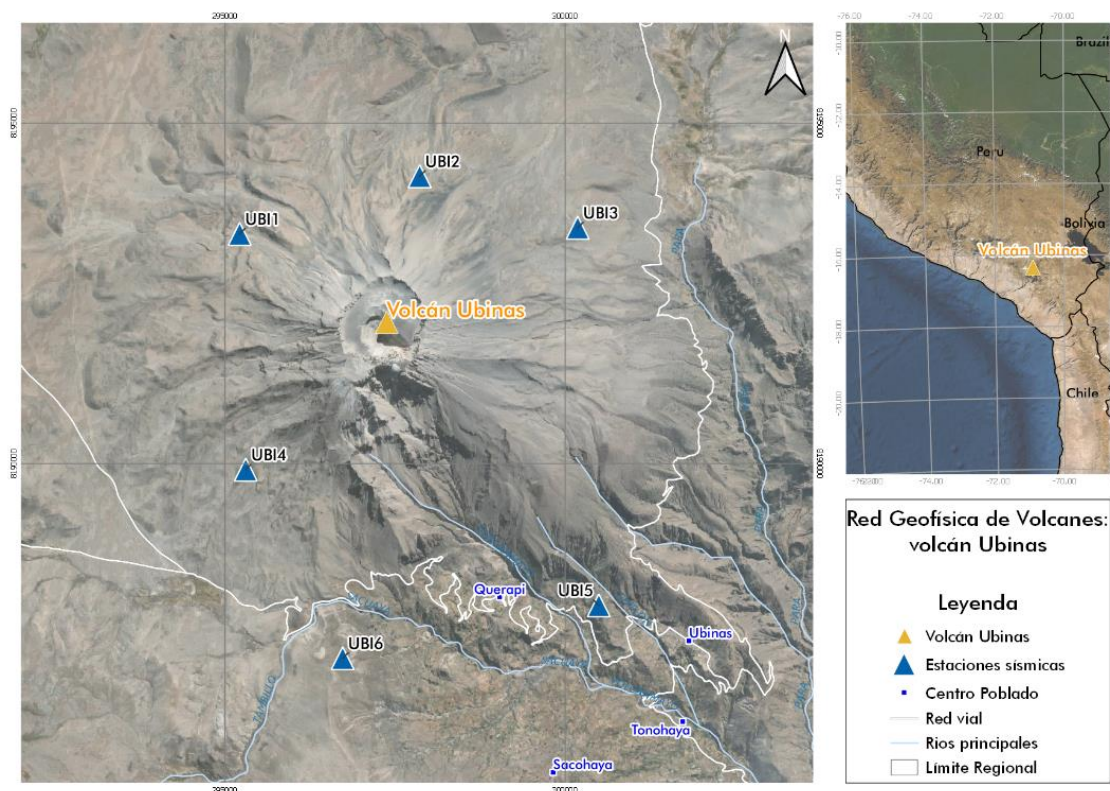


Figura 1.- Ubicación de las estaciones sísmicas que conforman la Red geofísica de volcanes en el volcán Ubinas. Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas.

En este estudio, se analiza las características de las señales sísmicas registradas en el entorno del volcán Ubinas (enero a julio de 2019), por la Red Geofísica de Volcanes a cargo del IGP (Figura 1). Esta información corresponde al antes, durante y después del inicio de la fase explosiva de la

última erupción del Ubinas ocurrida el 19 de julio del 2019. Este análisis permitirá reconocer patrones pre-eruptivos y fuentes generadoras de la actividad sísmica con fines de pronóstico de erupciones volcánicas.

2.- CONTEXTO VULCANOLÓGICO

El Ubinas es un estratovolcán andesítico que pertenece a la cadena de edificios volcánicos emplazados durante el Cuaternario en el sur peruano y forma parte de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC). El volcán Ubinas se ubica en la cabecera de los valles de Ubinas y Para. Hacia el noreste, norte y oeste, los extremos de su base corresponden a un área relativamente plana denominada superficie Puna.

El estratocono del volcán Ubinas está conformado por una potente intercalación de flujos de lava andesíticos y dacíticos con algunos flujos piroclásticos (1 200 m de espesor) que, en conjunto, le dan la geometría cónica algo simétrica. El estratocono posee un volumen de 54 km³ y sus lavas más antiguas fueron datadas en más de 400 000 años AP (Thouret et al., 2005) y las más recientes en menos de 20 000 años (Rivera et al., 2010). Durante los últimos 500 años, el volcán Ubinas ha presentado al menos 27 erupciones o procesos eruptivos con IEV 1 a 3 (Samaniego et al., 2020). La caldera actual es el producto, de por lo menos dos grandes procesos explosivos distintos acaecidos a fines del Pleistoceno y Holoceno (Rivera et al., 2010).

1.1. Historia Eruptiva del volcán Ubinas

Los últimos 3 procesos eruptivos generados por el volcán Ubinas: 2006-2009; 2013-2017 y 2019 fueron registrados instrumentalmente gracias a la red de monitoreo geofísico que opera el IGP. Las características de estas erupciones son brevemente descritas a continuación:

- a.) Actividad eruptiva 2006 – 2009:** Esta actividad eruptiva que tuvo un IEV igual a 2, se inició en abril de 2006 y perduro hasta los últimos meses de 2009. Durante dicho proceso eruptivo, las columnas de gases y cenizas generadas luego de las explosiones

alcanzaron alturas máximas de 4 km sobre la cima del volcán. A lo largo de los 36 meses que duró la actividad eruptiva, el volcán generó más de 170 explosiones con un rango de energía sísmica de 0.0001 MegaJoules y 500 MegaJoules (Del Carpio et al., 2020). Durante esta actividad se registraron enjambres sísmicos conformados por eventos de periodo largo (LP) que precedían a la ocurrencia de explosiones volcánicas (Machaca et al, 2012).

b.) Actividad eruptiva 2013 – 2017: Este proceso eruptivo tuvo un IEV igual a 2, y durante el mismo se ha registrado secuencialmente señales sísmicas de tipo VT, Tornillo, Tremor y LP, pero los de mayor importancia correspondió a los eventos de tipo Híbrido, relacionados con el ascenso de magma, visible en el fondo del cráter y que fue corroborado con las observaciones del sistema satelital MIROVA (Coppola et al., 2015; Del Carpio et al., 2020). Todas estas señales sísmicas precedieron el inicio de la fase explosiva y que fue inferida a partir del análisis sismo-volcánico efectuado con anterioridad por Del Carpio et al. (2016). Durante dicho proceso eruptivo se registraron un total de 667 explosiones con rangos de energía entre 0.0001 MJ y 284 MJ.

c.) Erupción volcánica 2019: Luego de culminado el último proceso eruptivo del volcán Ubinas (2013-2017), desde marzo de 2017 a inicios de junio de 2019, su comportamiento dinámico presentaba niveles bajos de actividad, llegándose a registrar 2 sismos de tipo VT por día. En dicho periodo las imágenes satelitales no mostraban anomalías térmicas y no se registraban emisiones anómalas de gases y/o cenizas. Con este escenario, el nivel de alerta por actividad volcánica del volcán Ubinas se mantenía en color VERDE (Del Carpio et al., 2019). El proceso de intranquilidad sísmica se inició el 18 de junio con el registro de 65 sismos de tipo VT (Figura 2) ocurridos bajo el volcán, indicando una etapa de reactivación que continuo con la

ocurrencia de sismicidad asociada al ascenso de fluidos volcánicos (sismos de tipo LP e Híbridos). El 21 de junio, el IGP recomienda al Gobierno Regional (GORE) de Moquegua elevar el nivel de alerta volcánica a color AMARILLO y el 24 de junio inicia la erupción con una pequeña emisión de cenizas (Del Carpio et al, 2019).

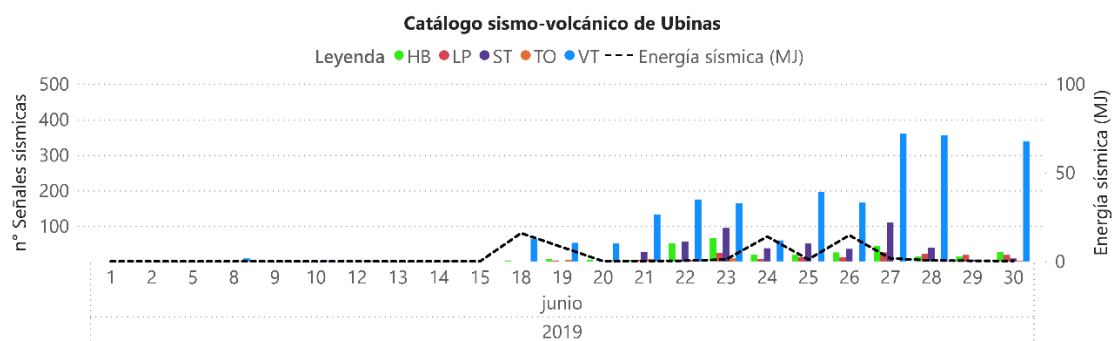


Figura 2.- Número y tipo de señales sísmicas detectadas por la red de monitoreo del volcán Ubinas entre el 1 y 30 de junio de 2019.

Antes de ocurrir las dos etapas explosivas distinguidas en este proceso eruptivo, se registraron señales sísmicas de tipo Tornillo, LP, Tremores e Híbridos. En total, se registraron 10 explosiones, las más energéticas (63 MJ) ocurrieron el 19 de julio y debido al incremento de la actividad sísmica, el IGP recomendó al GORE Moquegua elevar el nivel de alerta a color NARANJA. Las cenizas emitidas producto de estas explosiones volcánicas fueron dispersadas en dirección este y sureste del volcán, llegando a alcanzar distancias superiores a los 250 km.

La importancia de estudiar esta última erupción reside en dos importantes puntos:

- Los graves efectos generados por la caída de cenizas, hecho no ocurrido en los 2 últimos procesos eruptivos. El COEN estimó, inicialmente la afectación de 30 000 habitantes (COEN-INDECI, 2019) debido a que el proceso eruptivo se desarrolló en un corto periodo de tiempo (5 meses), a diferencia de los dos últimos procesos (2006-2009 y 2013-2017) que duraron más de 3 años.

- .- La secuencia clara y periódica de diferentes señales que pueden indicar el camino a seguir para el pronóstico de futuros procesos eruptivos del volcán Ubinas.

3.- METODOLOGÍA

La importancia del presente estudio radica en identificar el registro secuencial y temporal de diversas señales sísmicas o familias sísmicas previas a una inminente erupción volcánica y de este modo, contar con indicadores de pronósticos para futuras erupciones. El proceso eruptivo rápido del volcán Ubinas ocurrido en el año 2019 será el caso de estudio y para tal objetivo, se hace uso del algoritmo REDPy que de manera automática permite realizar la detección, correlación y formación de familias sísmicas o clusters, discriminando aquellas generadas por factores externos o que no estuvieron ligadas a la actividad volcánica.

Asimismo, las señales sísmicas registradas por la estación de referencia "UBI4" fueron analizadas aplicando el método estadístico de Kurtosis y la entropía de Shannon, a fin de diferenciar en base a sus características, el registro de series temporales según lo sugerido por Malfante et al. (2018). Para este objetivo se seleccionaron ventanas de señal del orden de 1 minuto con un traslape de 30 segundos entre ventana y ventana, y de este modo, analizar con mayor claridad el registro y la distribución de los señales sismo-volcánicas.

3.1.- Análisis automático de eventos sísmicos repetitivos

Para el registro y análisis automático de eventos sísmicos repetitivos se empleó el algoritmo REDPy. En este proceso, los eventos sísmicos repetidos se agrupan en familias usando la técnica de correlación cruzada entre registros de múltiples estaciones (Hotovec-Ellis y Jeffries, 2016). REDPy utiliza el algoritmo STA/LTA para poder identificar el inicio de un evento sísmico y cuando se activan las estaciones requeridas por el usuario, un nuevo evento se crea para que en el dominio de las frecuencias y mediante correlaciones cruzadas, sea comparado con otros eventos del catálogo. En este proceso es necesario establecer un factor de correlación que definirá sobre que umbral

se seleccionaran los sismos que pueden formar una u otra familia sísmica (Brill et al., 2018).

3.2.- Clasificación de señales sismo-volcánicas

La clasificación de señales sísmicas utilizada en el presente estudio está basada en los procedimientos descritos por Chouet (1996), Ibañez (1997) e Ibañez (2000). Chouet (1996) indica que los eventos de tipo Largo Periodo (LP) y Tremor estarían relacionados a la circulación de fluidos magmáticos. Los eventos LP son similares a sismos de tipo VT más pequeños, pero difieren en el rango de frecuencias y firma armónica. Algunas veces, los eventos LP y Tremores son generados en la misma ventana de tiempo y poseen las mismas componentes espectrales, lo que sugiere que tienen un proceso de origen común. Por su parte, los Tremores se caracterizan por ser señales de amplitud sostenida en el tiempo que pueden durar desde minutos hasta días. Los eventos de tipo Tornillo, incluidos dentro de la familia de los eventos de tipo Largo Periodo, tienen características monocromáticas con una amplitud cambiante (Torres et al., 1996; Gómez et al., 1999; Gómez & Torres, 1997). Estas señales sísmicas preceden a erupciones volcánicas y al emplazamiento de domos de lava (Gómez et al., 1999). Inmediatamente después de estas erupciones, los sismos de tipo Tornillo desaparecen por varios días (Torres et al., 1996).

Los principales tipos de sismos que fueron registrados antes, durante y después de la erupción del volcán Ubinas en el año 2019 son: Largo Periodo (LP), Tornillos, Volcano-Tectónicos (VT), Tremores Espasmódicos, Híbridos y Explosiones. Las principales características de cada tipo de señales volcánicas son descritas en Tabla 1.

Tabla 1.- Tipos de señales sísmicas registradas en el volcán Ubinas durante la erupción de 2019.

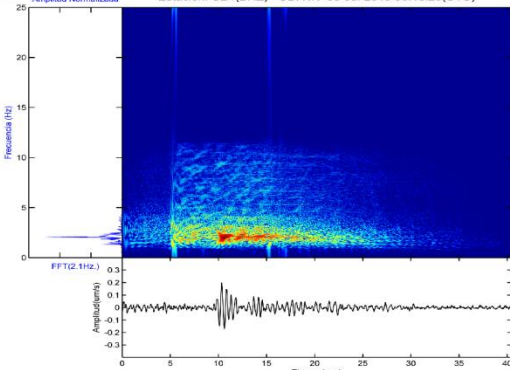
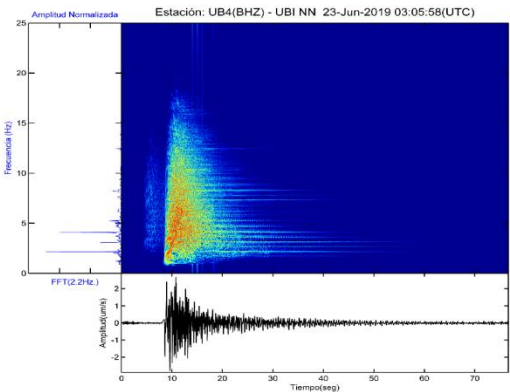
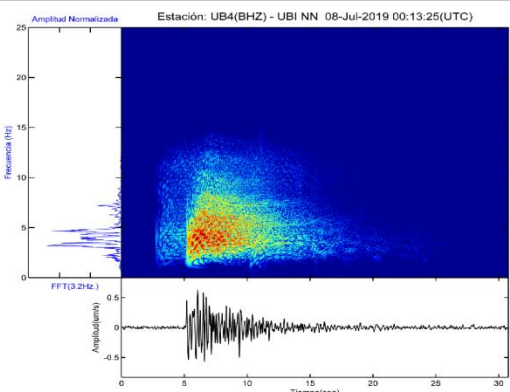
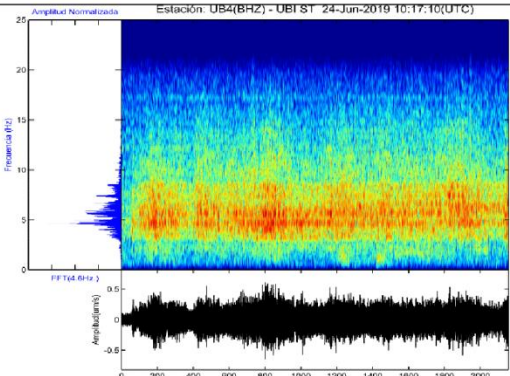
Tipo de señal: Firma sísmica	Fuente y características
Amplitud Normalizada Estación: UB1(BHZ) - UBINN 08-Jul-2019 00:13:25(UTC)  Frecuencia (Hz) Amplitud (µm) FFT(2.1Hz) Tiempo(seg)	Largo Periodo (LP) Bajas Frecuencias < 3 Hz Ligada al movimiento y resonancia de fluidos volcánicos como consecuencia de una presurización al interior de fracturas o cavidades saturadas por fluido. También se presentan durante la fragmentación del magma en las paredes del conducto (Khan et al., 2019).
Amplitud Normalizada Estación: UB4(BHZ) - UBINN 23-Jun-2019 03:05:58(UTC)  Frecuencia (Hz) Amplitud (µm) FFT(2.2Hz) Tiempo(seg)	Tornillo Aplica para evento LP Corresponde a señales sísmicas que tienen: (a) Larga duración comparada con su amplitud, (b) una coda larga, casi lineal con decaimiento lento, (c) forma de onda de baja frecuencia y monocromático o casi monocromático (Torres et al., 1996). Atribuida a la resonancia en una grieta llena de fluido, inducida por una presión transitoria aplicada sobre un área de una pared de la grieta (Chouet, 1985; Chouet, 1992).
Amplitud Normalizada Estación: UB4(BHZ) - UBINN 08-Jul-2019 00:13:25(UTC)  Frecuencia (Hz) Amplitud (µm) FFT(3.2Hz) Tiempo(seg)	Volcano-tectónico (VT) Frecuencia > 5Hz Están caracterizados por poseer, generalmente, ondas con arribo impulsivo de sus fases P y S, típicamente con una amplia banda espectral de hasta 15 Hz (Lahr et al., 1994). La mayoría de los sismos VTs en el volcán Ubinas presentan ondas P, emergentes haciendo difícil su localización. Los VTs están relacionados al fracturamiento de rocas como el resultado de esfuerzos causados, en gran medida, por la presión de fluidos.
Amplitud Normalizada Estación: UB4(BHZ) - UBINN 24-Jun-2019 10:17:10(UTC)  Frecuencia (Hz) Amplitud (µm) FFT(4.0Hz) Tiempo(seg)	Tremor espasmódico Frecuencia entre 1 Hz – 6 Hz y su espectro no tiene picos dominantes (Lesage et al., 2006). Corresponden a registros de vibraciones no armónicas que pueden durar por varios minutos o días. En la etapa pre-eruptiva del Ubinas, los tremores espasmódicos estuvieron relacionados con la perturbación del sistema hidrotermal, como consecuencia del ascenso del magma hacia la superficie.

Tabla 1.- Continuación.....//Tipos de señales sísmicas registradas en el volcán Ubinas durante la erupción de 2019.

Tipo de señal: Firma sísmica	Fuente y características
Amplitud Normalizada Estación: UB1(BHZ) - UBI NN 16-Sep-2020 13:29:42(UTC) FFT(3.9Hz) Amplitud(µm) Tiempo(seg)	Híbrido Son señales de largo periodo con contenido de altas frecuencias (Neuberg et al., 2006). Corresponden a señales sísmicas asociadas con la presurización del sistema volcánico (Lahr et al., 1994). Presentan bajas frecuencias (~1 Hz) al inicio de su señal, pero luego prevalecen las frecuencias más altas. Este tipo de eventos están asociados al ascenso de magma (parte de baja frecuencia) que inducen presión hasta cercanías de la superficie provocando ruptura (alta frecuencia) en las paredes del conducto volcánico o en el domo.
Amplitud Normalizada Estación: UB1(BHZ) - UBI NN 19-Jul-2019 07:27:17(UTC) FFT(4.2Hz) Amplitud(µm) Tiempo(seg)	Explosión Componente inicial de bajas frecuencias < 1 Hz. Señal sísmica de gran energía que presenta inicio emergente y una componente de muy baja frecuencia o VLF.

3.3.- Detección de sismos con STA/LTA

Para la detección de cambios en la amplitud en la señal sísmica se empleó el algoritmo *STA/LTA* (*Short Time Average / Long Time Average*). El *STA* es la ventana de tiempo corto y en ella se encuentra el evento sismo-volcánico. El *LTA* es la ventana de tiempo largo y toma el promedio de la amplitud del ruido sísmico (Trnkoczy, 1999), tal como se muestra en la Figura 3. Este algoritmo da como resultado una mejor sensibilidad para la detección de eventos sismo-volcánico y se previene el número excesivo de datos en los períodos de ruido ambiental (Argueta, 2019).

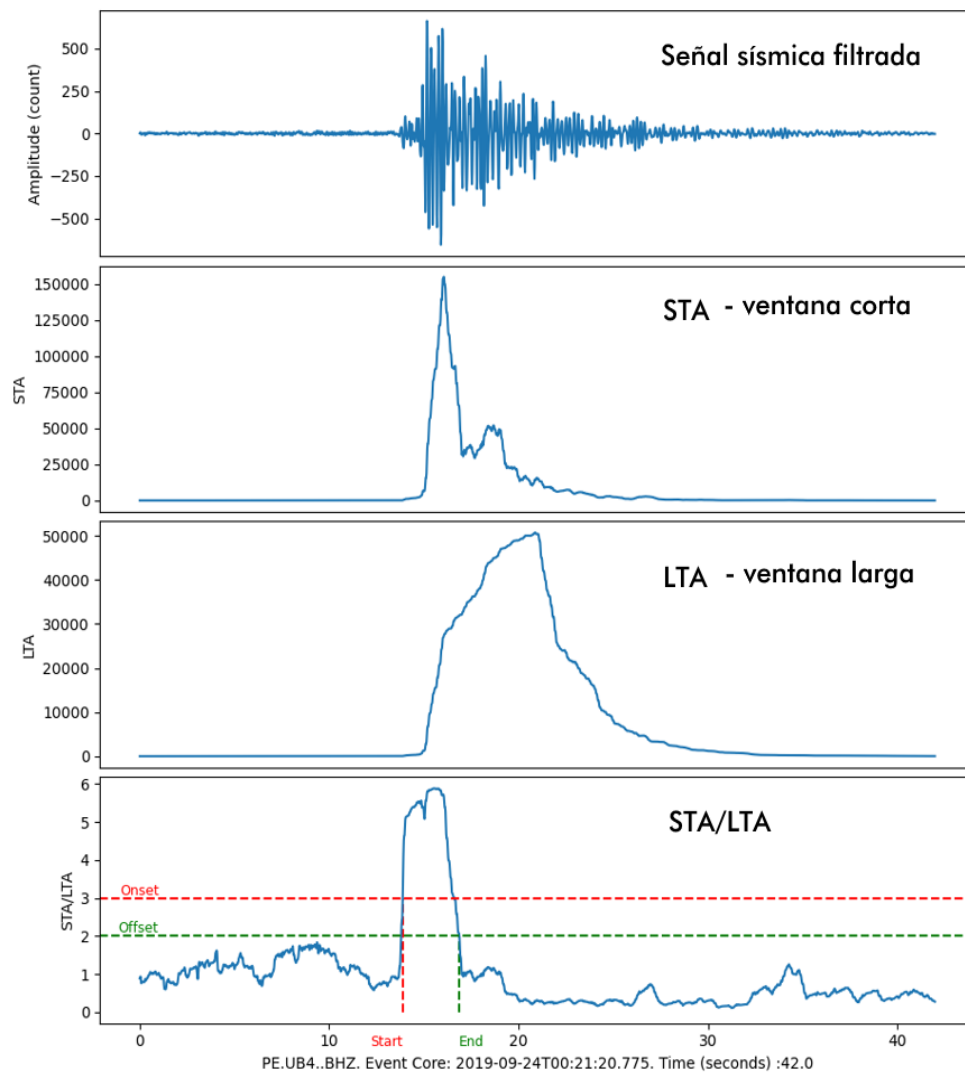


Figura 3.- Típico evento local y variables de disparo (Trigger) durante la detección del algoritmo STA/LTA.

El parámetro de activación STA/LTA y la configuración de los parámetros de disparo dependen de los objetivos del estudio, el ruido sísmico en el lugar, las propiedades de las señales sísmicas y en el tipo de sensor utilizado, pero no existe una regla común y única para establecer todos (Argueta, 2019).

Duración de la ventana promedio de corto plazo (STA): La ventana promedio de corto plazo mide el valor “instantáneo” de una señal sísmica o la mayor parte de ella. La duración de STA debe ser mayor que unos pocos periodos de una señal sísmica anticipada regularmente (Figura 3). Cuanto más corto es el valor elegido, mayor será la sensibilidad del disparador y si

es elegido con un valor muy grande este será menos sensible, esta condición es decisiva con respecto a los disparadores falsos.

Duración de la ventana promedio de largo plazo (LTA): La ventana promedio a largo plazo mide el ruido sísmico de amplitud media (Figura 3). Este parámetro debería de medir más de unos períodos del cambio del ruido sísmico habitualmente esporádico. Una corta duración de *LTA* permite que el valor de *LTA* amplíe gradualmente la amplitud de nuevas ondas sísmicas. Si el *LTA* es más largo, activa la sensibilidad a los sismos emergentes.

3.4.- Cálculo de la energía sísmica

Los niveles de energía sísmica liberada durante el proceso eruptivo del Ubinas en el año 2019, ha sido calculada en base a la estación UBI4 por integración de la señal sísmica (Johnson & Aster, 2005) y de acuerdo a la siguiente formula:

$$E_{seismic} = 2\pi r^2 \rho c \frac{1}{A} \int S^2 U(t)^2 dt,$$

Dónde: *r* es la distancia fuente-estación, *ρ* es la densidad, *c* es la velocidad de la onda P, *A* es la corrección por atenuación, *S* corrección de la respuesta sísmica del sitio y *U(t)* es la velocidad de la partícula. La fuente fue fijada debajo del cráter activo del volcán. La densidad (*ρ*) es 2 600 kg/m³; mientras que, la velocidad de la onda P (*c*) es 3 000 m/s, y la corrección por atenuación (*A*) y respuesta sísmica del sitio (*S*) fueron fijados en 1. En términos generales, la energía sísmica está relacionada a la magnitud de un sismo.

3.5.- Métodos estadísticos

Los principales métodos estadísticos utilizados en el presente estudio son:

Entropía de Shannon: La entropía de una señal es una medida de su distribución espectral y retrata el comportamiento ruidoso o sonoro de la señal sísmica (Esmaili et al., 2004). La entropía de una señal sísmica en el intervalo de tiempo n puede calcularse como:

$$H(n) = \sum_{f=0}^{F_m} P_f(TFD(n, f)) \log_2 P_f(TFD(n, f))$$

Donde:

$$P_f(TFD(n, f)) = \frac{TFD(n, f)}{\sum_{f=0}^{F_m} TFD(n, f)}$$

Aquí, $TFD(n, f)$ representa la energía de la señal en un intervalo de tiempo n y el índice de frecuencia f . F_m se refiere a la máxima frecuencia.

Kurtosis: La kurtosis es una medida de si los datos tienen heavy-tailed o light-tailed en relación con una distribución normal. Es decir, los conjuntos de datos con alta kurtosis tienden a tener una distribución heavy-tailed, o valores atípicos, mientras que los conjuntos de datos con kurtosis baja tienden a tener distribuciones light-tailed, o ausencia de valores atípicos. Una distribución uniforme sería el caso extremo (NIST-Handbook-2012, 2012).

Para datos univariados $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$, la fórmula de kurtosis es:

$$kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4 / N}{s^4}$$

Donde $\bar{Y}$ es la media, s es la desviación estándar y N es el número de datos. Obsérvese que al calcular la kurtosis, la desviación estándar se calcula utilizando N en el denominador, en lugar de $N - 1$ (NIST-Handbook-2012, 2012).

3.6.- Cálculo de hipocentros:

Para el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos se hace uso del algoritmo Hypoellipse y de una estructura de distribución de velocidades en capas horizontales propuesto por Del Carpio y Torres (2020) para el volcán Ubinas (Tabla 2). Para el procesamiento y cálculo de los parámetros hipocentrales, se hace uso de una relación $V_p/V_s = 1.68$.

Tabla 2.- Modelo de velocidad del volcán Ubinas.

Modelo de Velocidad	
Profundidad (km)	Vp (km/s)
0.0	2.500
2.5	2.898
4.0	2.300
6.5	3.426
9.0	4.370
12.5	4.696
16.0	4.929
21.0	5.763

3.7.- Datos

Asimismo, los datos utilizados en el presente estudio provienen del catálogo de sismos-volcánicos elaborado por el IGP usando información de toda la red geofísica de volcanes; además de las formas de ondas de la estación sísmica UBI4 (Figura 1) debido a que presenta continuidad operativa dentro del periodo de estudio (Figura 4). La clasificación de las señales sísmicas fue realizada de manera manual y contiene un total de 13 066 sismos de tipos VTs, LP, Tremores Espasmódicos y Armónicos, Tornillos, Híbridos, Explosiones y sismos de fractura. Estos últimos ubicados en un radio mayor de 6 km del edificio volcánico, conocidos como VD (Figura 5). El catálogo presenta información sobre la fecha y hora del registro del evento, frecuencias principales e índice de frecuencia, amplitud en $\mu\text{m/s}$, magnitud local, duración (s) y energía sísmica (MJ).

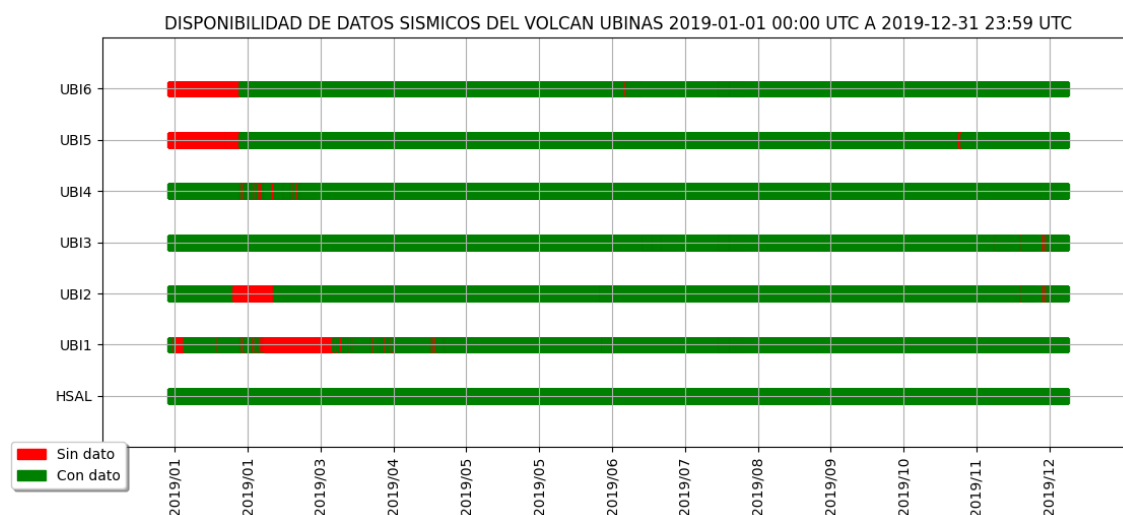


Figura 4.- Disponibilidad de datos sísmo-volcánicos del periodo enero a diciembre de 2019 registrados por las estaciones que conforman la red de monitoreo geofísico del volcán Ubinas.

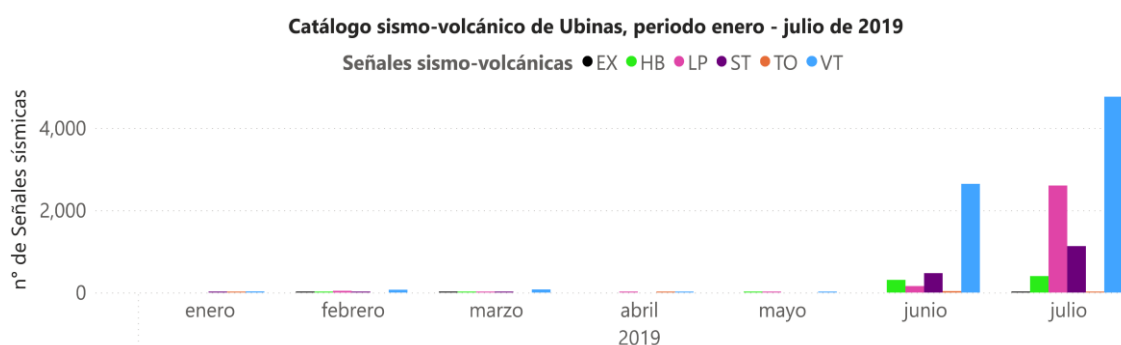


Figura 5.- Número de sismos volcánicos por tipo (barras de color) del volcán Ubinas detectados en el periodo de enero a julio de 2019.

4.- RESULTADOS

4.1.- Selección de señales sísmicas y clusterización

Para la selección automática y clusteración de señales sísmicas, usando REDPy, se ha hecho uso de las formas de onda registradas por la estación sísmica “UBI4” del volcán Ubinas durante el periodo entre el 1 de enero al 23 de julio de 2019. Para la detección automática se aplicó a la señal sísmica un filtro pasabanda de 1 Hz a 10 Hz, y luego el algoritmo STA/LTA, con una ventana larga de 8 segundos y ventana corta de 0.8 segundos, llegando a identificar un total de 39 641 eventos.

Construida la base de datos, se aplicó la correlación cruzada considerando una ventana de tiempo de 60 segundos después del inicio de evento y 20 segundos antes; además de un coeficiente de similitud de 0.85, considerado de alta calidad. Finalizada la correlación, se clusteriza todo el conjunto de datos, obteniéndose 165 familias sísmicas con un total de 828 señales sísmicas.

En general, las familias de señales sísmicas evidencian el registro recurrente de señales de tipo fractura (VT), de tipo LP y en menor número sismicidad tectónica y ruido, tal como se muestra en la Figura 6.

4.2.- Parámetros hipocentrales

Considerando que la gran mayoría de señales corresponde a la familia de VTs, se procedió a realizar el cálculo de sus parámetros hipocentrales, principalmente para 27 familias sísmicas que presentaron claros arribos de sus fases sísmicas P y S. En total se localizaron y obtuvieron los parámetros hipocentrales para 172 eventos sísmicos.

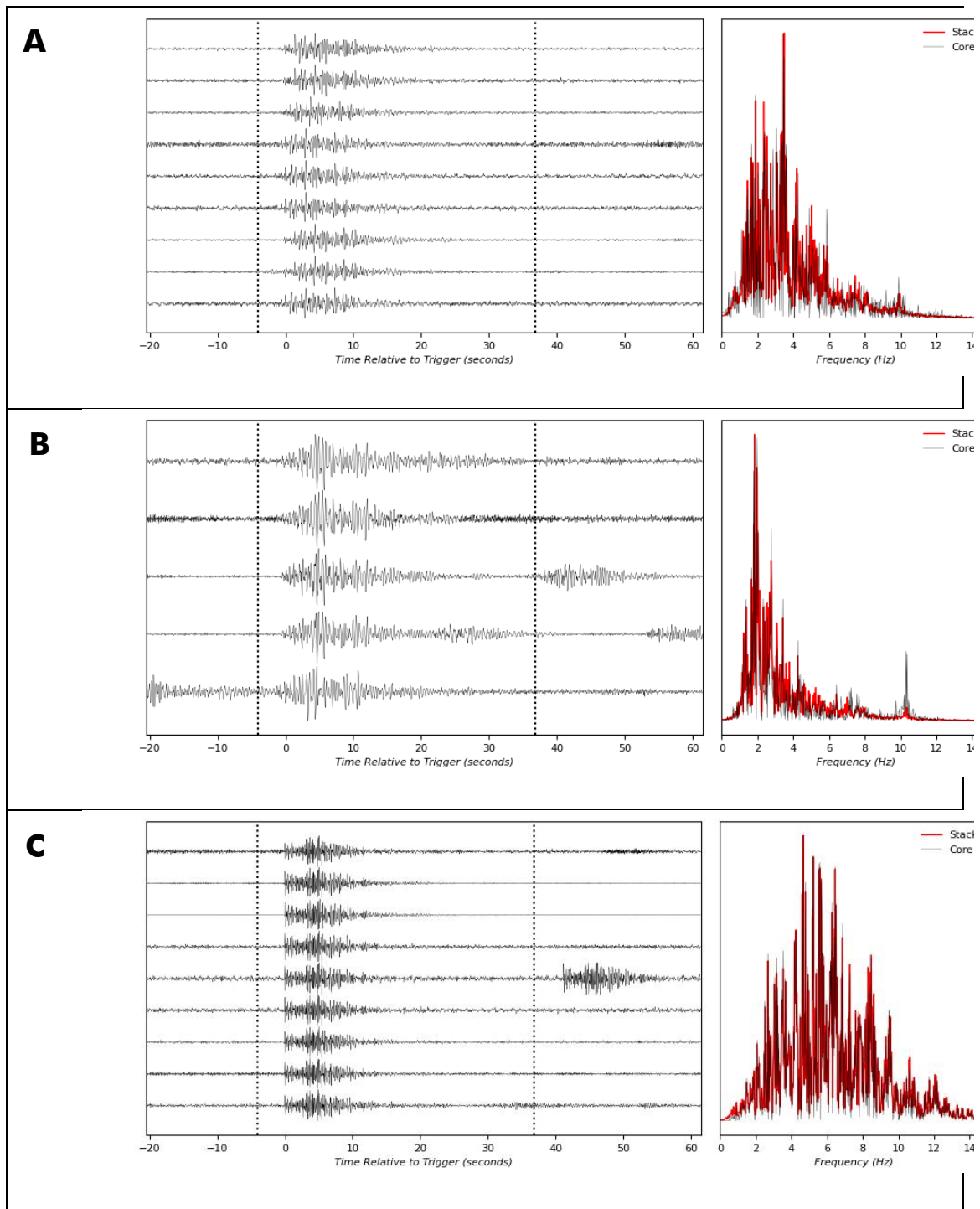


Figura 6.- Familias sísmicas que agrupan a eventos similares de tipo VT (A), LP (B) y de actividad tectónica (C) con su respectivo análisis de frecuencias (señal roja).

La distribución espacial de los sismos muestran que la actividad llegó a migrar desde una zona ubicada a 16 km al oeste del cráter, en dirección del edificio volcánico del Ubinas, en un periodo de tiempo que se inició en febrero y terminó en julio de 2019. Estos sismos presentaron profundidades entre 20 y 9 km debajo de la superficie (Figura 7). En este proceso, resaltan

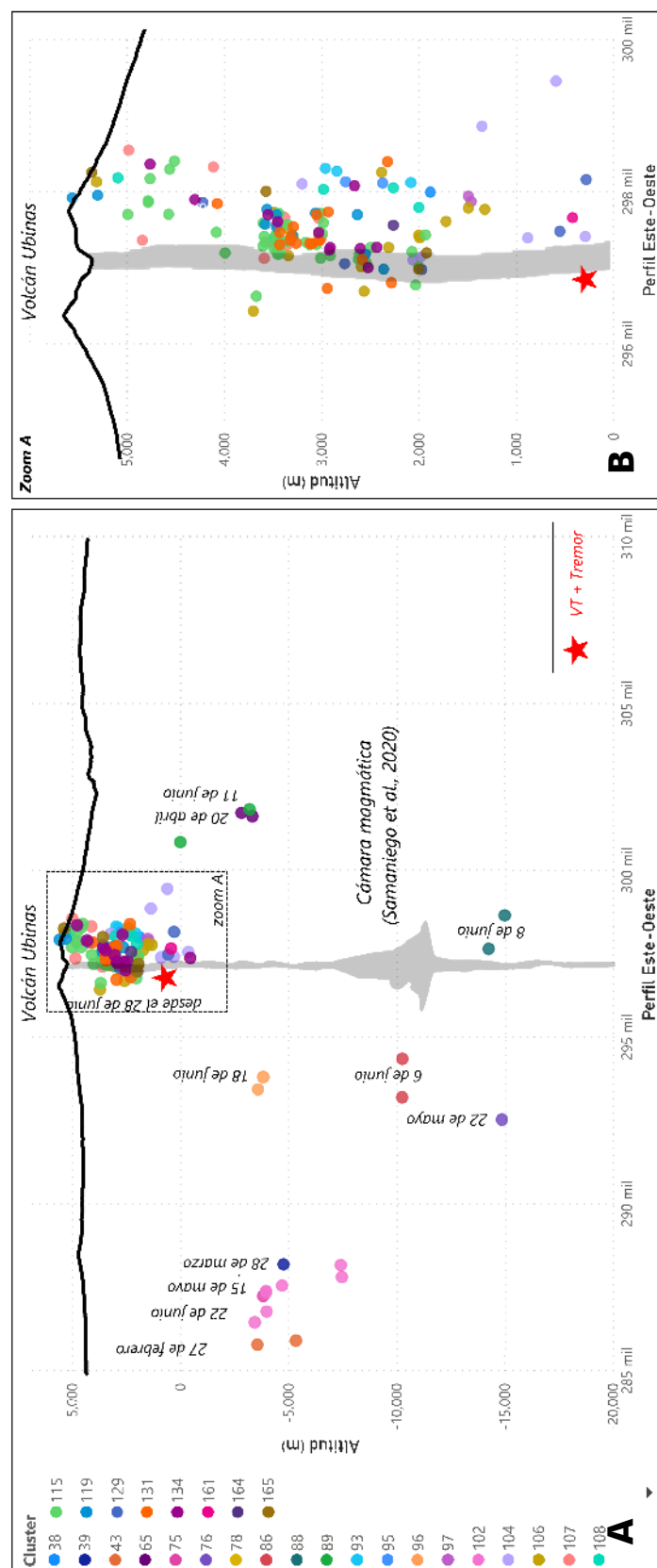


Figura 7.- a) Mapa de ubicación espacial de los clusters de tipo fractura registrados desde el 27 de febrero de 2019 en el volcán Ubinas. b) Acercamiento del interior del volcán Ubinas con la ubicación de los sismos registrados entre el 28 de junio y 23 de julio. En la leyenda se presentan los cluster o familias de sismos registrados.

los clusters 088 y 096, que se activaron entre el 8 y 18 de junio por debajo del cráter, y a 4 km al oeste del mismo (Figura 7), siempre a profundidades de 20 y 9 km. Estas familias o clusters corresponden a los eventos sísmicos registrados el 18 de junio de 2019 y que fueron catalogadas como señales precursoras de intranquilidad volcánica, motivo por el cual el IGP inicio la emisión de alertas por probable actividad eruptiva del volcán Ubinas (Del Carpio et al., 2019).

La Figura 7b muestra una estrella roja ubicada a aproximadamente 5.2 km de profundidad y al costado de lo que sería el conducto volcánico. Dicha estrella simboliza la ubicación de 11 señales sísmicas de tipo Tremor precedida por una señal VT y que será denominada en adelante como VT+Tremor (Figura 8A). Estos eventos son parte del catálogo sismo-volcánico del IGP para el periodo del 16 de febrero al 6 de marzo de 2019. Además, estos eventos presentan similitud en la forma de onda y contenido espectral con respecto a las explosiones freáticas (Figura 8B) observadas en septiembre de 2013 (Macedo et al., 2014). La parte "VT" de la señal es el resultado de la ruptura del medio o conducto; mientras que, el "Tremor" estaría relacionado con la perturbación del sistema hidrotermal al momento de interactuar con el magma.

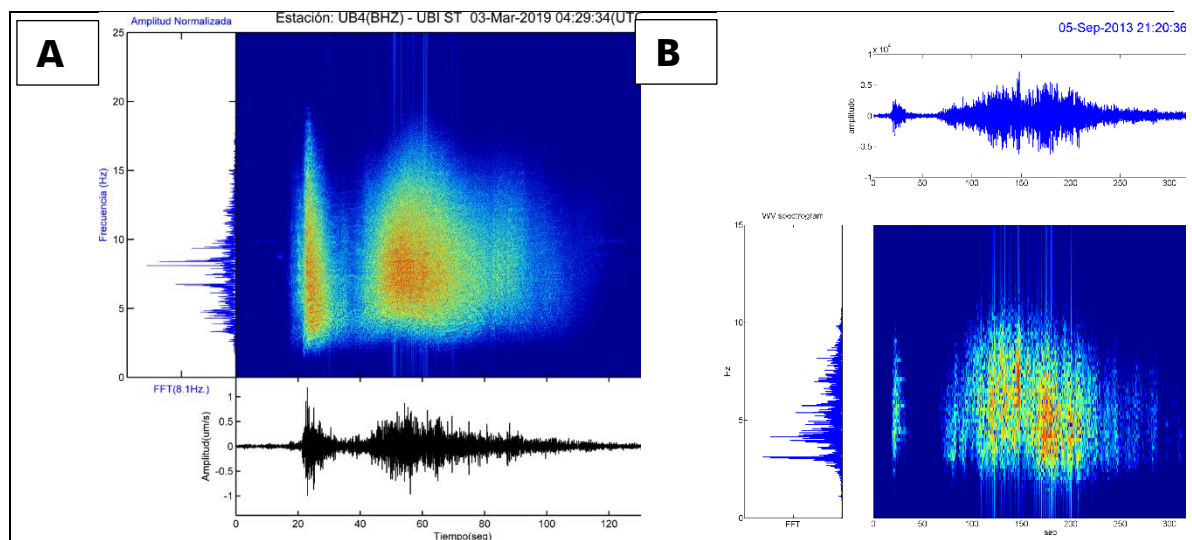


Figura 8.- (A) Señal compuesta VT+Tremor, registrada el 3 de marzo de 2019; (B) explosión freática registrada en septiembre de 2013, durante el desarrollo del proceso eruptivo 2013-2017 del volcán Ubinas.

4.3.- Ascenso de fluidos volcánicos

Las señales sísmicas de tipo LP están asociadas a la perturbación de sistemas hidrotermales por la proximidad de un cuerpo de magma o relacionados también, con el movimiento y/o ascenso de magma hacia la superficie. Ambos procesos son claros indicadores del desarrollo de un proceso eruptivo. Tal como se observa en la Figura 9, la clusterización de señales sísmicas ha permitido identificar a las familias N° 031, 032, 033, 091, 109, 147, 162 y 163 como eventos sísmicos de tipo LP presentes en dos periodos: entre el 12 de febrero y 9 de abril de 2019 (Figura 10) y el entre el 13 de junio y 19 de julio (Figura 11). El primer grupo estuvo compuesto por las familias 031, 032 y 033, y su aparición e incremento en el número de eventos coincidió con el registro de las señales VT+Tremor y con la ocurrencia de lluvias (diciembre-marzo).

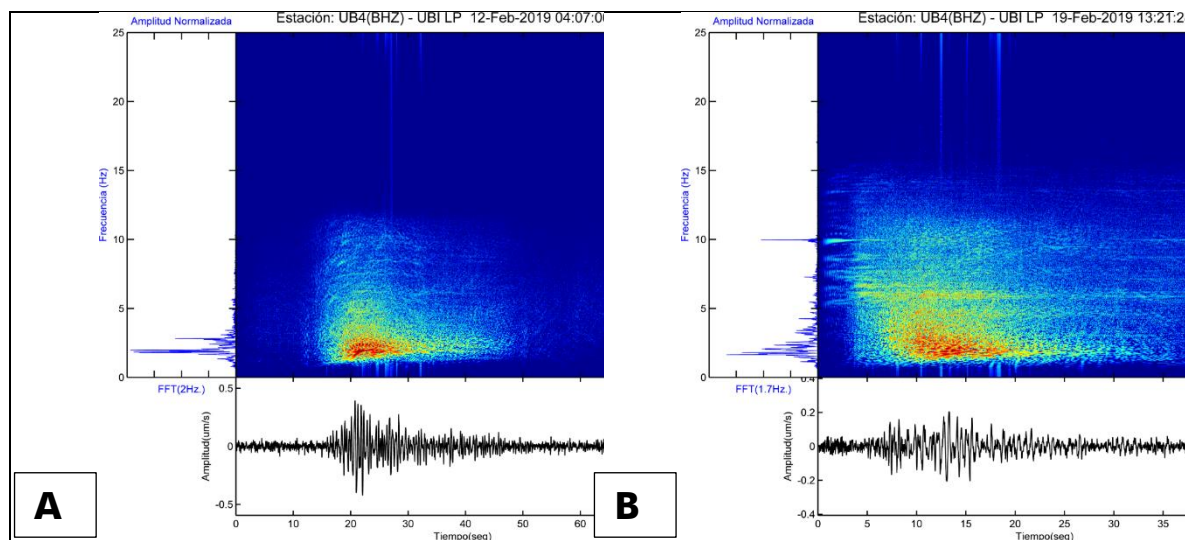


Figura 9.- Ejemplo de las señales sísmicas de los clusters 031 (A) y 033 (B), respectivamente.

El segundo grupo se inició con la detección de la familia 091 entre el 13 y 15 de junio, previo al enjambre sísmico del 18 de junio. Luego del inicio de la erupción, ocurrida el 24 de junio, se registraron las familias 147, 162 y 163 con un total de 53 señales sísmicas, siendo la familia 147 la que presentó mayor número de eventos (42 eventos) hasta el 31 de julio de 2019.

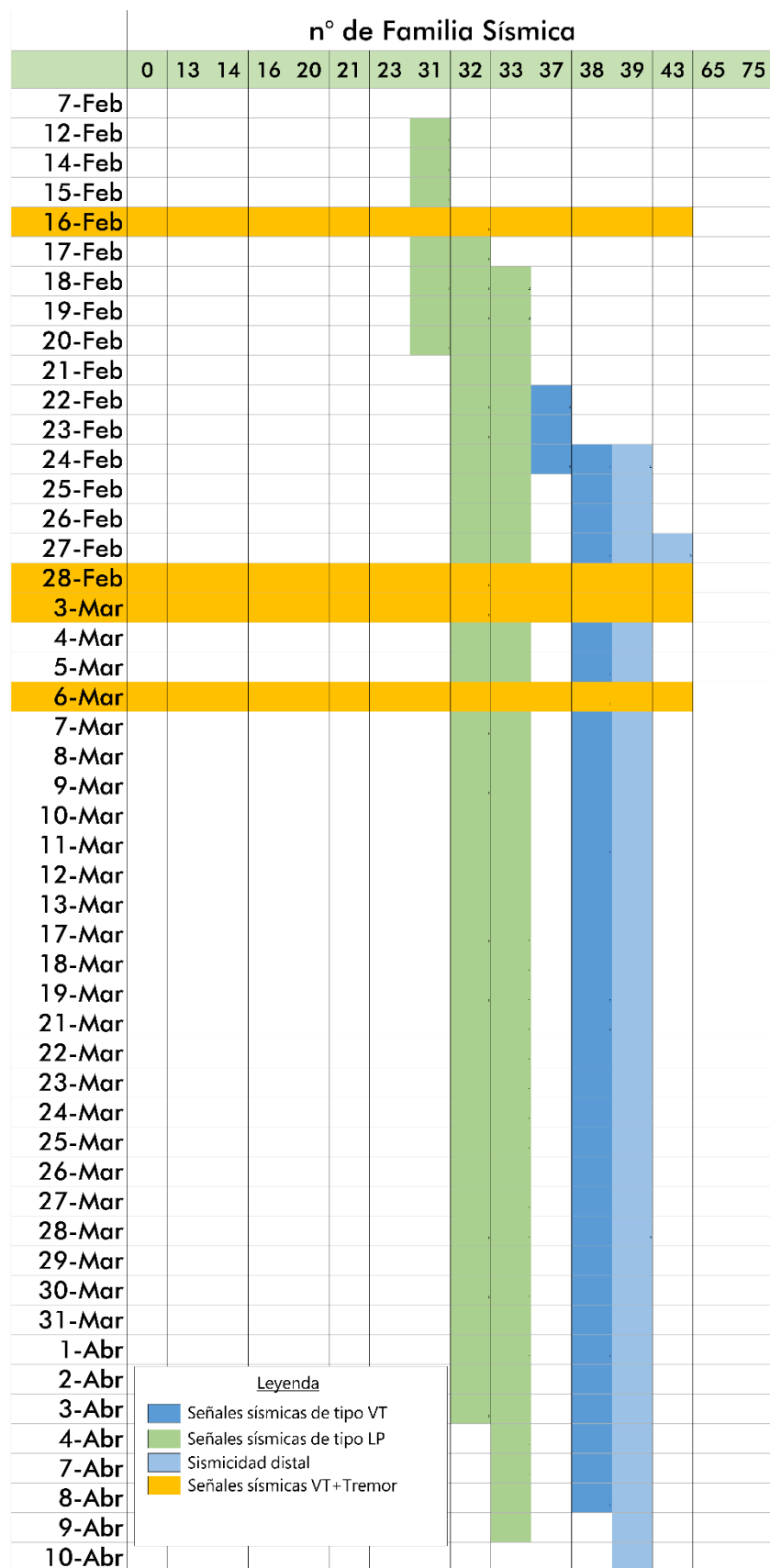


Figura 10.- Ocurrencia de familias sísmicas en el periodo del 7 de febrero al 10 de abril de 2019. Interpretación sobre el tipo de señal sísmica detectada.

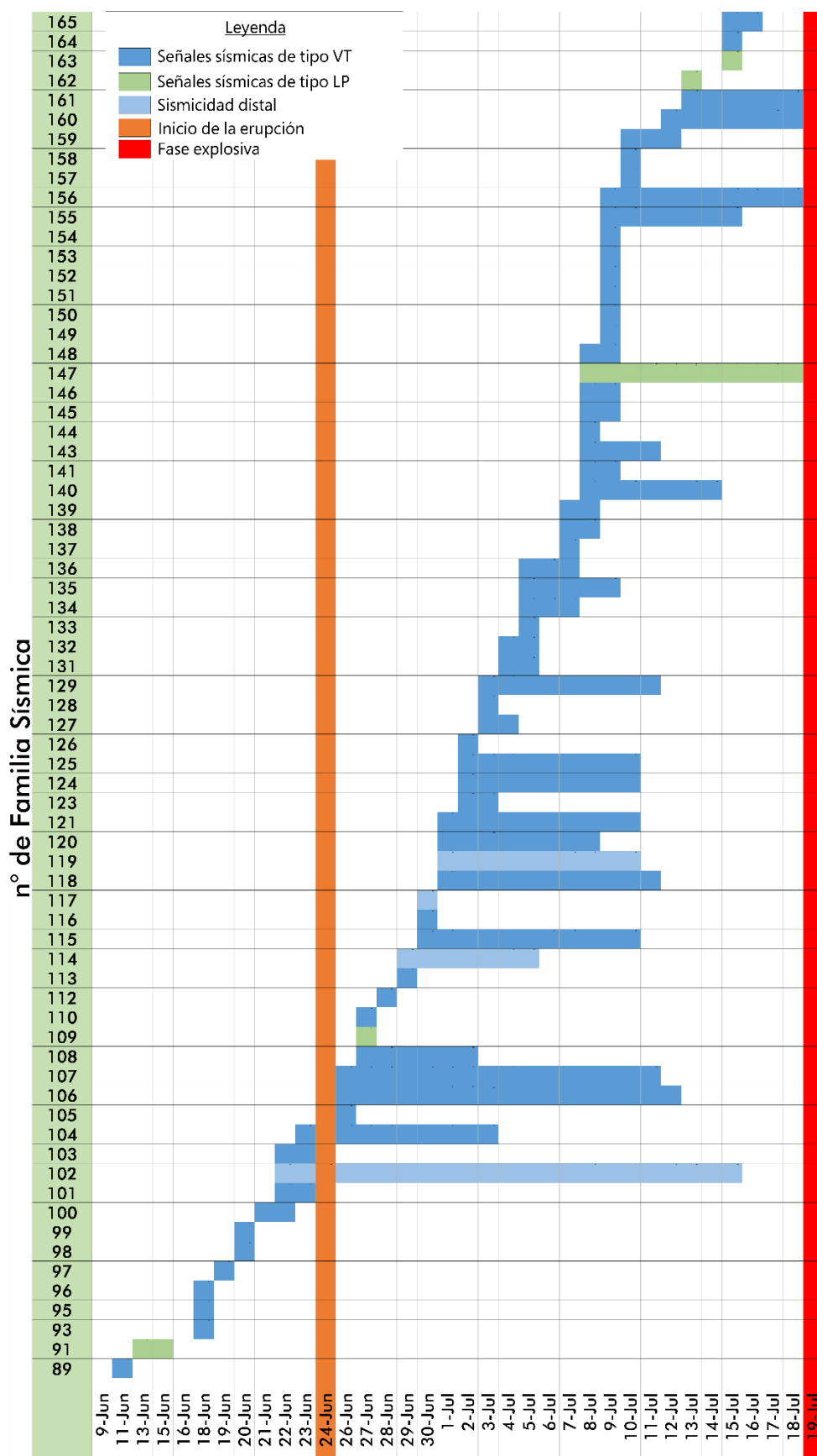


Figura 11.- Ocurrencia de familias sísmicas en el periodo del 9 de junio al 19 de julio de 2019. Interpretación sobre el tipo de señal sísmica detectada.

4.4.- Entropía de Shanon y Kurtosis

Estos procedimientos estadísticos han permitido identificar la presencia de anomalías, en cuanto al ruido de los datos sísmicos y a la distribución normal de la señal sísmica, respectivamente. La Entropía de Shannon muestra una proyección de los valores tendiendo a cero para el 22 de junio, 2 días antes del inicio de la erupción y vuelve a tender a cero el 19 de julio (Figura 12, línea celeste). Mientras que, la sumatoria de la Kurtosis evidencia un incremento positivo de los valores de la señal con respecto a un estado de normalidad para el día 18 de junio (Figura 12, línea azul), en correlación con la ocurrencia de un enjambre sísmico y por el cluster n° 096 identificado en el presente estudio. La señal producto de la Kurtosis intenta retomar los valores registrados antes del 19 de julio, fecha del inicio de la fase explosiva de la erupción (Figura 12).

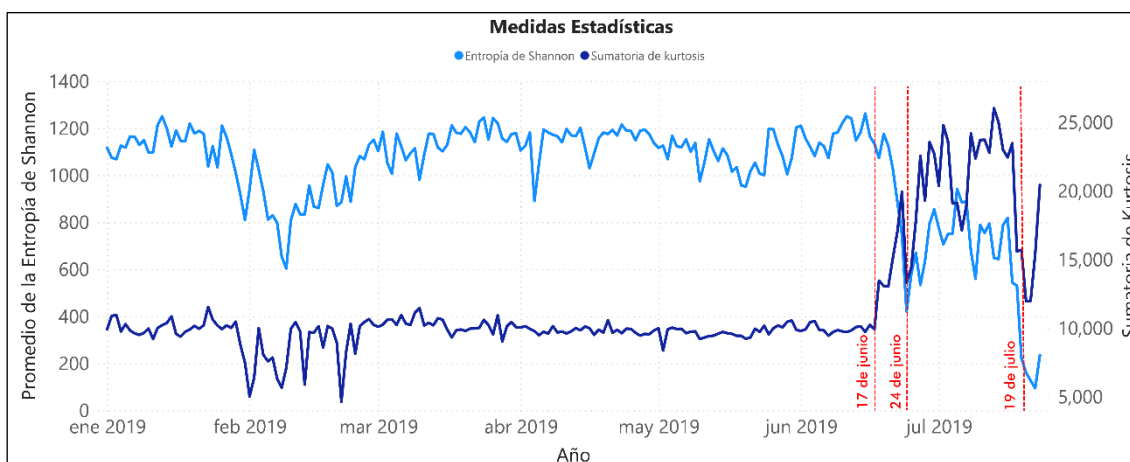


Figura 12.- Medidas estadísticas: promedio de la Entropía de Shannon (línea celeste) y sumatoria de Kurtosis (línea azul.)

5.- DISCUSIÓN

En febrero de 2019, a 5 meses del inicio de la última erupción del volcán Ubinas se registraron tres familias sísmicas n° 031, 032 y 033 (Figura 10), que agruparon un número importante de eventos relacionados con el movimiento de fluidos volcánicos, en correlación con las señales sísmicas de tipo “VT+Tremor”. Las señales sísmicas de tipo “VT+Tremor”, generadas por la ruptura del medio o conducto y la perturbación del sistema hidrotermal debido al ascenso del magma a la superficie (Figura 8), son similares a las señales sísmicas asociadas a explosiones freáticas; sin embargo, no hubo evidencia superficial de este proceso (por ejemplo: presencia cenizas finas, bloques arrancados del conducto, etc.). Además, cerca de 11 eventos VT+Tremor registrados entre el 16 de febrero y 3 de marzo habrían ocurrido a 5 y 6 km de profundidad bajo el cráter del Ubinas (Figura 7). En una eventual reactivación volcánica del Ubinas, estas señales sísmicas podrían ser consideradas como precursores de erupciones, tal como ha sucedido en 2019 en el volcán Ubinas.

Posteriormente, luego del proceso de ruptura y perturbación del sistema hidrotermal por el ascenso de magma, entre el 15 de mayo y 8 de junio de 2019, la actividad sísmica estuvo representada por las familias sísmicas o clusters que contenían señales sísmicas de tipo VD (familias n° 075, 076, 078, 086 y 088) con periodos de longevidad corta. Estos eventos habrían ocurrido en un radio de 16 km de distancia del Ubinas y estarían asociados a procesos de ruptura de rocas ocurridos fuera del ambiente volcánico, probablemente generados por la actividad tectónica de la zona (Figura 13). Aunque la zona de sismicidad distal localizada en el 2019 no se había observado desde 2014, no hay evidencia de que los clusters que la componen hayan ocurrido por efecto de una intrusión o ascenso del magma.

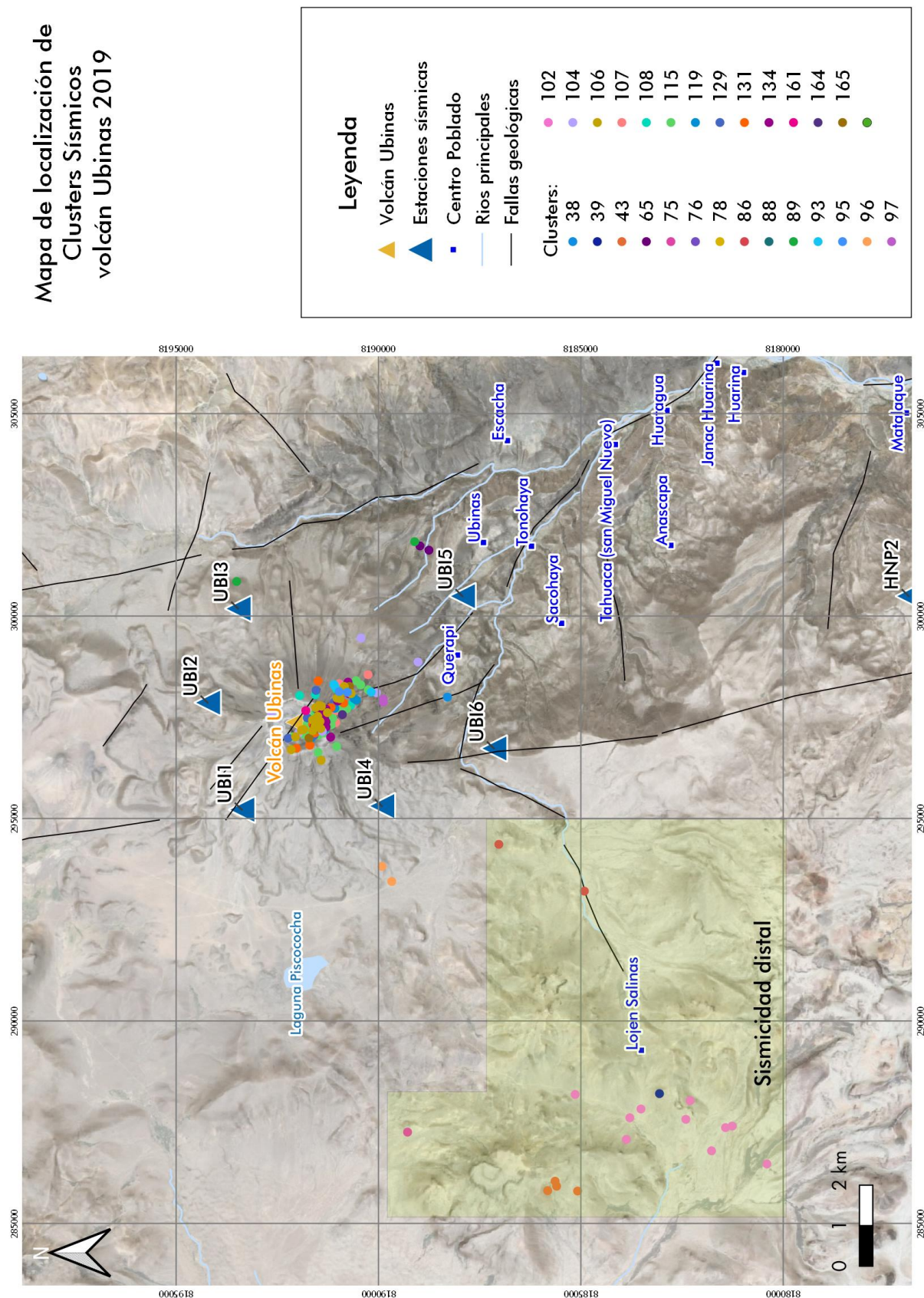


Figura 13-. Mapa de ubicación de los clusters registrados e identificados por REDPy. Estos eventos estarían asociados a procesos de ruptura de roca: VT y sismicidad distal.

A partir del 11 de junio se inicia una etapa de importante actividad sísmica que, hasta el 19 de julio, estuvo caracterizada por la detección de 60 clusters de tipo VT (Figura 11), ocurridos entre 0.1 y 9 km de profundidad por debajo del cráter (Figura 13), así como, 5 familias de tipo LP (clusters n° 091, 109, 147, 162 y 163) que, correlacionadas con la sismicidad local, sugieren el tránsito y ascenso del magma hacia la superficie.

Los métodos de detección automática y clusterización de señales sísmicas, permitieron identificar en el volcán Ubinas, entre febrero y abril de 2019, la ocurrencia de sismos de tipo LP y eventos VT+Tremor, ambos asociados con los primeros aportes de magma y la perturbación del sistema hidrotermal. Estos eventos se hicieron presentes cuatro meses antes del registro del incremento de la actividad sísmica de tipo VT relacionada con la ruptura de rocas al interior del volcán y cinco meses previo al desarrollo de la fase explosiva de la erupción del volcán Ubinas ocurrida el 19 de julio de 2019.

Las formas de onda y características espectrales de las señales sísmicas agrupadas en familias sísmicas permitieron identificar y caracterizar cada etapa del proceso eruptivo del volcán Ubinas ocurrido en el año 2019. En este sentido, al iniciarse un nuevo proceso eruptivo tenemos conocimiento fundamental para dar alertas tempranas con mayor tiempo de anticipación y así reducir el riesgo por exposición de la población. Desde luego, las etapas y características de un nuevo proceso eruptivo podrían variar después de una anterior erupción, pero el reconocimiento logrado permite avanzar en la gestión del riesgo de desastres ante erupciones volcánicas en nuestro país.

CONCLUSIONES

- El uso de algoritmos como el LTA/STA y REDP, han permitido identificar durante todo el proceso eruptivo del volcán Ubinas, la ocurrencia de 828 sismos como parte de un total de 165 familias.
- Se han registrado 172 sismos que espacialmente han migrado desde una zona ubicada a 16 km al oeste del cráter, en dirección del edificio volcánico del Ubinas en un periodo de tiempo que se inicio en febrero y termino en julio de 2019. La profundidad a la cual ocurrieron estos sismos fluctuó entre 9 y 20 km. Los eventos sísmicos de tipo VT+Tremor ocurrieron entre 5 y 6 km por debajo del cráter. Estos eventos son el resultado de la ruptura del medio o conducto y de la perturbación del sistema hidrotermal por el ascenso de magma.
- Las familias sísmicas detectadas desde el 11 de junio al 19 de julio sugieren el tránsito y ascenso del magma hacia la superficie al desarrollarse una intensa actividad de tipo ruptura.
- Las formas de onda y características espectrales de las señales sísmicas agrupadas en familias sísmicas identificadas durante el proceso eruptivo del volcán Ubinas en el año 2019, podrían ser reconocidas como señales sísmicas precursoras durante una próxima erupción.

BIBLIOGRAFÍA

- Arámbula-Mendoza, R., Lesage, P., Valdés-González, C., Varley, N., Reyes-Dávila, G., & Navarro, C. (2011). Seismic activity that accompanied the effusive and explosive eruptions during the 2004-2005 period at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of the Volcanology and Geothermal Research*, 30-46.
- Argueta, P. (2019). *Reconocimiento automático de señales sísmicas volcánicas en el volcán Santiaguito, Guatemala*. Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Guatemala.
- Battaglia, J., Got, J., & Okubo, P. (2003). Location of long-period events below Kilauea Volcano using seismic amplitudes and accurate relative relocation. *Journal of Geophysical Research*, 108(B12), 2553.
- Brill, K., Waite, G., & Chigna, G. (2018). Foundations for Forecasting: Defining Baseline Seismicity at Fuego Volcano, Guatemala. *Frontiers in Earth Science*, 6, 1-18.
- Buurman, H., West, M., & Roman, D. (2013). Using Repeating Volcano-Tectonic Earthquakes to Track Post-eruptive Activity in the Conduit System at Redoubt Volcano, Alaska. *Geology*, 41(4), 511-514.
- Chouet, B. (1985). Excitation of a buried magmatic pipe: a seismic source model for volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 90, 1881-1893.
- Chouet, B. (1992). A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in Volcanic Seismology. (P. Gasparin, R. Scarpa, & K. Aki, Edits.) *Springer Verlag*, 133-156.
- Chouet, B. (1996). Long-period volcano seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. *Nature*, 380(6572), 309-316.
- COEN-INDECI. (2019). *Explosión volcánica afecta a los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno*. Lima: Reporte Complementario n° 1528 - 21/07/2019.
- Coppola, D., Macedo, O., Ramos, D., Finizola, A., Delle Donne, D., Del Carpio, J., . . . Taipei, E. (2015). Magma extrusion during the Ubinas 2013-2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199-210.
- Del Carpio, J., & Rivera, M. (2019). *Aportes del monitoreo geofísico en el manejo de crisis del volcán Ubinas, actividad eruptiva 2019*. Lima.
- Del Carpio, J., & Torres, J. (2020). *La actividad sísmica en el volcán Ubinas y su variación temporal (1998-2019) para la identificación de patrones de sismicidad a ser considerados en la gestión del riesgo de desastres*. Instituto Geofísico del Perú. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4781>

- Del Carpio, J., Macedo, O., Puma, N., Centeno, R., Torres, J., & Cruz, J. (2016). Características de la actividad sísmica en el proceso eruptivo 2013-2015 del volcán Ubinas. *Congreso Peruano de Geología*.
- Del Carpio, J., Tavera, H., Macedo, L., Machacca, R., Puma, N., Cruz, J., . . . Concha, J. (2019). *Evaluación del proceso eruptivo del volcán Ubinas de julio 2019*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4685>
- Esmaili, S., Krishnan, S., & Raahemifar, K. (2004). Content based audio classification and retrieval using joint time-frequency analysis. *2004 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, V-665.
- Gómez, D., & Torres, R. (1997). Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galeras and other volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 173-193.
- Gómez, D., Torres, R., & Rademacher, H. (1999). Tornillo seismic events at Galeras volcano, Colombia: A summary and new information from broadband three-component measurements. *Annali di Geofisica*, 42(3).
- Green, D., & Neuberg, J. (2006). Waveform Classification of Volcanic Low-Frequency Earthquake Swarms and its Implication at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Journal of the Volcanology and Geothermal Research*, 51-63.
- Hamaguchi, H., & Hasegawa, A. (1975). Recurrent occurrence of the earthquakes with similar wave forms and its related problems. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 28, 153-169.
- Hotovec-Ellis, A., & Jeffries, C. (20 de abril de 2016). Near Real-time Detection, Clustering, and Analysis of Repeating Earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt Volcanoes – Invited. *Seismological Society of America Annual Meeting*. Reno, Nevada.
- Ibañez, J. (1997). *Apuntes de Sismología Volcánica*. Universidad de Granada, Instituto Andaluz de Geofísica.
- Ibañez, J., & Carmona, E. (2000). *Sismicidad volcánica*. Universidad de Granada, Instituto Andaluz de Geofísica.
- Johnson, J., & Aster, R. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 334-354.
- Khan, M. S., Curilem, M., Huenupan, F., F., K. M., & Becerra Yoma, N. (2019). A Signal Processing Perspective of Monitoring Active Volcanoes [Applications Corner]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(6), 125-163.
- Lahr, J., Chouet, B., Stephens, C., Power, J., & Page, R. (1994). Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt

- volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62, 137-151.
- Lesage, P., Mora, M., Alvarado, G., Pacheco, J., & Metaxian, J. (2006). Complex behavior and source model of the tremor at Arenal volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157, 49-59.
- Malfante, M., Dalla Murca, M., Mars, J., Métaxian, J., Macedo, O., & Inza, A. (2018). Automatic classification of volcano seismic signatures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 10645-10658.
- Neuberg, J., Tuffen, H., Collier, L., Green, D., Powell, T., & Dingwell, D. (2006). The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 153, 37-50.
- NIST-Handbook-2012. (2012). *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. Obtenido de Measures of Skewness and Kurtosis: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>
- Passarelli, L., Heryandoko, N., Cesca, S., Rivalta, E., Rasmid Rohadi, S., & Milkereit, C. (2018). Magmatic or Not Magmatic? The 2015–2016 Seismic Swarm at the Long-Dormant Jailolo Volcano, West Halmahera, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 6.
- Power, J., & Lalla, D. (2010). Seismic observations of Augustine Volcano, Alaska; 1970-2007, in The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska. *U.S. Geological Survey*, 1769, 3-40.
- Rivera, M., Thouret, J., 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, 19-34.
- Rodgers, M., Roman, D., Geirsson, H., LaFemina, P., Muñoz, P., Guzman, C., & Tenorio, V. (2013). Seismicity Accompanying the 1999 Eruptive Episode at Telica Volcano, Nicaragua. *Journal of the Volcanology and Geothermal Research*, 265, 39-51.
- Roman, D., & Power, J. (2011). Mechanism of the 1996–97 non-eruptive volcano-tectonic earthquake swarm at Iliamna Volcano, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 73(2), 143-153.
- Rowe, C., Thurder, C., & White, R. (2004). Dome growth behavior at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, revealed by relocation of volcanic event swarms, 1995-1996. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 134(3), 199-221.
- Saccorotti, G., Lokmer, I., Bean, C., Di Grazia, G., & Patane, D. (2007). Analysis of sustained long-period activity at Etna Volcano, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(3-4), 340-354.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano

- (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407. doi:doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095
- Thelen, W., Malone, S., & West, M. (2011). Multiplets: Their behavior and utility at dacitic and andesitic volcanic centers. *Journal of Geophysical Research*, 116(B8).
- Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557-589.
- Torres, R., Gómez, D., & Narváez, L. (1996). Unusual seismic signals associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, from july 1992 to september 1994. *Annals of Geophysics*, 39, 299-310.
- Trnkoczy, A. (1999). *Topic Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. New manual of seismological observatory practice.*
- Umakoshi, K., Takamura, N., Shinzato, N., Uchida, K., Matsuwo, N., & Shimizu, H. (2008). Seismicity Associated with the 1991–1995 Dome Growth at Unzen Volcano, Japan. *Journal of the Volcanology and Geothermal Research*, 91-99.
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353-1368.

