

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICO-ACÚSTICA DEL VOLCÁN REVENTADOR DURANTE LOS AÑOS 2015 –2017

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

OPCIÓN: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

JOSÉ LUIS FLORES PAREDES

jose.flores@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. MARIO RUIZ ROMERO

mruiz@igepn.edu.ec

QUITO, ENERO 2019

DECLARACIÓN

Yo, José Luis Flores Paredes, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias aquí mencionadas.

La Escuela Politécnica Nacional tiene derecho de propiedad intelectual del presente trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

José Luis Flores Paredes

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por José Luis Flores Paredes, bajo mi supervisión.

PhD. Mario Ruiz Romero

Director del trabajo

AGRADECIMIENTOS

A Dios, San Gonzalito y a la Virgen María por haberme bendecido con una familia tan maravillosa.

A mi madre Narcisa, mi primer amor, por haberme apoyado desde un inicio en mi carrera, por sus enseñanzas, sus consejos y sobre todo por todo el amor que me tiene a pesar de las adversidades que hemos pasado. TE AMO MADRE MÍA.

A mi abuelita Vitalina, por todo el amor y la confianza que me tiene. A mi tía Martha, por apoyarme en todo momento y corregir mi juventud.

A mi abuelito Enrique que está en el cielo, te me fuiste muy temprano viejo mío y no pude tenerte en mi juventud. Gracias por todos tus consejos y tus jaladas de orejas. Te extraño y te amo mucho.

Al Dr. Mario Ruiz por haberme dado la oportunidad en este proyecto de titulación, por todos sus consejos, su paciencia y por todas las sugerencias para la elaboración de este trabajo. Muchas gracias Dr. Mario.

Al Físico Hugo Ortiz por ayudarme con la programación del Matlab y por todas las sugerencias recibidas de su parte. Eternamente agradecido.

A la Ing. Silvia Vallejo, al Ing. Patricio Ramón, a la Ing. María Fernanda Naranjo y al Ing. Arturo Aguilar por todos sus consejos y la ayuda prestada. Muchas gracias

A todo el personal del IG-EPN en especial a Pablo, Edwin, Emilio, Xavier muchas gracias por acogerme en el área de picadores y por sus enseñanzas.

A mi primo Eduardo Mazón por compartir toda mi vida universitaria conmigo y por los consejos que recibí. Muchas gracias primo.

A mi primo Walter Mazón por haber incentivado a irme a estudiar en la capital. Gracias por todo el apoyo brindado y por esa motivación.

A mi primo Jorge Morales por toda la ayuda que recibí de su parte.

A mis primos Andy Guevara, Xavier Mazón, David Flores, Jorge Paredes por todos los momentos compartidos y el apoyo brindado.

A mi amiga Katy Vallejo por todos los momentos compartidos en la universidad y la ayuda brindada. Gracias Katy y a mis amigos Isaac Pico, Majo Salán, Sebas Cruz, Paúl Cornejo, Pablo Cueva, Daya Yaguana y compañeros de la universidad, muchas gracias por todos los momentos que compartimos.

DEDICATORIA

A Dios y a mi madre Narcisa Flores Paredes.

TABLA DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación y antecedentes	1
1.2 Área de estudio	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Hipótesis	3
CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Volcanismo en el Ecuador Continental.....	4
2.2 Historia geológica del volcán Reventador	4
2.2.1 Complejo Volcánico Basal (CVB)	5
2.2.2 Volcán Paleo-Rventador (VPR)	5
2.2.3 Volcán Reventador Actual (VER).....	5
2.3 Actividad histórica del volcán Reventador.....	5
2.4 Actividad eruptiva del Reventador.....	6
2.4.1 Actividad Sísmica	6
2.4.1.1 Eventos de Largo Periodo (LP).....	6
2.4.1.2 Eventos de Muy Largo Periodo (VLP).....	7
2.4.1.3 Tremor Espasmódico (TRESP) y Tremor Armónico (TREMI).....	8
2.4.1.4 Explosiones (EXP)	9
2.4.1.5 Secuencia Chugging.....	10
2.4.2 Actividad Superficial.....	11
2.4.2.1 Corrientes de Densidad Piroclástica (PDC)	11
2.4.2.2 Caídas de rocas.....	12
2.4.2.3 Flujos de lava.....	13

2.4.2.4 Lahares	15
2.4.2.5 Caídas de ceniza	16
2.4.2.6 Emisiones de gases	16
2.4.3 Red de monitoreo del volcán Reventador	16
2.4.4 Resumen de la actividad sísmica del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017.	18
2.4.4.1 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 – junio 2016.	19
2.4.4.2 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017.	21
2.4.4.3 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017.	23
2.4.5 Información de la actividad superficial del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017	24
2.4.5.1 Actividad superficial del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 - junio 2016	25
2.4.5.2 Actividad superficial del volcán Reventador durante julio 2016 y junio 2017.....	31
2.4.5.3 Actividad superficial del volcán Reventador durante julio 2017 y diciembre del 2017	33
Capítulo 3- METODOLOGÍA	35
3.1 Sismicidad Volcánica	35
3.2 Detección de explosiones	35
3.3 Catálogo sísmico.....	36
3.4 Señales sísmicas	38
3.5 Señales de infrasonido.....	39
3.6 Estimación de energías.....	41
3.6.1 Estimación de la energía acústica	41
3.6.2 Estimación de la energía sísmica	42
3.6.3 Estimaciones del VARS	43
Capítulo 4- Resultados.....	44
4.1 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo mayo 2015 – junio 2016	44
4.2 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo julio 2016 – junio 2017	46

4.3 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017.....	47
4.4 Relación entre la energía acústica y sísmica durante los periodos mayo 2015 - junio 2016, julio 2016 - junio 2017 y julio 2017 - diciembre 2017.....	48
4.5 Interpretación de señales sísmicas y acústicas de flujos piroclásticos (PDC) y caídas de rocas durante el periodo febrero – agosto 2017	50
Febrero 2017.....	51
Evento #1: 2017 02 07 – 04:09:05 (UTC)	51
Evento #2: 2017 02 07- 11:06:00 (UTC)	54
Evento # 3: 2017 02 08- 08:15:57 (UTC)	57
Marzo	60
Evento #4: 2017 03 11 – 01:33:00 (UTC)	60
Abril.....	63
Evento #5: 2017 04 03 - 04:08:18 (UTC)	63
Evento #6: 2017 04 03 - 06:17:59 (UTC)	66
Evento #7: 2017 04 26 - 00:17:18 (UTC)	69
Mayo	72
Evento# 8: 2017 05 09 - 04:28:02 (UTC)	72
Evento #9: 2017 05 23 – 01:21:26 (UTC)	75
Evento #10: 2017 05 23 - 03:50:41 (UTC)	78
Evento #11: 2017 05 29 – 03:25:51 (UTC)	81
Evento #12: 2017 05 29 – 07:35:55 (UTC)	84
Junio.....	87
Evento #13: 2017 06 06 - 06:36:24 (UTC)	87
Evento #14: 2017 06 06 – 13:56:28 (UTC)	90
Evento #15: 2017 06 08 – 10:43:03 (UTC)	93
Evento #16: 2017 06 08 – 11:37:09 (UTC)	96
Evento #17: 2017 06 25 – 05:58:41 UTC.....	100
Agosto	103
Evento #18: 2017 08 16 – 03:06:12 (UTC).	103
Evento #19: 2017 08 20 – 04:44:06 (UTC).	106
Evento #20: 2017 08 20 – 07:39:42 (UTC).	109
Evento #21: 2017 08 23 – 01:16:46 (UTC)	112
4.6 Discusión.....	115
Capítulo 5- Conclusiones y Recomendaciones.....	120
5.1 Conclusiones.....	120

5.2 Recomendaciones	122
CAPÍTULO 6	123
6.1 Referencias	123
CAPÍTULO 7- ANEXOS	I
7.1 ANEXO I: Tabla de los Parámetros utilizados para la estimación de energías acústicas y sísmicas del Volcán Reventador.	I
7.2 ANEXO II: Código del algoritmo en Matlab para cuantificar la partición de la energía acústica y sísmica.	II
ANEXO III: Código del algoritmo en Matlab para abrir los archivos SAC (Seismic Analysis Code) y analizar las señales acústicas y sísmicas de la estación REVS.	III

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de ubicación del volcán Reventador y su relación con la carretera, oleoductos y el poblado del Reventador (Tomado de Hall et al., 2004).....	2
Figura 2.1: Evento sísmico de Largo Periodo (LP) en el volcán Reventador, registrado el 15 de agosto del 2005. Las duraciones de coda de los LP fueron de 20-28 s (Tomado de Lees et al., 2007).....	7
Figura 2.2: Evento sísmico de Muy Largo Periodo (VLP) registrado en la estación RVEN el día 218 (Tomado de Lees et al., 2007).....	8
Figura 2.3: Tremor en tres componentes de datos sísmicos (vertical y dos horizontales) tomados el día 252 en la estación RVEN. La secuencia se divide en 7 etapas, discutidas en detalle en el texto. El infrasonido (LD) se presenta para mostrar que no hay una fuerte correlación entre las señales acústicas y sísmicas durante esta secuencia (Tomado de Lees et al., 2007).....	9
Figura 2.4: (a) Explosión del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en Pa y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Explosión del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la Base del IG-EPN, 2018).....	10
Figura 2.5: Secuencia Chugging tomada el día 217 en la estación RVEN. Una explosión inicial es seguida por una serie de pulsaciones llamadas chugging. Estos se observan en registros acústicos y sísmicos. El recuadro muestra un detalle del registro acústico (Tomado de Lees et al., 2007).....	11
Figura 2.6: PDC por colapso de domo (Tomado de Branney M. y Kokelaar P., 2002).....	12
Figura 2.7: PDCs por explosión lateral (Tomado de Branney M. y Kokelaar P., 2002).....	12
Figura 2.8: Caída de rocas en el volcán Santiaguito, Guatemala (Modificado de Johnson y Ronan, 2015).....	13
Figura 2.9: Flujo de lava de tipo pāhoehoe emitido por el volcán Kilauea, Hawái en el año 1972 (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).....	14
Figura 2.10: Flujos de lava de tipo 'a'ā y pāhoehoe emitido por el volcán Kilauea durante la misma erupción del año 1972 (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).....	14
Figura 2.11: Flujo de lava tipo bloque de composición basáltica – andesítica, montaña Brown, USA (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).....	15
Figura 2.12: Roca gigante de un lahar cerca de la localidad de Mulaló, Cotopaxi, Ecuador (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).....	16
Figura 2.13: Ubicación de las estaciones de monitoreo del volcán Reventador. Las estaciones sísmicas son las siguientes: REVEN, REVS, LAV4, en círculo de color naranja. La estación sísmica CONE dejó de funcionar debido a un flujo de lava extenso que arrasó con la estación. Las cámaras termales son: REBECA y COPTVS, en círculo de color verde claro. Las cámaras visuales son: COPTIR y LAVCAM, en círculo de color magenta (Tomado de Vallejo, 2017)	17

Figura 2.14: Número diario de eventos volcánicos del Reventador entre los años 2004-2018. El recuadro de color negro es el periodo estudiado (mayo 2015 – diciembre 2017). El eje x es el tiempo (dd/mm/yy) y el eje y es el número de eventos diarios (Tomado de la base del IG-EPN).....	19
Figura 2.15: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante periodo mayo 2015 – junio 2016. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.....	20
Figura 2.16: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015- junio 2016 (Tomado de la base de datos del IG).....	21
Figura 2.17: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.....	22
Figura 2.18: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo julio 2016- julio 2017 (Tomado de la base de datos del IG).....	23
Figura 2.19: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.....	23
Figura 2.20: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo julio- diciembre del año 2017 (Tomado de la base de datos del IG).....	24
Figura 2.21: Sismograma de la estación CONE tomada el día 17 de mayo del 2015. CONE está ubicado en el flanco NE del cono. Desde las 13h50 UTC, se logró observar un incremento en la amplitud del tremor (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador).....	25
Figura 2.22: Flujo de lava descendiendo por los flancos S, observado por la cámara térmica ubicada en el sector de Copete (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador).....	26
Figura 2.23: Sismograma de la estación CONE tomada el 24 de junio del 2015. Esta estación sísmica está ubicada en el flanco NE del volcán (Tomado del IG-EPN).....	27
Figura 2.24: Imagen del 19 de enero del 2016 a las 12:19:56 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete. Se observó depósitos de flujos piroclásticos en los flancos S y SE (Fuente: Cámara visual COPETE, IG-EPN).....	28
Figura 2.25: Sistema de anomalías termales. En la figura superior, se observa las anomalías termales del mes de enero, mientras en el gráfico inferior se observa las anomalías termales de todos los meses del año 2016 (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).....	29
Figura 2.26: a) Registro sísmico de la estación LAV4 tomada el 15 de enero del 2016, se observa pequeñas explosiones. b) Columna de gases y vapor con un contenido moderado de ceniza (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).....	29
Figura 2.27: Se observa emisiones de gas sin contenidos de ceniza en el flanco SW del volcán el 28 de enero del 2016. Además, se visualiza el viento Norte, el viento Central y el flujo de lava del flanco N (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).....	30
Figura 2.28: Flujo de lava descendiendo por los flancos SW y S observado por la cámara térmica localizada en el sector de COPETE. Tomado el 23 de junio del 2016 a las 19h50 UTC (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).....	31
Figura 2.29: Imagen tomada el 22 de junio del 2017 a las 22:12:44 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete. Se observa flujos piroclásticos que descendieron a lo largo del flanco NE (Tomado del Informe 2017-01, Reporte de erupción del volcán Reventador).....	32

Figura 2.30: Imagen tomada el 25 de junio del 2017 a las 05:58:51 (UTC) a través de la cámara visual COPETE. Se observa material incandescente a lo largo del flanco NE (Tomado del Informe 2017-01, Reporte de erupción del volcán Reventador).....	32
Figura 2.31: a) Imagen aérea del flujo de lava. b) Imagen térmica del flujo de lava que descendió del 24 de junio al 1 de julio del 2017 (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°3, 2017, Flujo de lava).....	33
Figura 2.32: Imagen tomada el 24 de agosto del 2017 a las 10:33:29 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete, ubicada a 5.2 km del viento. Se observa caídas de rocas a lo largo de los flancos E y NE (Tomado del Informe del estado del volcán Reventador N°236, Resumen de la actividad del volcán).....	34
Figura 2.33: Imagen infrarroja de los flujos de lava que descendieron desde el viento Norte y viento Sur el 23 de agosto del 2017 (Tomada del Informe del estado del volcán Reventador N°236, Resumen de la actividad del volcán).....	34
Figura 3.1: a) evento infrasónico, donde el eje y corresponde a la amplitud en cuentas y el eje x el tiempo (hh: mm: ss) b) espectro del evento infrasónico analizado con el SIPASS, donde el eje y corresponde a la amplitud y el eje x es la frecuencia (Hz). Tomada del 2 de febrero del 2017 a las 04:09:05 (UTC) (Tomado de la base del IG-EPN).....	36
Figura 3.2: Formato xls extraído del programa SIPASS luego de realizar el procesamiento de las señales sísmicas y acústicas (Tomado del IG-EPN).	37
Figura 3.3: Registro sísmico original del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la velocidad de movimiento del terreo en cm/s y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).....	38
Figura 3.4: Registro sísmico filtrado (0.5 a 15 Hz) del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es velocidad de movimiento del terreno en cm/s y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).....	39
Figura 3.5: Registro infrasónico original del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la presión (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).	40
Figura 3.6: Registro infrasónico filtrado (0.5 a 15 Hz) del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la presión (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).	41
Figura 4.1: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS durante el periodo mayo 2015 – junio 2016.	45
Figura 4.2: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS durante el periodo julio 2016 – junio 2017.	46
Figura 4.3: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS para el periodo julio – diciembre 2017.	47
Figura 4.4: Partición de la energía sísmica y la energía acústica durante los periodos mayo 2015- junio 2016 (azul), julio 2016 – junio 2017 (rojo) y julio – diciembre del 2017 (verde). Se calculó los percentiles 5 y 95 para los tres periodos, los cuales se ven reflejados en las líneas largas. También se calcularon los percentiles 34 y 67 para los tres periodos, los cuales se ven reflejadas en las líneas pequeñas de mayor grosor. Energía Sísmica (eje x) y Energía Acústica (eje y).	48

Figura 4.5: Imagen del 7 de febrero a las 04:09:05 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	51
Figura 4.6: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.....	52
Figura 4.7: (a) Registro infrasónico del Evento #1 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #1 registrado de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	54
Figura 4.8: Imagen del 7 de febrero a las 11:06:00 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un PDC a lo largo del flanco E (Fuente: IG-EPN).	54
Figura 4.9: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	55
Figura 4.10: (a) Registro infrasónico del Evento #2 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #2 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	57
Figura 4.11: Imagen del 8 de febrero a las 08:15:57 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E y visiblemente en el flanco NE. (Fuente: IG-EPN).....	57
Figura 4.12: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.....	58
Figura 4.13: (a) Registro infrasónico del Evento #3 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #3 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	60
Figura 4.14: Imagen del 11 de marzo a las 01:33:05 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	60
Figura 4.15: (a) Señal filtrada de 3 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 7 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	61

Figura 4.16: a) Registro infrasónico del Evento #4 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #4 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	63
Figura 4.17: Imagen del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S, SE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	63
Figura 4.18: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico.	64
Figura 4.19: a) Registro infrasónico del Evento #5 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #5 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	65
Figura 4.20: Imagen del 03 de abril a las 06:17:59 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	66
Figura 4.21: (a) Señal filtrada de 5 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico.	67
Figura 4.22: a) Registro infrasónico del Evento #6 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #6 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	68
Figura 4.23: Imagen del 26 de abril a las 00:07:18 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	69
Figura 4.24: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico	70
Figura 4.25: a) Registro infrasónico del Evento #7 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #7 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	72

Figura 4.26: Imagen del 09 de mayo a las 04:28:02 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, ESE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	72
Figura 4.27: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico	73
Figura 4.28: a) Registro infrasónico del Evento #8 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #8 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	75
Figura 4.29: Imagen del 23 de mayo a las 01:21:26 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	75
Figura 4.30: (a) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 2 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico	76
Figura 4.31: a) Registro infrasónico del Evento #9 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #9 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	78
Figura 4.32: Imagen del 23 de mayo a las 03:50:41 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	78
Figura 4.33: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	79
Figura 4.34: a) Registro infrasónico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	80
Figura 4.35: Imagen del 29 de mayo a las 03:28:51 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	81

Figura 4.36: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	82
Figura 4.37: (a) Registro infrasónico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de un posible PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de un posible PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	83
Figura 4.38: Imagen del 29 de mayo a las 07:35:55 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, E e incandescencia en el vento (Fuente: IG-EPN).....	84
Figura 4.39: (a) Señal filtrada de 3 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) corresponde a la señal original del evento sísmico.	85
Figura 4.40: (a) Registro infrasónico del Evento #12 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #12 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	87
Figura 4.41: Imagen del 06 de junio a las 06:36:24 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el vento (Fuente: IG-EPN).....	87
Figura 4.42: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	88
Figura 4.43: (a) Registro infrasónico del Evento #13 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). (b) Registro sísmico del Evento #13 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	89
Figura 4.44: Imagen del 06 de junio a las 13:55:53 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un PDC a lo largo del flanco E. (Fuente: IG-EPN).	90
Figura 4.45: (a) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	91

Figura 4.46: a) Registro infrasónico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	93
Figura 4.47: Imagen del 08 de junio a las 10:43:03 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un flujo piroclástico (PDC) a lo largo del flanco E (Fuente: IG-EPN).....	93
Figura 4.48: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico.	94
Figura 4.49: a) Registro infrasónico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	96
Figura 4.50: Imagen del 08 de junio a las 11:37:09 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa flujos piroclásticos (PDCs) a lo largo de los flancos SW y E. (Fuente: IG-EPN).....	97
Figura 4.51: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico.	98
Figura 4.52: a) Registro infrasónico del Evento #16 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #16 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	100
Figura 4.53: Imagen del 25 de junio a las 05:58:41 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a largo del flanco N e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).....	100
Figura 4.54: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). d) Señal original del evento sísmico.....	101
Figura 4.55: a) Registro infrasónico del Evento #17 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #17 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	103

Figura 4.56: Imagen del 16 de agosto a las 03:06:12 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a los flancos SE, E, N e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).....	103
Figura 4.57: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.....	104
Figura 4.58: a) Registro infrasónico del Evento #18 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #18 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	106
Figura 4.59: Imagen del 20 de agosto a las 04:44:06 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a los flancos S, SE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).....	106
Figura 4.60: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	107
Figura 4.61: a) Registro infrasónico del Evento #19 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #19 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	109
Figura 4.62: Imagen del 20 de agosto a las 07:39:42 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa visiblemente material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	109
Figura 4.63: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	110
Figura 4.64: a) Registro infrasónico del Evento #20 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). b) Registro sísmico del Evento #20 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).	112
Figura 4.65: Imagen del 23 de agosto a las 01:16:46 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a lo largo de los flancos S, SE, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).	112
Figura 4.66: (a) Señal filtrada de 2 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 2 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.	113

Figura 4.67: a) Registro infrasónico del Evento #21 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #21 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). 115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen de la actividad sísmica y actividad superficial del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017 (Fuente IG-EPN). 19

Tabla 4. 1: Tabla con los periodos, duración estimada y tipo de actividad del volcán Reventador durante el estudio realizado. 48

Tabla 7.1: Parámetros utilizados para la estimación de energías acústicas y sísmicas del Volcán Reventador. II

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la evolución de la actividad del volcán Reventador, mediante el análisis de las señales acústicas y sísmicas tomadas de la estación REVS localizada a 5.2 km al SE del volcán entre los periodos mayo 2015 - junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017. La relación entre estas señales, conocida como Volcano Acoustic Seismic Ratio (VASR), permite distinguir la dinámica de erupción (Johnson et al., 2005; Sciotto, 2012; Steele et al., 2014). Además, se analizaron 21 señales acústicas y sísmicas durante el periodo febrero 2017 – agosto 2017, con el objetivo de determinar el tipo predominante de actividad. Esta información fue comparada con las imágenes visuales obtenidas a través de una cámara localizada en el sector de Copete.

Para la cuantificación de la energía acústica y sísmica se utilizaron las fórmulas propuestas por Johnson y Aster (2005) implementadas para el análisis en los volcanes Karymsky y Erebus. Los valores de VASR para los periodos mayo 2015 - junio 2016 y julio 2017 – diciembre 2017 fueron > 10 , significando que la energía acústica es mayor que la energía sísmica, relacionado con: #1 el proceso de desgasificación mediante un conducto abierto (Steele et al., 2014) o #2 la fuente se localizaba cerca de la superficie (Johnson y Aster, 2005). Para ambos casos se tendrá una actividad explosiva con la generación de flujos piroclásticos, columnas de ceniza, emisiones de vapor y gases o una actividad efusiva con la generación de flujos de lava (Sciotto, 2012; Johnson y Aster 2005). Mientras que para el periodo julio 2016 – junio 2017 los valores de VASR fueron < 10 , significando que la energía sísmica radiada en el suelo es mayor que la energía acústica, relacionada con: #3 un conducto restringido (Steele et al., 2014) o #4 la fuente se encontraba muy profunda (Johnson y Aster, 2005). Se tendrá una actividad explosiva con la generación de flujos piroclásticos, columnas de ceniza, emisiones de vapor y gases para el caso #3 y una actividad efusiva con la generación de flujos de lava para el caso #4 (Sciotto, 2012; Johnson y Aster 2005).

Con el análisis de las señales registradas durante el periodo febrero 2017 – agosto 2017 se logró identificar y describir la generación de corrientes de densidad piroclástica (PDC) y caídas de rocas. Johnson y Ronan (2015) proponen que las señales acústicas de estos productos volcánicos generan frecuencias entre 7.5 – 20 Hz siempre que el receptor se encuentre a una corta distancia de la fuente. Para este periodo, las frecuencias de las señales tenían un rango entre 5 – 15 Hz debido a que el receptor se localiza a 5.2 km al SE del volcán Reventador y la atenuación de las altas frecuencias es inminente.

ABSTRACT

In the present work, the evolution of the Reventador volcano's activity is studied, throughout the analysis of the acoustic and seismic signals taken from the REVS station located at 5.2 km SE from volcano summit, during the periods May 2015 - June 2016, July 2016 - June 2017 and July 2017 - December 2017. The ratio between these signals is known as the Volcano Acoustic Seismic Ratio (VASR), distinguishes the eruption dynamic changes (Johnson et al., 2005, Sciotto, 2012, Steele et al., 2014). In addition, 21 acoustic and seismic signals are analyzed during the period February 2017 - August 2017, in order to determine the predominant type of activity. This information was compared with the visual images recorded by Copete camera.

For the quantification of acoustic and seismic energy, equations proposed by Johnson and Aster (2005) for the analysis of Karymsky and Erebus volcanoes are used. The VASR values for the periods May 2015 - June 2016 and July 2017 - December 2017 are > 10 , meaning that the acoustic energy is greater than the seismic energy, related to: #1 the degassing process through an open conduit (Steele et al. al., 2014) or #2 the source was located near the surface (Johnson and Aster, 2005). For both cases there will be an explosive activity with the generation of pyroclastic density currents (PDCs), ash columns, steam and gas emissions or an effusive activity with the generation of lava flows (Sciotto, 2012, Johnson and Aster 2005). While for the period July 2016 - June 2017 the VASR values are < 10 , meaning that the seismic energy radiated in the soil is greater than the acoustic energy, related to: #3 a closed conduit (Steele et al., 2014) or #4 a very deep (Johnson and Aster, 2005). Case #3 will be related to explosive activity with the generation of pyroclastic density currents (PDCs), ash columns, steam and gas emissions and case #4 will be related to effusive activity with the generation of lava flows (Sciotto, 2012; Johnson and Aster 2005).

During the analysis of signals recorded between the period February 2017 - August 2017, it was possible to identify and describe the generation of pyroclastic density currents (PDC) and rock falls. Johnson and Ronan (2015) reported that the acoustic signals of these volcanic products generate frequencies between 7.5 - 20 Hz when record at short distance (< 2 km) from the source. For this period, the frequencies of the signals had a range between 5 - 15 Hz because the receiver is located 5.2 km SE of the Reventador volcano summit and higher frequencies decay fast.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación y antecedentes

La evolución geodinámica de los Andes Septentrionales desde el Neógeno está relacionada con la subducción de la placa oceánica Nazca bajo de la placa Sudamericana. La característica más significativa del sistema de subducción actual, en los Andes Septentrionales, es su segmentación en distintas regiones sismo-tectónicas, con ángulos de subducción altos (25°-35°), alternada con regiones asísmicas y segmentos de subducción sub-horizontales, debido principalmente a la heterogeneidad de la placa Nazca (Baby y Barragán., 2004). A lo largo de los Andes también se observa una segmentación del volcanismo. El volcanismo activo se expone al norte de 2° S en el Ecuador (Gutscher et al., 1999), pero hacia el sur de 2° S carece de volcanismo, debido a que la placa Nazca se subduce bajo la placa Sudamericana con un ángulo de aproximadamente 15° (Barragán et al., 1998).

En nuestro país, se ha logrado reconocer 84 volcanes cuaternarios, la mayoría de estos en estado de actividad, y con procesos eruptivos históricos; como es el caso del volcán Reventador (Samaniego et al., 2008).

El volcán Reventador es un estratovolcán andesítico, el mismo que se encuentra asentado en el levantamiento Sub-andino Oriental (Figura 1.1), a una distancia de 350 km al este de la fosa oceánica y a pocos kilómetros al sur de la línea ecuatorial (Hall et al., 2004). Se caracteriza por un volcanismo calco-alcalino con una cierta signatura adakítica, similar a la que presentan los volcanes holocénicos Cayambe y Antisana de la Cordillera Real (Baby y Barragán., 2004).

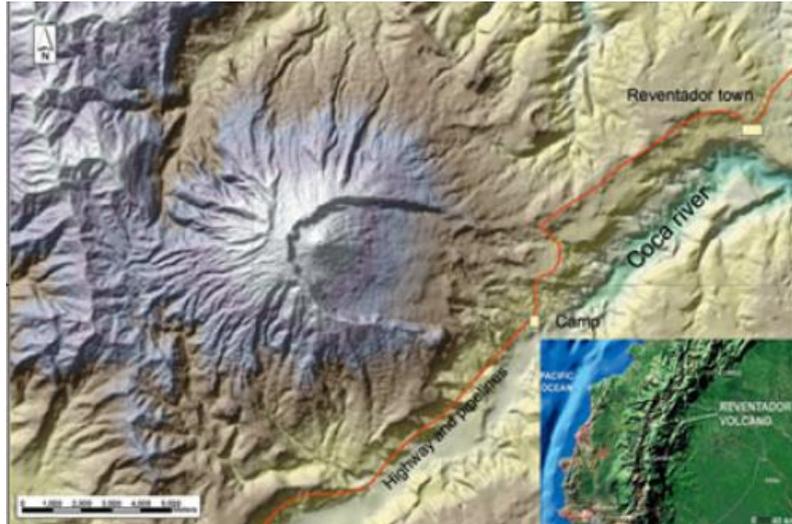


Figura1.1: Mapa de ubicación del volcán Reventador y su relación con la carretera, oleoductos y el poblado del Reventador (Tomado de Hall et al., 2004).

A nivel mundial, los primeros trabajos de la evolución sísmico - acústica se dieron en los siguientes volcanes: Arenal (Garcés et al., 1998, Hagerty et al., 2000), Erebus (Aster et al., 2003, Johnson et al., 2003), Stromboli (Ripepe et al., 1993) y Karymsky (Johnson y Lees, 2000), entre otros.

Los fenómenos eruptivos que se produce en el vento volcánico se pueden explorar y cuantificar mediante el infrasonido, a diferencia de las señales sísmicas que se producen tanto en procesos volcánicos superficiales como internos. Además, el infrasonido puede alcanzar distancias globales y regionales en donde el monitoreo sísmico tiene una capacidad limitada (Johnson y Ripepe, 2011).

Durante el periodo 2015-2017 se presentó un incremento en la actividad explosiva del volcán, el mismo que a finales del año 2017 presentó una tendencia decreciente. El análisis de este periodo de actividad explosiva puede permitir un mejor conocimiento del comportamiento de la dinámica eruptiva del volcán.

1.2 Área de estudio

El estudio comprende el volcán Reventador localizado aproximadamente a 90 km al Este de Quito y de coordenadas 0,08° S; 77, 657° W, con una altura de 3562 metros y un diámetro de 17 km (IG-EPN, 2018). Los datos sísmicos y acústicos fueron recopilados de la estación de monitoreo REVS, desde mayo del 2015 hasta diciembre del 2017, usando eventos de explosiones (EXP), agrupados en un catálogo sísmico (Capítulo 3, Sección 3.4).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Determinar la evolución de la actividad del volcán Reventador, mediante el análisis de los registros de la energía sísmica, la energía acústica y las características de cada explosión.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Confección de un catálogo sísmico y acústico del volcán durante los años 2015- 2017.
- Calcular la energía sísmica, la energía acústica; y la relación existente entre estas dos energías (VASR).
- Estudiar la dinámica de la erupción.
- Evaluar la posibilidad de detectar señales acústicas y sísmicas de los flujos piroclásticos y caídas de roca.

1.4 Hipótesis

Los procesos eruptivos del volcán Reventador pueden ser evaluados e interpretados a partir de señales sísmicas y acústicas.

CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

2.1 Volcanismo en el Ecuador Continental.

La actividad volcánica en el Ecuador Continental se dio a lo largo del frente volcánico, arco principal y tras arco desde el Plioceno hasta la actualidad (Hall et al., 2008).

Frente volcánico: está compuesto por rocas volcánicas sedimentarias y basaltos que sobreyacen el basamento del Cretácico tardío. Los estratovolcanes presentan una composición andesítica silícica a dacítica, donde la mayoría de estos edificios volcánicos tienen una caldera de 2 a 3 km de ancho (Hall et al., 2008). Ejemplos son el Guagua Pichincha, Illiniza, Fuya Fuya, entre otros (Tomado de la base del IG-EPN).

Arco Principal: constituido por estratovolcanes andesíticos con una actividad efusiva hasta calderas riolíticas con ignimbrita de erupciones explosivas (Hall y Beate, 1991). Ejemplos son el Chalupas, Cotopaxi, Tungurahua, entre otros (Tomado de la base del IG-EPN).

Tras Arco: constituido por un selecto grupo de estratovolcanes alcalinos, con una altura que oscila los 2000 y 4000 metros. El volcán Sumaco tiene una edad joven con respecto al resto de los volcanes localizados en el Tras Arco (Hall et al., 2008). Ejemplos son el Reventador, Sumaco, Pan de Azúcar y Yanaurcu (Tomado de la base del IG-EPN).

2.2 Historia geológica del volcán Reventador

Los depósitos del volcán Reventador están constituidas por una secuencia de productos efusivos y explosivos que alcanzan espesores de 1000 m y recubren las formaciones mesozoicas de la región del Napo. El volcán Reventador presenta tres grandes unidades correspondientes a otros edificios volcánicos.

- El complejo Volcánico Basal (CVB)
- El Volcán Paleo-Reventador (VPR)
- El Volcán Reventador (VER), o cono actual.

2.2.1 Complejo Volcánico Basal (CVB)

El complejo volcánico basal (CVB) aparece en la parte Norte y Occidental del actual centro eruptivo. Está limitado en la parte Este por un lineamiento tectónico con fallas arqueadas y alineadas en dirección N-S. Su petrografía son piroclastos de caída; intercalaciones de brechas volcánicas y lavas e ignimbritas. El cerro Copete, de composición andesítica, se considera como un centro dómico. Debido a su morfología, en la ladera Norte, los aparatos dómicos de los cerros Líder y Mirador parecen ser atribuidas a una fase tardía del CVB. Actualmente se presenta un depósito de avalancha de escombros de aproximadamente 20 km³ en el CVB (INECEL, 1988).

2.2.2 Volcán Paleo-Reventador (VPR)

Está formado por productos explosivos y efusivos que se localizan en la parte occidental del anfiteatro y se puede reconocer dos fases de actividad separadas por un paleosuelo. Se presume que la actividad del VPR terminó con la generación de flujos de lava, las mismas que se encuentran debajo de los depósitos de avalancha de escombros. Diversos fenómenos de colapso y deslizamiento en masa provocaron la destrucción del VPR (INECEL, 1988).

2.2.3 Volcán Reventador Actual (VER)

El Reventador es un estratovolcán andesítico con un diámetro aproximado de 16 a 20 km de ancho dentro de una caldera de 4 km de ancho en forma de herradura de caballo abierta hacia el Este (Samaniego et al., 2005). En la parte occidental de la caldera se encuentra el cono actual, el cual tiene un volumen de ~5 km³ y una altura de 3562 m (INECEL, 1988).

2.3 Actividad histórica del volcán Reventador

La actividad histórica del volcán Reventador se remonta al año 1541, con la llegada de los españoles al Ecuador, los mismos que observaron descender material incandescente del volcán (Wolf T., 1873). Debido a su inaccesibilidad, lejana ubicación, y malas condiciones climáticas, el Reventador fue descubierto en 1931 por Paz y Miño. Se presume que caídas de ceniza ocurridas en el Valle Interandino y en Quito en los siglos XIX y XX se originaron de este volcán (Paz y Miño et al., 1931).

Se reportaron erupciones a partir del siglo XX, entre las que se destacan las de los años 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1958-1960, 1972, 1973-1974 y 1976; ocurriendo en estas últimas erupciones flujos piroclásticos, flujos de lava, lahares y caídas de cenizas que dejaron depósitos de pocos milímetros en el Valle Interandino (Hall et al., 2004).

El volcán Reventador entró en erupción desde el 3 de noviembre hasta mediados de diciembre del 2002, en donde la actividad inicial del 3 de noviembre fue de sub-pliniana (VEI =4) (Hall et al., 2004) con columna de ceniza (17 km de altura), caídas de rocas y flujos piroclastos andesíticos cambió a una actividad efusiva con la generación de flujos de lava los días 6 y 21 de noviembre del 2002 (Ridolfi et al., 2008). El primero flujo de lava comenzó a fluir el 6 de noviembre y presentaba una composición andesítica-andesítica baja en sílice, y el otro flujo comenzó a fluir el 21 de noviembre con una composición andesítica-basáltica (Ridolfi et al., 2008). Esto se debe a que la automezcla convectiva estuvo operando conjuntamente con la cristalización fraccionada (inferido del cumulado de gabro) antes de la inyección del magma básico, el mismo que dio lugar a este tipo de flujos de lava (Ridolfi et al., 2008). A mediados de diciembre, ambos flujos se habían detenido (Johnson et al., 2006).

2.4 Actividad eruptiva del Reventador.

El volcán Reventador inició su proceso eruptivo actual en noviembre del 2002 y se ha caracterizado por generar explosiones, eventos de largo periodo (LP), eventos de muy largo periodo (VLP), secuencias Chugging, emisiones de ceniza, flujos de lava, flujos piroclásticos (PDC) y lahares, los mismos que se describen a continuación.

2.4.1 Actividad Sísmica

Desde el 2 de agosto hasta el 13 de septiembre del 2005, la actividad del Reventador incluyó una amplia variedad de pequeños sismos acompañados muchos con señales infrasónicas. Se registraron eventos largo periodo (LP), eventos de muy largo periodo (VLP), tremor armónico (TREMI) y espasmódico (TRESP), explosiones (EXP) y secuencias Chugging (Lees et al., 2007).

Los eventos volcano tectónicos (VT) son sismos de alta frecuencia con arribos de ondas P y S bien definidas y son causados por procesos magmáticos locales, como el fracturamiento de roca. Ocurren a una profundidad entre 1 – 20 km bajo el edificio volcánico. Los LP, tremor armónico y tremor espasmódico están relacionados con el movimiento de fluidos en el interior del conducto volcánico y los híbridos (HB) comparten características de los VT y LP con un inicio de alta frecuencia y llegadas de ondas P y S seguidas de una coda larga de baja frecuencia, acorde con lo mencionado por Aki y Lee (2003) y McNutt (2005).

2.4.1.1 Eventos de Largo Periodo (LP)

Los eventos de largo de largo periodo (LP) o de baja frecuencia (LF) se caracterizan por tener un comienzo emergente, por lo que resulta difícil determinar el tiempo exacto del

inicio de la señal. No presentan llegadas de ninguna fase, ni P ni S, varían en tamaño y fueron menos evidentes durante periodos de tremor armónico (Ibáñez y Carmona, 2000). Estos eventos se caracterizan por tener espectros de banda estrecha con amplitudes entre 2 y 6 Hz (Figura 2.1), que a su vez no fueron acompañados por señales acústicas, lo que implica que ocurren lejos del ventó volcánico, siendo lo más probable que se generen en el conducto (Lees et al., 2007).

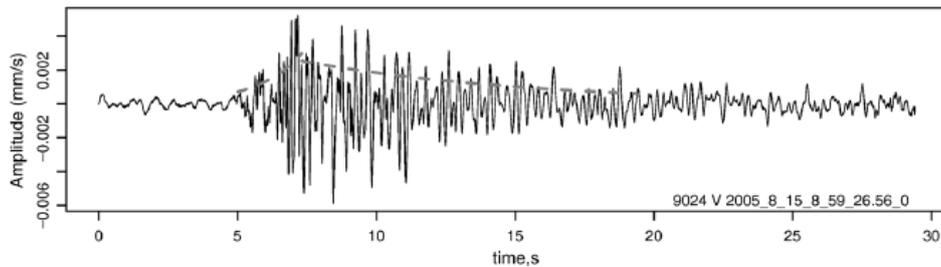


Figura 2.1: Evento sísmico de Largo Periodo (LP) en el volcán Reventador, registrado el 15 de agosto del 2005. Las duraciones de coda de los LP fueron de 20-28 s (Tomado de Lees et al., 2007).

2.4.1.2 Eventos de Muy Largo Periodo (VLP)

Estos eventos ocurridos en el 2005 fueron similares a los eventos que ocurrieron en el volcán Stromboli (De Martino et al., 2005), donde las señales de banda en el Reventador se dan entre 2 a 50 s (Figura 2.2) y fueron analizadas por inversión del tensor momento (Lees et al., 2007). Determinar los detalles de la geometría del conducto en el Reventador requiere un monitoreo adicional y una mayor cantidad de estaciones de banda ancha que las tres que se desplegaron por Lees et al. (2007).

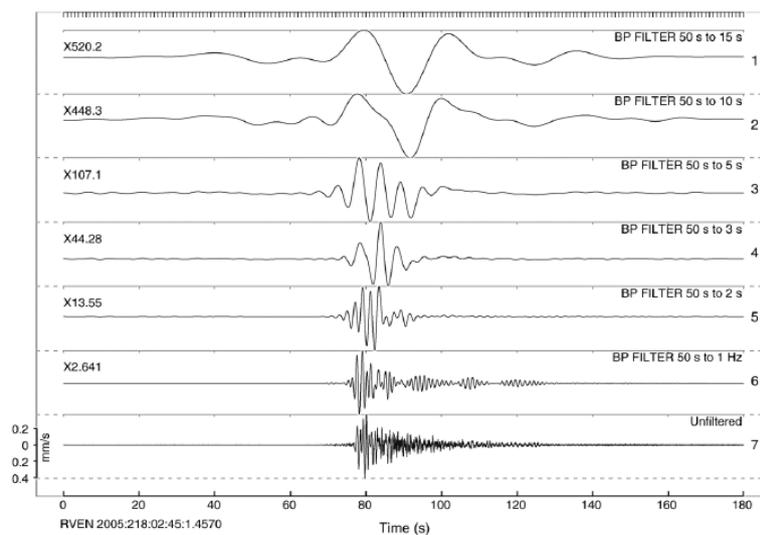


Figura 2.2: Evento sísmico de Muy Largo Periodo (VLP) registrado en la estación RVEN el día juliano 218 (Tomado de Lees et al., 2007).

2.4.1.3 Tremor Espasmódico (TRESP) y Tremor Armónico (TREMI)

Las señales de tremor espasmódico y armónico son aproximadamente de 2 Hz, que pueden variar con el tiempo. El tremor espasmódico podría durar horas e incluso días, mientras que el tremor armónico dura varios segundos o minutos, sin embargo, en algunas ocasiones se ha registrado tremor armónico de varias decenas de segundo (Manzanillas, 2011).

Un ejemplo de tremor armónico monocromático se registró en el 2005 en las estaciones RVEN y LAV3 cerca del cono de erupción que duró 1000 s, donde no se registraron señales infrasónicas que acompañaban a este tremor, por lo que se considera que los procesos asociados con estas señales se produjeron muy por debajo del viento activo. En la figura 2.3 se da el inicio del episodio de tremor, en donde la Etapa I se caracterizó por presentar frecuencias relativamente altas. En la Etapa II la secuencia pasa a un modo espasmódico con una frecuencia de alrededor de 1.6 Hz. Posteriormente entra a una Etapa III conocida como modo caótico, donde el comportamiento armónico específico está ausente, aunque la frecuencia se mantiene en 1.6 Hz. En la etapa IV las ondas se vuelven bicromáticas, donde dos frecuencias dominan esta etapa. Al comienzo las frecuencias alcanzan un máximo de 1.38 y 2.82 Hz, posterior a esto, se deslizan a 1.21 y 2.46 Hz hasta el final de esta etapa. Permanecen constantes durante la Etapa V donde, a los 600 s las vibraciones disminuyen. La Etapa VI se registró a los 645 s con contenido de banda ancha. A los 800 s aparece la Etapa VII, donde se observa una vibración monocromática de baja amplitud con un ligero deslizamiento hacia frecuencias más altas. No todas las secuencias de tremor en el Reventador siguen los detalles mostrados en esta progresión, pero muchas tenían características que generalmente eran similares, aunque no en el orden establecido (Lees et al., 2007).

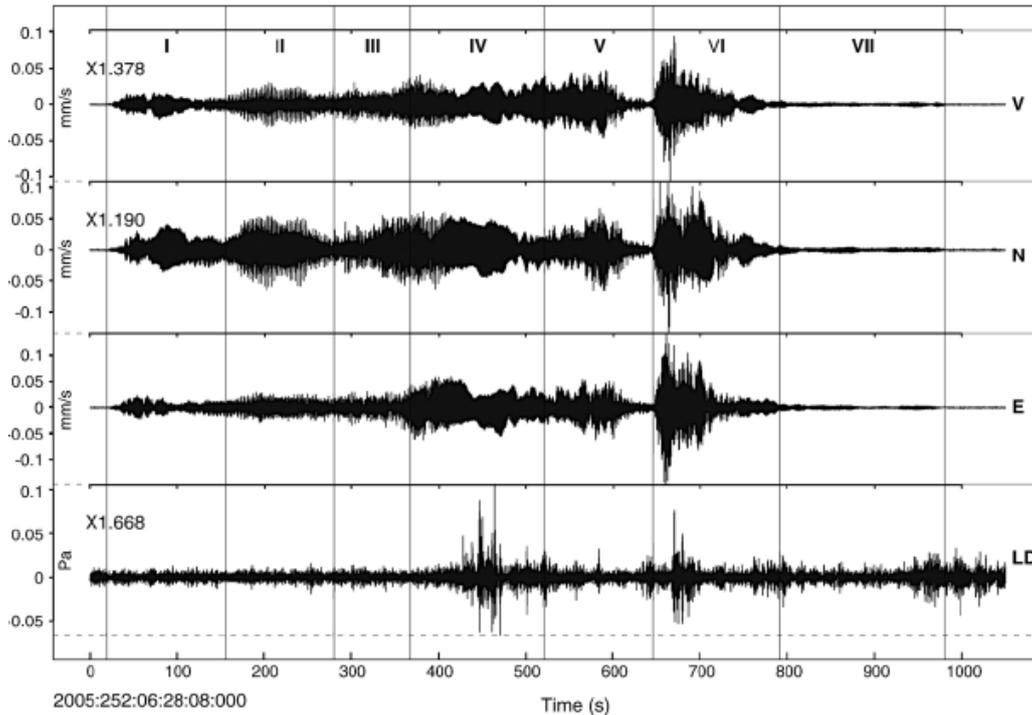


Figura 2.3: Tremor en tres componentes de datos sísmicos (vertical y dos horizontales) tomados el día 252 en la estación RVEN. La secuencia se divide en 7 etapas, discutidas en detalle en el texto. El infrasonido (LD) se presenta para mostrar que no hay una fuerte correlación entre las señales acústicas y sísmicas durante esta secuencia (Tomado de Lees et al., 2007).

2.4.1.4 Explosiones (EXP)

Estos eventos se pueden observar desde erupciones estrombolianas hasta plinianas (Minakami, 1960), y sus formas de ondas son similares a los LP, ya que presentan frecuencias de 2 a 6 Hz (Lees et al., 2007). Su magnitud está estrechamente relacionada con la máxima amplitud de onda y mantienen una relación directamente proporcional con la liberación de la energía cinética (Minakami, 1974).

Las explosiones ocurren durante erupciones freáticas, freato-magmáticas y magmáticas, dándose como una secuencia de eventos o un evento único (Zobin V., 2012).

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión del día lunes 3 de abril del 2017 a las 04:08:18 (UTC). Para el evento infrasónico se registró una explosión en términos de amplitud de 8.1 Pa con un rms de 0.04 Pa. Por otro lado, el evento sísmico se registró con una amplitud máxima de 0.0235 cm/s y un rms de 0.43 cm/s. El registro sísmico arribó ~15 segundos antes que el registro infrasónico (Figura 2.4).

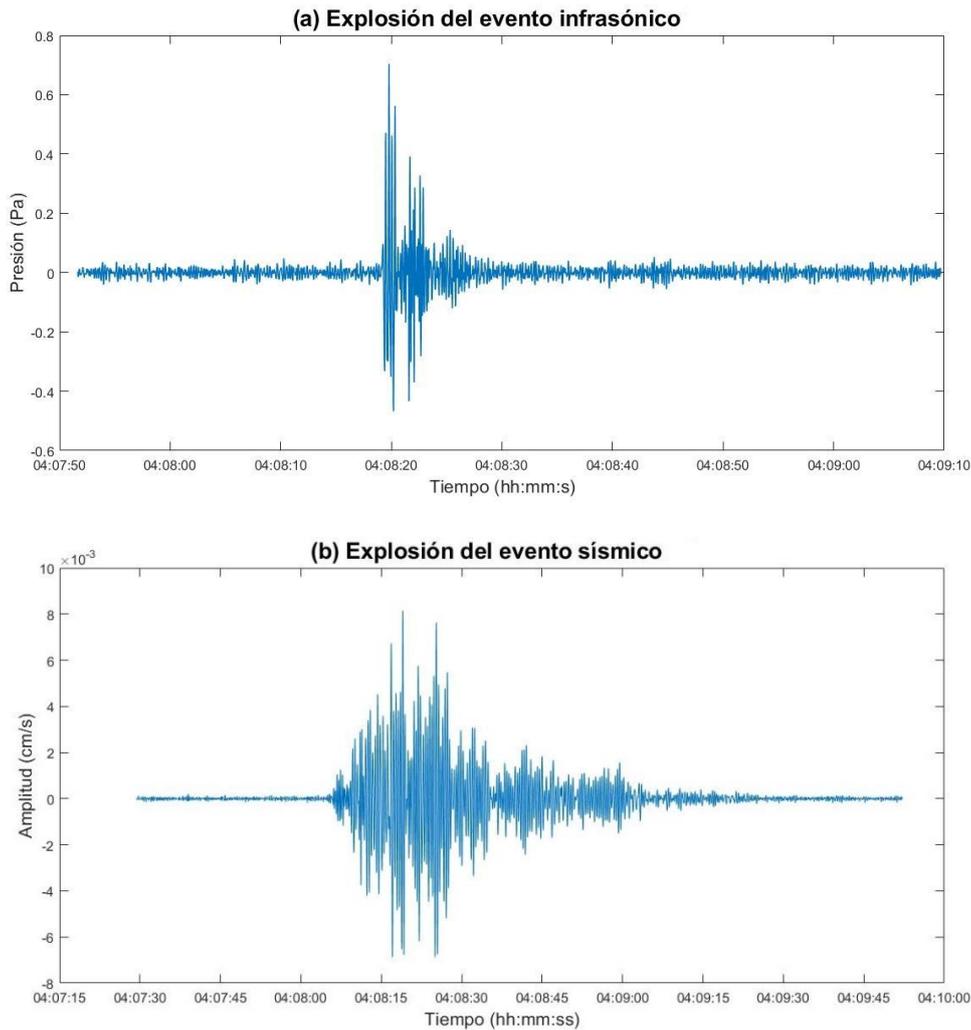


Figura 2.4: (a) Explosión del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en Pa y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Explosión del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la Base del IG-EPN, 2018).

2.4.1.5 Secuencia Chugging

La secuencia de Chugging es modelado como un tremor armónico periódico de ondas estacionarias conductoras asociados a un flujo no continuo de gases y ceniza cerca del viento. En el Reventador se dio una secuencia Chugging con un canal acústico y tres canales sísmicos (Figura 2.5). Esta secuencia es similar a la observada en el volcán Karymsky en Rusia y Sangay en Ecuador porque la secuencia de colapso comenzó 151 s después de la primera explosión. En estos 2 últimos volcanes se ha demostrado que tienen un comportamiento no lineal lo que sugiere mecanismos de retroalimentación que conducen las fluctuaciones de presión en el viento (Lees et al., 2007).

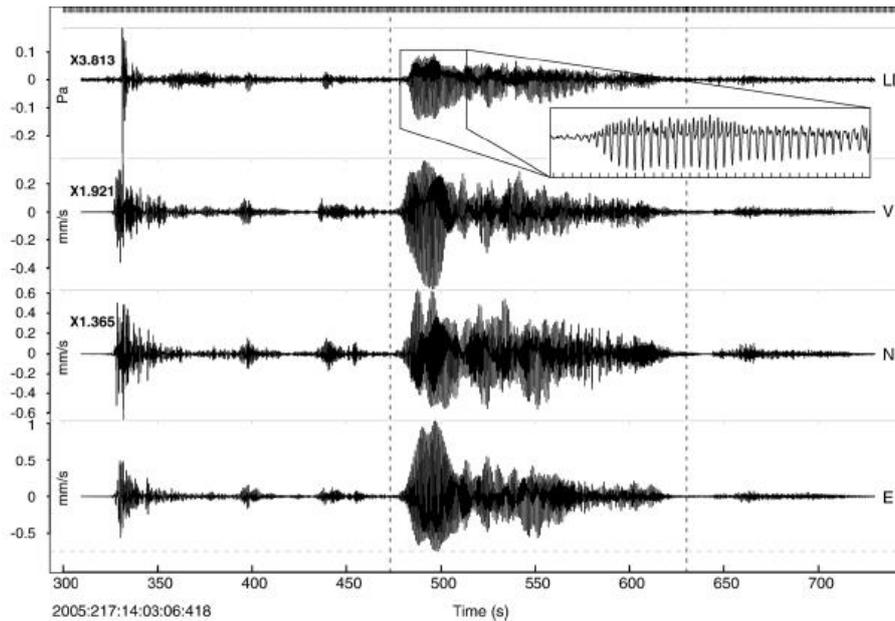


Figura 2.5: Secuencia Chugging tomada el día 217 en la estación RVEN. Una explosión inicial es seguida por una serie de pulsaciones llamadas chugging. Estos se observan en registros acústicos y sísmicos. El recuadro muestra un detalle del registro acústico (Tomado de Lees et al., 2007).

2.4.2 Actividad Superficial

La actividad superficial del volcán Reventador se ha caracterizado por presentar flujos piroclásticos (PDC), caídas de rocas, flujos de lava, lahares, caídas de ceniza y emisiones de gases (Vallejo, 2017).

2.4.2.1 Corrientes de Densidad Piroclástica (PDC)

PDCs son mezclas uniformes compuestas por gases y material sólido (Ridolfi et al., 2008) que fluyen por tener una mayor densidad con respecto a la atmósfera y por acción de la gravedad (Branney M y Kokelaar P, 2002). PDCs se propagan por los flancos de los volcanes y podrían cubrir eventualmente cientos de kilómetros cuadrados y cientos de metros de grosor en los depósitos y que se originan comúnmente durante erupciones explosivas (Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

Existen varios tipos de flujos piroclásticos: #1 los flujos de bloque que se originan comúnmente de erupciones vulcanianas y tienen a estar localizados alrededor del volcán, #2 los flujos de ceniza que son más energéticos y se originan en erupciones plinianas que se extienden a grandes distancias (Lockwood J. y Hazlett R., 2010). #3 PDCs tipo avalancha de escombros se dan por colapso de domo. Este proceso comprende la abrasión, trituración por fragmentación y ruptura de vesículas, acompañados de una mezcla y expansión de aire, las mismas que se originan de forma

explosiva (Figura 2.6). Este tipo de PDCs genera pequeños volúmenes de depósitos de flujos de bloques y cenizas. Se considera un proceso de corta vida (Branney M. y Kokelaar P., 2002).

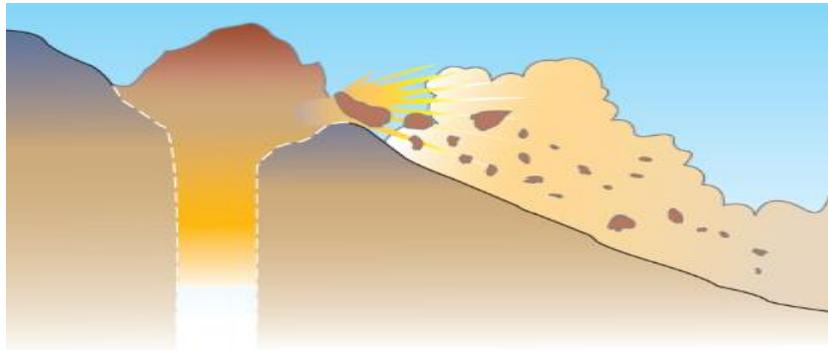


Figura 2.6: PDC por colapso de domo (Tomado de Branney M. y Kokelaar P., 2002).

#4 PDCs que se generan por explosiones laterales, resultan de la despresurización del sistema magmático dentro del volcán (Figura 2.7). En este proceso las fuerzas de inercia dominan las fuerzas gravitacionales al inicio de la explosión y durante un periodo corto de tiempo (Branney M. y Kokelaar P., 2002).

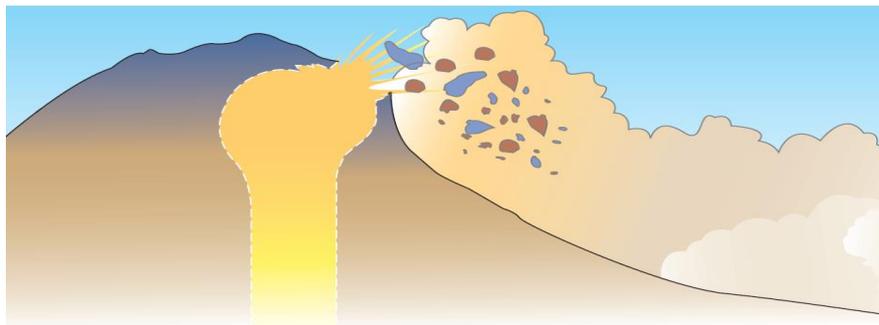


Figura 2.7: PDCs por explosión lateral (Tomado de Branney M. y Kokelaar P., 2002).

2.4.2.2 Caídas de rocas

Las caídas de rocas son fragmentos de rocas que se desprenden por deslizamiento o caída libre y al momento de perder energía a causa de la fricción se detienen en el borde de la pendiente (Figura 2.8). Las caídas de rocas provocadas por deslizamiento se caracterizan por presentar velocidades bajas, altas pérdidas de energía y recorren distancias cortas desde unos pocos centímetros hasta decenas metros. Mientras, que las caídas de rocas incitadas por caída libre son impulsadas por la gravedad, presentan

velocidades altas, su trayectoria es de forma balística y recorren grandes distancias (Guzzetti et al., 2002).



Figura 2.8: Caída de rocas en el volcán Santiaguito, Guatemala (Modificado de Johnson y Ronan, 2015).

2.4.2.3 Flujos de lava

Los flujos de lava son derrames de roca fundida extruidas en el venticulo volcánico o en fracturas laterales y son controladas por variaciones en la viscosidad del magma y las tasas de derrame durante una erupción efusiva. Con una alta tasa de emisión, la lava fluye rápidamente, tiende a formar un flujo extenso y puede alcanzar una gran distancia. Mientras que, con una baja tasa de derrame, la lava fluye lentamente y tiende a acumularse en forma de capas cerca del venticulo (Walker et al., 1973; Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

Además, los flujos de lava son considerados fluidos multifase de alta temperatura debido a que presentan mezclas de cristales, burbujas y roca fundida, los mismos que son considerados de fases sólida, gaseosa y líquida respectivamente (Lockwood J. y Hazlett R., 2010). Macdonald (1953) describió tres principales flujos de lava según su morfología: 'a'ā, pāhoehoe, y bloque de lava.

Pāhoehoe: flujo de lava de composición basáltica con un rango de temperatura entre 1050 – 1200 °C, menos viscoso que los flujos de lava de tipo bloque y 'a'ā. Se caracteriza por presentar una superficie lisa y vidriosa con grandes ondulaciones. Su grosor varía entre los 3 – 40 cm, puede extenderse hasta los 100 metros y su formación está relacionada con una tasa baja de derrame (Macdonald G., 1953; Kilburn C., 2000; Lockwood J. y Hazlett R., 2010) (Figura 2.9).



Figura 2.9: Flujo de lava de tipo pāhoehoe emitido por el volcán Kilauea, Hawái en el año 1972 (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

'A'Ā: flujo de lava de composición basáltica y se caracterizan por presentar una superficie irregular y rocosa (Kilburn C., 2000; Lockwood J. y Hazlett R., 2010). Este tipo de lava se forma a causa de una transición de la morfología de la superficie. Esta transición está relacionada con la viscosidad y la velocidad de la tensión de cizallamiento. Las lavas que tienen baja viscosidad presentan mayores tasas de tensión de cizallamiento para que se produzca la transición a flujo de lava de tipo 'a'ā (Macdonald G., 1953) (Figura 2.10).



Figura 2.10: Flujos de lava de tipo 'a'ā y pāhoehoe emitido por el volcán Kilauea durante la misma erupción del año 1972 (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

Bloque de Lava: los flujos de lava de tipo bloque presentan composiciones andesíticas, dacíticas, riolíticas y en algunas ocasiones presentan una composición basáltica - andesítica. Se caracteriza por presentar superficies lisas, angulares, planas y son más viscosos que los flujos de lava de tipo 'a'ā y pāhoehoe (Kilburn C., 2000; Lockwood J. y Hazlett R., 2010) (Figura 2.11).



Figura 2.11: Flujo de lava tipo bloque de composición basáltica – andesítica, montaña Brown, USA (Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

2.4.2.4 Lahares

Los lahares están compuestos por detritos rocosos (arcillas, pómez, cascajo, arena) que al combinarse con grandes cantidades de agua pueden generar fluidos de alta densidad (Figura 2.12). Según Lockwood J. y Hazlett R. (2010), los lahares son de dos tipos:

- 1) Hipoconcentrado: son mezclas de agua y materiales granulares de 35 – 40% en volumen o 55 – 60% en peso (arena).
- 2) Flujos de escombros: son mezclas de agua y materiales granulares sumamente viscosos de 55 – 60% en volumen o 75 – 80% en peso (grava) (Lockwood J. y Hazlett R., 2010).



Figura 2.12: Roca gigante de un lahar cerca de la localidad de Mulaló, Cotopaxi, Ecuador
(Tomado de Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

2.4.2.5 Caídas de ceniza

La ceniza volcánica es generada por la fragmentación de magma y de materiales presentes en el cráter del volcán remanentes de erupciones anteriores (Büttner et al., 1999). La ceniza puede estar compuesta por cuarzo, feldespato, horblenda, hipersteno, biotita, augita y principalmente vidrio volcánico (Nanzyo, 2004). La distancia de transporte de las cenizas depende de la forma, rugosidad, esfericidad, composición química y principalmente de la densidad de las partículas y los vientos. Durante una erupción, las partículas menos densas son transportadas a grandes distancias a causa del viento, mientras que las partículas más densas son depositadas cerca del cráter (Riley et al., 2003).

2.4.2.6 Emisiones de gases

Los gases son considerados un componente principal de los magmas y forman la mayor cantidad de material emitido antes, durante y después de una erupción volcánica. El magma está compuesto principalmente por agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) e hidróxido de azufre (H_2S). Además, los gases volcánicos representan ~ 1% del peso de los magmas basálticos y ~ 7% de los magmas ácidos (Lockwood J. y Hazlett R., 2010).

2.4.3 Red de monitoreo del volcán Reventador

Con el paso de los años, el Instituto Geofísico ha ido mejorando el monitoreo sísmico y volcánico, logrando tener una amplia gama de estaciones. El monitoreo nos facilita información sobre la actividad volcánica. Esta información permite crear planes de evacuación si así lo amerita la situación (Alvarado et al., 2018).

El volcán Reventador es monitoreado por tres estaciones sísmicas de corto período (CHAR, CONE y LAV4), una estación sísmica de banda ancha (REVN), una estación infrasónica (REVS), dos estaciones AFM (Azuela y Marker), dos cámaras, una de ellas ubicada en el sector de COPETE y la otra en el flanco suroriental del volcán; también están instalados inclinómetros y estaciones temporales. La estación REVS, ubicada a 5.2 km del viento, está compuesta por un sensor sísmico de banda ancha (Trillium compact) con tres componentes que tiene una ganancia alta con una tasa de muestreo de 50 muestras / segundo, un microbarómetro MB2005 y un digitalizador Kinematics Quanterra Q330S (IG-EPN, 2018).

Actualmente las estaciones sísmicas son las siguientes: REVN, REVS, LAV4, en círculo de color naranja. Cabe recalcar, la estación sísmica CONE dejó de funcionar debido a que el volcán Reventador presentó un flujo de lava extenso, el mismo que arrasó con la estación antes mencionada. Las cámaras térmicas son: REBECA y COPTIR. Las cámaras visuales son: COPTVS y LAVCAM (Figura 2.13).

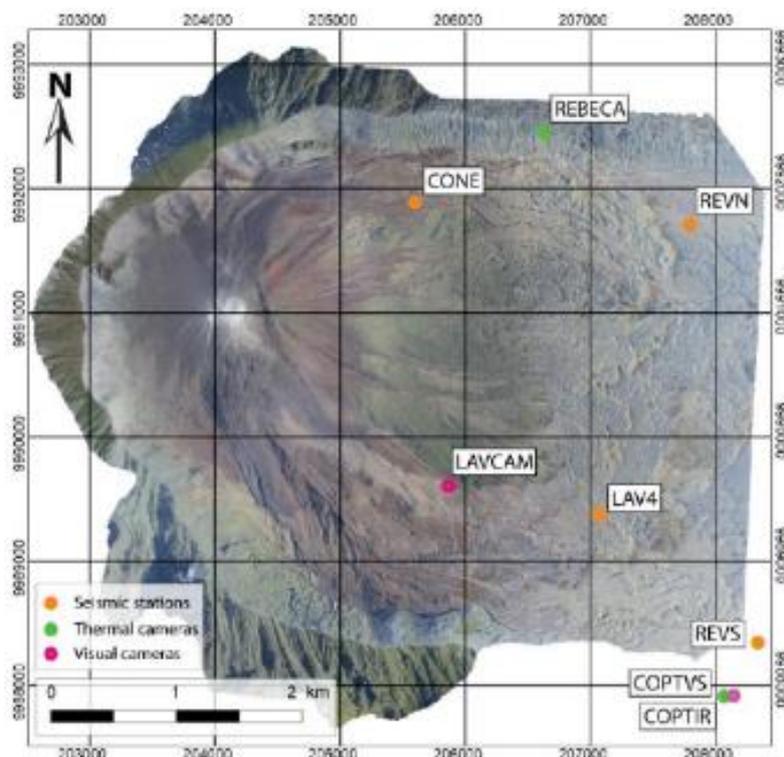


Figura 2.13: Ubicación de las estaciones de monitoreo del volcán Reventador (Tomado de Vallejo, 2017).

2.4.4 Resumen de la actividad sísmica del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017.

Para la elaboración de este trabajo, se realizó un análisis de los datos sísmicos mediante el reconocimiento de los valores máximos o ‘picos’ de actividad volcánica en la Figura 2.14 y se establecieron los periodos mayo 2015 – junio 2016 (recuadro azul), julio 2016 – junio 2017 (recuadro rojo) y julio 2017 – diciembre 2017 (recuadro verde), debido a que estos picos corresponden al mayor número de eventos sísmicos registrados durante los periodos antes mencionados en comparación con los años anteriores (2004 – 2014). En estos periodos se determinaron asociaciones y características de las señales sísmicas que corresponden a la actividad interna del volcán Reventador.

Esta actividad sísmica se complementó con la información extraída de informes especiales, informes diarios, fotos y videos de las erupciones más relevantes ocurridas en el volcán Reventador, los mismos que se describen a detalle en el Capítulo 2, Sección 2.4.4.

En la tabla 1.1 se resume la actividad sísmica y actividad superficial del Reventador, en donde el periodo julio 2017 – diciembre 2017 presenta una disminución de la actividad sísmica en comparación con los periodos mayo 2015 – junio 2016 y julio 2016 – junio 2017, siendo este último el de mayor generación de actividad sísmica, mientras la actividad superficial es casi similar para los tres periodos.

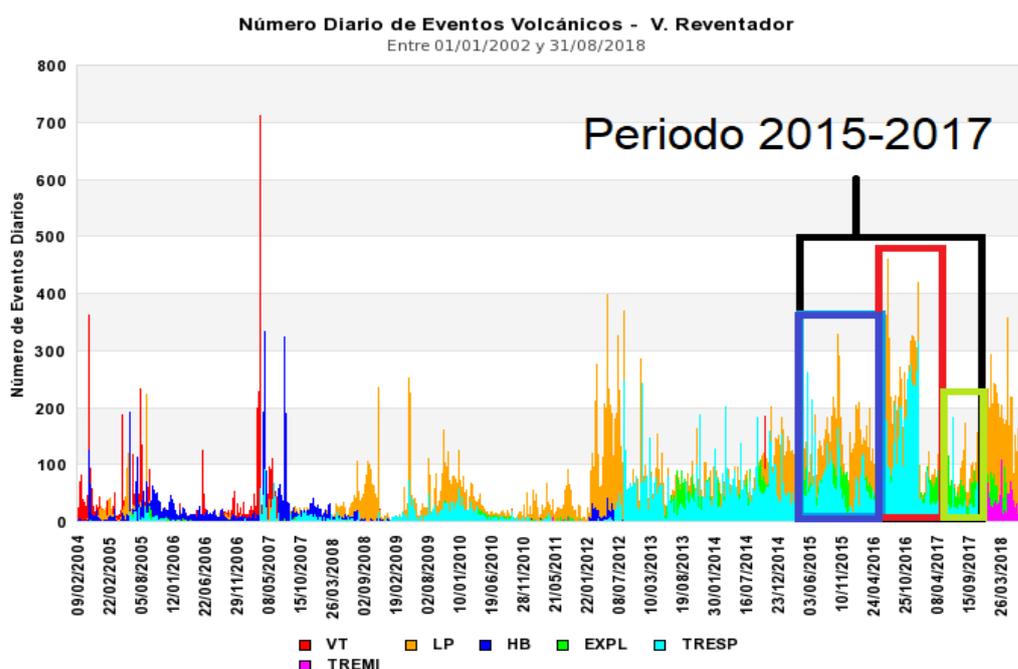


Figura 2.1413: Número diario de eventos volcánicos del Reventador entre los años 2004-2018. El recuadro de color negro es el periodo estudiado (mayo 2015 – diciembre 2017). El eje x es el tiempo (dd/mm/yy) y el eje y es el número de eventos diarios (Tomado de la base del IG-EPN).

Periodo	Actividad sísmica	Actividad Superficial
mayo 2015 – junio 2016	Sismos Totales= 91 394	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos de lava. • Flujos piroclásticos. • Caídas de rocas. • Generación de dos ventos. • Material incandescente en los flancos. • Emisiones de gases y ceniza.
julio 2016 – junio 2017	Sismos Totales= 95 385	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos de lava. • Flujos piroclásticos. • Caídas de rocas. • Material incandescente en los flancos. • Emisiones de gases y ceniza.
julio 2017 – diciembre 2017	Sismos Totales= 26 041	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos de lava. • Caídas de rocas. • Flujos piroclásticos. • Material incandescente en los flancos. • Emisiones de gases y ceniza.

Tabla 2.1: Resumen de la actividad sísmica y actividad superficial del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017 (Fuente IG-EPN).

A continuación, se presenta un resumen de la actividad sísmica del volcán Reventador, en donde se calculó el límite máximo, límite mínimo, promedio y total de sismos registrados durante los periodos antes mencionados.

2.4.4.1 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 – junio 2016.

La actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 – junio 2016 tiene un límite máximo de sismos de 431 registrado en el mes de septiembre del 2015 y un límite mínimo de 93 sismos registrado durante el mes de mayo del 2016, con un

promedio de 230 sismos y una desviación estándar de 96 (Figura 2.15). Además, durante este periodo se contabilizó 84 VT, 4230 LP, 89 HB, 17262 EXP, 12211 Eventos Infrasónicos, 2498, 17020 tremor Armónico y Espasmódico respectivamente (Fuente IG-EPN) (Figura 2.16).

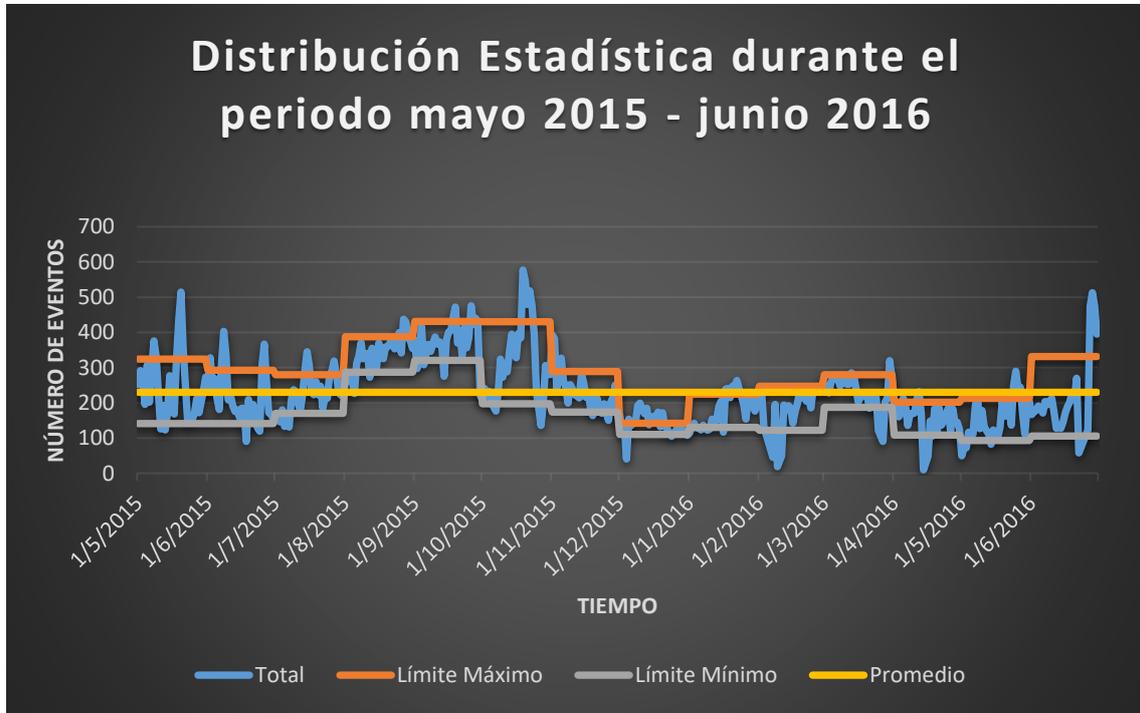


Figura 2.15: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante periodo mayo 2015 – junio 2016. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.

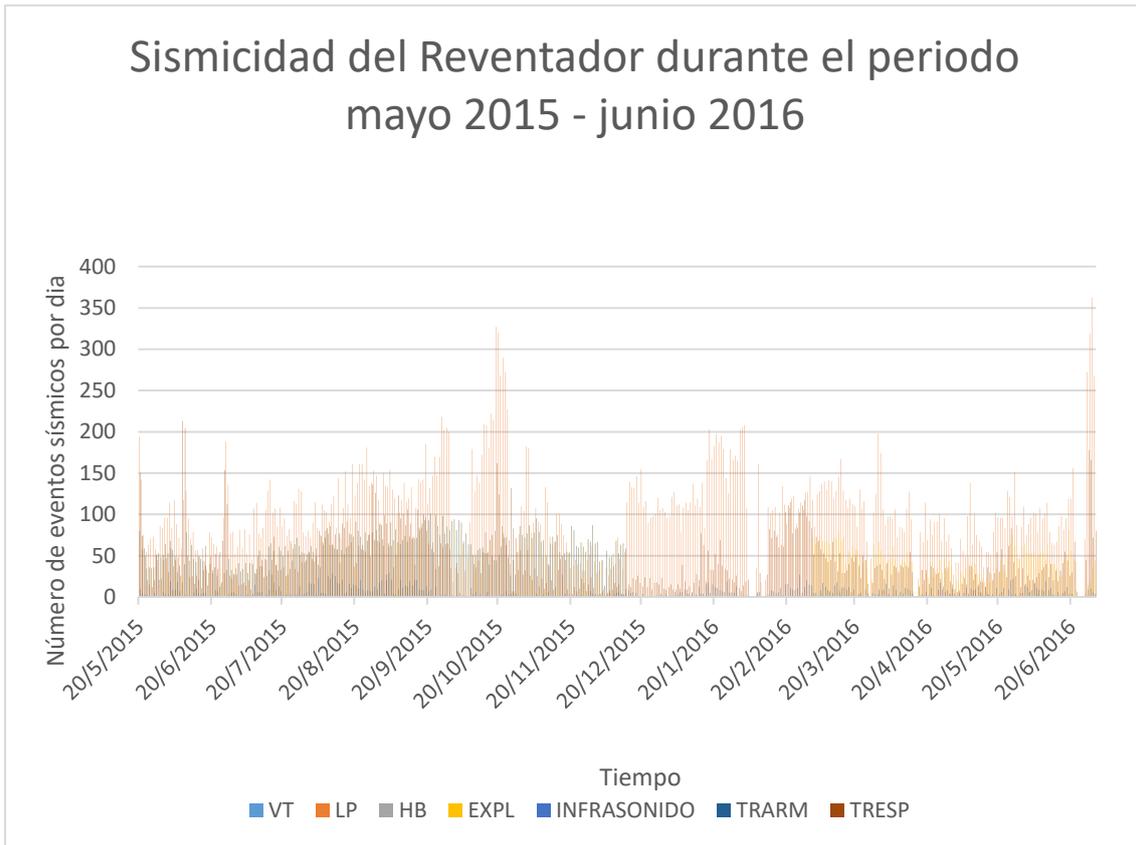


Figura 2.16: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015- junio 2016 (Tomado de la base de datos del IG).

2.4.4.2 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017.

La actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017 tiene un límite máximo de sismos de 711 registrado en el mes de diciembre del 2016 y un límite mínimo de 106 sismos registrado durante el mes de enero del 2017, con un promedio de 281 sismos y una desviación estándar de 161 (Figura 2.17). Además, durante este periodo se contabilizó 76 VT, 41234 LP, 175 HB, 16998 EXP, 11950 Eventos Infrasónicos, 1274, 23678 tremor Armónico y Espasmódico respectivamente (Figura 2.18).

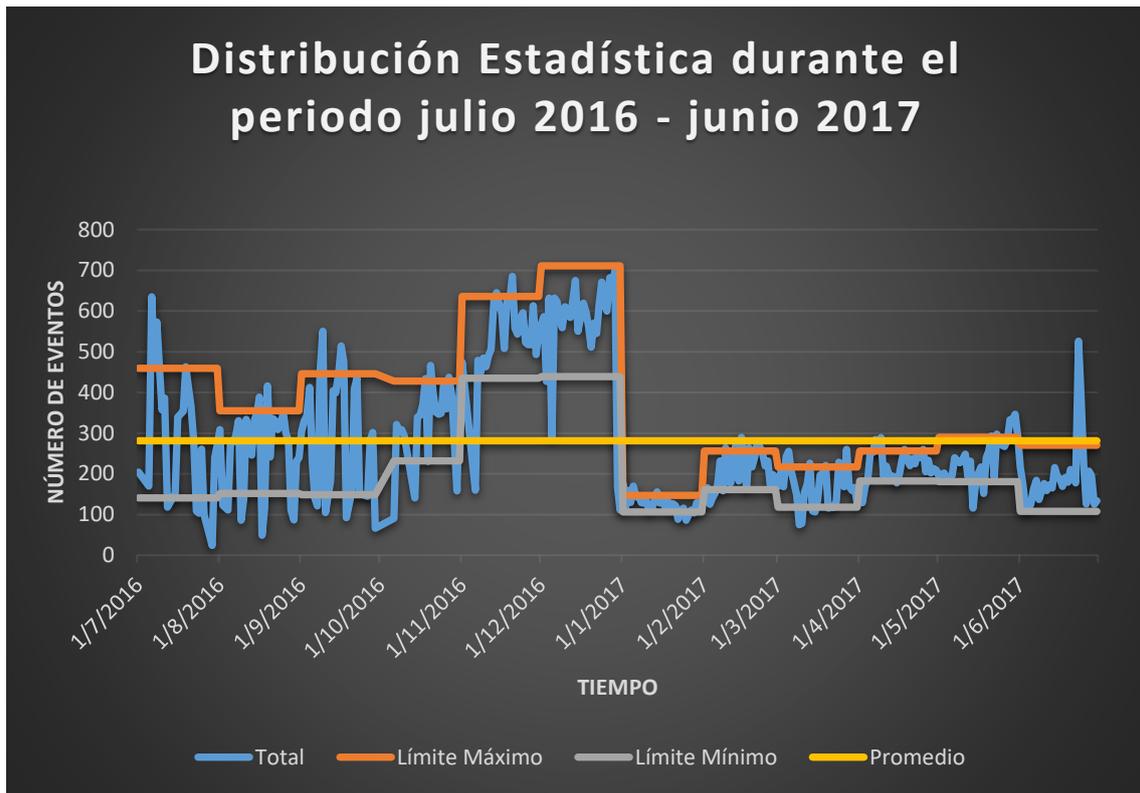


Figura 2.17: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante el periodo julio 2016 – junio 2017. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.

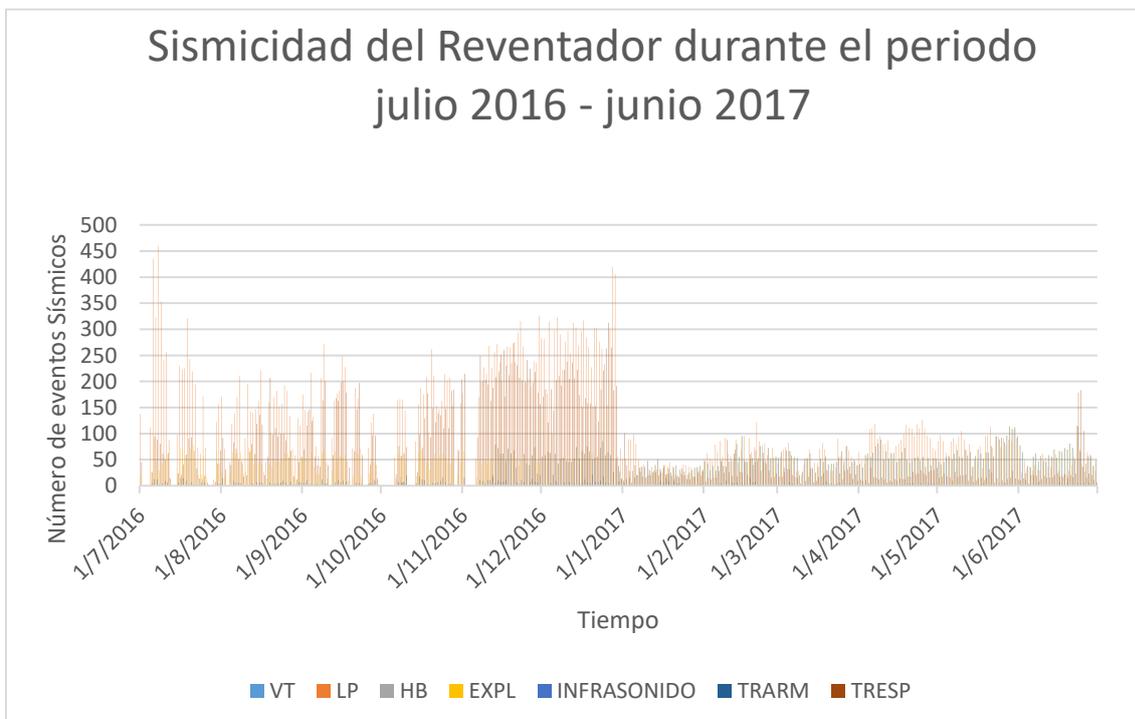


Figura 2.18: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo julio 2016- julio 2017 (Tomado de la base de datos del IG).

2.4.4.3 Actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017.

La actividad sísmica del volcán Reventador durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017 tiene un límite máximo de sismos de 373 registrado en el mes de noviembre del 2017 y un límite mínimo de 7 sismos registrado durante el mes de diciembre del 2017, con un promedio de 152 sismos y una desviación estándar de 21457 (Figura 2.19). Además, durante este periodo se contabilizó 1 VT, 12816 LP, 9 HB, 5940 EXP, 4663 Eventos Infrasónicos, 607, 2005 tremor Armónico y Espasmódico respectivamente (Fuente IG-EPN) (Figura 2.20).

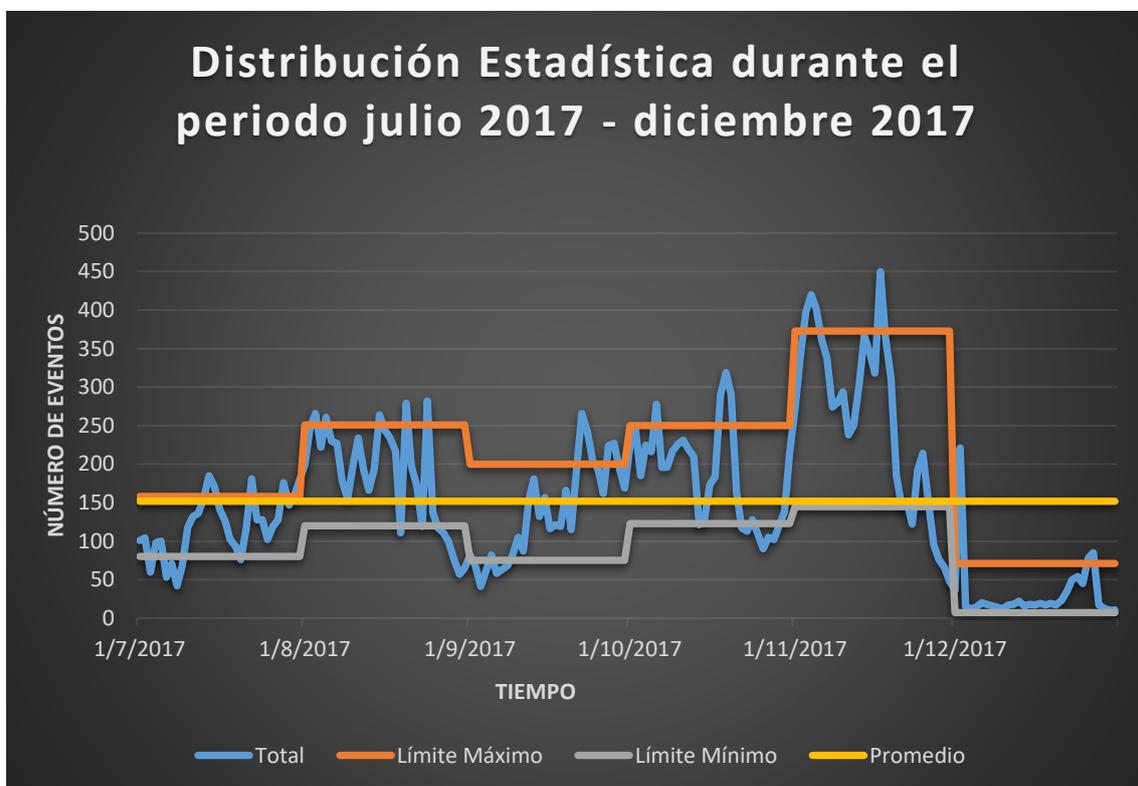


Figura 2.19: Distribución estadística de los sismos del volcán Reventador durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017. En el eje x es el tiempo, eje y es el número de eventos.



Figura 2.20: Número de eventos registrados del volcán Reventador durante el periodo julio-diciembre del año 2017 (Tomado de la base de datos del IG).

2.4.5 Información de la actividad superficial del volcán Reventador durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017

En esta sección se ha utilizado fundamentalmente la información establecida en los informes especiales realizados por los técnicos del IG-EPN durante los meses de mayo y junio del año 2015, enero 2016, enero, junio, julio y agosto del año 2017, los mismos que están dentro del periodo mayo 2015 – diciembre 2017 en el cual se realizó esta investigación. Se establecieron los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017 en base a la información sísmica descrita en el Capítulo 2, Sección 2.4.3. Las imágenes visuales e imágenes térmicas que se describen en esta sección, fueron obtenidas de la cámara visual COPETE y de la cámara térmica localizadas en el sector de Copete y los sismogramas se obtuvieron de las estaciones CONE y LAV4. Esta información ha servido para corroborar los resultados obtenidos en esta investigación (Capítulo 4). Cabe recalcar, que también se efectuó una revisión de los informes diarios durante estos años.

A continuación, se presenta un resumen de la actividad superficial más representativa del volcán Reventador durante los periodos: mayo 2015 - junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017.

2.4.5.1 Actividad superficial del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 - junio 2016

En el periodo mayo 2015 – junio 2016, los técnicos del IG-EPN realizaron informes especiales para los meses de mayo, junio del año 2015 y enero del año 2016, los mismos que se describen a continuación.

Flujo de lava en el mes de mayo del 2015

Los técnicos del IG-EPN lograron visualizar el 17 de mayo del 2015 a las 13h50 UTC (8h50 TL) un aumento en la amplitud del tremor de emisión (Figura 2.21) que está vinculado con la extrusión de un flujo de lava. El 19 de mayo registraron un flujo de lava que descendía por el flanco S del volcán con una longitud estimada de 1000 metros (Figura 2.22), el mismo que se registró con la cámara térmica ubicada en el sector de Copete y se reportaron 35 explosiones y 38 LP (IG-EPN, Informe especial del volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador).

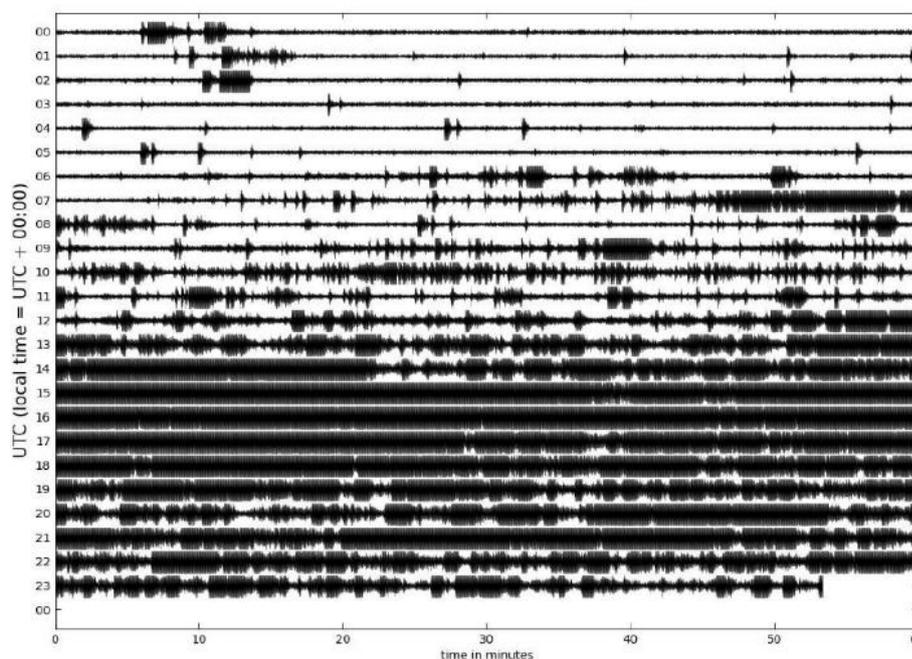


Figura 2.21: Sismograma de la estación CONE tomada el día 17 de mayo del 2015. CONE está ubicado en el flanco NE del cono. Desde las 13h50 UTC, se logró observar un incremento en la amplitud del tremor (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador).

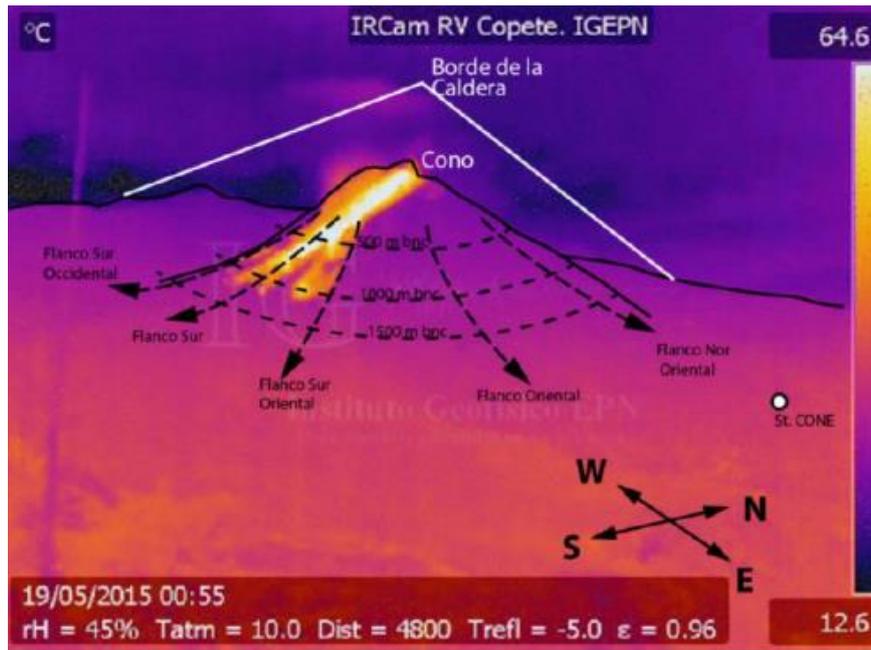


Figura 2.22: Flujo de lava descendiendo por los flancos S, observado por la cámara térmica ubicada en el sector de Copete (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador).

Flujo de lava en el mes de junio del 2015

El volcán Reventador el 24 de junio del 2015 a las 14h00 UTC (09h00 LT), registró un aumento en la actividad sísmica, caracterizado por una señal de tremor continuo (Figura 2.23) (IG-EPN, Informe Especial del Volcán Reventador N°3, 2015. Intensa actividad en el volcán Reventador).

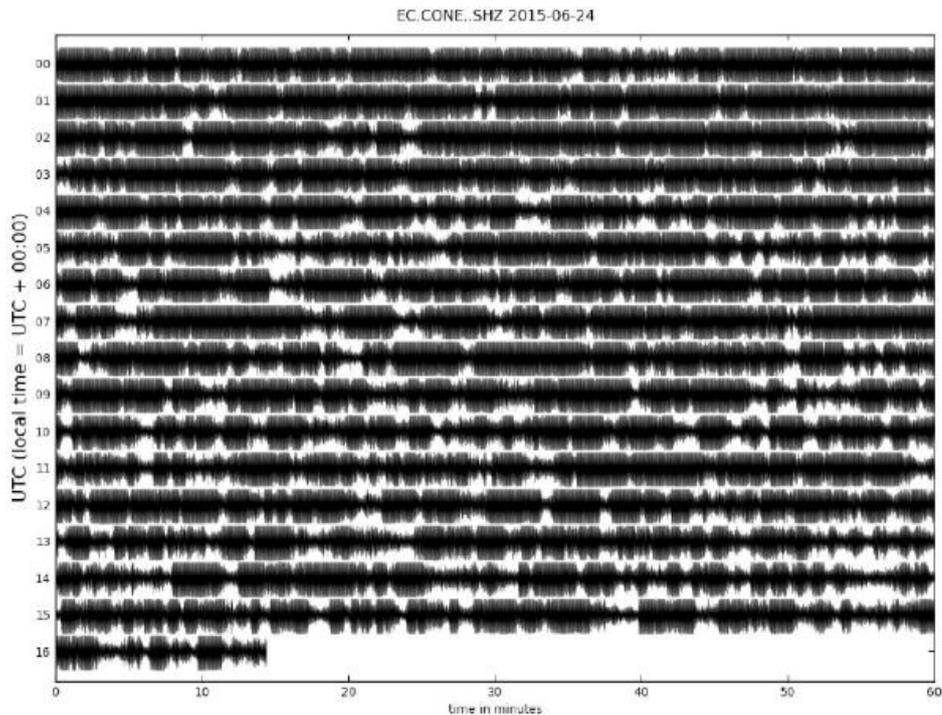


Figura 2.23: Sismograma de la estación CONE tomada el 24 de junio del 2015. Esta estación sísmica está ubicada en el flanco NE del volcán (Tomado del IG-EPN).

Las imágenes capturadas por la cámara térmica localizada en el sector de Copete indicaron que la actividad superficial aumentó y además los técnicos del IG-EPN visualizaron diversos flujos de lava que se desplazaban a lo largo de los flancos SW, S, E y NE. Estimaron la distancia del flujo de lava que se movilizó a lo largo del flanco E en 1000 metros y relacionaron la señal de tremor sísmico con la salida de los flujos de lava. Debido al clima desfavorable en la zona, no lograron vincular directamente el inicio de la señal de tremor con el inicio de la salida de los flujos de lava. Además, reportaron que varias señales de explosiones acompañaron las emisiones de lava y probablemente desencadenaron flujos piroclásticos. Estos flujos piroclásticos y flujos de lava permanecieron en el interior de la caldera y no representaron peligro para las zonas cercanas al volcán (IG-EPN, informe Especial del Volcán Reventador N°3, 2015. Intensa actividad en el volcán Reventador).

Flujos piroclásticos en el mes de enero del 2016

La actividad del volcán Reventador disminuyó rápidamente a partir del mes de julio del 2015 hasta el mes de diciembre del mismo año, pero a comienzos del año 2016 se evidenció un incremento en la actividad eruptiva principalmente de manera superficial. En la figura 2.24 se observa depósitos de flujos piroclásticos a lo largo de los flancos S y SE (IG-EPN, Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).

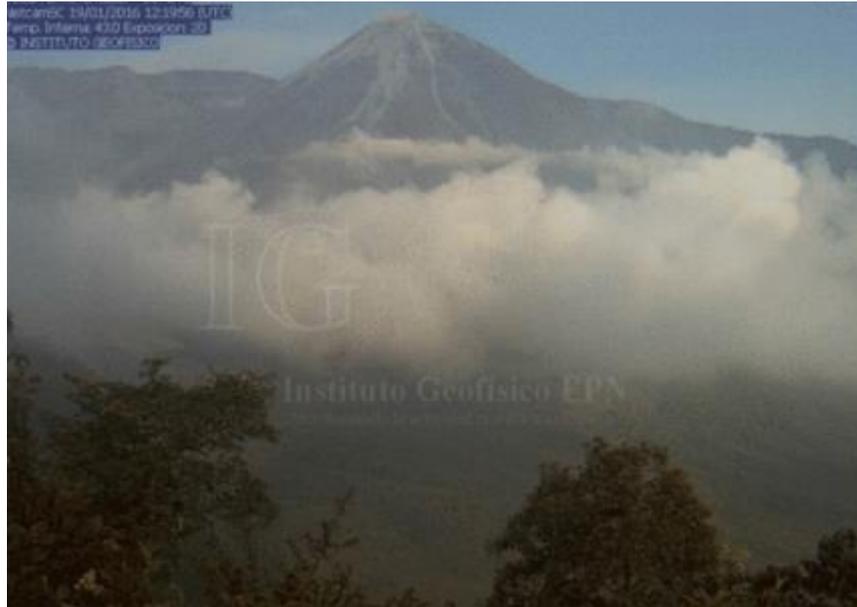


Figura 2.24: Imagen del 19 de enero del 2016 a las 12:19:56 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete. Se observó depósitos de flujos piroclásticos en los flancos S y SE (Fuente: Cámara visual COPETE, IG-EPN).

Los técnicos del IG-EPN utilizaron el sistema de detección de anomalías térmicas (MIROVA) y determinaron que las frecuencias e intensidades de estas anomalías se incrementaron en enero del 2016 en comparación con el año 2015. Se registraron: 3 anomalías de intensidad alta, 21 anomalías de intensidad moderada y 9 anomalías de intensidad baja (Figura 2.25).

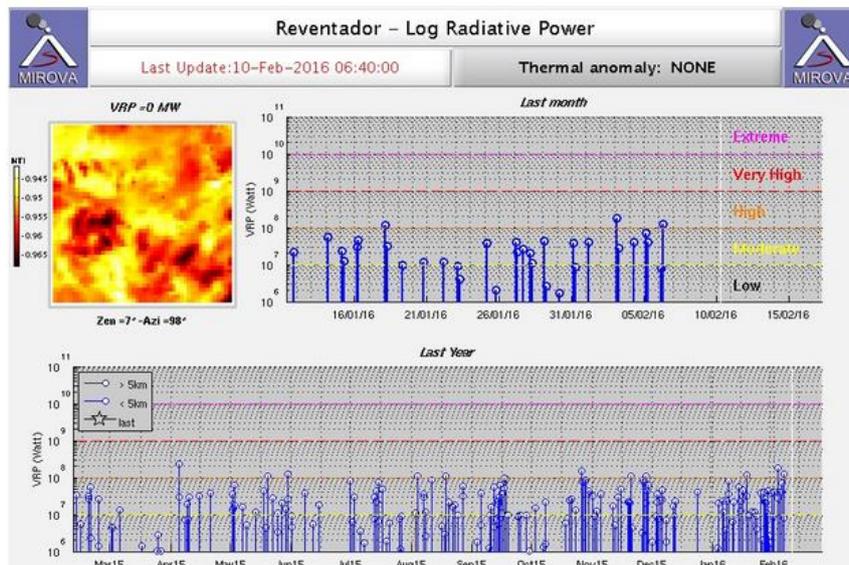


Figura 2.25: Sistema de anomalías termales. En la figura superior, se observa las anomalías termales del mes de enero, mientras en el gráfico inferior se observa las anomalías termales de todos los meses del año 2016 (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).

El monitoreo sísmico indica explosiones pequeñas, las cuales pueden estar vinculadas con columnas eruptivas menores a 1 km de altura, con contenidos moderados de ceniza y con una dirección de propagación hacia el NW (Figura 2.26).

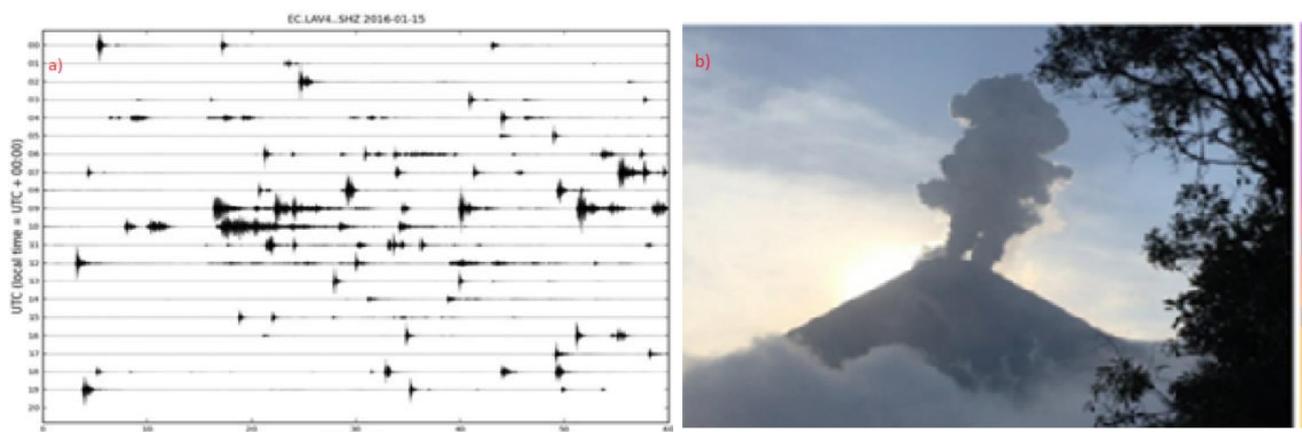


Figura 2.26: a) Registro sísmico de la estación LAV4 tomada el 15 de enero del 2016, se observa pequeñas explosiones. b) Columna de gases y vapor con un contenido moderado de ceniza (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).

El volcán Reventador presentó actividad alta el 28 de enero del 2016, en la que se registraron caídas de ceniza en las cercanías del volcán, varias explosiones pequeñas con descensos de bloques incandescentes. Los técnicos del IG- EPN observaron en todos los flancos del volcán depósitos de flujos piroclásticos que alcanzaron distancias de ~1000 metros. Lo más importante de esta etapa fue que lograron visualizar dos ventos en su cráter. Estos dos ventos presentaban actividad diferente pero simultánea. El viento Norte presentaba una actividad efusiva, mientras que el viento Sur presentaba actividad explosiva (IG-EPN, Informe 2017-01, Reporte de erupción del volcán reventador). En el viento Norte observaron un flujo de lava que estaba alineado en sentido N-S con el viento central (Figura 2.27). Además, percibieron un fuerte olor a azufre producto de las emisiones de gas disperso en el ambiente.

El 26 y 27 de marzo no lograron hacer el conteo de la actividad sísmica debido al daño en las estaciones cercanas, mientras que en el mes de mayo los técnicos indicaron que el volcán presentó varias explosiones con descenso de bloques incandescentes. En el resto de los meses del año reportaron caídas de ceniza, explosiones pequeñas sin causar ningún daño a las zonas aledañas del volcán (IG-EPN, Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).



Figura 2.27: Se observa emisiones de gas sin contenidos de ceniza en el flanco SW del volcán el 28 de enero del 2016. Además, se visualiza el viento Norte, el viento Central y el flujo de lava del flanco N (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).

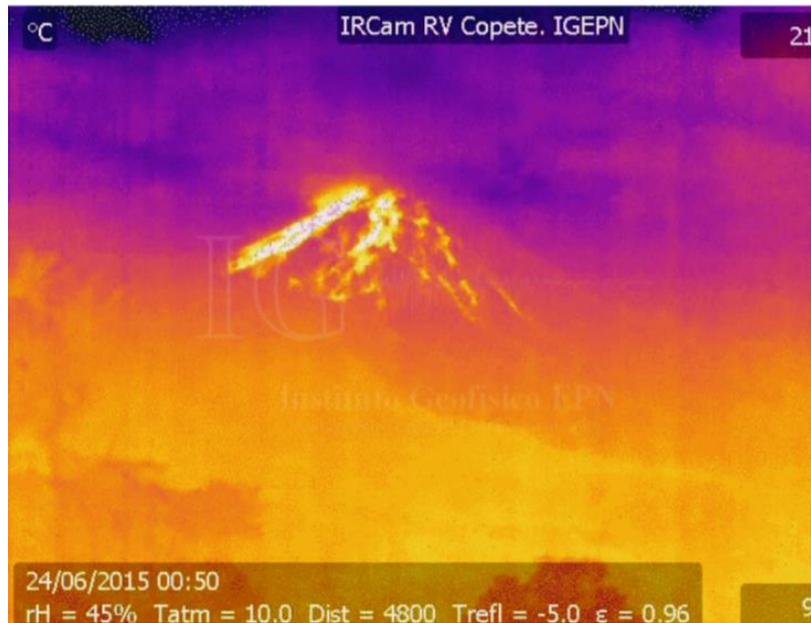


Figura 2.28: Flujo de lava descendiendo por los flancos SW y S observado por la cámara térmica localizada en el sector de COPETE. Tomado el 23 de junio del 2016 a las 19h50 UTC (Tomado del Informe 2016-1, Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador).

2.4.5.2 Actividad superficial del volcán Reventador durante julio 2016 y junio 2017

La actividad volcánica del Reventador durante julio 2016 y diciembre 2016 no fue de gran relevancia, por lo que no realizaron informes especiales.

Los técnicos del IG-EPN realizaron vuelos sobre el Reventador el 16 de enero del 2017 e indicaron que el volcán mantenía eventos explosivos y continuas emisiones de ceniza, las mismas que no afectaron a zonas pobladas cercanas. Una expedición desarrollada vía terrestre del 29 de mayo al 01 de junio del 2017 certificó que los dos ventos reportados en enero del 2016 presentaban actividad explosiva y reconocieron un nuevo vento en la parte Occidental del volcán en donde se generaba actividad efusiva (IG-EPN, Informe 2017-02, Reporte de erupción del volcán Reventador).

El volcán Reventador durante los días 22 y 23 de junio del 2017 presentó una fase explosiva fuerte, la misma que generó flujos piroclásticos que descendieron a lo largo del flanco NE del volcán (Figura. 2.29). Desde el 24 de junio al 1 de julio reportaron que el volcán presentaba una fase efusiva con emisiones de SO_2 y un descenso de material incandescente a lo largo del flanco NE (Figura 2.30) (IG-EPN, Informe 2017-02, Reporte de erupción del volcán Reventador).



Figura 2.29: Imagen tomada el 22 de junio del 2017 a las 22:12:44 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete. Se observa flujos piroclásticos que descendieron a lo largo del flanco NE (Tomado del Informe 2017-02, Reporte de erupción del volcán Reventador).



Figura 2.30: Imagen tomada el 25 de junio del 2017 a las 05:58:51 (UTC) a través de la cámara visual COPETE. Se observa material incandescente a lo largo del flanco NE (Tomado del Informe 2017-02, Reporte de erupción del volcán Reventador).

2.4.5.3 Actividad superficial del volcán Reventador durante julio 2017 y diciembre del 2017

Los técnicos del IG-EPN realizaron un sobrevuelo sobre el volcán el 21 de julio del 2017 y determinaron que la actividad efusiva había cesado, y observaron una sola anomalía termal en todo el cráter. Además, los dos ventos reportados en el 2016 habían desaparecido y evidenciaron la presencia de flujos piroclásticos, y sobre estos un nuevo flujo de lava (IG-EPN, Informe 2017-01, Reporte de erupción del volcán Reventador). El flujo de lava alcanzó una longitud mayor a 2 km con un ancho al tope de ~60 m y hacia el frente de ~300 m (IG-EPN, Informe especial del volcán Reventador N°3, 2017, Flujo de lava) (Figura 2.31).

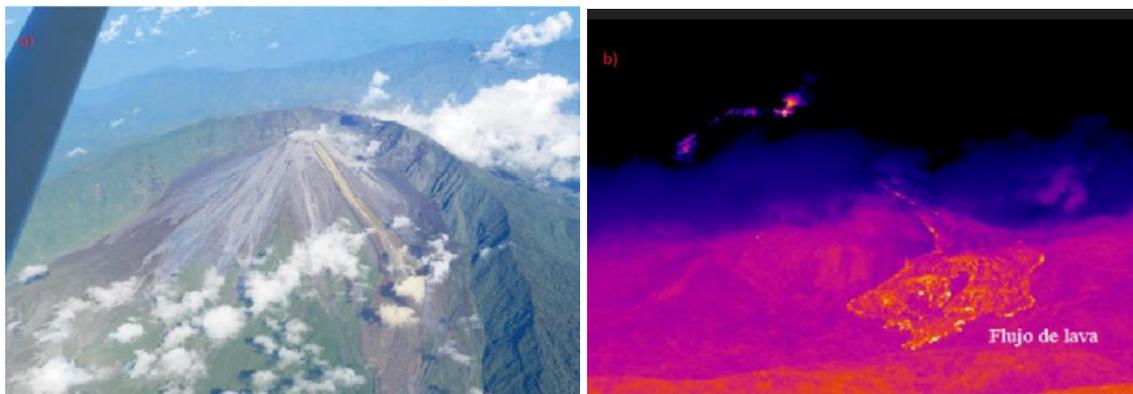


Figura 2.31: a) Imagen aérea del flujo de lava. b) Imagen térmica del flujo de lava que descendió del 24 de junio al 1 de julio del 2017 (Tomado del Informe especial del volcán Reventador N°3, 2017, Flujo de lava).

Durante los días 23 y 24 de agosto reportaron caídas de ceniza con una altura menor a 500 m y emisiones de vapor, las mismas que estaban acompañadas por caídas de rocas incandescentes (Figura 2.32) y flujos de lava que alcanzaron los 800 m a lo largo de los flancos NE, E, S, ENE, WSW (Figura 2.33) (IG-EPN, Informe del estado del volcán Reventador N°236, Resumen de la actividad del volcán).

A partir del mes de septiembre la actividad superficial del volcán Reventador disminuyó considerablemente hasta el mes de diciembre.



Figura 2.32: Imagen tomada el 24 de agosto del 2017 a las 10:33:29 (UTC) a través de la cámara instalada en el sector de Copete, ubicada a 5.2 km del viento. Se observa caídas de rocas a lo largo de los flancos E y NE (Tomado del Informe del estado del volcán Reventador N°236, Resumen de la actividad del volcán).

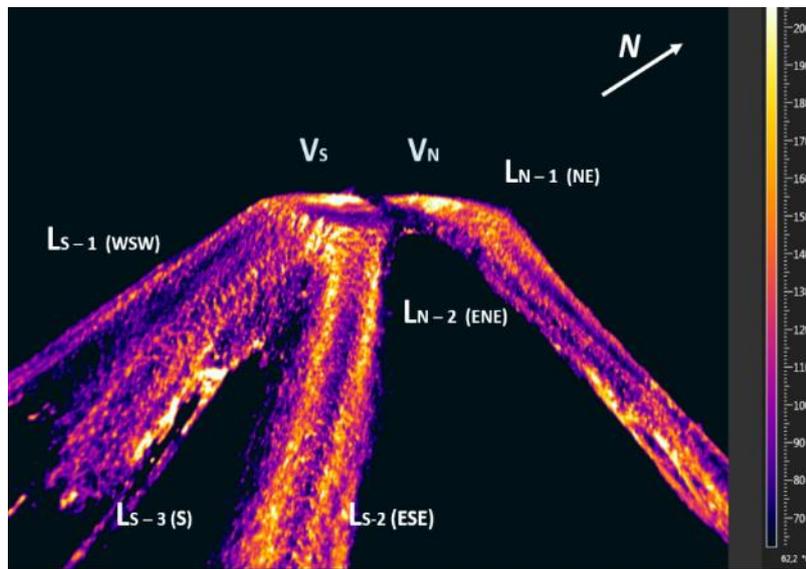


Figura 2.33: Imagen infrarroja de los flujos de lava que descendieron desde el viento Norte y viento Sur el 23 de agosto del 2017 (Tomada del Informe del estado del volcán Reventador N°236, Resumen de la actividad del volcán).

Capítulo 3- METODOLOGÍA

3.1 Sismicidad Volcánica

La sismicidad volcánica trata del estudio de las señales sísmicas que se originan en los volcanes y que son asociadas con su actividad. El estudio volcánico, desde el punto de vista sísmico, es muy importante porque nos posibilita conocer diferentes aspectos de los volcanes (Ibáñez y Carmona, 2000). Estos aspectos son la localización en profundidad de los cuerpos de magma y fluidos hidrotermales, la geometría, composición y dinámica del sistema de conductos (Patanè et al., 2006).

Para lograr el monitoreo volcánico, se debe seguir ciertas técnicas propias del mismo. Estas técnicas son: detección, identificación, registro, clasificación y análisis de las señales sísmicas, monitoreo de gas y evaluación de la deformación del terreno. Esto se desarrolla mediante estaciones sísmicas ubicadas en las cercanías del volcán, GPS, el espectrómetro de correlación o COSPEC para los gases, interferometría SAR, datos satelitales, estudios gravimétricos y magnéticos (Ibáñez y Carmona, 2000; Sciotto, 2012).

3.2 Detección de explosiones

Para realizar un eficiente trabajo sobre la detección de las explosiones, se debe tener a nuestro alcance programas informáticos que nos ayuden a procesar los diferentes tipos de señales sísmicas e infrasónicas que presenta los diferentes volcanes.

Las señales sísmicas y acústicas se obtienen mediante el empleo de instrumentos de medida como son sensores sísmicos (REVS: banda ancha y LAV4: periodo corto) y de infrasonido (REVS).

Las señales sísmicas e infrasónicas se almacenan en archivos mseed y se analizan con la ayuda de programas como SIPASS (Sistema Informático para el Análisis y Procesamiento de Señales Sísmicas) y Swarm (Espectros de frecuencia) para poder visualizar, identificar y catalogar las señales.

El software SIPASS nos permite procesar el tiempo de arribo de la onda P y mediante la transformada de Fourier observamos los espectros de frecuencias de los terremotos volcánicos y los clasificamos de acuerdo a sus frecuencias (Pérez, 2016) (Figura 3.2).

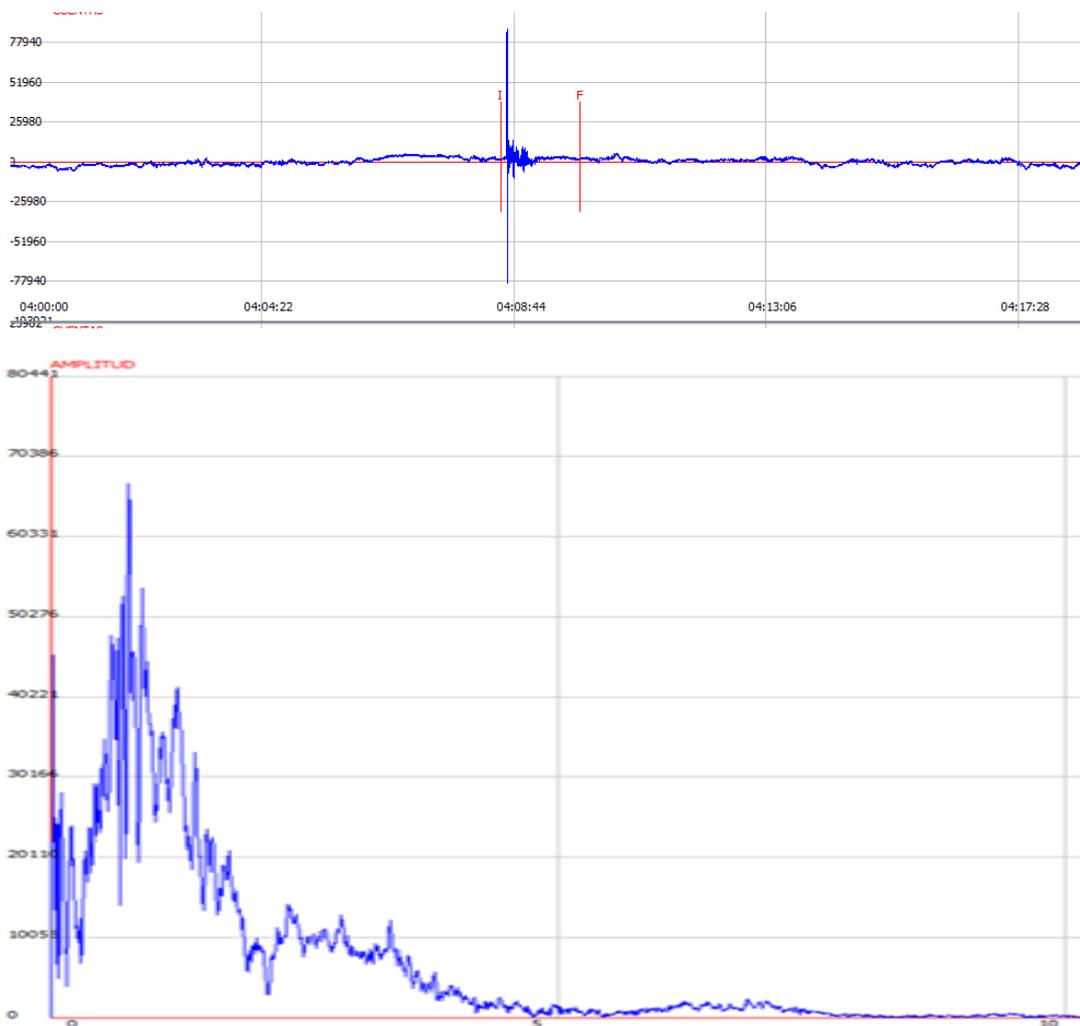


Figura 3.1: a) evento infrasónico, donde el eje y corresponde a la amplitud en cuentas y el eje x el tiempo (hh: mm: ss) b) espectro del evento infrasónico analizado con el SIPASS, donde el eje y corresponde a la amplitud y el eje x es la frecuencia (Hz). Tomada del 2 de febrero del 2017 a las 04:09:05 (UTC) (Tomado de la base del IG-EPN).

3.3 Catálogo sísmico

El catálogo sísmico es muy importante para poder realizar el monitoreo sísmico, ya que nos proporciona información muy valiosa de los datos de magnitud, latitud, longitud, profundidad y fecha de ocurrencia de los sismos, siendo estos datos un aporte necesario para poder realizar varios estudios (Woessner y Wiemer, 2005).

Estos datos que se procesan pueden contener diferentes tipos de errores, entre los errores más comunes es que no se pueden registrar todos los eventos sísmicos. Esto se debe a que algunas estaciones sísmicas son incapaces de detectar eventos muy pequeños, también se debe a errores humanos, a la ubicación de las estaciones

sísmicas y a los fenómenos meteorológicos que pueden ocurrir cerca de las estaciones (Garza, 2014).

Para esto, se construye una base de datos mediante el programa SIPASS de la estación REVS, el mismo que tiene un formato xls. Este formato nos detalla información de los eventos infrasónicos y sísmicos, por ejemplo: Amplitud en cuentas, amplitud mínima, RMS, Coda, periodo y frecuencia (Figura 3.3).

CODREGISTRO	VOLCAN	ESTACION	COMPONENTE	FECHA	HORA	CODA	AMP_CUENT	AMP_MM	PERIODO	FRECUENCIA	RMS	POL	PESOS
1224788	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	17:55:49	9,10	33157,40	305,50	1,50	0,68	0,01	N	0
1224790	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	17:56:47	11,40	25963,20	239,30	1,30	0,73	0,01	N	0
1224792	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	18:36:15	9,20	13545,02	125,11	1,70	0,58	0,07	N	0
1224983	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	19:54:15	18,30	20878,10	192,50	1,70	0,58	0,01	N	0
1224985	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	20:12:37	21,70	24736,40	228,10	5,90	0,17	0,01	N	0
1224988	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	20:20:31	14,70	71355,30	656,90	1,70	0,58	0,00	N	0
1224992	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	21:43:57	18,10	44009,40	405,30	3,40	0,29	0,00	N	0
1224996	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	22:31:09	18,20	78236,40	720,20	0,90	1,07	0,01	N	0
1225004	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	23:45:08	18,20	41493,43	382,24	2,28	0,43	0,01	N	0
1225007	Reventador	REVS	BDF	17/4/2015	23:54:40	11,40	27659,92	254,97	1,86	0,53	0,00	N	0
1225011	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	0:07:49	21,70	37097,85	341,80	1,58	0,63	0,01	N	0
1225019	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	0:37:51	17,10	28944,03	266,79	1,71	0,58	0,00	N	0
1225024	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	0:57:35	11,40	25649,08	236,47	1,86	0,53	0,03	N	0
1225027	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	1:00:07	20,50	12224,65	112,97	1,41	0,70	0,07	N	0
1225040	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	2:16:33	14,80	49301,87	454,08	1,58	0,63	0,04	N	0
1225046	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	2:46:29	8,00	14127,00	130,47	1,46	0,68	0,29	N	0
1225048	Reventador	REVS	BDF	18/4/2015	2:50:53	14,80	30825,74	284,10	1,71	0,58	0,01	N	0

Figura 3.2: Formato xls extraído del programa SIPASS luego de realizar el procesamiento de las señales sísmicas y acústicas (Tomado del IG-EPN).

El catálogo puede ser abierto en el programa Matlab y se puede desarrollar scripts los mismos que crean gráficas para su posterior interpretación y establecer conclusiones. Las ecuaciones usadas para calcular algunos parámetros se encuentran resumidas en el Capítulo 3, sección 3.7.

El catálogo sísmico se realizó en tres periodos. A continuación, se detalla los periodos:

- 1 de mayo del 2015 – 30 de junio del 2016.
- 1 de julio del 2016 - 30 de junio del 2017.
- 1 de julio – 27 de diciembre del 2017.

Además, se obtuvieron los datos infrasónicos y sísmicos de la estación REVS en formato SAC (Seismic Analysis Code) para el periodo febrero 2017 – agosto 2017, realizando una identificación y descripción de señales de corriente de densidad piroclástica (PDC) y caída de rocas mediante el análisis de sus registros. Con la ayuda del software de Matlab, se crearon códigos para poder realizar las identificaciones y descripciones de los productos volcánicos antes mencionados (Capítulo 4, Sección 4.5).

3.4 Señales sísmicas

La corteza terrestre está constituida por las conocidas placas tectónicas, las cuales en el momento de su interacción generan terremotos y volcanes (Jiménez, 2007). Las ondas que se generan debido a los terremotos se las conoce como ondas sísmicas, esto se debe a una ruptura a lo largo de fallas y fracturas, las cuales pueden hacer vibrar la superficie (Ibáñez y Carmona, 2000). También se generan ondas sísmicas debido a los procesos volcánicos, las mismas que están vinculadas con el movimiento del magma en profundidad, y que se dan en el momento de la emisión de los productos sólidos, líquidos y gaseosos en la superficie (Sciotto, 2012).

Las ondas sísmicas se propagan con más facilidad en la atmósfera que en un medio sólido, a pesar de que la atmósfera heterogénea y debido a los vientos en un medio dinámico (Ripepe et al., 2002).

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran una señal sísmica original y filtrada respectivamente, tomada del día 03 de abril a las 04:08:18 (UTC) de la estación REVS.

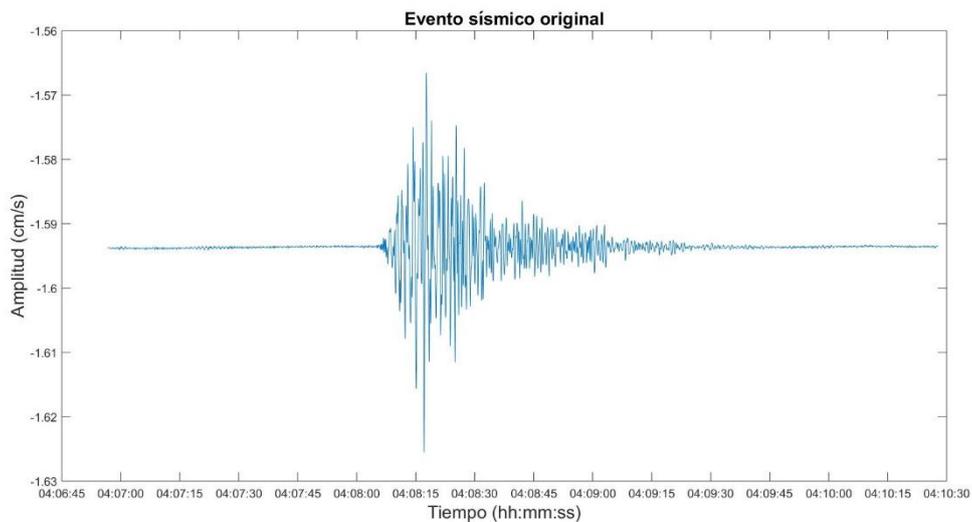


Figura 3.3: Registro sísmico original del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la velocidad de movimiento del terreo en cm/s y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).

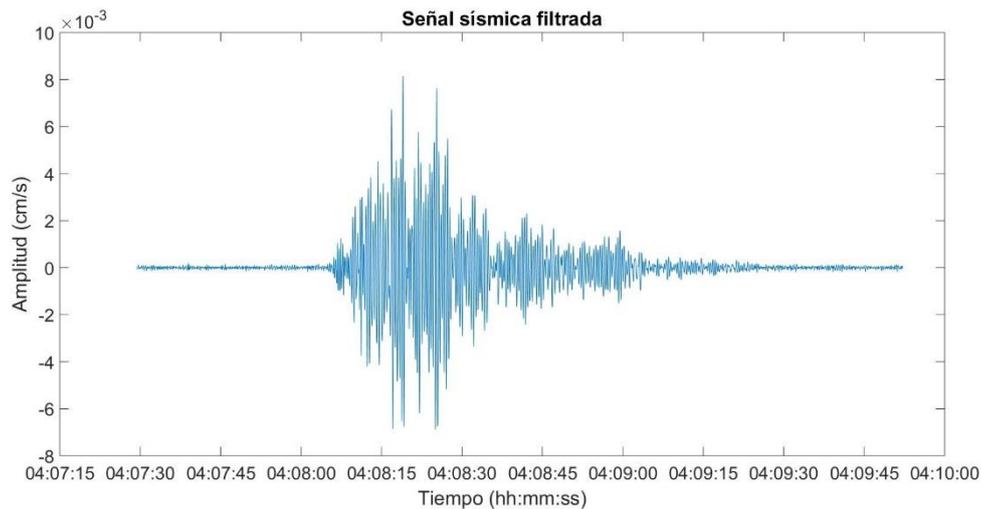


Figura 3.4: Registro sísmico filtrado (0.5 a 15 Hz) del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es velocidad de movimiento del terreno en cm/s y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).

3.5 Señales de infrasonido

Los fenómenos eruptivos que se produce cerca del viento volcánico se pueden explorar y cuantificar mediante el infrasonido, mientras que las señales sísmicas se producen tanto en procesos volcánicos superficiales como internos (Johnson J. y Ripepe M., 2011). La propagación del infrasonido en la atmósfera es controlada por el gradiente vertical de temperatura y vientos horizontales. Esta propagación está influenciada por la tropósfera (10 a 15 km de altura) y las interacciones con la topografía volcánica, que pueden reflejar, difractar o bloquear la señal. Las interacciones con la topografía se pueden controlar si se conoce donde se origina la señal infrasónica (Allstadt et al., 2018).

Además, para eventos más grandes, la propagación infrasónica se produce en un ambiente anisotrópico formado por vientos en la estratósfera (35 a 55 km de altura). También, se presenta el caso que la propagación infrasónica se produzca en un ambiente isotrópico formado por vientos en la termósfera (90 a 120 km de altitud) (Allstadt et al., 2018).

El estudio infrasónico se utiliza para los siguientes propósitos: 1) monitorear los volcanes activos (e.g. Ortiz et al., 2018). 2) Sondar la atmósfera (e.g Johnson et al., 2018). 3) Estudiar la dinámica de la erupción (e.g Johnson y Aster, 2005). 4) Inferir geometrías de vientos, conductos y cuantificar el flujo de materiales volcánicos para evaluar y mitigar los peligros que estos pueden generar (Johnson J. y Ripepe M., 2011).

Las señales infrasónicas se pueden complementar con observaciones y mediciones geofísicas, que incluyen cámaras térmicas, radar Doppler, datos sísmicos y banda visual. (Johnson J. y Ripepe M., 2011).

Las señales infrasónicas se pueden clasificar en explosión, jetting y tremor infrasónico (Fee y Matoza, 2013).

- Explosiones: comienza con una fase de compresión seguida de una rarefacción o descompresión de amplitud (Johnson y Ripepe, 2011), y la duración de la coda es de unos pocos segundos a minutos (Sciotto, 2012). Están asociadas con erupciones estrombolianas y vulcanianas (Fee y Matoza, 2013) (Figuras 3.6 y 3.7).
- Jetting: están acompañadas de explosiones y presentan un infrasonido de banda ancha (Sciotto, 2012). Según Ruiz et al. (2006), jetting presentó codas de larga duración y comienzos de ondas emergentes que se observaron en la señal registrada del volcán Tungurahua.
- Tremor infrasónico: es una vibración continua por parte de la atmósfera que presenta frecuencias bajas (< 10 Hz) y pueden durar de segundos a meses (Sciotto, 2012).

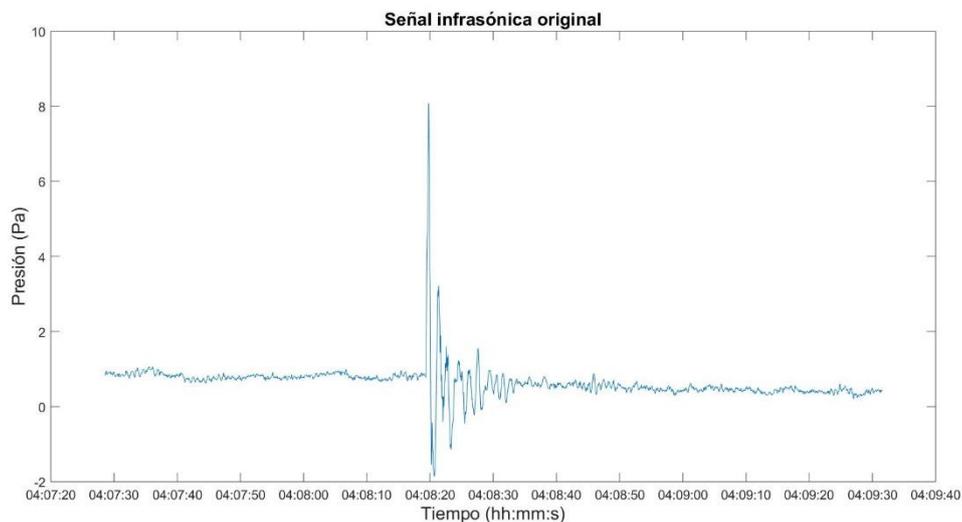


Figura 3.5: Registro infrasónico original del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la presión (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).

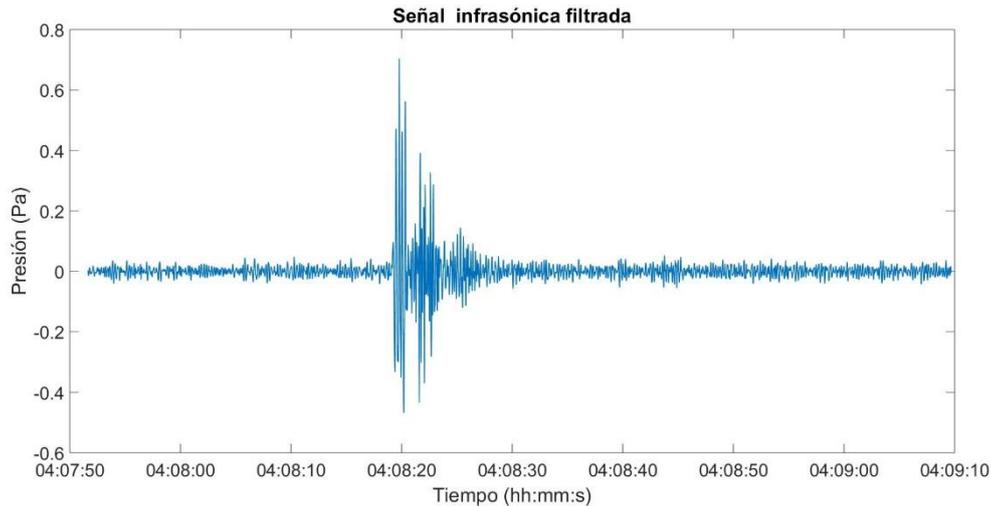


Figura 3.6: Registro infrasónico filtrado (0.5 a 15 Hz) del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC), obtenido a través de la estación REVS. El eje y es la presión (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm) (Tomado de la base del IG-EPN).

3.6 Estimación de energías

En el presente trabajo, se ha realizado una investigación de la actividad volcánica del Reventador a través del análisis de las señales infrasónicas y su relación con las señales sísmicas. La relación de las señales sísmicas y señales infrasónicas nos ayuda a disociar los procesos superficiales o subaéreos de los procesos netamente profundos (sísmicos) (Sciotto, 2012). Según Kobayashi et al. (2005); Garcés y McNutt (1997), los diversos procesos volcánicos producen señales sísmico-acústicas como por ejemplo el exceso de magma dentro del conducto, desgasificación explosiva y fenómenos de resonancia.

3.6.1 Estimación de la energía acústica

A partir de los registros de presión infrasónica, es fácil de evaluar la energía acústica emitida durante las erupciones volcánicas (Johnson y Aster, 2005).

La energía acústica se estimó, considerando la propagación del sonido lineal (exceso de presión infinitesimal con respecto a la presión ambiental), pero es concebible la propagación no lineal en el campo cercano para explosiones muy energéticas. (Johnson et al., 2005).

$$(1) \quad E_{acustica} = \frac{2\pi r^2}{\rho_a c_a} \int \Delta P(t)^2 dt$$

Donde:

r = Distancia desde la fuente al receptor

ρ_a = Densidad atmosférica

c_a = Velocidad media de la onda acústica

ΔP = Exceso de amplitud de presión

t = Tiempo de muestreo

$dt = 1 / \text{frecuencia de muestreo}$

3.6.2 Estimación de la energía sísmica

Según Johnson y Aster (2005), la energía sísmica incluye las ondas P, S y las ondas de superficie, y se calcula:

$$(2) \quad E_{sismica} = 2\pi r^2 \rho_e c_e \frac{1}{A(r)} \int S^2 U(t)^2 dt$$

Donde:

ρ_e = densidad del suelo.

c_e = asignación del valor de la onda P.

$A(r)$ = Atenuación.

S = respuesta del sitio.

U = velocidad de la partícula.

t = Tiempo de muestreo.

$dt = 1 / \text{frecuencia de muestreo}$.

$$(2.1) \quad A(r) = e^{(-\pi f r)/(c_e Q)}$$

Donde:

$A(r)$ = atenuación.

f = frecuencia.

r = radio.

c_e = asignación del valor de la onda P

Q = factor de calidad.

3.6.3 Estimaciones del VARS

Usando estimaciones de energía acústica (EA) y energía sísmica (ES) se calculó la razón de la ecuación (1) y (2), la misma que se conoce como VARS o η . Es un parámetro no dimensional que facilita información sobre las características del magma, la geometría del conducto y la fuente de erupción (Johnson y Aster, 2005).

Además, el VARS ofrece la posibilidad de facilitar la comparación del comportamiento explosivo en diferentes volcanes y examinar las condiciones cambiantes dentro de un conjunto de eventos explosivos en un solo volcán (Sciotto, 2012).

Debido a que el VARS es sensible a las estimaciones tanto de energía sísmica como acústica, es importante considerar los posibles errores asociados con cada cálculo de energía (Johnson y Aster, 2005).

$$(3) \quad \eta = \frac{E_A}{E_S}$$

Donde:

η = VARS (parámetro no dimensional).

E_A = Energía acústica (Joule).

E_S = Energía sísmica (Joule).

Capítulo 4- Resultados

En este capítulo se presentan y se detallan los resultados obtenidos para los periodos eruptivos establecidos en el Capítulo 2, Sección 2.4.4 (Marco Teórico). Se analizaron y se procesaron las señales sísmicas y acústicas en las componentes infrasónicas y sísmicas obtenidas de la estación REVS. Para cumplir este objetivo se desarrollaron códigos en Matlab para obtener las mayores amplitudes en cuentas de estas señales. Se trabajó con un número limitado de eventos para cada periodo, debido a que para algunas fechas no existen una de las dos componentes (BDF o HHZ), además un determinado grupo de datos tenían valores no apropiados ocasionados por la pérdida continua del funcionamiento de los equipos y otros factores que limitaron el número de eventos registrados.

Se realizó una comparación de señales para flujos piroclásticos y caídas de rocas durante el periodo febrero - agosto del 2017 en base a registros acústicos, sísmicos y fotografías adquiridas por la cámara visual ubicada en el sector COPETE. Se estableció este periodo debido a que el Reventador presentó una mayor actividad superficial según los reportes del IG-EPN.

Las energías acústicas y sísmicas se calcularon a partir de perfiles acústicos y sísmicos calibrados (Capítulo 3, Sección 3.7). Existieron variaciones de cálculo de estas energías tanto para la sismicidad e infrasonido. Las variaciones en los cálculos de las energías acústicas se relacionaron con el ruido, el mismo que generó dispersión en los valores. En cambio, las variaciones en las energías sísmicas se relacionaron con la respuesta de sitio y la atenuación que ocasionaron variaciones en los valores. Estas variaciones provocaron errores de aproximadamente el 20% en los cálculos de los valores del VASR (Johnson y Aster, 2005; Sciotto, 2012). Sumado a esto, se utilizó algunos parámetros fijados para las estimaciones de las energías, que se tomaron de datos de artículos científicos (e.g Palacios et al., 2016; Sciotto, 2012; Johnson y Aster, 2005).

4.1 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo mayo 2015 – junio 2016

La partición de la energía acústica y sísmica (VASR) arrojó 727 valores, de los cuales 100 de estos valores estaban en el rango de 10.82 - 2966.20. Esto sugiere que el volcán Reventador presentó una fuerte radiación acústica durante los periodos de desgasificación explosiva, relacionado: #1 un sistema de conducto abierto (Steele et al., 2014) o #2 la fuente se encontraba cerca de la superficie (Johnson y Aster, 2005). Los valores de VASR para ambos casos podrían estar relacionados con una actividad

explosiva, la cual genera flujos piroclásticos y/o caídas de rocas o una actividad efusiva con la generación de flujos de lava (Sciotto, 2012).

Los valores de VASR del resto de eventos se encontraron en el rango de 9.81 hasta 0.0001. Estos valores bajos sugieren: #3 el conducto se encontraba restringido debido a la presencia de roca densa que podría tapan dicho conducto y esto podría estar sustentado con la presencia de eventos sísmicos de baja frecuencia sin radiación de energía acústica (Steele et al., 2014). #4 Johnson y Aster (2005) sugieren que la fuente en ese período de tiempo se encontraba muy profunda. Para el caso #3 se tendrá una actividad explosiva con la generación de flujos piroclásticos, columnas de ceniza, emisiones de vapor y gases, mientras que para el caso #4 una actividad efusiva con la generación de flujos de lava (Sciotto, 2012; Johnson y Aster 2005), debido a que estos magmas presentan una baja viscosidad (Johnson, 2000; Mader, 2006; Sahetapy-Engel et al., 2008) y lo cual es muy acorde con la actividad del volcán Reventador. Por lo tanto, se sugiere que la radiación sísmica predominó a través del suelo (Steele et al., 2014).

La dispersión de los valores del VASR está representada mediante escala logarítmica en la Figura 4.1. No se observa una clara correlación de la partición de la energía sísmica y la energía acústica, sugiriendo que el volcán presentó cambios en el estilo eruptivo o cambios en la densidad de la pluma volcánica acorde con Johnson y Aster (2005) y Sciotto (2012).

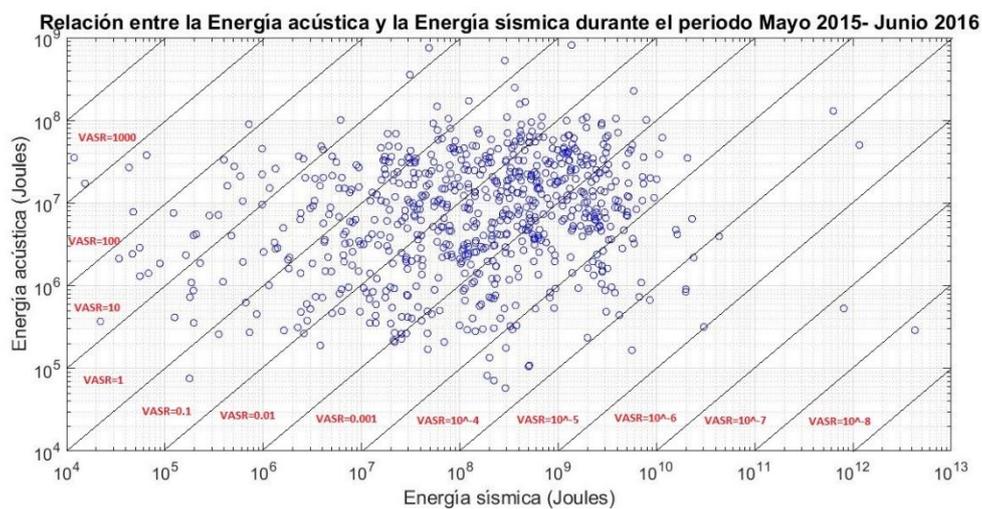


Figura 4.1: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS durante el periodo mayo 2015 – junio 2016.

4.2 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo julio 2016 – junio 2017

En el periodo julio 2016 – junio 2017 se obtuvieron 760 valores del VASR analizando las energías acústicas y sísmicas, de los cuales 47 de estos valores presentaban un rango en el VASR de 10.23 – 980.57, esto sugiere que en pocos momentos el volcán presentó un conducto abierto (Steele et al., 2014). Johnson y Aster (2005) sugieren que la fuente se encontraba cerca de la superficie. Para ambos casos se puede dar: #1 desgasificación muy fuerte durante la etapa explosiva con la generación de PDCs o #2 una etapa efusiva con generación de flujos de lava (Sciotto, 2012).

Los 713 valores restantes del VASR, son valores < 10 . Estos valores bajos sugieren que el conducto se encontraba bloqueado por una masa rocosa o que la fuente se encontraba demasiado profunda. Esto podría estar sustentado en la presencia de eventos sísmicos de baja frecuencia sin radiación de energía acústica (Johnson y Aster, 2005; Sciotto, 2012; Sahetapy-Engel et al., 2008).

En la figura 4.2 se representaron la relación entre la energía acústica y sísmica en escala logarítmica y no se observa una clara correlación de estas energías, sugiriendo que el volcán presentó cambios en la geometría del conducto o cambios en la densidad de la pluma volcánica acorde con Johnson y Aster (2005).

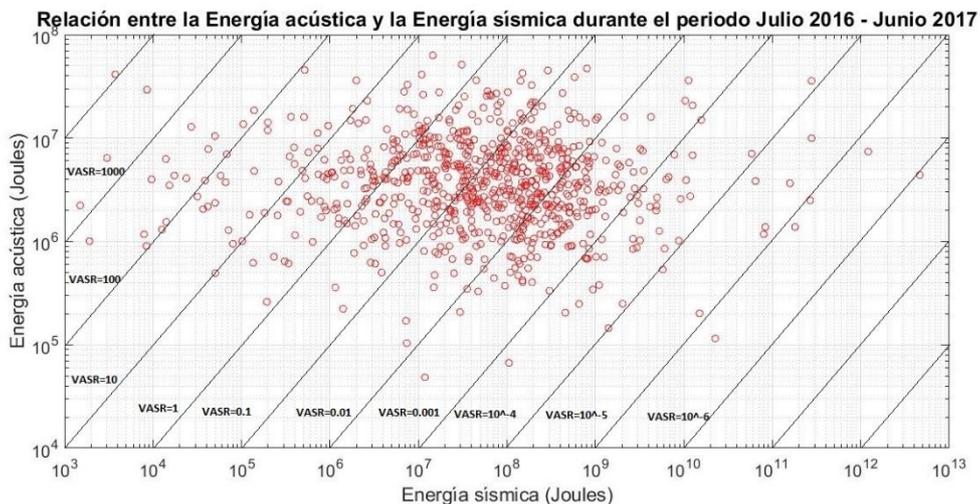


Figura 4.2: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS durante el periodo julio 2016 – junio 2017.

4.3 Relación entre la energía sísmica y acústica durante el periodo julio 2017 – diciembre 2017

Se obtuvieron 615 valores del VASR analizando las energías acústicas y sísmicas. De los valores calculados 511 tienen un rango entre 10.76 – 912.46. Estos valores altos del VASR sugieren que el volcán Reventador presentó una fuerte radiación acústica durante los períodos de desgasificación explosiva (Sciotto, 2012). Steele et al. (2014) sugieren que el volcán presentó un sistema de conducto abierto. En cambio, Johnson y Aster (2005) sugieren que la fuente podría estar localizada cerca de la superficie. Por tanto, para estos casos se puede dar una actividad explosiva con la generación de PDCs, caídas de rocas, columnas de gases y ceniza o una actividad efusiva con la generación de flujos de lava (Sciotto, 2012).

Los 104 valores restantes del VASR, son valores <10. Estos valores sugieren: #1 la fuente se encontraba a profundidad (Johnson y Aster, 2005) o #2 el conducto estaba tapado por una roca densa (Steele et al., 2014). Por lo tanto, para el caso #1 el volcán puede presentar una actividad efusiva con la generación de flujos de lava, mientras que para el caso #2 el volcán puede presentar una actividad explosiva con la generación de PDCs, caídas de rocas, columnas de ceniza y gases acorde con lo mencionado por Sciotto (2012).

En la figura 4.3 se representaron la relación entre la energía acústica y sísmica en escala logarítmica y no se observa una clara correlación entre estas energías, sugiriendo que el volcán presentó cambios en la geometría del conducto y/o en la fricción de las paredes (Johnson y Aster, 2005).

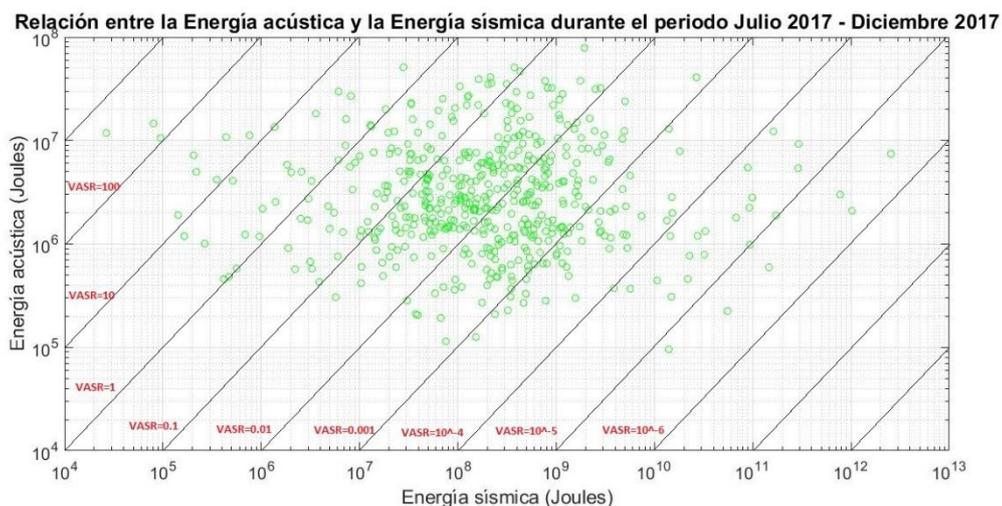


Figura 4.3: Relación entre la energía sísmica (eje x) y acústica (eje y) de las explosiones calculado para la estación REVS para el periodo julio – diciembre 2017.

4.4 Relación entre la energía acústica y sísmica durante los periodos mayo 2015 - junio 2016, julio 2016 - junio 2017 y julio 2017 - diciembre 2017

Se realizó una comparación de la partición de la energía acústica y sísmica durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017. Esta comparación se hizo mediante el cálculo de los percentiles 5, 50 y 95 para los tres periodos, los cuales se ven reflejados en las líneas largas y también los percentiles 34, 50 y 67 para los tres periodos, los cuales se ven reflejadas en las líneas pequeñas de mayor grosor (Figura 4.4).

En la tabla 4.1 se detalla el tipo de actividad durante los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016- junio 2017 y julio – diciembre 2017.

Periodo	Duración Estimada	Tipo de actividad
Periodo 1	Mayo 2015 - Febrero 2016	Explosiva
Periodo 2	Julio 2016 – Junio 2017	Efusiva
Periodo 3	Julio 2017 – Diciembre 2017	Explosiva

Tabla 4. 1: Tabla con los periodos, duración estimada y tipo de actividad del volcán Reventador durante el estudio realizado.

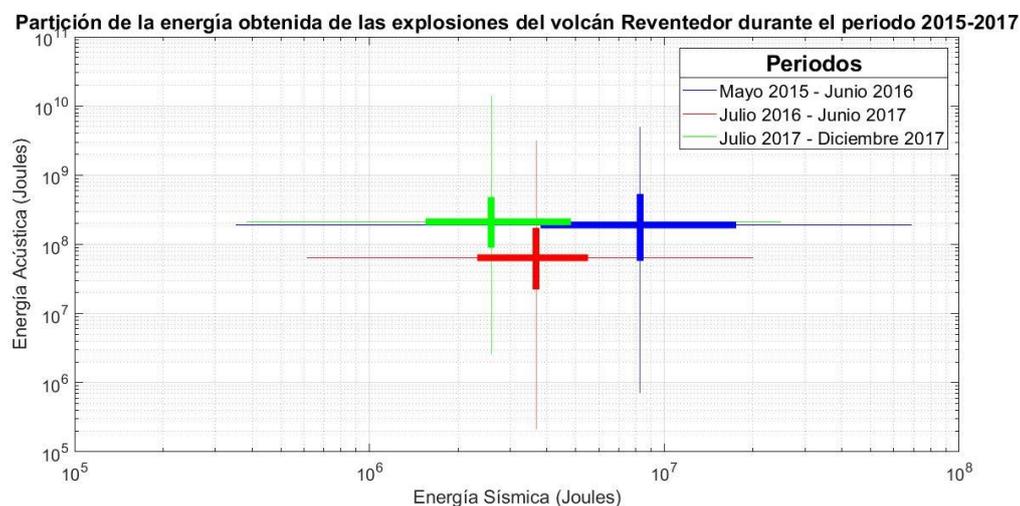


Figura 4.4: Partición de la energía sísmica y la energía acústica durante los periodos mayo 2015- junio 2016 (azul), julio 2016 – junio 2017 (rojo) y julio – diciembre del 2017 (verde). Se calculó los percentiles 5 y 95 para los tres periodos, los cuales se ven reflejados en las líneas largas. También se calcularon los percentiles 34 y 67 para los tres periodos, los cuales se ven reflejadas en las líneas pequeñas de mayor grosor. Energía Sísmica (eje x) y Energía Acústica (eje y).

Periodo 1 (mayo 2015 – junio 2016)

La partición de la energía acústica y la energía sísmica en el periodo 1 (azul) presentaron valores altos de VASR relacionados con una actividad explosiva (Figura 4.4). Durante este periodo se observaron dos ventos en el volcán Reventador. Estos dos ventos posiblemente se formaron debido a que el magma que se encuentra en profundidad contenía un exceso de volátiles, lo que habría causado una sobrepresión y la salida del magma a través del conducto volcánico. El magma del volcán Reventador al ser viscoso, podría ascender por descompresión a través del conducto y llegar a la superficie de fragmentación. En este nivel la expansión de gas es muy violenta y podría provocar que el magma sea expulsado a la superficie. Como las explosiones suelen ser muy fuertes, el magma no puede escapar por el viento central entonces encuentra otras rutas para ser expulsado del edificio volcánico, originando los ventos secundarios (Mader, 2006). Por lo tanto, se puede inferir que las señales sísmicas y acústicas que se recibieron en la estación REVS se originaron en estos dos ventos.

Periodo 2 (julio 2016 – junio 2017)

En el periodo 2 (rojo) presenta una menor energía acústica en comparación con los periodos 1 y 3 (Figura 4.4), en donde la etapa explosiva se mantuvo con explosiones pequeñas a moderadas y la etapa efusiva incrementó. Este cambio drástico en el estilo de erupción se sugiere que se debió a que la temperatura en la cámara magmática aumentó producto de la mezcla de magmas de composición y una temperatura constante, esto implica que la viscosidad y el contenido de sílice del magma disminuyeran causando una reducción en la presión (Heiken & Eichelberger, 1980). Otra sugerencia es que la fuente se movió a una mayor profundidad, debido a que durante la fase explosiva la fuente se encontraba cerca de la superficie. Por lo tanto, se concluye que la fuente en el volcán Reventador es móvil (Ortiz et al., 2018; Sciotto, 2012). Estas hipótesis se sustentan en base a los reportes del IG-EPN. Además, los valores del VASR son bajos en comparación con el periodo 1.

Periodo 3 (julio 2017 – diciembre 2017)

En el periodo 3 (verde) la etapa explosiva se reanudó y la etapa efusiva disminuyó. Los dos ventos reportados durante los periodos anteriores habían desaparecido y se reportaron explosiones fuertes y mayor cantidad de flujos piroclásticos (IG-EPN, Informe 2017-01, Reporte de erupción del volcán Reventador). Este periodo se caracterizó por

presentar mayor energía acústica en comparación con el periodo 2 y menor energía sísmica que los periodos 1 y 2 (Figura 4.4). Esto se pudo deber a que durante la fase lenta de extrusión de magma (etapa efusiva), reportada en el periodo anterior, se produce una desgasificación y cristalización causado por un sub- enfriamiento, aumentando la viscosidad del magma. Esto puede originar un tapón de magma que impide el ascenso del mismo causando un aumento de presión. Posteriormente, la presión se libera expulsando el tapón y generando una erupción explosiva (Mader, 2006; Sahetapy-Engel et al., 2008).

Además, los valores de VASR calculados para esta etapa son altos y podemos considerar que el volcán Reventador debió presentar una fuerte radiación acústica durante los períodos de desgasificación explosiva. Esto puede ocurrir debido a que la actividad volcánica actúa mediante un sistema de conducto abierto (Steele et al., 2014; Sciotto, 2012).

4.5 Interpretación de señales sísmicas y acústicas de flujos piroclásticos (PDC) y caídas de rocas durante el periodo febrero – agosto 2017

Con el objetivo de determinar a qué producto volcánico corresponden las señales infrasónicas y sísmicas del volcán Reventador estudiadas en esta investigación (Sección 4.1), se determinó el tiempo de arribo de las ondas acústicas y ondas sísmicas respectivamente, las mismas que fueron filtradas en diferentes bandas de frecuencia.

En el momento de realizar el filtrado de las señales infrasónicas y señales sísmicas, las amplitudes se vieron afectadas notablemente por este filtrado, por lo cual se tomaron las amplitudes de las señales originales.

Para corroborar la correspondencia de estas señales con la actividad superficial, se analizaron espectros infrasónicos, espectros sísmicos de las señales antes mencionadas e imágenes visuales obtenidas de la cámara fija de video COPETE, ubicada en el sector del mismo nombre a 5.2 km al SE del cráter del volcán. La selección de las mejores imágenes arrojó un total de 21 eventos que se estudiaron en este periodo. Estos se interpretaron según su mes, día y hora de registro en UTC (Universal Time Coordinated).

Cabe mencionar, que el tiempo de arribo de las señales infrasónicas y señales sísmicas con respecto al tiempo de las imágenes seleccionadas, presentan una diferencia de 1 a 5 minutos. Esto se debe a que el proceso de almacenamientos de las imágenes se realiza cada 5 minutos. Además, el registro de la señal sísmica llega antes que el registro

de la señal infrasónica, esto se debe a que la onda sísmica viaja a una velocidad de $\sim 2500 \frac{m}{s}$ a través del suelo, mientras que la onda infrasónica viaja a una velocidad de $\sim 343 \frac{m}{s}$ a través de la atmósfera (Johnson y Aster, 2005) y la diferencia promedio entre los arribos de la señal sísmica y la señal acústica es de ~ 14 segundos.

Con los datos mencionados, se realizó una identificación y descripción entre corriente de densidad piroclástica (PDC) y caída de rocas acorde con lo mencionado por Johnson y Ronan (2015), Yamasato (1997), Jolly et al. (2002), Oshima y Maekawa (2001), Palacios et al. (2016), Moran et al. (2008) y Allstadt et al. (2018).

Febrero 2017

Durante el mes de febrero se describen tres eventos.

Evento #1: 2017 02 07 – 04:09:05 (UTC)

La imagen muestra material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento. La mayor incandescencia se visualiza a lo largo de los flancos E, SE y visiblemente a lo largo de los flancos S y NE (Figura 4.5). No se visualiza la dirección de propagación de la columna eruptiva.



Figura 4.5: Imagen del 7 de febrero a las 04:09:05 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.6).

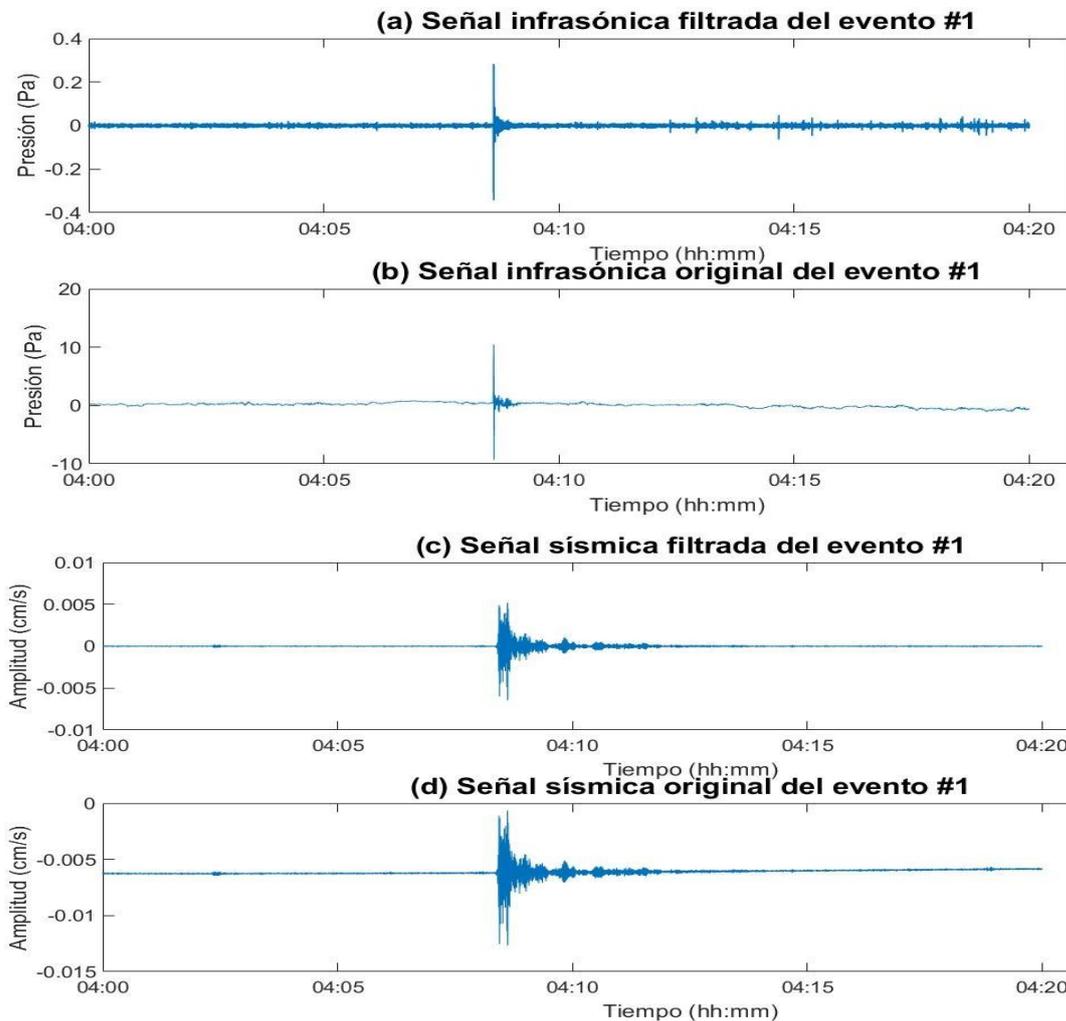


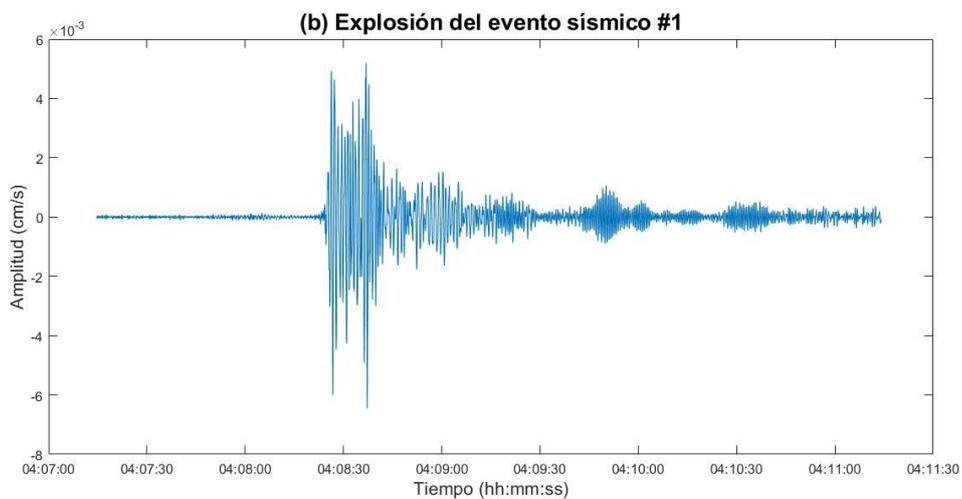
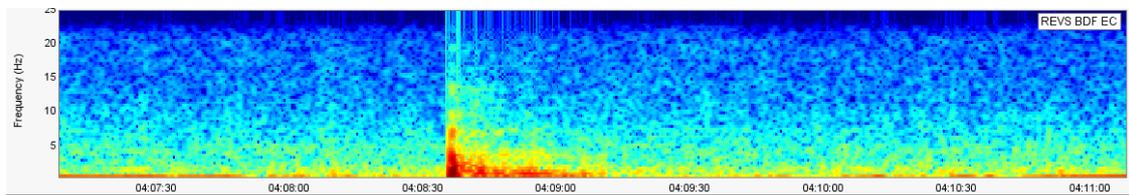
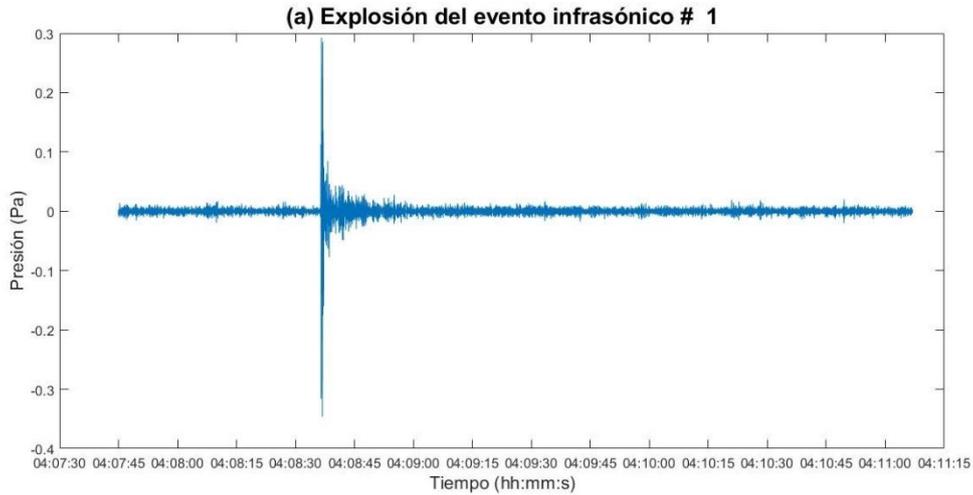
Figura 4.6: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #1

Este es un evento de caída de rocas que se presume se inició alrededor de las 04:09:30 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 04:09:40 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos y una amplitud máxima de 10.4 Pa (Figura 4.6b) del evento infrasónico. Las frecuencias correspondientes al infrasonido son relativamente bajas para la caída de rocas (< 5 Hz) y pueden verse afectadas por la atenuación del infrasonido (Figura 4.7a).

En cambio, el evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.0052 (cm/s) (Figura 4.6c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de aproximadamente 5 Hz. La caída de rocas se sugiere que inició alrededor de las 04:09:10 (hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 04:09:20 (hh: mm: ss). Además, la señal sísmica llega ~10 segundos antes que la señal infrasónica (Figura 4.7b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 750 metros a lo largo del flanco E del volcán.



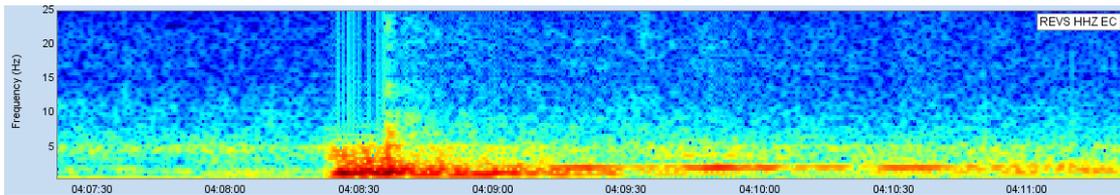


Figura 4.7: a) Registro infrasónico del Evento #1 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #1 registrado de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #2: 2017 02 07- 11:06:00 (UTC)

La imagen muestra un PDC a lo largo del flanco E. La columna eruptiva tiene una altura mínima de 2 km con una dirección de propagación al NW (Figura 4.8).



Figura 4.8: Imagen del 7 de febrero a las 11:06:00 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un PDC a lo largo del flanco E (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.9).

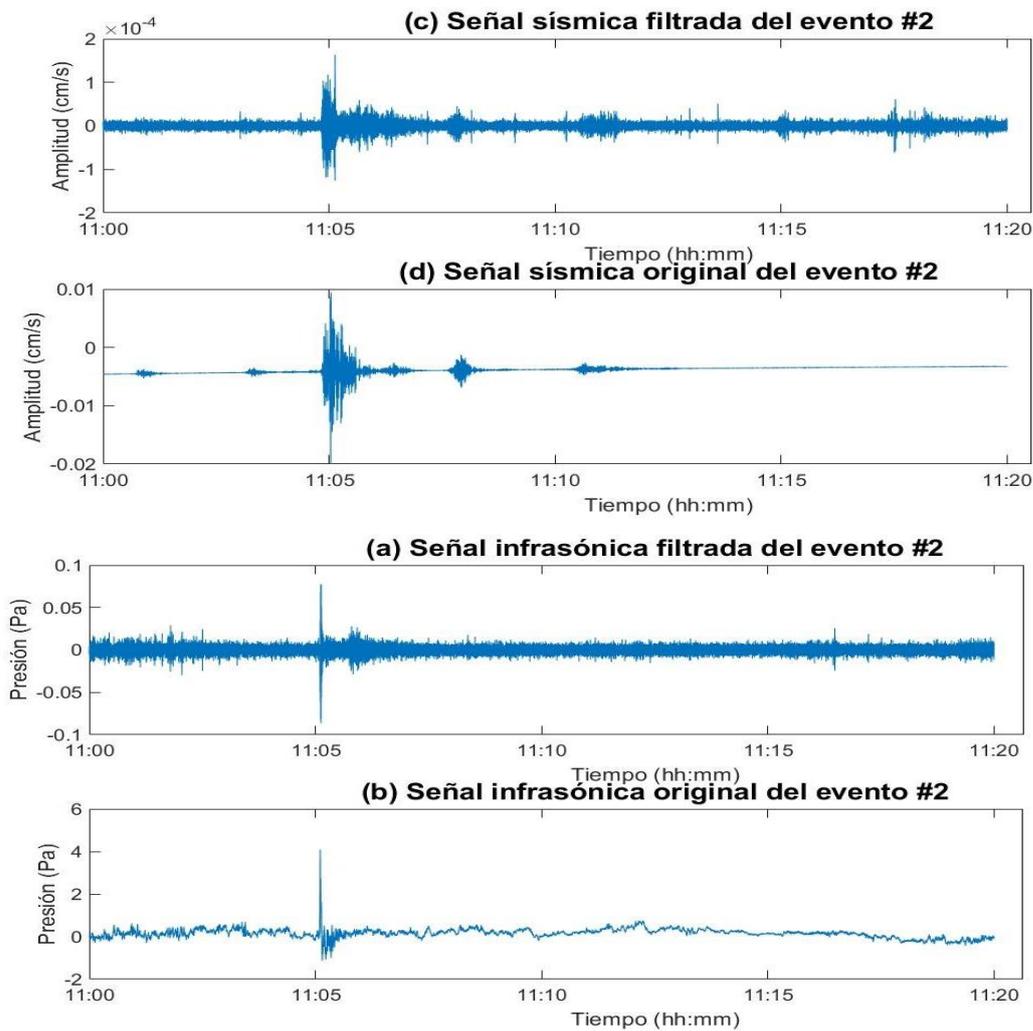


Figura 4.9: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #2

Se realizó una magnificación del evento infrasónico, en la que se registró una explosión con una amplitud máxima de 4 Pa (Figura 4.9b). La parte posterior del infrasonido se trataría de una PDC que se presume inició alrededor de las 11:05:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 11:06:00 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es <5 Hz (Figura 4.10a).

La señal sísmica arribó ~15 segundos antes que la señal infrasónica y se registró una amplitud máxima de 0.000124 (cm/s) (Figura 4.9c). El PDC se presume que inició alrededor de las 11:05:30 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 11:05: 45 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. El espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de aproximadamente 5 Hz (Figura 4.10b).

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica (PDC) se estima que fue de 800 metros a lo largo del flanco E del volcán.

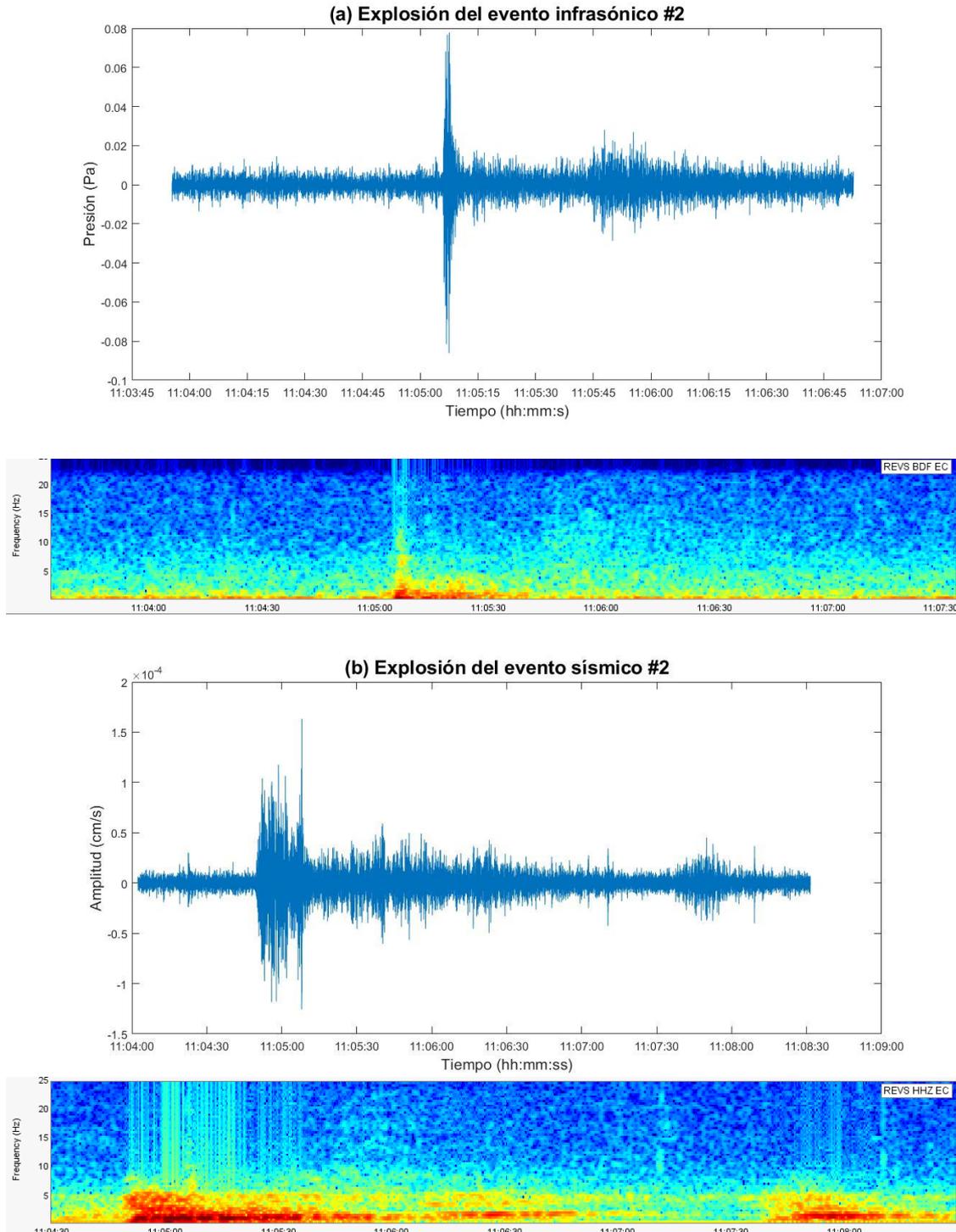


Figura 4.10: a) Registro infrasónico del Evento #2 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #2 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento # 3: 2017 02 08- 08:15:57 (UTC)

En la imagen se puede observar claramente material incandescente a lo largo de los flancos S, SE, E y visiblemente a lo largo del flanco NE. No se visualiza material incandescente en el vento y tampoco la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.11).



Figura 4.11: Imagen del 8 de febrero a las 08:15:57 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E y visiblemente en el flanco NE.

(Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.12).

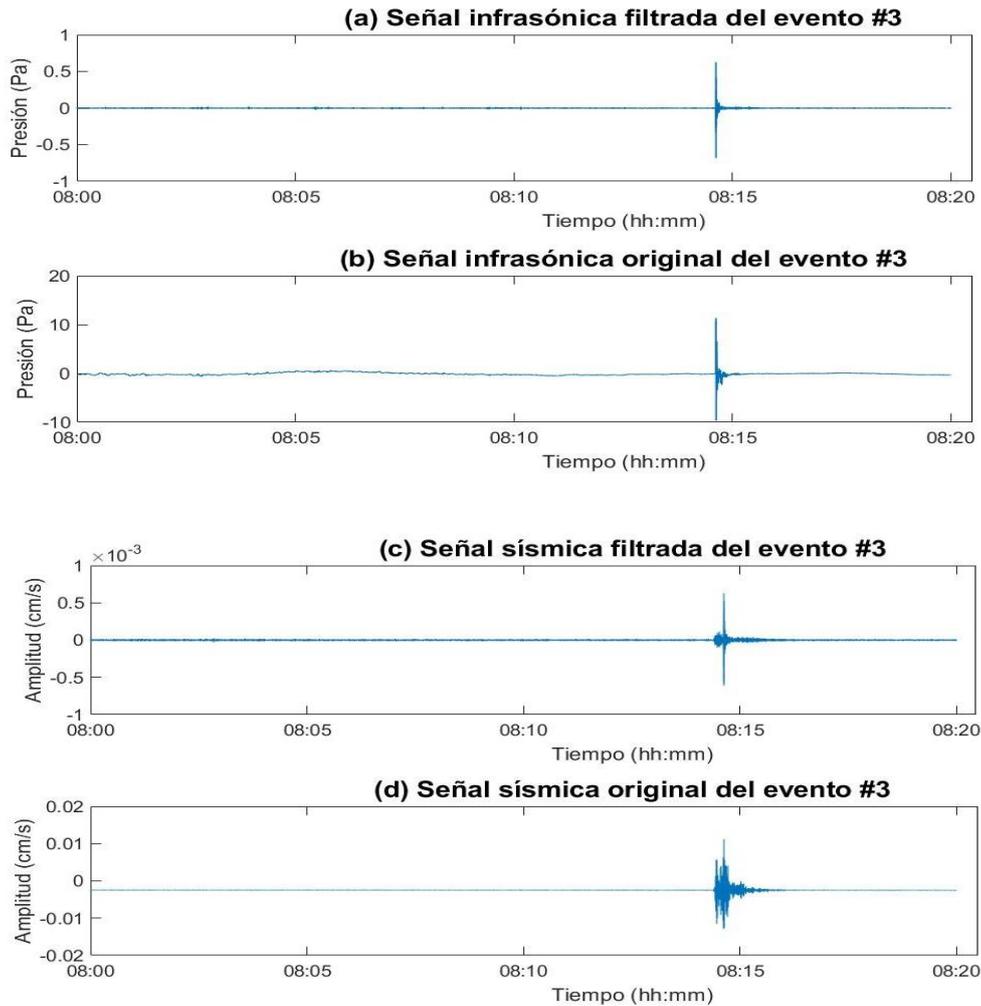


Figura 4.12: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #3

Este es uno de los eventos de caída de rocas más grandes en términos de amplitud (11.3 Pa) (Figura 4.12b) y duración de la señal. No se logra visualizar a detalle el tiempo de inicio de la caída de roca para la señal infrasónica. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es de <10 Hz (Figura 4.13a).

El evento sísmico se registró en una ventana de tiempo de 150 segundos con una amplitud máxima de 0.0129 (cm/s) (Figura 4.12d) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es < 15 Hz. Esta caída de rocas se presume comenzó alrededor de las 08:14:50 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 08:15:00 (UTC - hh: mm:

ss), con una duración de ~15 segundos. El tiempo de arribo de la señal sísmica fue ~15 segundos antes que la señal infrasónica (Figura 4.13b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 750 metros a lo largo del flanco E del volcán.

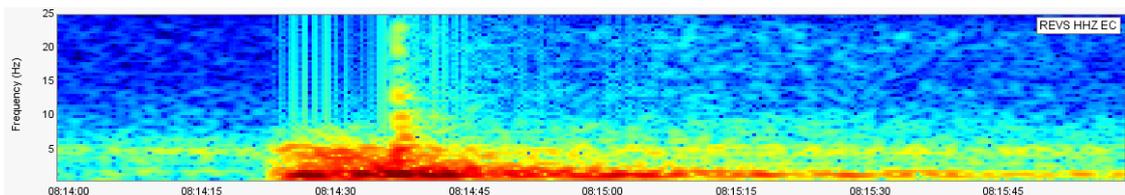
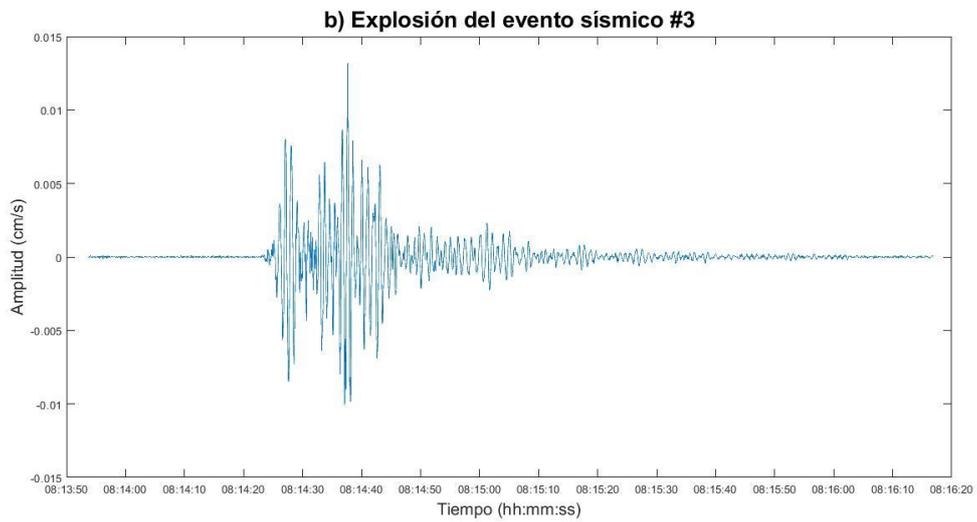
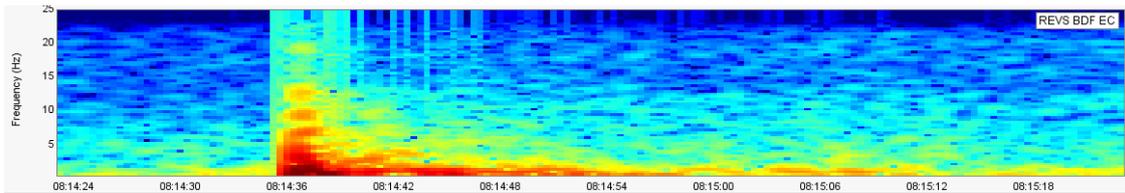
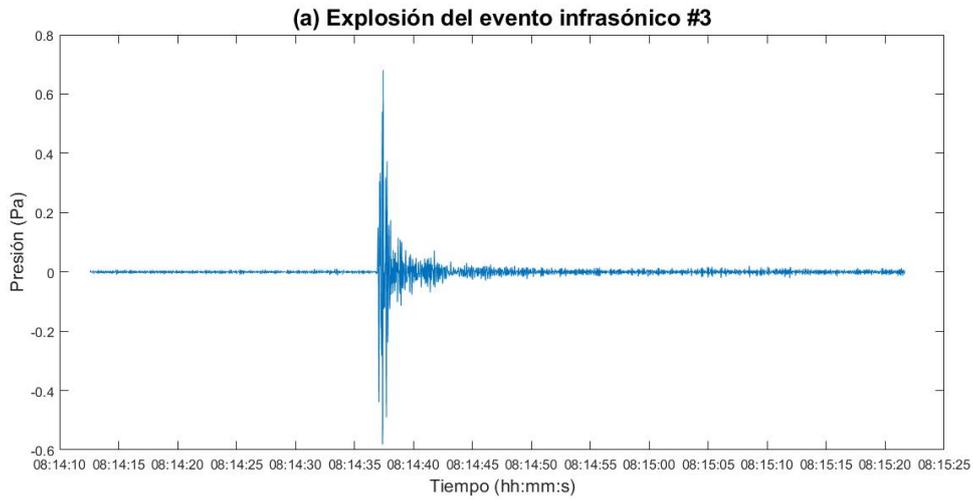


Figura 4.13: a) Registro infrasónico del Evento #3 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #3 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Marzo

Durante el mes de marzo se describe 1 evento.

Evento #4: 2017 03 11 – 01:33:00 (UTC)

En la imagen se observa material incandescente a lo largo del flanco S del volcán e incandescencia en el viento. La columna eruptiva alcanza una altura mínima de 2 km en la dirección NW (Figura 4.14).



Figura 4.14: Imagen del 11 de marzo a las 01:33:05 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.15).

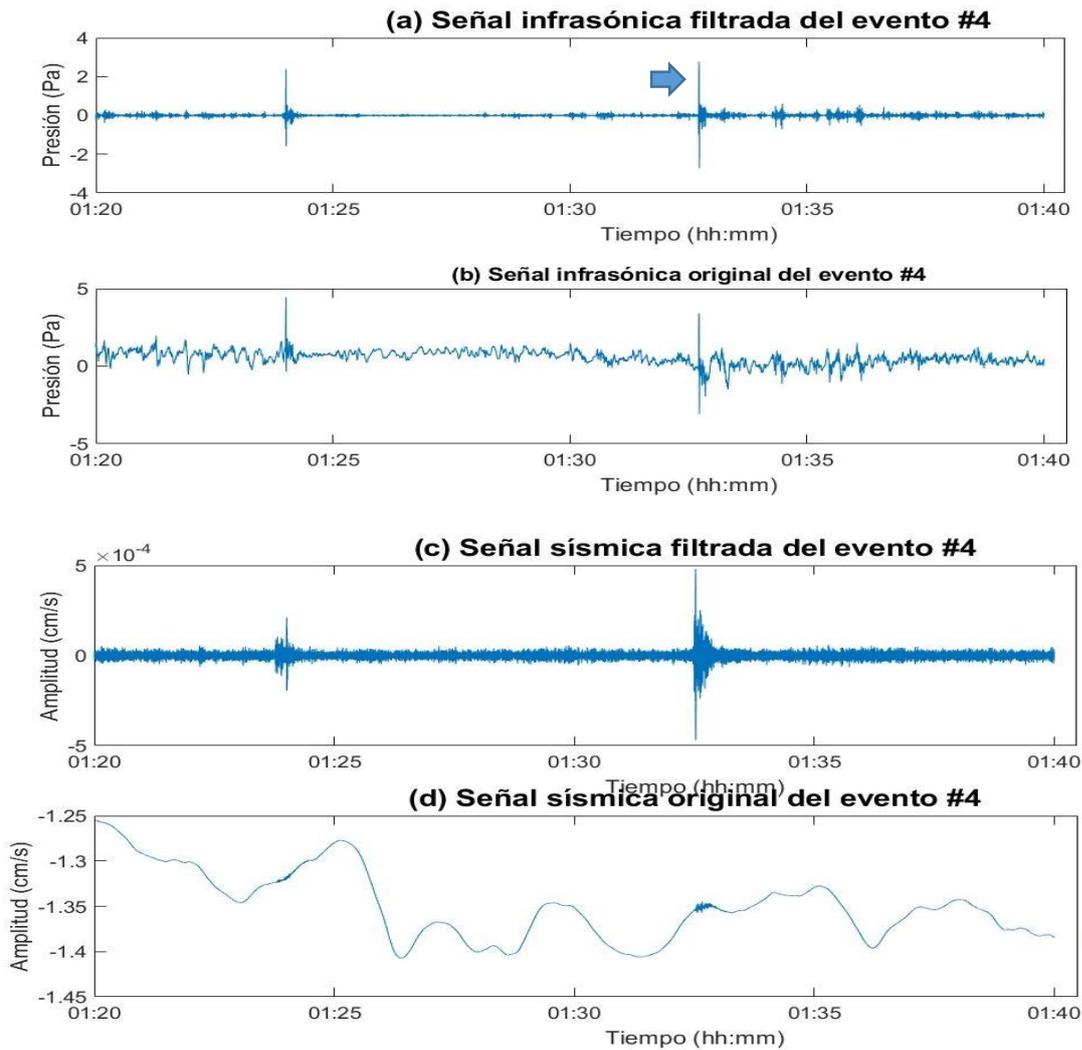


Figura 4.15: **(a)** Señal filtrada de 3 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(b)** Señal original del evento infrasónico. **(c)** Señal filtrada de 7 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(d)** Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #4

Este es un evento de caída de rocas que presenta una amplitud máxima de 3.3 Pa (Figura 4.15b) y se sugiere que se registró alrededor de las 01: 33: 10 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 01: 33:20 (UTC – hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. Este evento tiene una amplitud y una duración menores al evento #2. Las frecuencias correspondientes del infrasonido son relativamente bajas (<5 Hz) (Figura 4.16a).

En cambio, el evento sísmico presenta una amplitud de 0.0004 (cm/s) (Figura 4.15c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz. Se sugiere que la

caída de roca para el evento sísmico se registró alrededor de las 01: 33: 00 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 01: 33:10 (UTC – hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. El registro sísmico arribó ~15 segundos antes que el registro infrasónico (Figura 4.16b).

La distancia que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 750 metros a lo largo del flanco S del volcán.

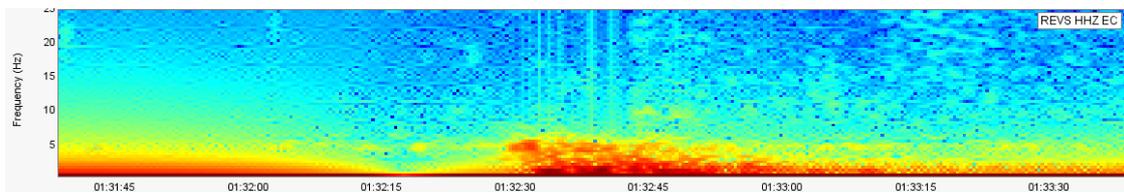
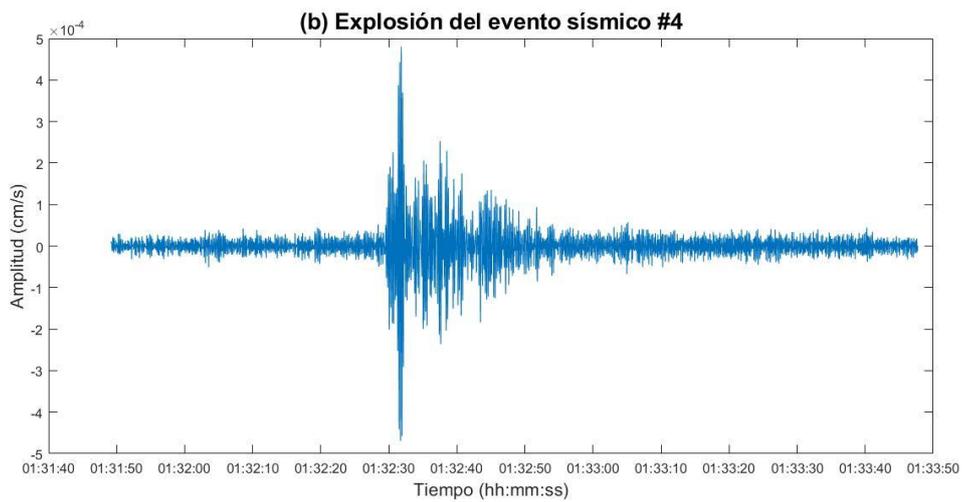
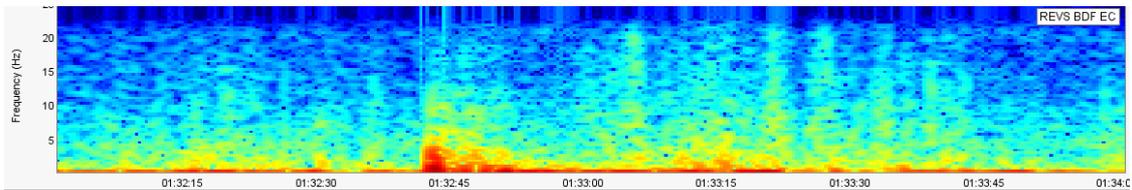
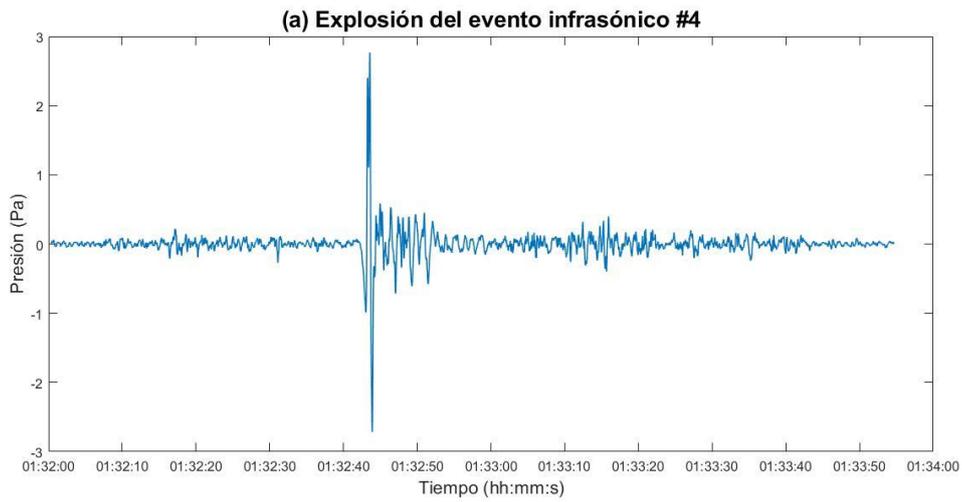


Figura 4.16: a) Registro infrasónico del Evento #4 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #4 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Abril

Durante el mes de abril se describen tres eventos.

Evento #5: 2017 04 03 - 04:08:18 (UTC)

En la imagen se logra observar gran cantidad de material incandescente a lo largo del flanco S y visiblemente a lo largo del flanco SE. Además, se observa incandescencia en el viento y no se visualiza con detalle la propagación de la columna eruptiva (Figura 4.17).



Figura 4.17: Imagen del 03 de abril a las 04:08:18 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S, SE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.18).

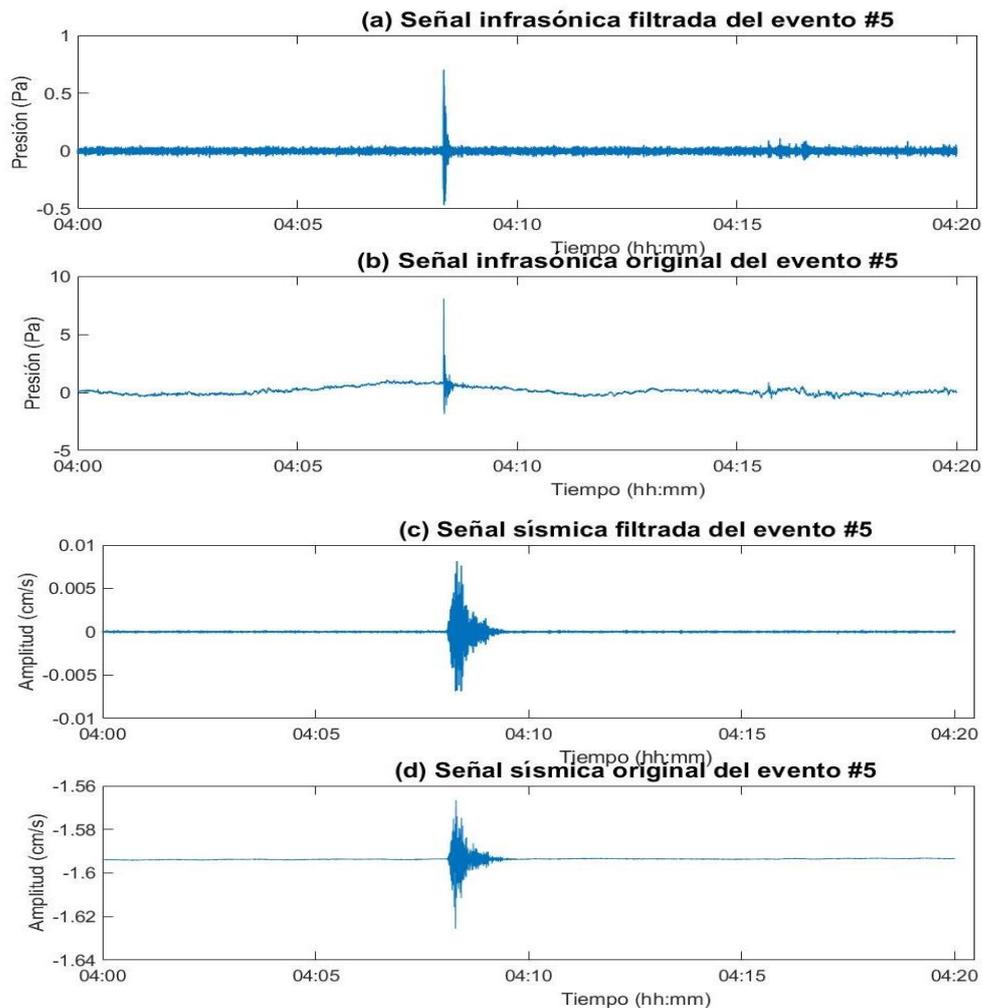


Figura 4.18: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #5

Se registró una gran explosión en términos de amplitud de 8.1 Pa (Figura 4.18b). Posterior a la explosión se presentó un PDC que se sugiere que inició alrededor de las 04:09:00 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 04:09:15 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. La amplitud que se registró en este evento es mayor a las amplitudes registradas en los eventos #2 y #4. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es de aproximadamente 5 Hz (Figura 4.19a).

Por otro lado, el evento sísmico se registró con una amplitud máxima de 0.0071 (cm/s) (Figura 4.6c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es ~10 Hz. Se sugiere que el PDC se registró alrededor de las 04:08:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó

alrededor de las 04:09:00 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos El registro sísmico arribó ~15 segundos antes que el registro infrasónico (Figura 4.19b).

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica (PDC) se estima que fue de 700 metros a lo largo del flanco S del volcán.

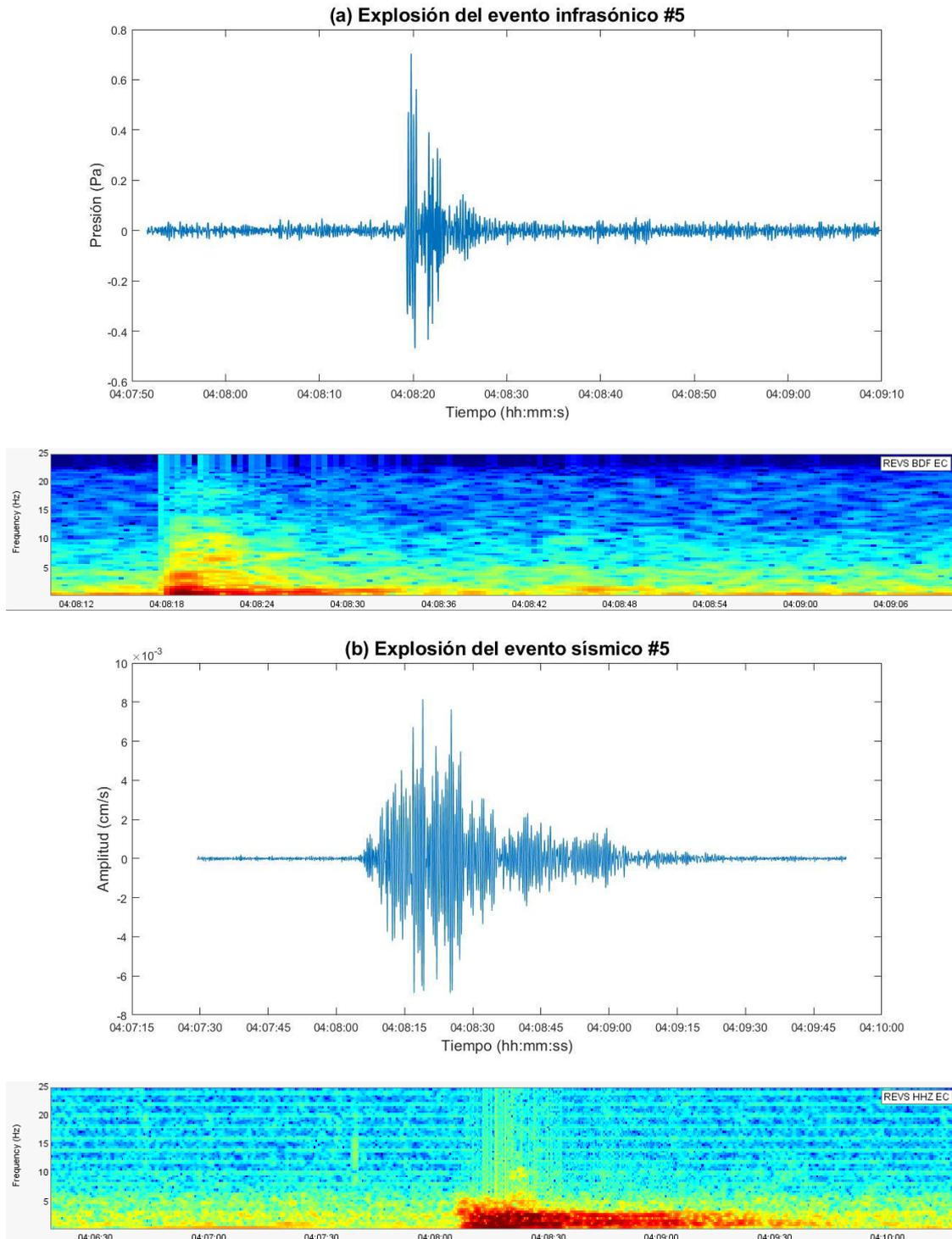


Figura 4.19: a) Registro infrasónico del Evento #5 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los

rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #5 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #6: 2017 04 03 - 06:17:59 (UTC)

En la imagen se puede apreciar material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento. La columna eruptiva tiene una altura mínima de 3 km en la dirección NW (Figura 4.20).



Figura 4.20: Imagen del 03 de abril a las 06:17:59 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.21).

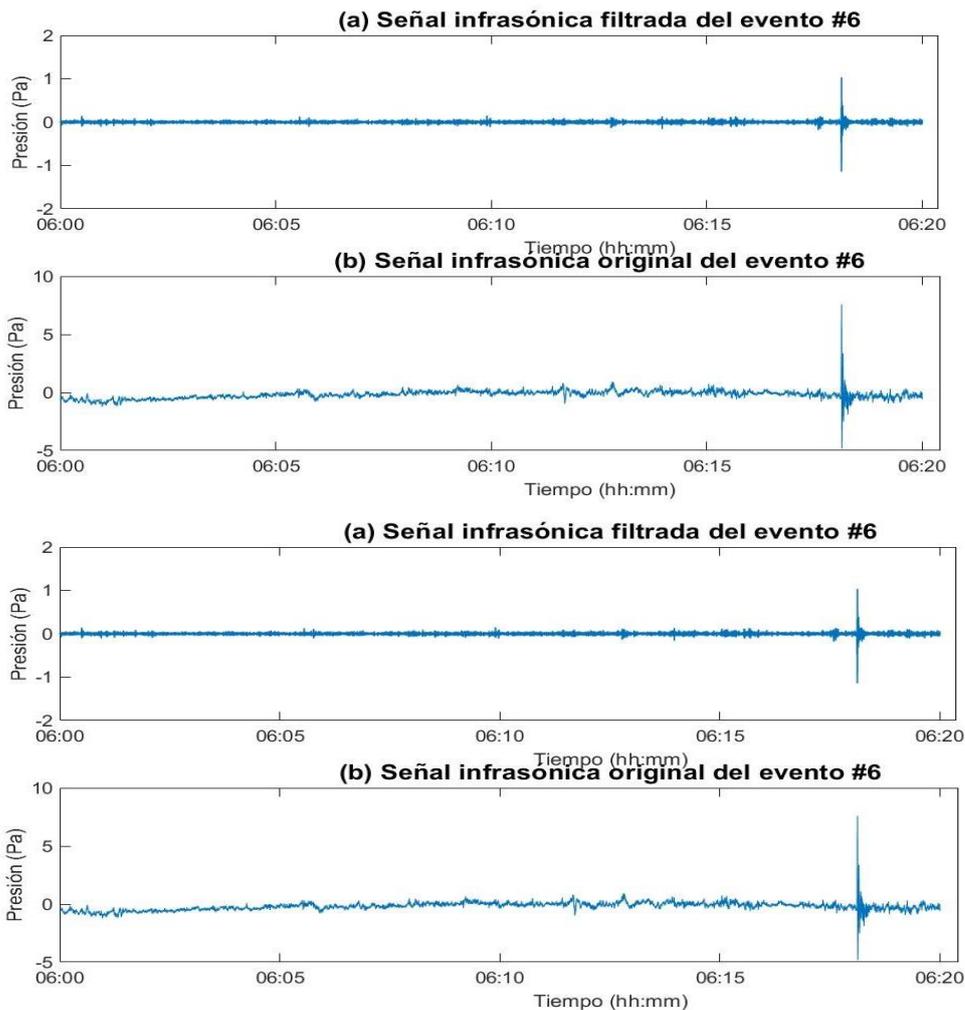


Figura 4.21: (a) Señal filtrada de 5 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #6

Evento de corriente de densidad piroclástica (PDC) que se sugiere se registró a las 06:19:05 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó 06:19:20 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos y una amplitud máxima de 7.6 Pa (Figura 4.21b). Comparado con el evento #5 presenta una disminución de la amplitud, mientras que su duración es similar. Su espectro de frecuencia es de aproximadamente 5 Hz (Figura 4.22a).

La señal sísmica arribó ~15 segundos antes que la señal infrasónica y se registró una amplitud máxima de 0.0044 (cm/s) (Figura 4.21c). El PDC se sugiere que se registró alrededor de las 06:18:50 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó 06:19:05 (UTC - hh: mm: ss) con

una duración de ~15 segundos. El espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica ~5 Hz (Figura 4.22b)

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica (PDC) se estima que fue de 730 metros a lo largo del flanco S del volcán.

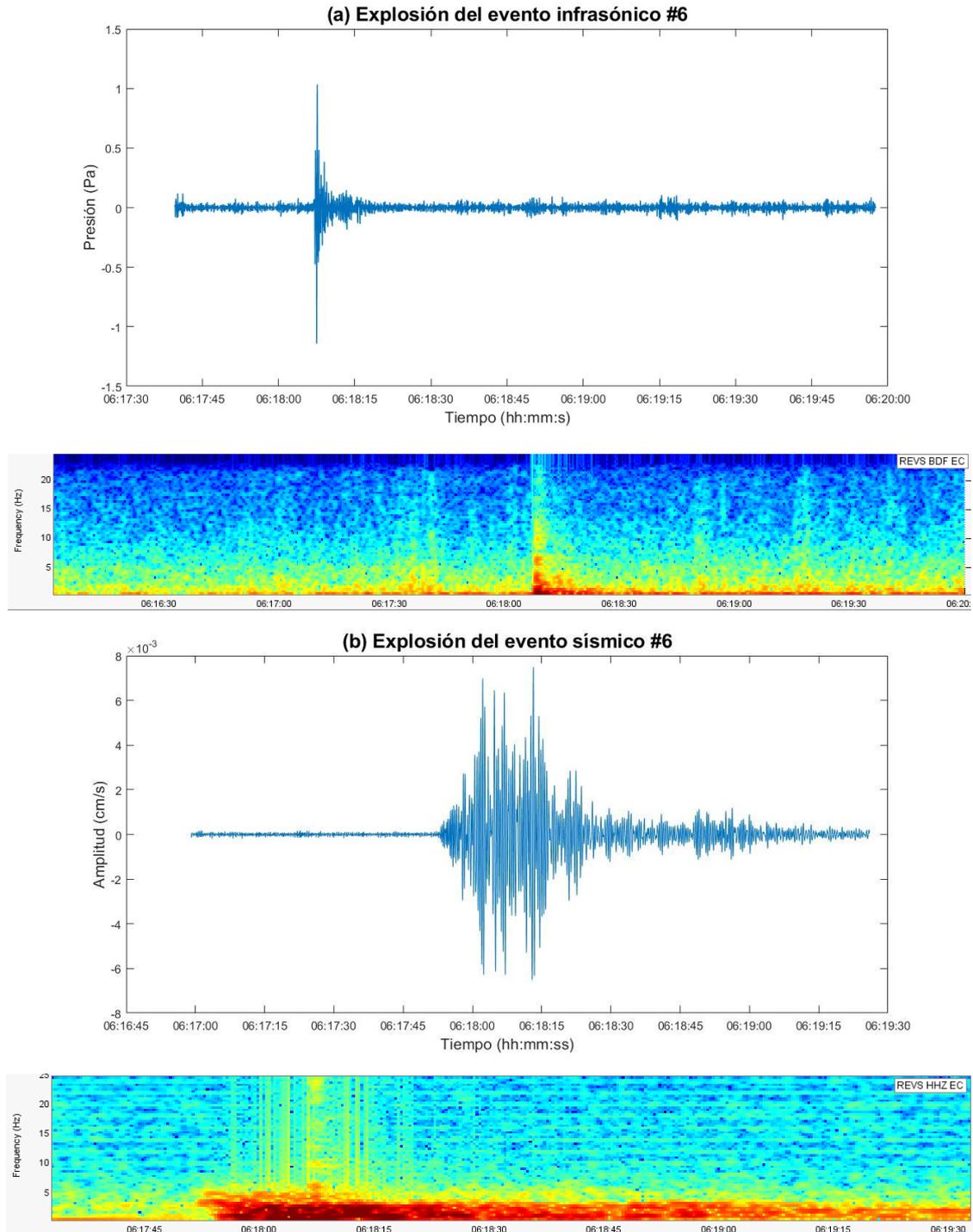


Figura 4.22: a) Registro infrasónico del Evento #6 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de

frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #6 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #7: 2017 04 26 - 00:17:18 (UTC)

En la imagen se logra observar gran cantidad de material incandescente descender a lo largo del flanco S y cantidades menores de materiales incandescentes a lo largo de los flancos SE, E y NE. Se observa incandescencia en el viento y no se visualiza la columna eruptiva (Figura 4.23).



Figura 4.23: Imagen del 26 de abril a las 00:07:18 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.24).

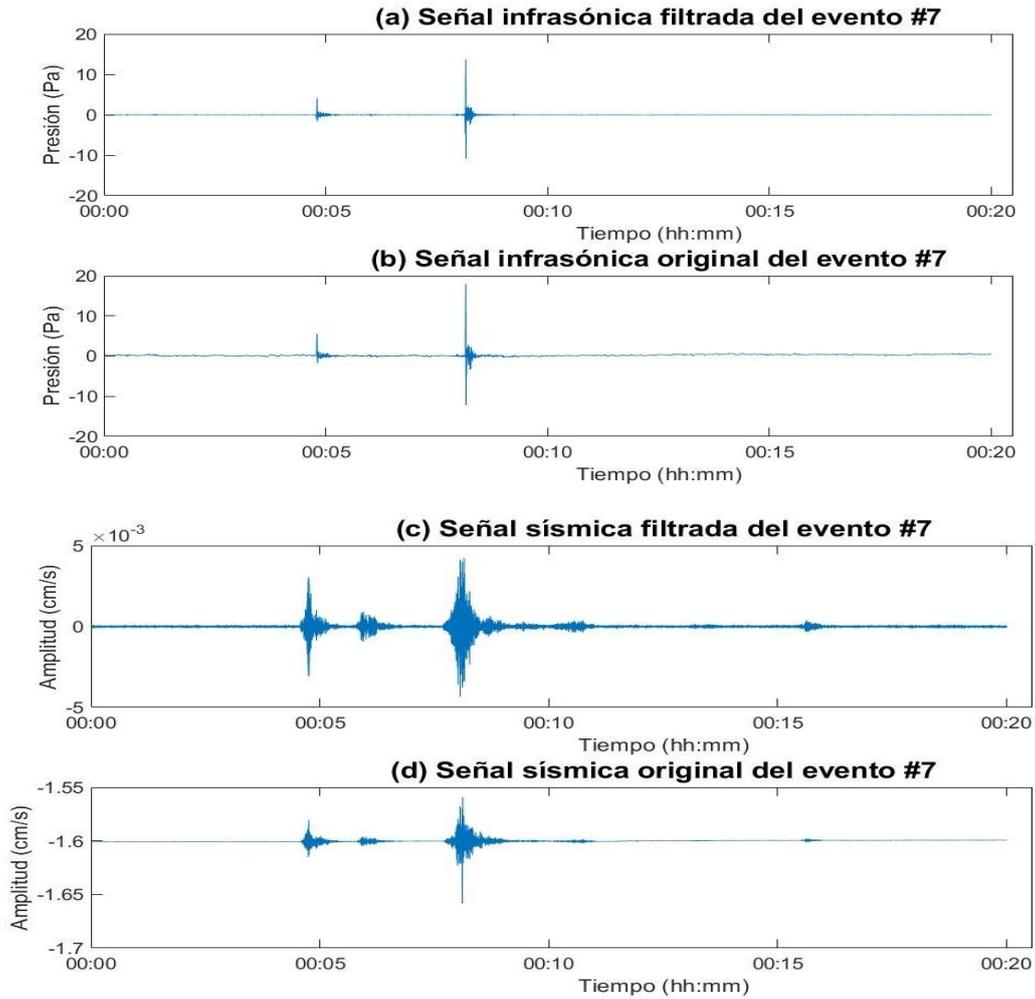


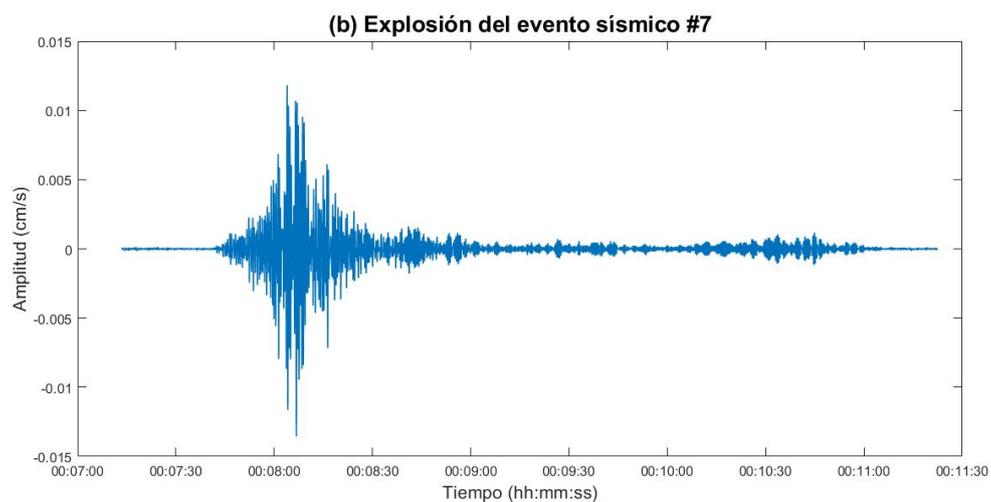
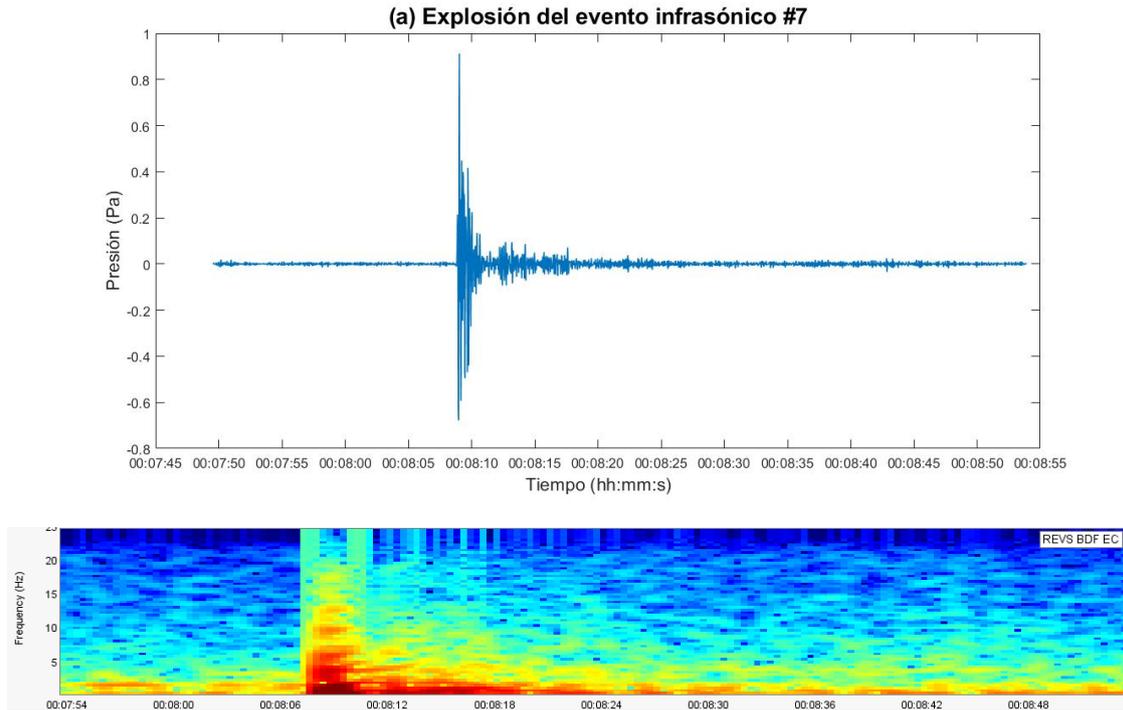
Figura 4.24: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #7

Este es un evento de caída de rocas que se sugiere se registró a las 00:08:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 00:09:00 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos y con amplitud máxima de 17.6 Pa (Figura 4.24b) del evento infrasónico. Las frecuencias correspondientes al infrasonido son < 15 Hz (Figura 4.25a). Comparada con el evento #1 y el evento #3 que también son caídas de rocas presenta una amplitud mucho mayor pero una duración menor.

En cambio, el evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.005 (cm/s) (Figura 4.24c)/ y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es < 10 Hz. Se sugiere que la caída de rocas inició alrededor de las 00:08:30 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 00:08:45 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~ 15 segundos. Además, la señal sísmica llega ~ 10 segundos antes que la señal infrasónica (Figura 4.5.25b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 600 metros a lo largo del flanco S del volcán.



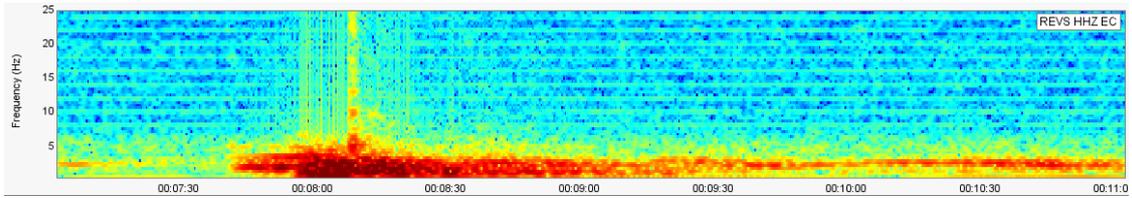


Figura 4.25: a) Registro infrasónico del Evento #7 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #7 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Mayo

Durante el mes de mayo se describieron cinco eventos.

Evento# 8: 2017 05 09 - 04:28:02 (UTC)

La imagen muestra el momento justo que el volcán está emanando material incandescente descender por los flancos S, SE y E. Además, el viento presenta incandescencia y se visualiza la propagación de la columna eruptiva verticalmente con una altura mínima de 3 km (Figura 4.26).



Figura 4.26: Imagen del 09 de mayo a las 04:28:02 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, ESE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.27).

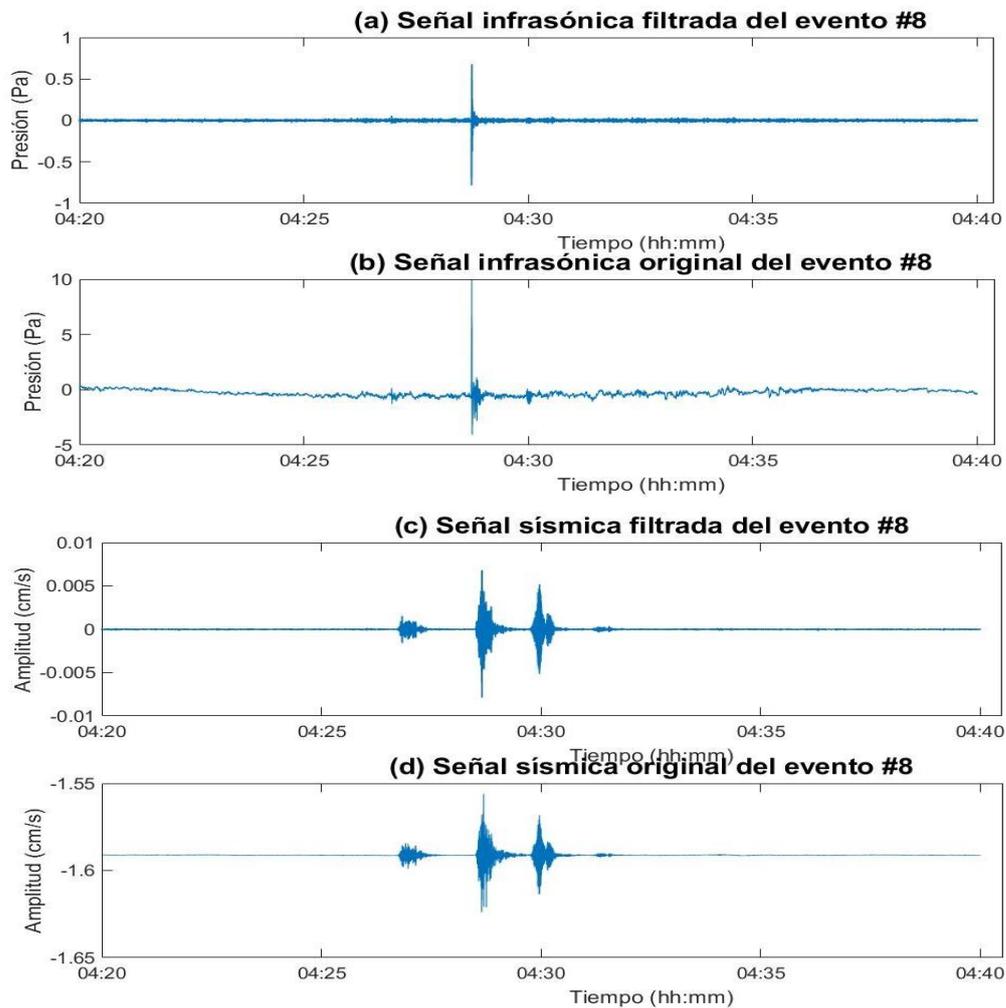


Figura 4.27: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico

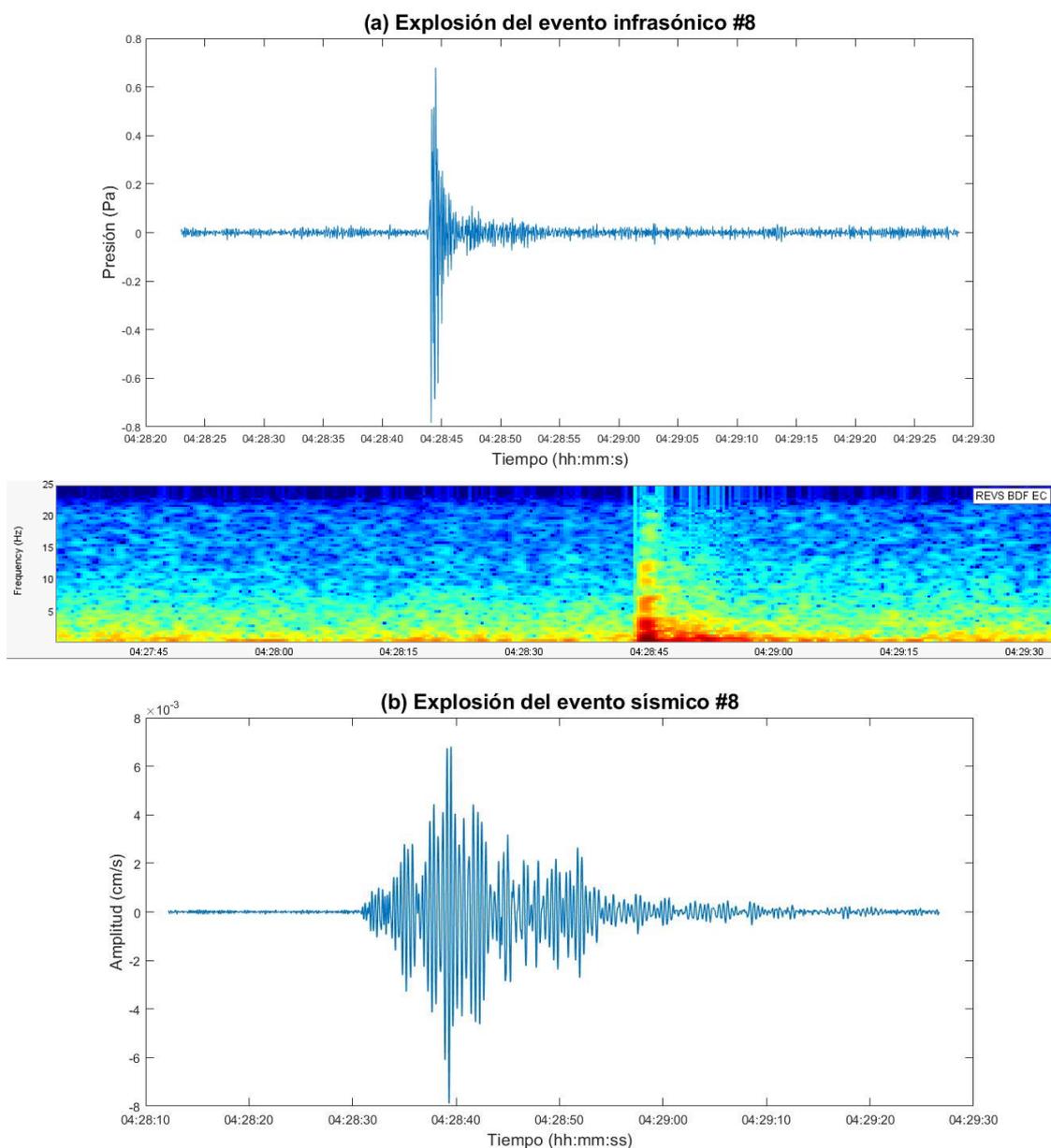
Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #8

Este es un evento de caída de rocas, la cual presenta una presión de 10 Pa (Figura 4.27b) en el registro infrasónico. Posterior a la explosión se registra un tren de ondas (caída de rocas) que se sugiere que comienza alrededor de las 04:29:10 (UTC - hh: mm: ss) y finaliza a las 04:29:20 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos. Este evento presenta la mayor amplitud comparada con los eventos #5 y #6, los mismos que

tienen amplitudes de 8.1 Pa y 7.6 Pa respectivamente. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es < 10 Hz (Figura 4.28a).

El evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.0071 (cm/s) (Figura 4.27c) y una envolvente que decae exponencialmente. La caída de rocas se sugiere que comienza alrededor de las 04:28:55 (UTC - hh: mm: ss) y finaliza a las 04:29:05 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~ 10 segundos. La señal sísmica llega ~ 12 segundos antes que la señal infrasónica y su espectro de frecuencia es < 10 Hz (Figura 4.28b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 750 metros a lo largo del flanco SE del volcán.



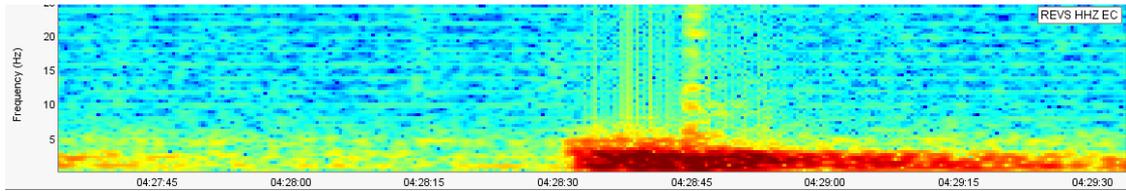


Figura 4.28: a) Registro infrasónico del Evento #8 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #8 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #9: 2017 05 23 – 01:21:26 (UTC)

La imagen muestra material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento. No se visualiza la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.29).



Figura 4.29: Imagen del 23 de mayo a las 01:21:26 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en el flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.30).

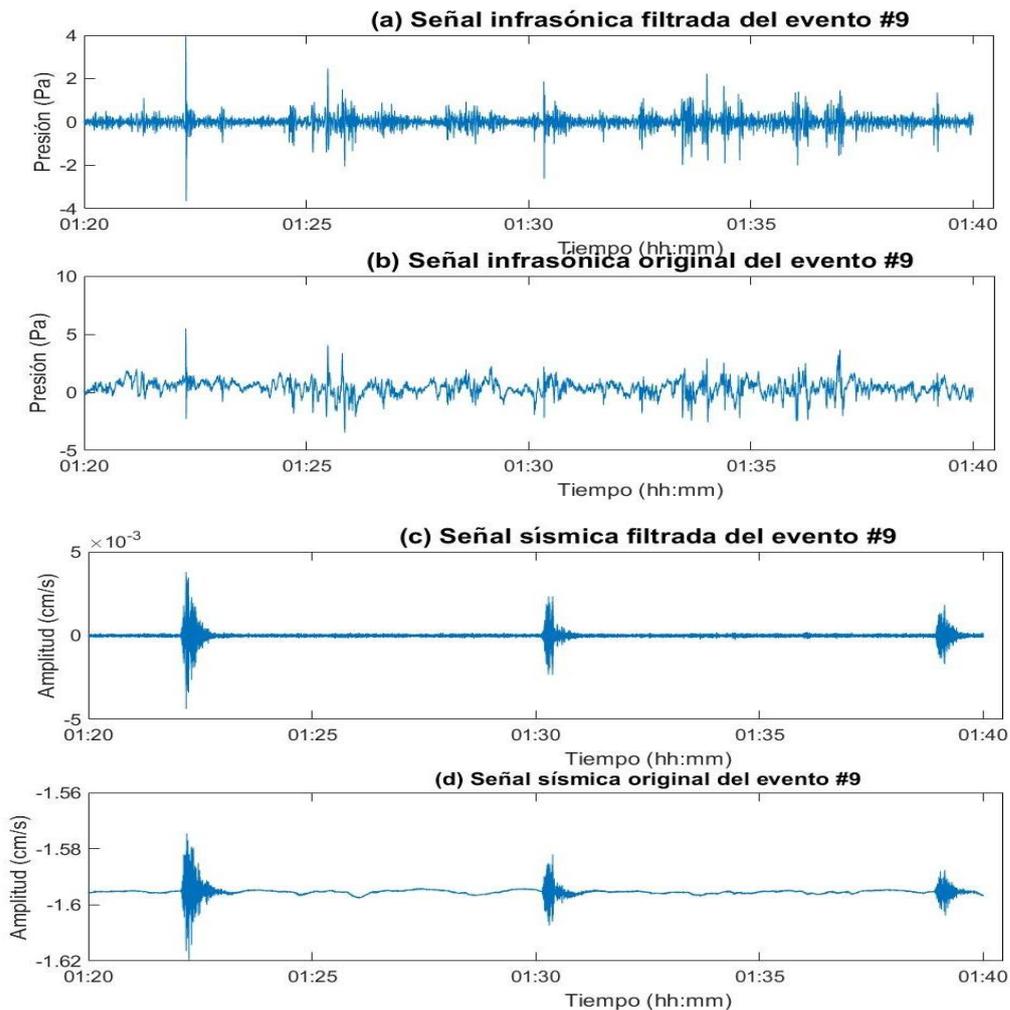


Figura 4.30: (a) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 2 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #9

Este es un evento de caída de rocas que presenta una amplitud de 5.5 Pa (Figura 4.30b). La caída de rocas se sugiere que inició alrededor de las 01:22:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 01:22:55 (UTC - hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. Posterior a la caída de rocas puede ser ruido causado por las condiciones meteorológicas que se dieron en ese día. Comparado con los eventos #1, #2 y #7 presenta una amplitud menor. Su espectro de frecuencia correspondiente es < 10 Hz (Figura 4.31a).

En cambio, el evento sísmico presenta una amplitud máxima de 0.0045 (cm/s) (Figura 4.30c). La caída de rocas se presume que inició alrededor de las 01:22:35 (UTC - hh:

mm: ss) y finalizó a las 01:22:45 (UTC - hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. Además, el registro sísmico arribó ~15 segundos antes que el registro infrasónico. Su espectro de frecuencia es < 5 Hz (Figura 4.31b).

La distancia que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 650 metros a lo largo del flanco S del volcán.

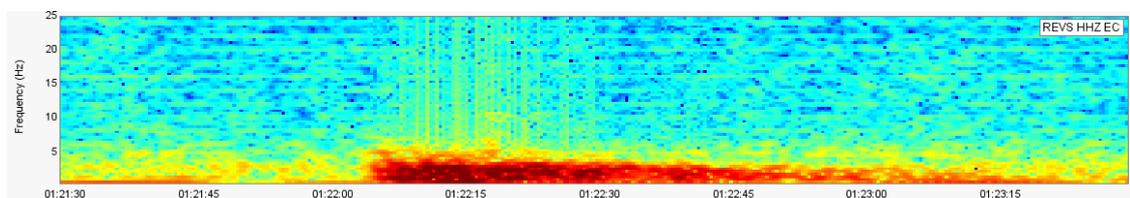
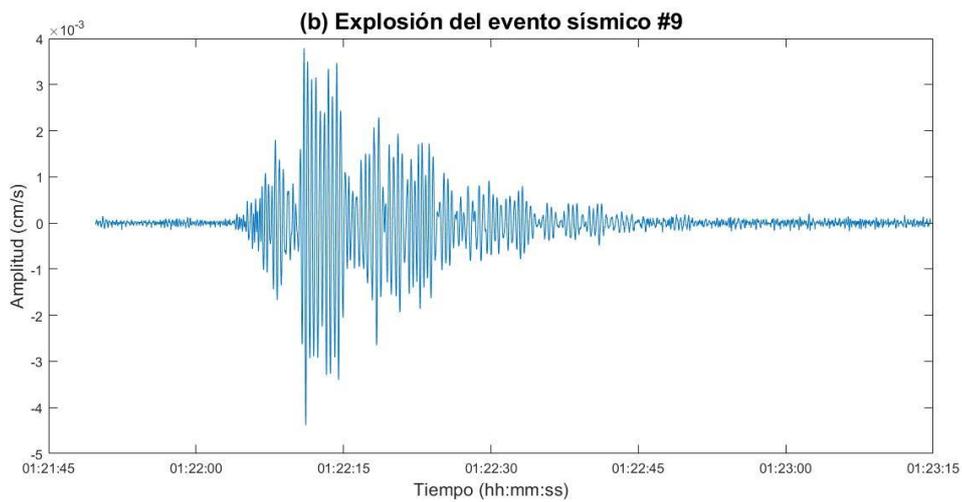
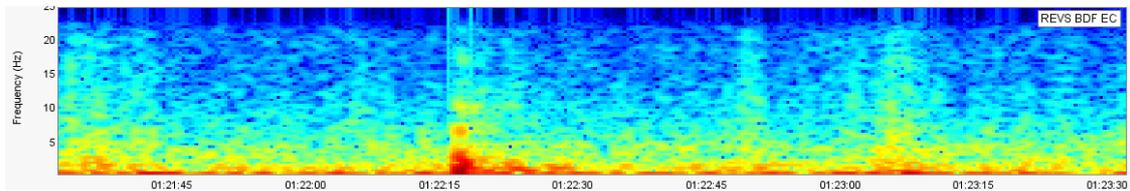
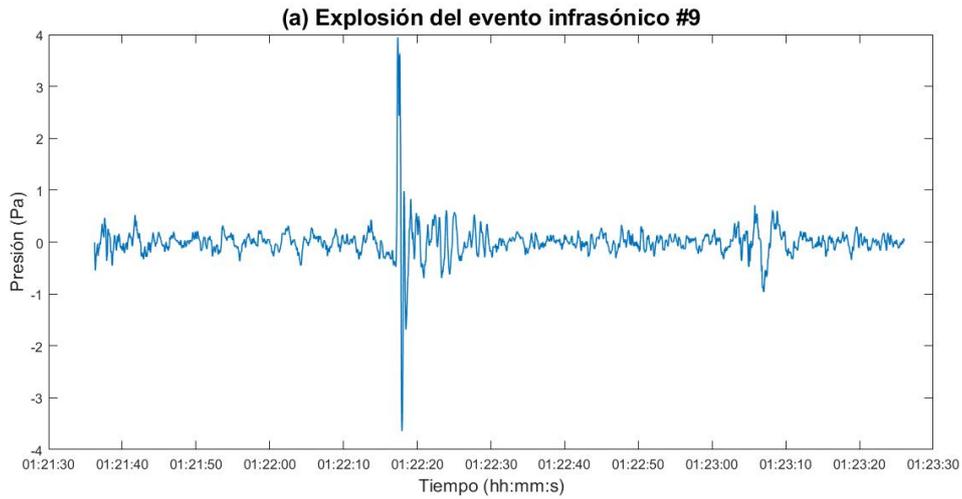


Figura 4.31: a) Registro infrasónico del Evento #9 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #9 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #10: 2017 05 23 - 03:50:41 (UTC)

En la imagen se observa mayor cantidad de material incandescente a lo largo del flanco S y poca cantidad de material a lo largo de los flancos SE y E. Además, el viento presenta incandescencia y no se visualiza la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.32).



Figura 4.32: Imagen del 23 de mayo a las 03:50:41 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.33).

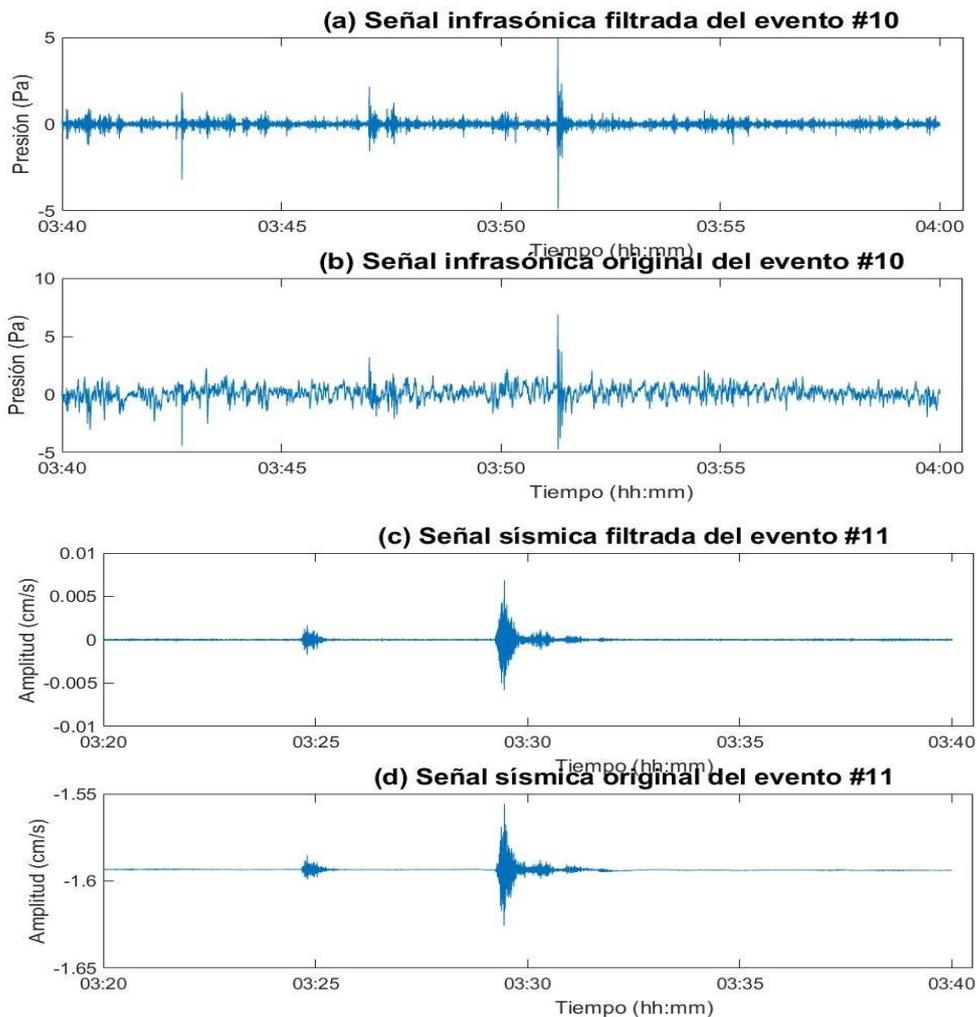


Figura 4.33: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #10

Se realizó una magnificación del evento infrasónico, en la que se registró una explosión con una amplitud máxima de 6.8 Pa (Figura 4.33b). No se observa claramente la señal infrasónica del PDC. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es <5 Hz (Figura 4.34a).

La señal sísmica arribó ~ 15 segundos antes que la señal infrasónica y se registró una amplitud máxima de 0.029 (cm/s) (Figura 4.33c). El PDC se presume que inició a las 03:47:10 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 03:47:20 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~ 10 segundos. La envolvente decae exponencialmente y el espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de aproximadamente 10 Hz (Figura 4.34b).

La distancia mayor que recorrió el PDC se estima que fue de 670 metros a lo largo del flanco S del volcán.

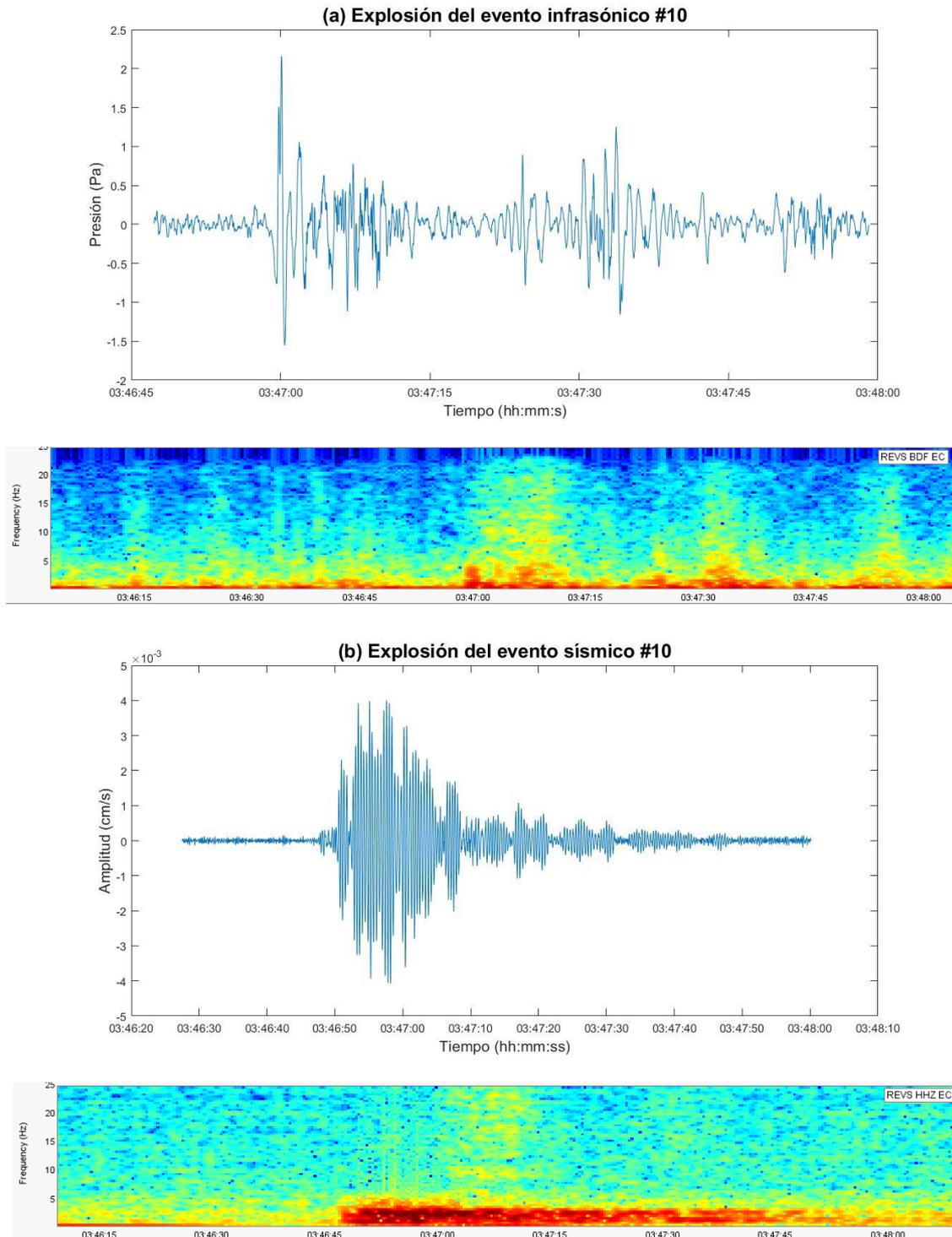


Figura 4.34: a) Registro infrasónico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su

espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #11: 2017 05 29 – 03:25:51 (UTC)

En la imagen se aprecia que gran cantidad de material incandescente ha descendido a lo largo del flanco S y poca cantidad de material a lo largo de los flancos SE, E y visiblemente a lo largo del flanco NE. Se observa que el viento presenta incandescencia y la columna eruptiva alcanza una altura mínima de 2 km (Figura 4.35).



Figura 4.35: Imagen del 29 de mayo a las 03:28:51 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, SE, E, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.36).

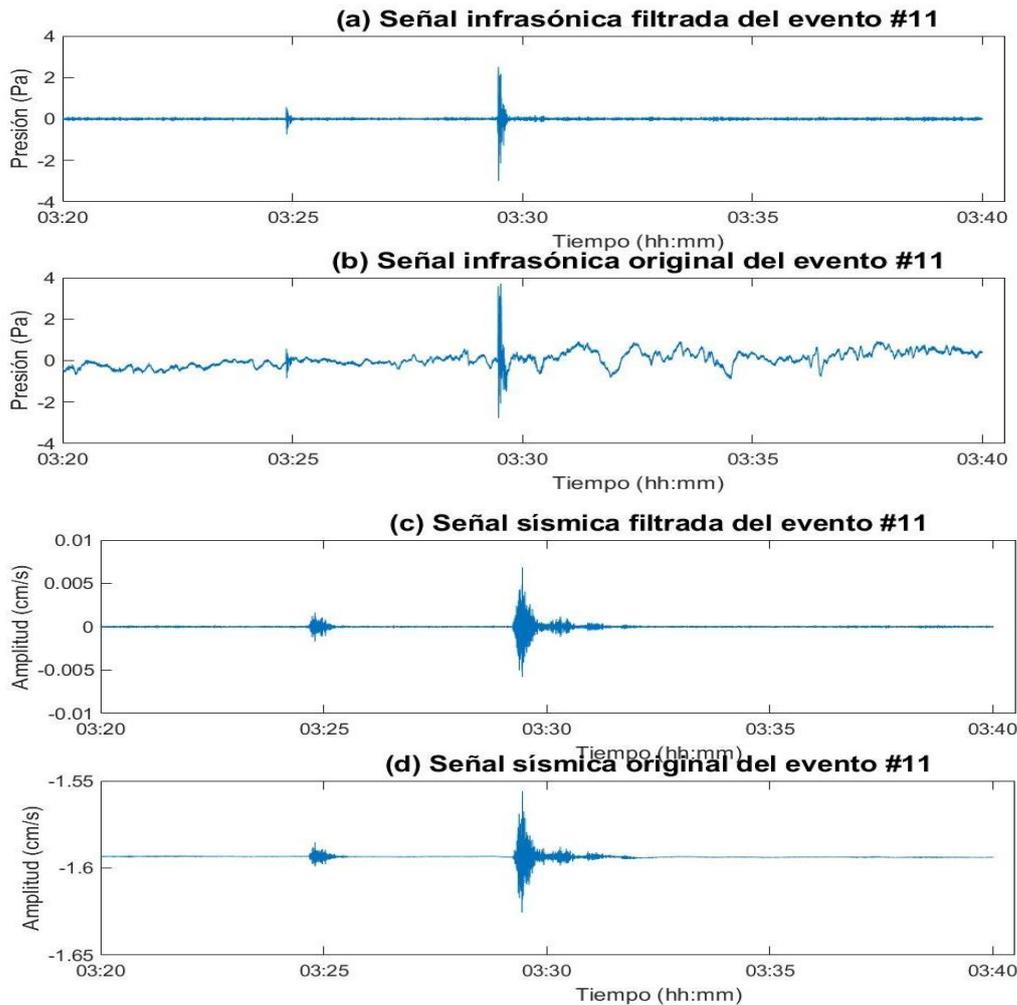


Figura 4.36: (a) Señal filtrada de 0.5 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #11

Este evento se presume que es una corriente de densidad piroclástica (PDC) que presenta una amplitud máxima de 3.7 Pa (Figura 4.36b) y se sugiere que se registró alrededor de las 03: 30: 15 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 03: 30:25 (UTC – hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. Las frecuencias correspondientes del infrasonido son relativamente bajas (<5 Hz) (Figura 4.37a).

En cambio, el evento sísmico presenta una amplitud de 0.006 (cm/s) (Figura 4.36c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz. Posible PDC que se sugiere que se registró alrededor de las 03: 30: 05 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó

alrededor de las 03: 30:15 (UTC – hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos. El registro sísmico arribó ~15 segundos antes que el registro infrasónico (Figura 4.37b).

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica (PDC) se estima que fue de 700 metros a lo largo del flanco S del volcán.

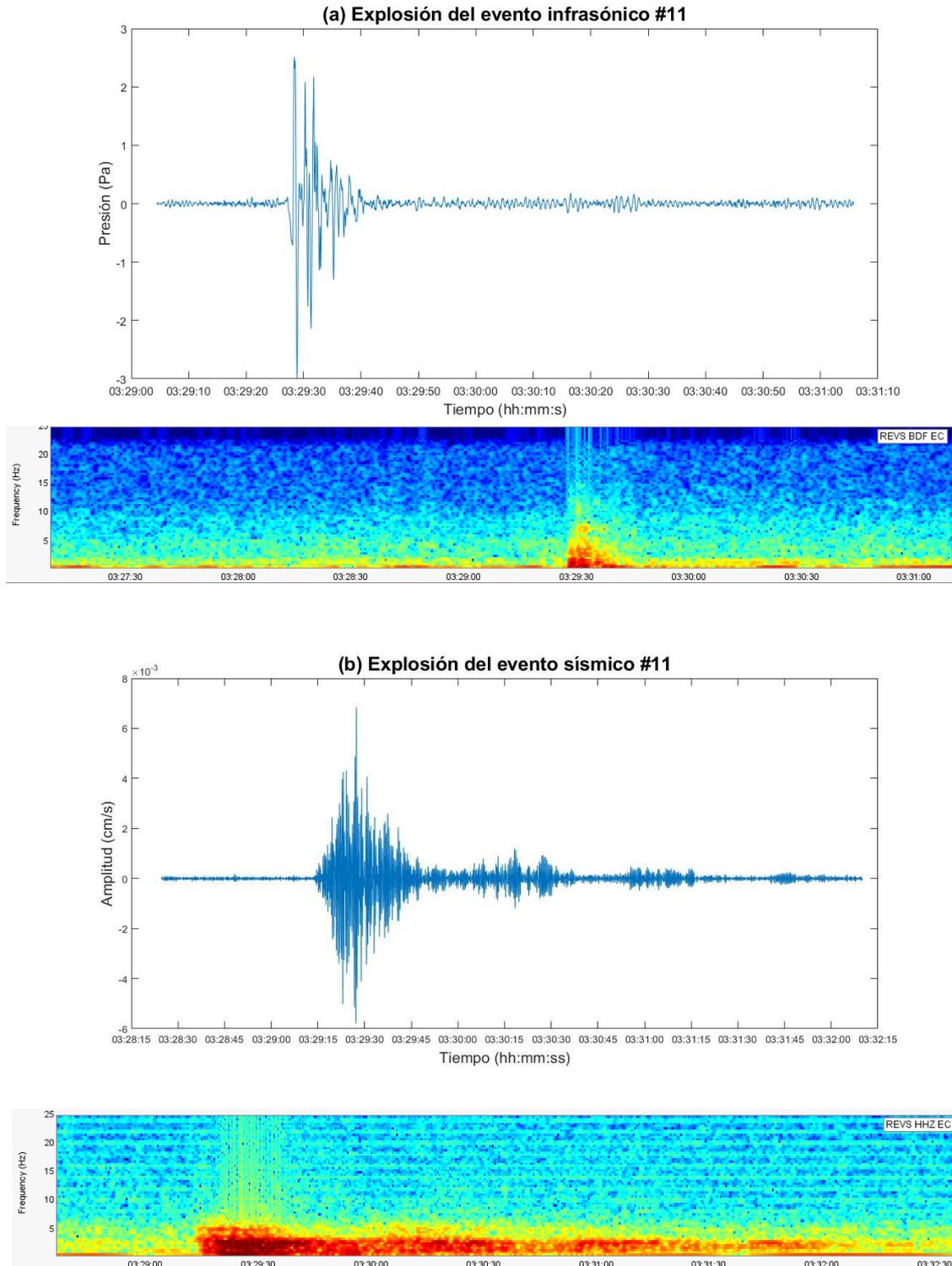


Figura 4.37: a) Registro infrasónico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de

frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de un posible PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #10 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh:mm:ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de un posible PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #12: 2017 05 29 – 07:35:55 (UTC)

La imagen muestra material incandescente en los flancos S, E e incandescencia en el viento. No se observa la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.38).



Figura 4.38: Imagen del 29 de mayo a las 07:35:55 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente en los flancos S, E e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.39).

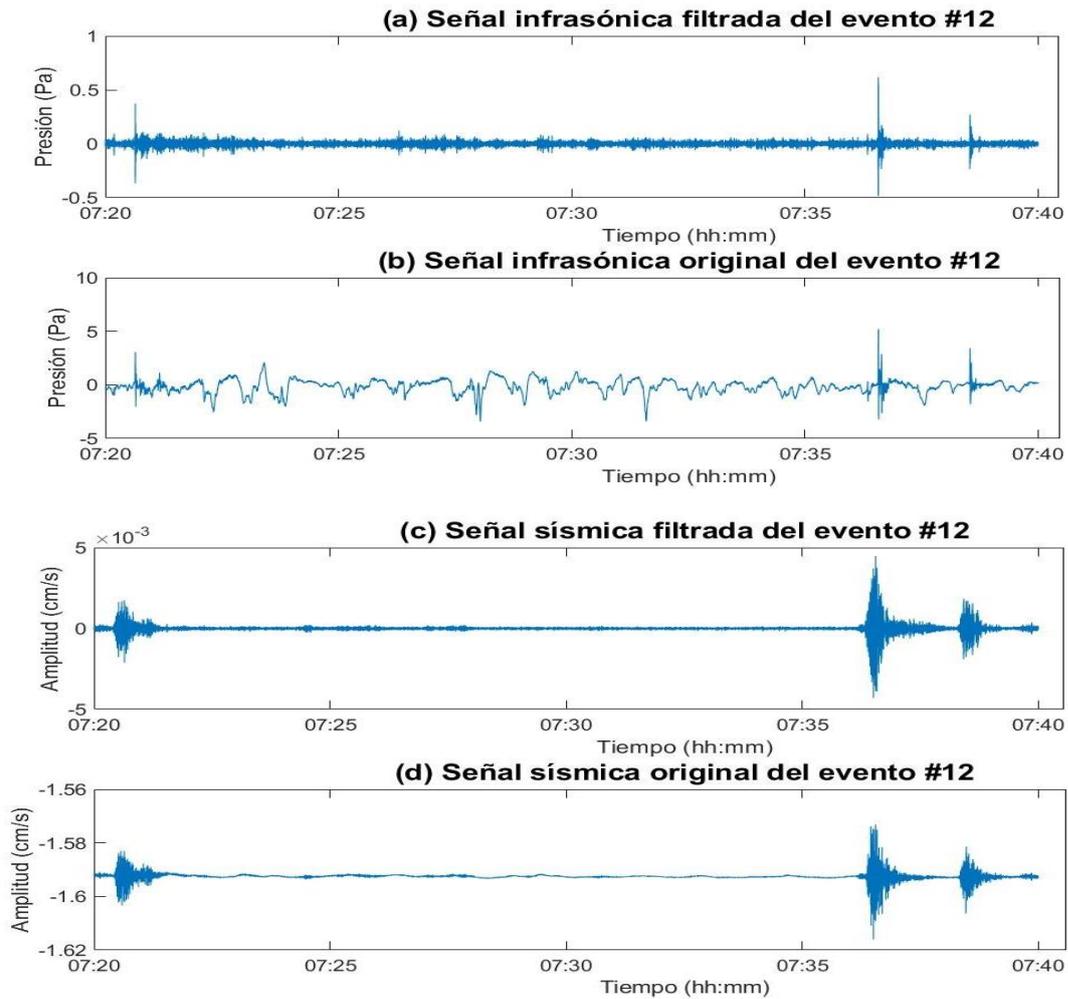


Figura 4.39: **(a)** Señal filtrada de 3 a 17 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(b)** Señal original del evento infrasónico. **(c)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(d)** corresponde a la señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #12

Durante este evento infrasónico se registraron tres explosiones. La primera explosión tiene una amplitud de 0.9 Pa, la segunda explosión tiene una amplitud de 5.2 Pa y la última tiene una amplitud de 3.4 Pa (Figura 4.39b). Posterior a las explosiones se observa una caída de roca, la cual se sugiere que se registró a las 07:37:05 (UTC - hh:mm:ss) y finalizó a las 07:37:20 (UTC - hh:mm:ss) con una duración ~ 10 segundos. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido es < 5 Hz, < 10 Hz y aproximadamente 5 Hz respectivamente (Figura 4.40a).

El registro sísmico presenta una amplitud de 0.0045 (cm/s) (Figura 4.39c) y su envolvente decae exponencialmente. La caída de rocas se sugiere que se registró a las

07:36:50 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 07:37:10 (UTC - hh: mm: ss) con una duración ~20 segundos. El tiempo de arribo de la señal sísmica fue ~15 segundos antes que el tiempo de arribo de la señal infrasónica. Su espectro de frecuencia correspondiente es de alrededor de 5 Hz (Figura 4.40b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 670 metros a lo largo del flanco S del volcán.

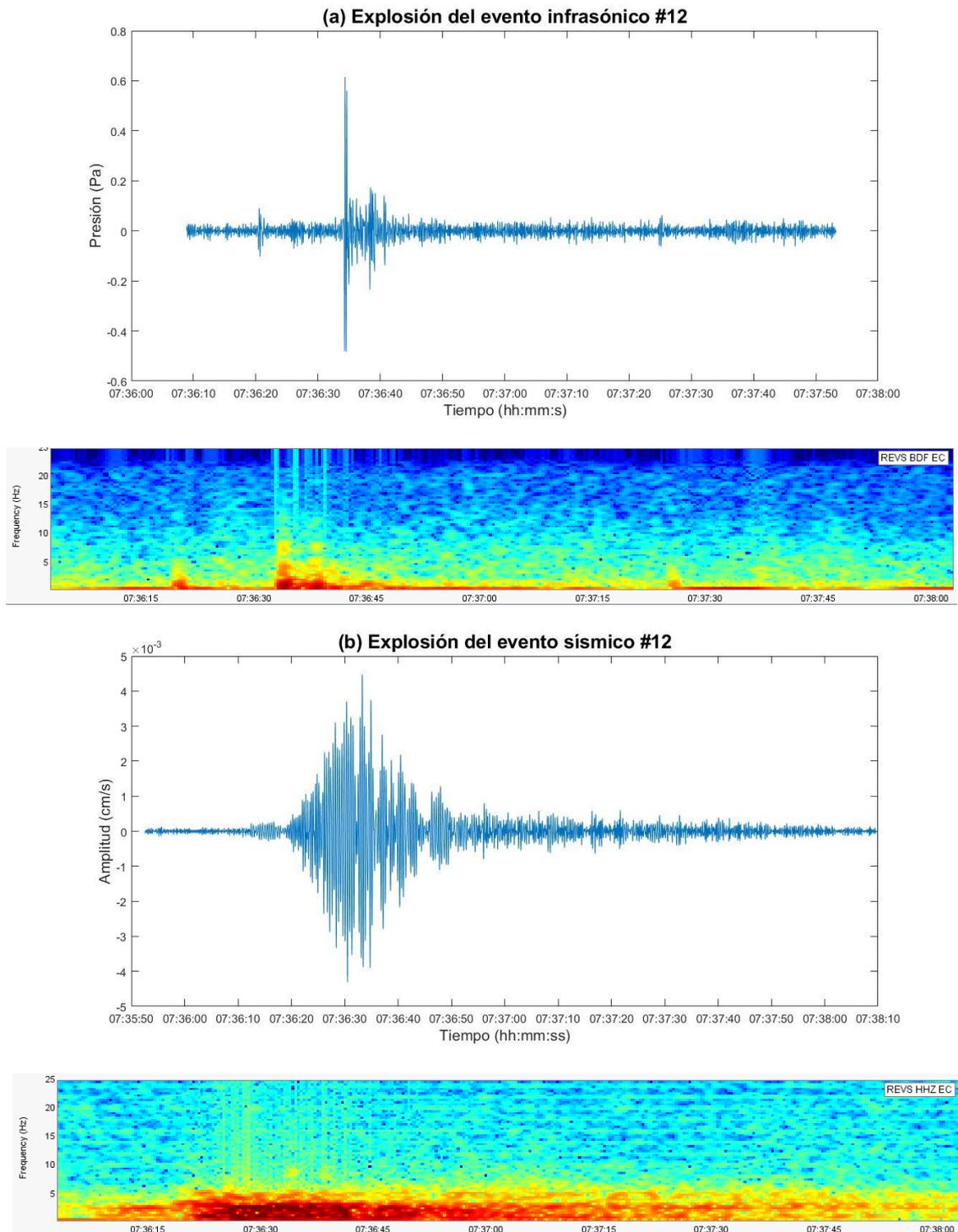


Figura 4.40: a) Registro infrasónico del Evento #12 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #12 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Junio

Durante el mes de junio se describieron 5 eventos.

Evento #13: 2017 06 06 - 06:36:24 (UTC)

En la imagen se observa material incandescente descender a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento. No se visualiza la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.41).



Figura 4.41: Imagen del 06 de junio a las 06:36:24 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.42).

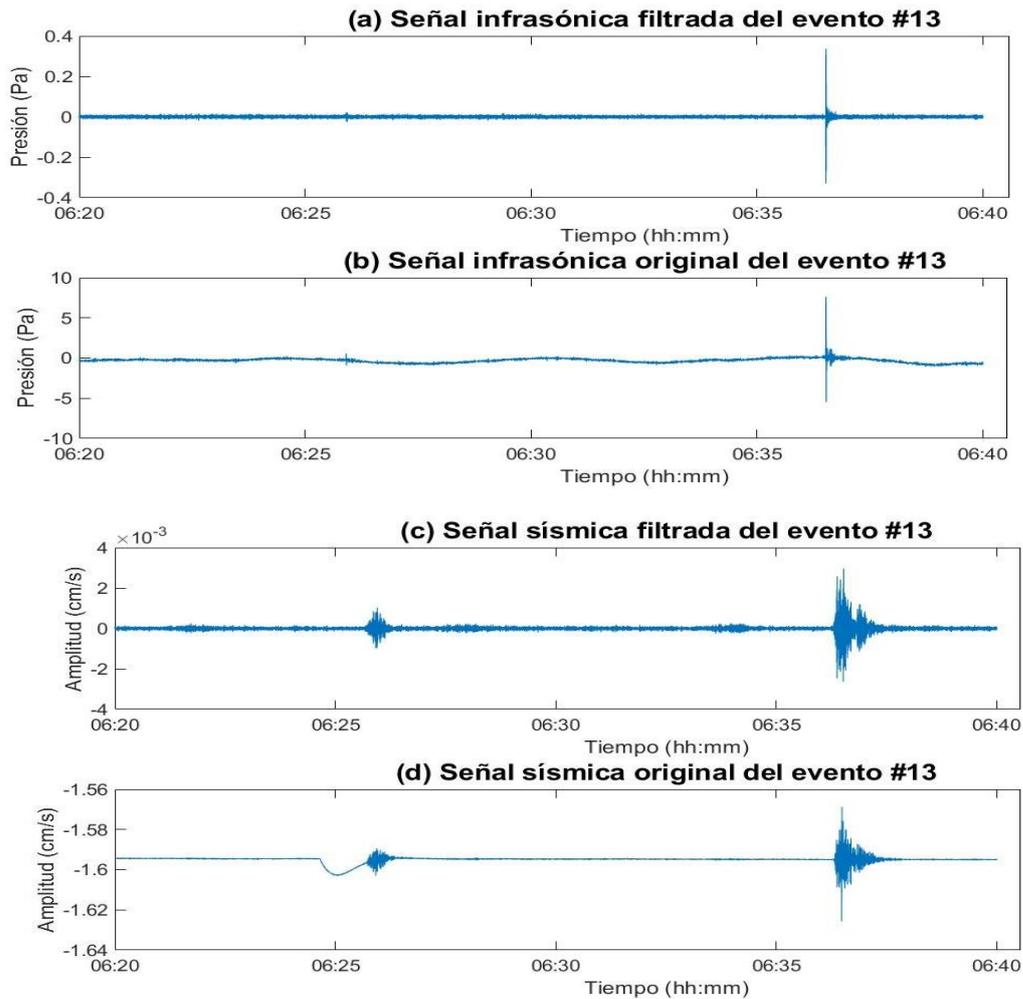


Figura 4.42: (a) Señal filtrada de 7 a 25 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #13

Este es un evento de caída de rocas que presenta una amplitud máxima de 7.5 Pa (Figura 4.42b) y se presume que comenzó alrededor de las 06:37:15 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó a las 06: 37:30 (UTC – hh: mm: ss) con una duración de ~20 segundos. Las frecuencias correspondientes del infrasonido son relativamente bajas (<5 Hz) (Figura 4.43a).

En cambio, el evento sísmico presenta una amplitud de 0.025 (cm/s) (Figura 4.42c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz. La caída de rocas se presume que comenzó alrededor de las 06:37:00 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó a las 06:

37:15 (UTC – hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. El registro sísmico arribó ~12 segundos antes que el registro infrasónico (Figura 4.43b).

La distancia que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 750 metros a lo largo del flanco S del volcán.

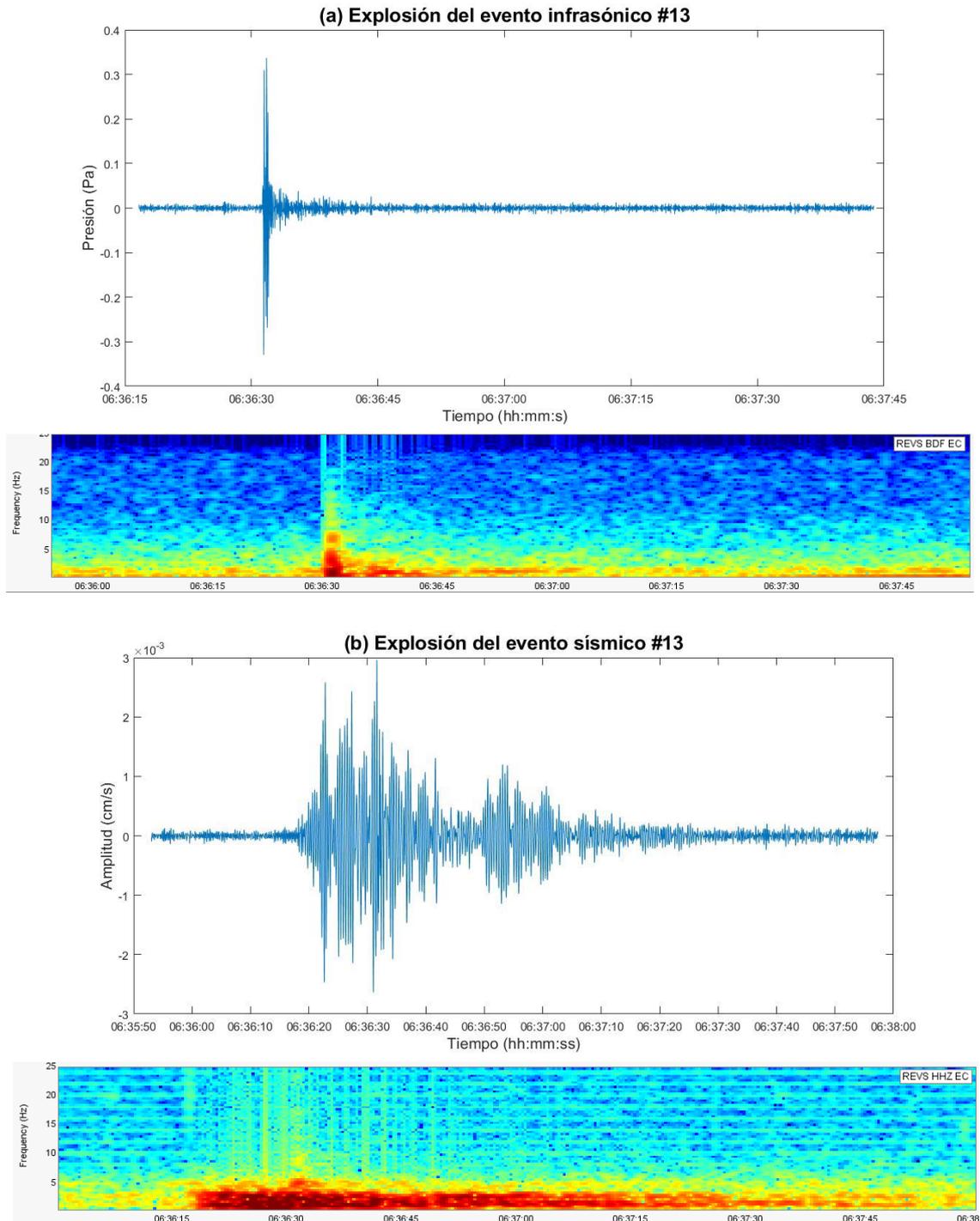


Figura 4.43: a) Registro infrasónico del Evento #13 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como

muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #13 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #14: 2017 06 06 – 13:56:28 (UTC)

En la imagen se observa un PDC descender a lo largo del flanco E, en la cual múltiples bloques comienzan a desintegrarse generando columnas cenizas. La columna eruptiva alcanza una altura mínima de 3 km en la dirección NW (Figura 4.44).



Figura 4.44: Imagen del 06 de junio a las 13:55:53 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un PDC a lo largo del flanco E. (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.45).

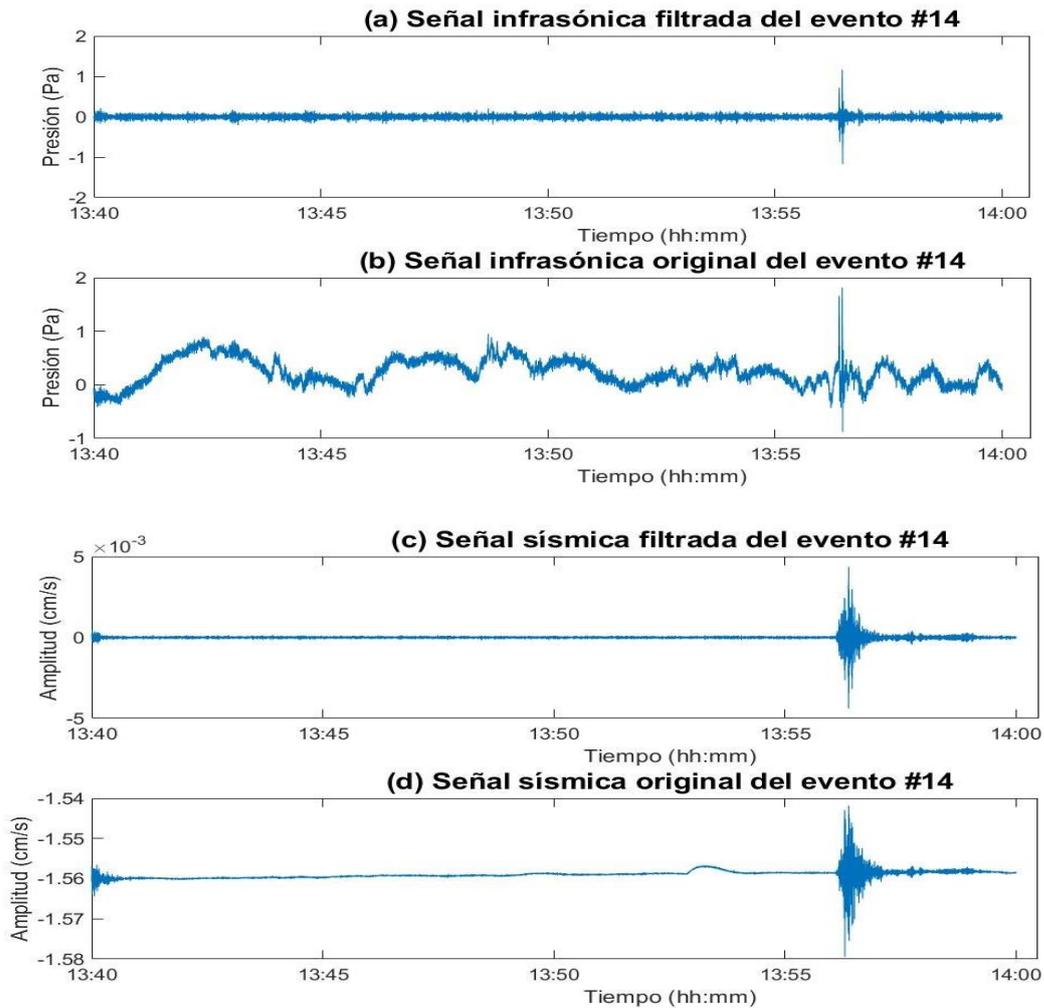


Figura 4.45: (a) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #14

Este evento corresponde a una corriente de densidad piroclástica (PDC), y se presume que inició alrededor de las 13:57:00 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 13:57:15 (UTC - hh: mm: ss) con una duración ~15 segundos. La parte posterior al PDC puede ser ruido causado por los fuertes vientos que pudieron darse en ese día. Este evento presenta dos explosiones. La explosión 1 tiene una amplitud de 1.6 Pa y la explosión 2 tiene una amplitud de 1.8 Pa (Figura 4.45b). El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido para las explosiones es < 5 Hz (Figura 4.46a).

El evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.047 (cm/s) (Figura 4.45c) y una envolvente que decae exponencialmente. La caída de rocas se presume que inició

alrededor de las 13:56:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 13:57:05 (UTC - hh: mm: ss) con una duración ~20 segundos La señal sísmica llega ~15 segundos antes que la señal infrasónica y su espectro de frecuencia es < 10 Hz (Figura 4.46b). No hay una relación clara entre estos 2 eventos.

La distancia que recorrió el PDC se estima que fue de 720 metros a lo largo del flanco E del volcán

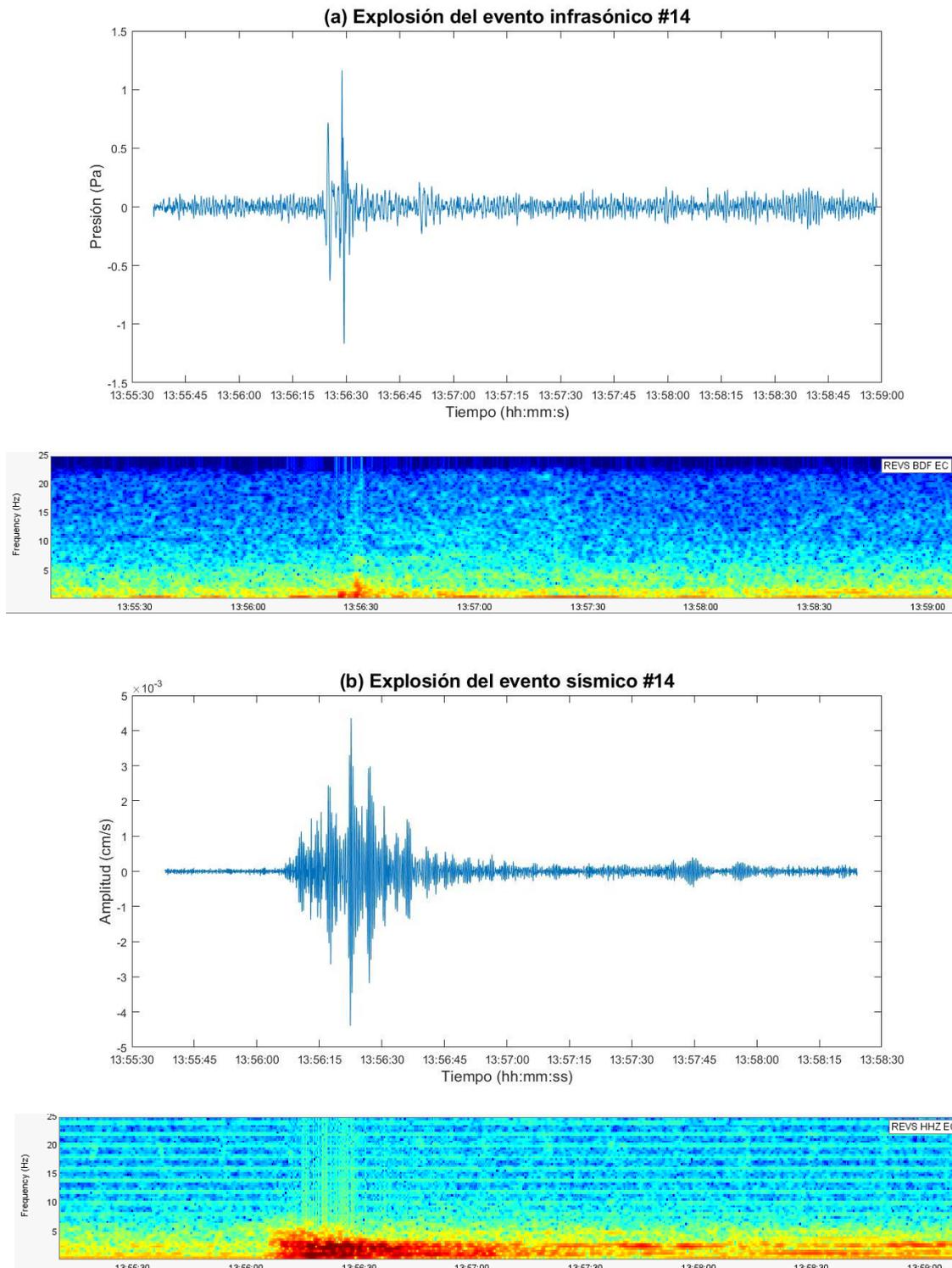


Figura 4.46: a) Registro infrasónico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #15: 2017 06 08 – 10:43:03 (UTC)

La imagen muestra un flujo piroclástico (PDC) a lo largo del flanco E del volcán. La columna eruptiva alcanza una altura mínima de 3 km en la dirección NW (Figura 4.47).



Figura 4.47: Imagen del 08 de junio a las 10:43:03 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa un flujo piroclástico (PDC) a lo largo del flanco E (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.48).

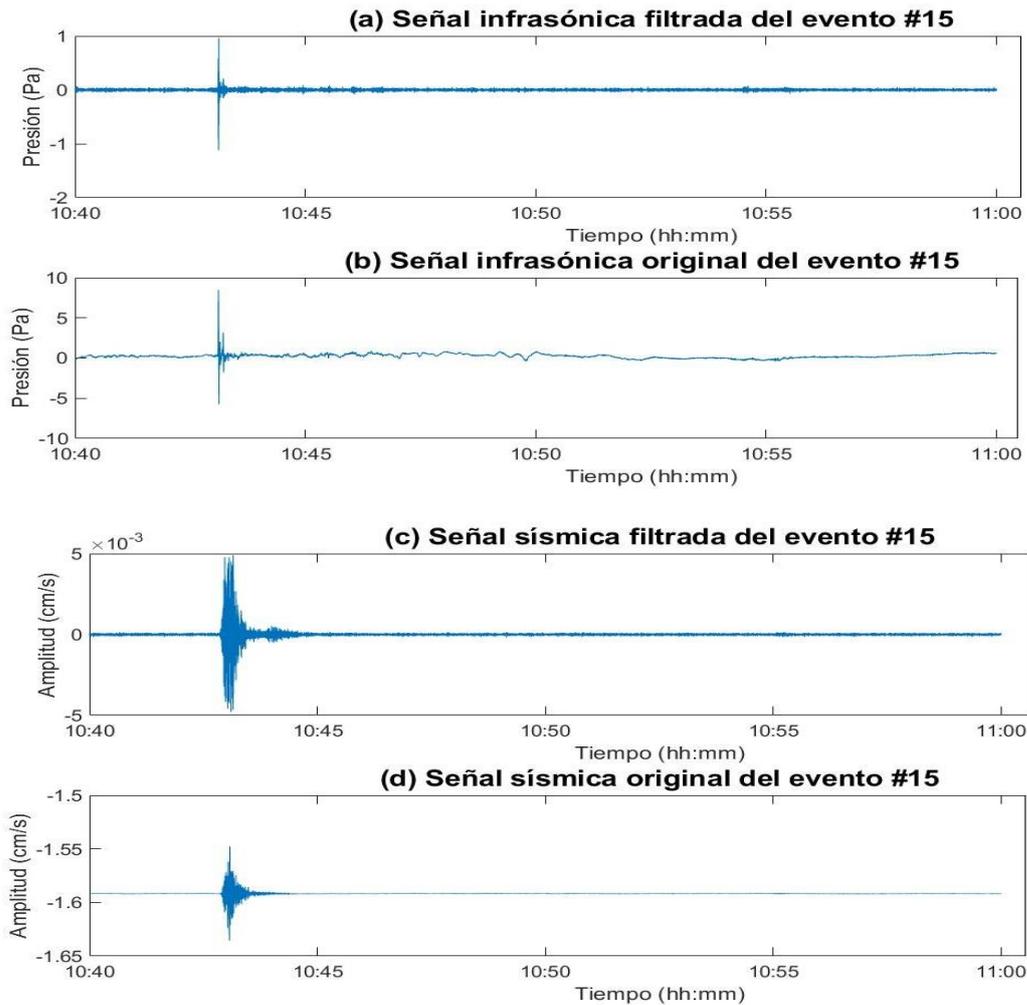


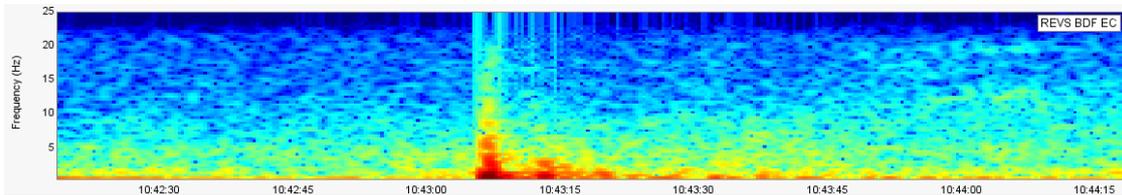
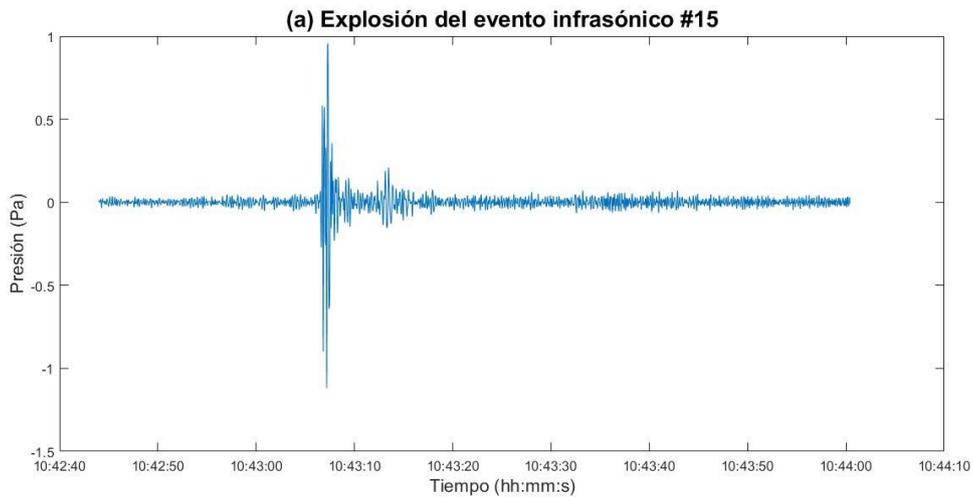
Figura 4.48: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #15

Durante este evento se registraron dos explosiones. La primera explosión tiene una amplitud de 2.3 Pa. La segunda explosión tiene una amplitud de 0.9 Pa (Figura 4.48b) y consecuentemente un PDC que se presume comenzó alrededor de las 10:43:40 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 10:43:55 (UTC – hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. El evento posterior al PDC se presume que es una caída de rocas, debido a que presentan amplitudes bajas. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido para las explosiones es < 10 Hz y < 5 Hz respectivamente (Figura 4.49a).

El evento sísmico se registró ~12 segundos antes de la primera explosión del evento infrasónico con una amplitud de 0.005 (cm/s) (Figura 4.48c). El PDC se presume comenzó alrededor de las 10:43:30 (UTC – hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 10:43:45 (UTC – hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. Su envolvente decae exponencialmente y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz (Figura 4.49b).

La distancia que recorrió el PDC se estima que fue de 720 metros a lo largo del flanco E del volcán.



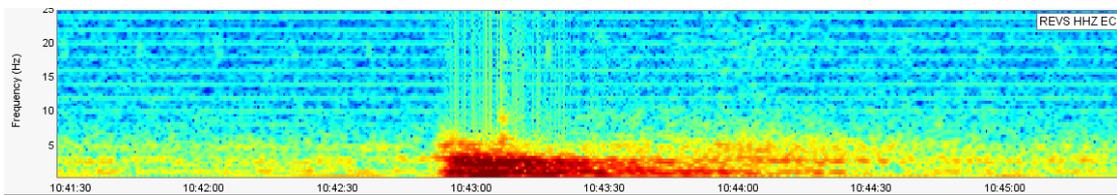
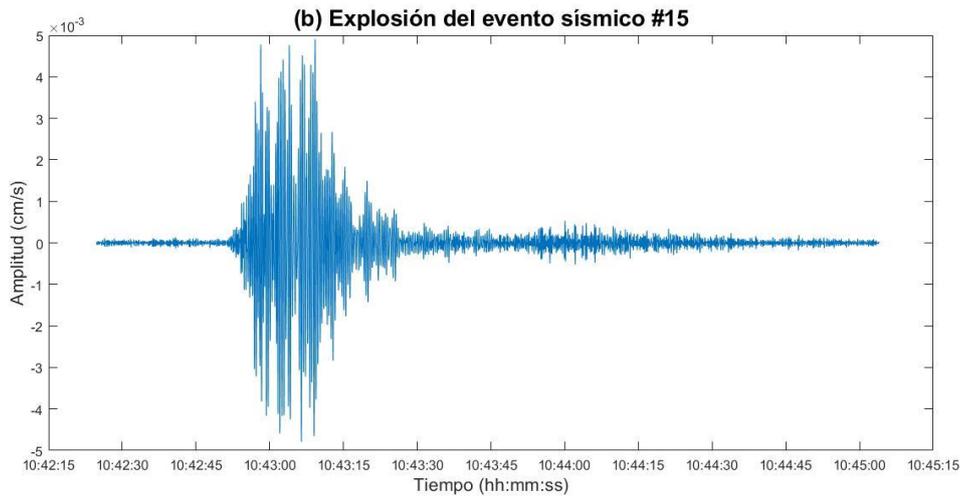


Figura 4.49: a) Registro infrasónico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #14 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #16: 2017 06 08 – 11:37:09 (UTC)

La imagen muestra flujos piroclásticos (PDCs) a lo largo de los flancos SW y E del volcán. La columna eruptiva alcanza una altura mínima de 4 km en la dirección NW (Figura 4.50).



Figura 4.50: Imagen del 08 de junio a las 11:37:09 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa flujos piroclásticos (PDCs) a lo largo de los flancos SW y E. (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.51).

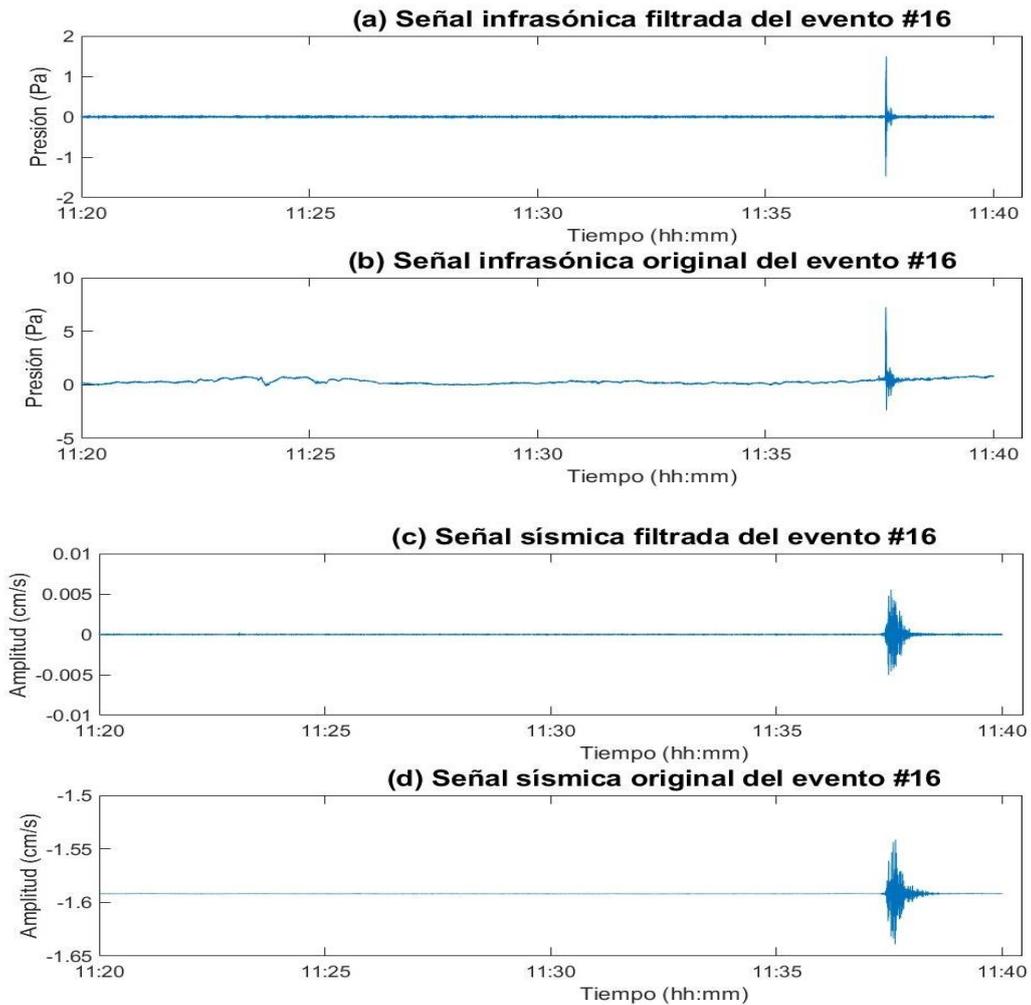


Figura 4.51: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #16

Este es un evento de corriente de densidad piroclástica (PDC) que se presume que inició alrededor de las 11:38:10 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 11:38:25 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. Durante este evento se registró una explosión de 7.2 Pa (Figura 4.51b). Comparado con el evento #13, presenta una disminución de la presión y un aumento en la duración del PDC. El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido para la explosión es < 10 Hz (Figura 4.52a).

Durante el evento sísmico se registró una explosión de 0.045 (cm/s) (Figura 4.51c) y el tiempo de arribo fue ~15 segundos antes que el evento infrasónico. El PDC se presume

que inició alrededor de las 11:38:00 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 11:38:20 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~20 segundos. La envolvente decae exponencialmente y el espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es < 10 Hz (Figura 4.52b).

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica se estimó en 900 metros a lo largo del flanco SW y 720 metros a lo largo del flanco E del volcán.

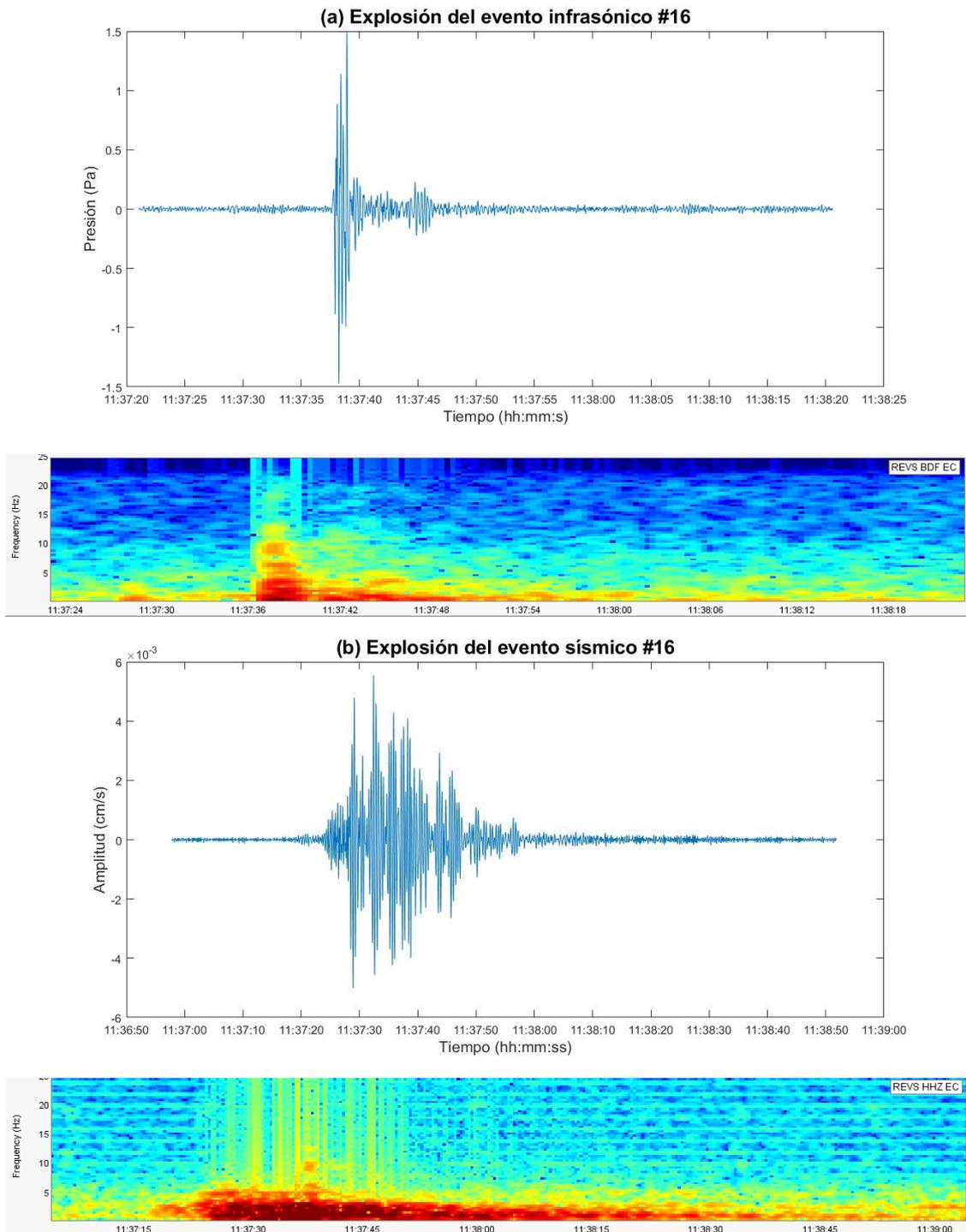


Figura 4.52: a) Registro infrasónico del Evento #16 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #16 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #17: 2017 06 25 – 05:58:41 UTC

La imagen muestra material incandescente a lo largo del flanco NE e incandescencia en el viento. No se visualiza la dirección de propagación de la columna eruptiva (Figura 4.53).



Figura 4.53: Imagen del 25 de junio a las 05:58:41 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a largo del flanco N e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.54).

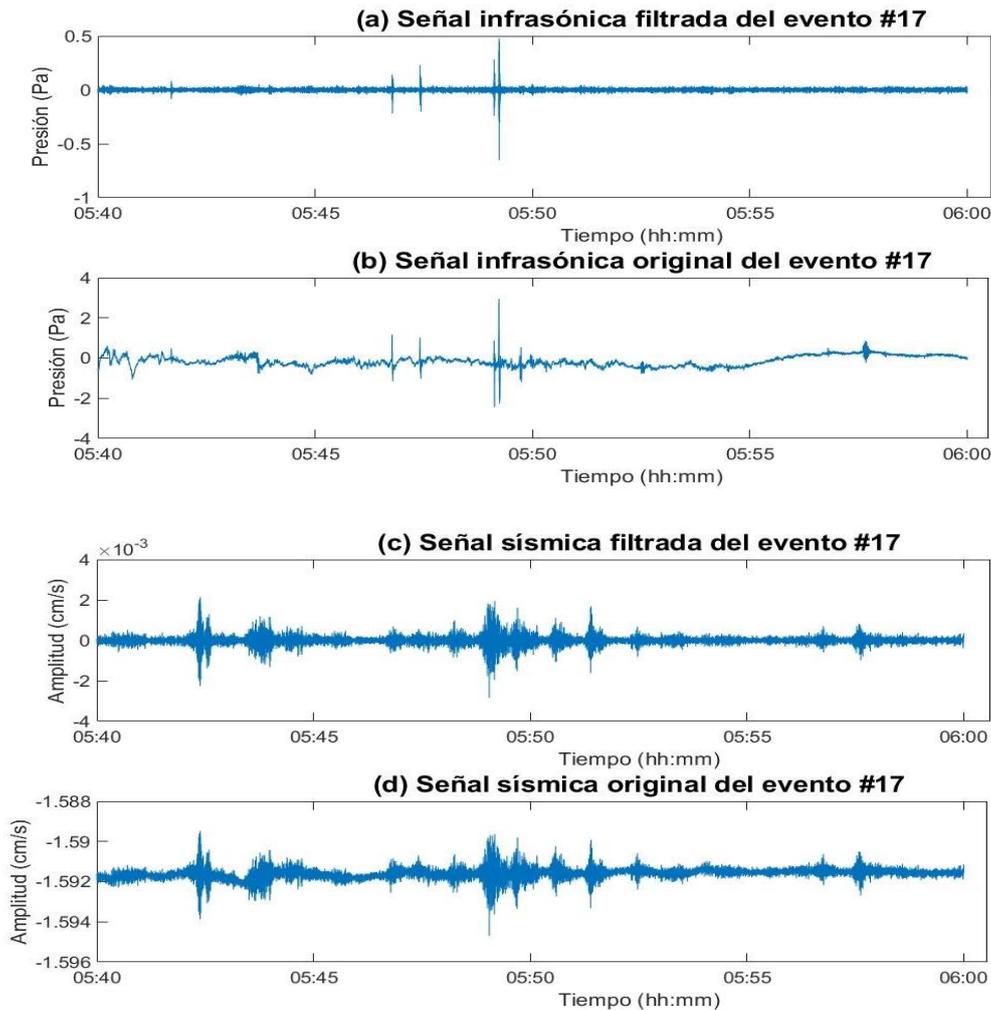


Figura 4.54: (a) Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

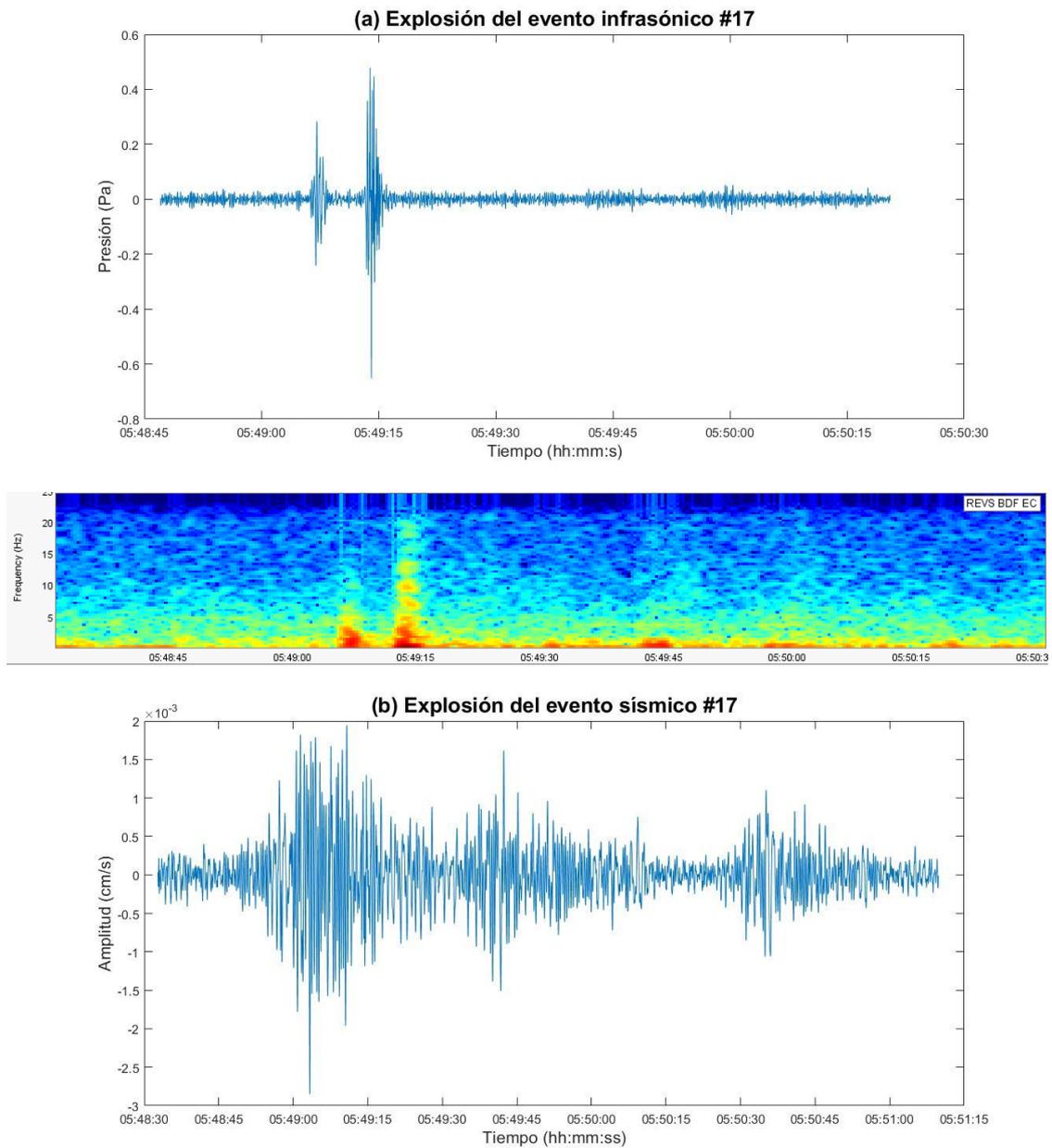
Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #17

Evento de corriente de densidad piroclástica (PDC) que se presume comenzó alrededor de las 05:49:55 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 05:50:10 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. Durante este evento se registraron dos explosiones. La primera explosión tiene una amplitud de 0.8 Pa y la segunda explosión con una amplitud de 3 Pa (Figura 4.54b). La última parte de la señal infrasónica correspondería a ruido ocasionado por las condiciones meteorológicas de ese día o una reflexión de ondas en las paredes del anfiteatro. El espectro de frecuencia

correspondiente al infrasonido para las explosiones es < 5 Hz y < 15 Hz respectivamente (Figura 4.55a).

El evento sísmico se registró en una ventana de tiempo de 145 segundos con una amplitud máxima de 0.0019 (cm/s) (Figura 4.54c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz. No se logra visualizara detalle el tiempo de inicio del PDC, debido a que la señal sísmica presenta ruido (Figura 4.55b).

La distancia que recorrió la corriente de densidad piroclástica se estimó en 750 metros a lo largo del flanco NE.



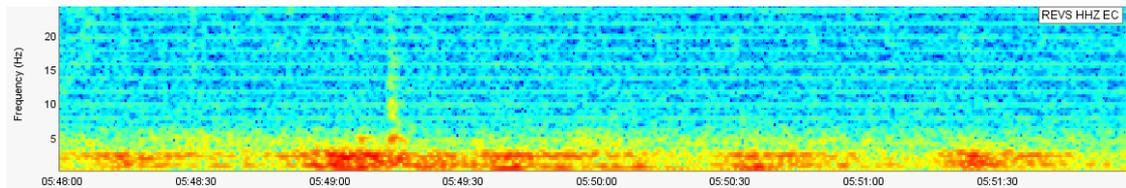


Figura 4.55: a) Registro infrasónico del Evento #17 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #17 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Agosto

Durante el mes de agosto se analizaron 4 eventos.

Evento #18: 2017 08 16 – 03:06:12 (UTC).

La imagen muestra gran cantidad de material incandescente a lo largo de los flancos E, NE y poco material a lo largo del flanco SE y visiblemente a lo largo del flanco S. El viento presenta incandescencia y la columna eruptiva alcanza una altura mínima de 2 km (Figura 4.56).



Figura 4.56: Imagen del 16 de agosto a las 03:06:12 (UTC) a través de la cámara COPETE.

Se observa material incandescente a los flancos SE, E, N e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.57).

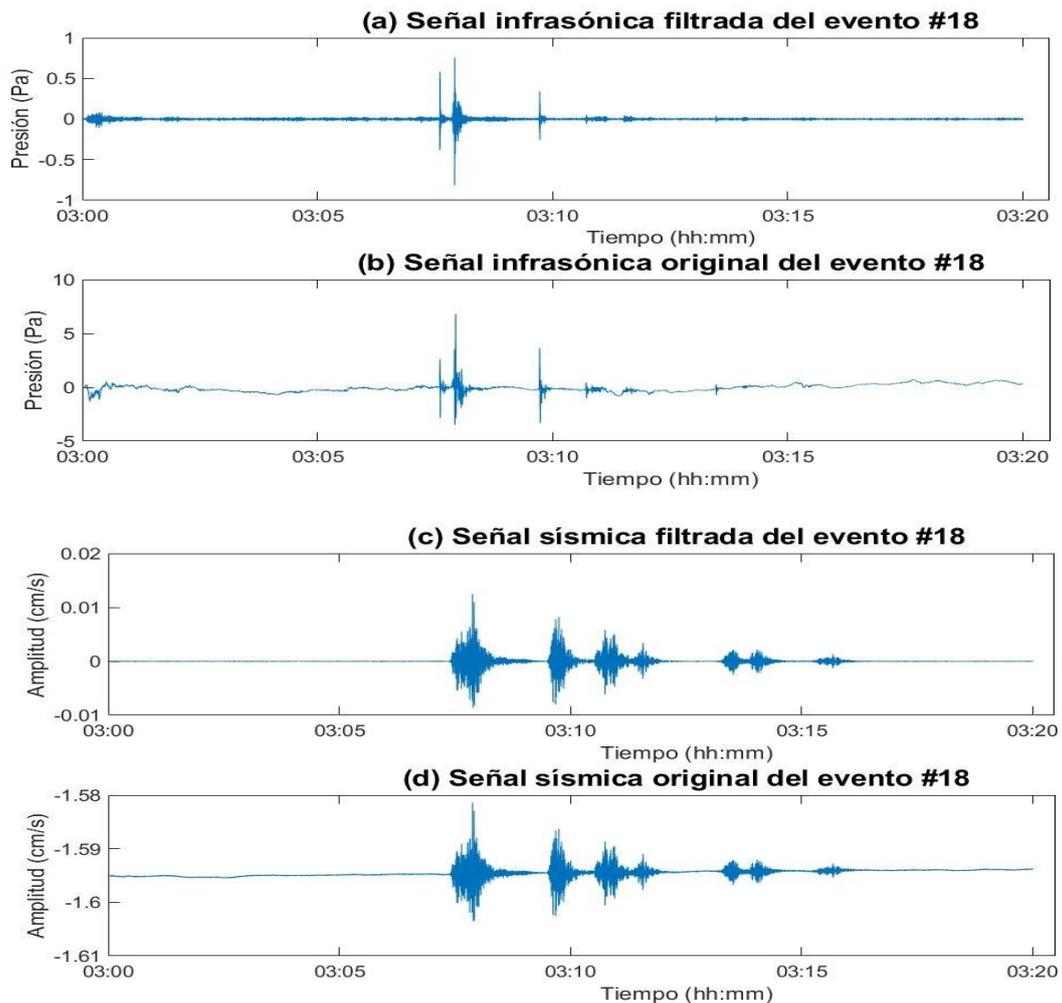


Figura 4.57: **(a)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(b)** Señal original del evento infrasónico. **(c)** Señal filtrada de 0.5 a 15 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(d)** Señal original del evento sísmico.

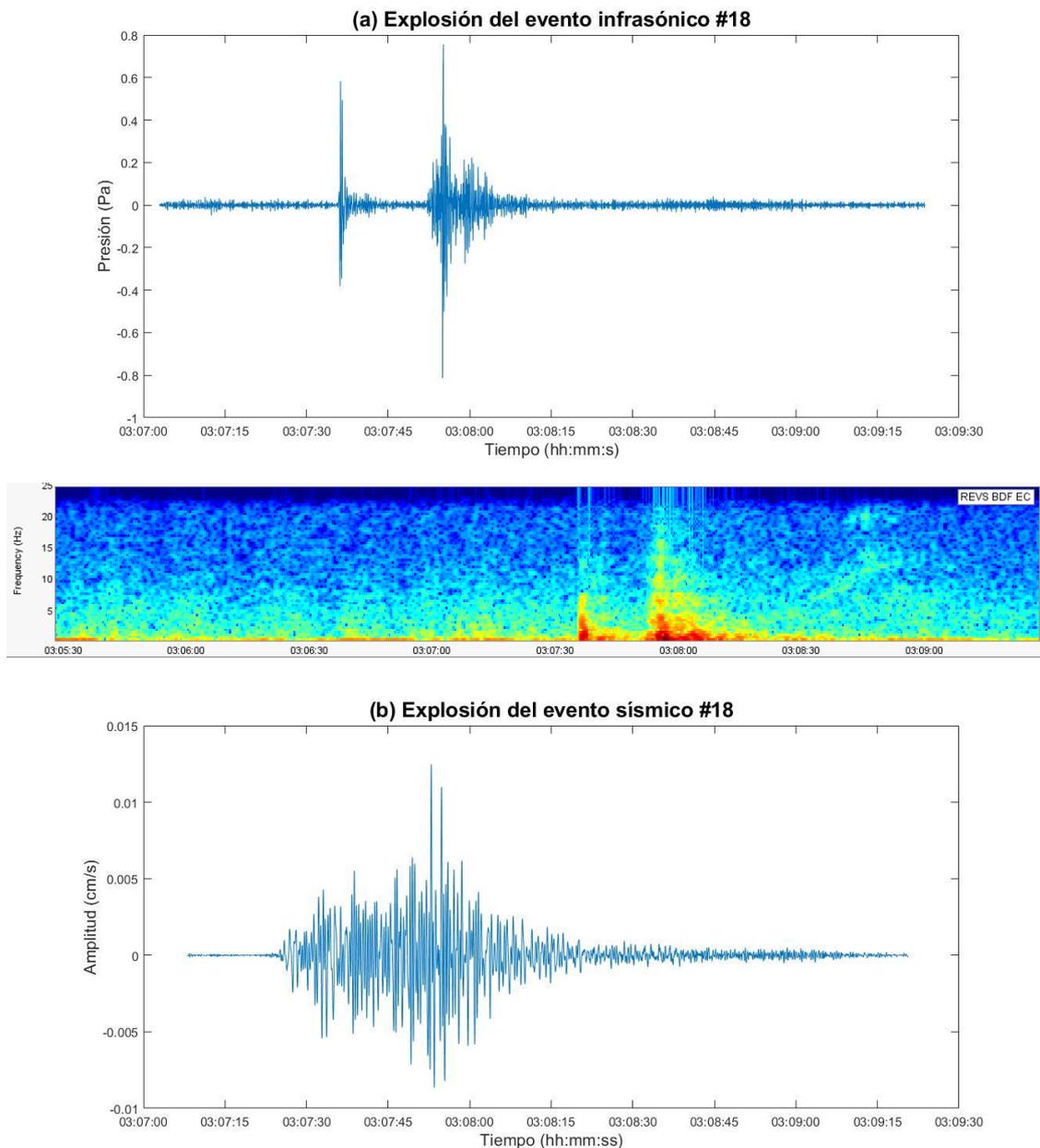
Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #18

Se realizó una magnificación del evento infrasónico, en la que se registró dos explosiones. La primera explosión tiene una amplitud de 2.1 Pa y la segunda explosión con una amplitud de 6.7 Pa (Figura 4.57b). Posterior a la explosión 1 se registra un PDC pequeño en términos de amplitud a las 03:07:35 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 03:07:45 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos. Después de la segunda explosión se observa un PDC 2 relativamente más grande en términos de amplitud y duración que el PDC 1, el cual se presume que inició a las 03:08:45 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 03:09:05 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~20 segundos. El espectro de frecuencia correspondiente al

infrasonido para las explosiones es de aproximadamente 5 Hz y < 10Hz respectivamente (Figura 4.58a).

La señal sísmica arribó ~15 segundos antes que la señal infrasónica y se registró una amplitud máxima de 0.013 (cm/s) (Figura 4.57c). El PDC se presume que inició alrededor de las 03:08:20 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 03:08:35 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. La envolvente decae exponencialmente y el espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es de 5 Hz (Figura 4.58b).

La distancia mayor que recorrió la corriente de densidad piroclástica (PDC) se estima que fue de 700 metros a lo largo del flanco NE del volcán.



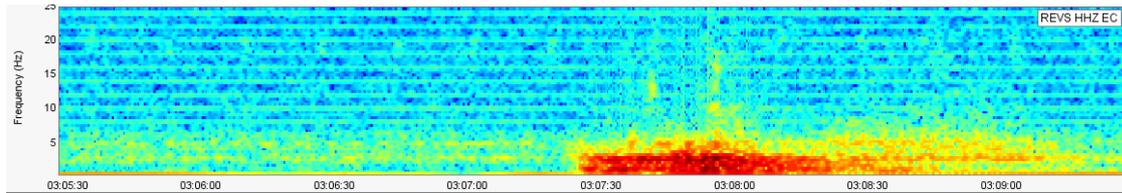


Figura 4.58: a) Registro infrasónico del Evento #18 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #18 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #19: 2017 08 20 – 04:44:06 (UTC).

En la imagen se logra observar gran cantidad de material incandescente a lo largo del flanco S y poca cantidad de material a lo largo del flanco SE. El viento presenta incandescencia y la altura mínima de la columna eruptiva es de 3 km (Figura 4.59).



Figura 4.59: Imagen del 20 de agosto a las 04:44:06 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a los flancos S, SE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.60).

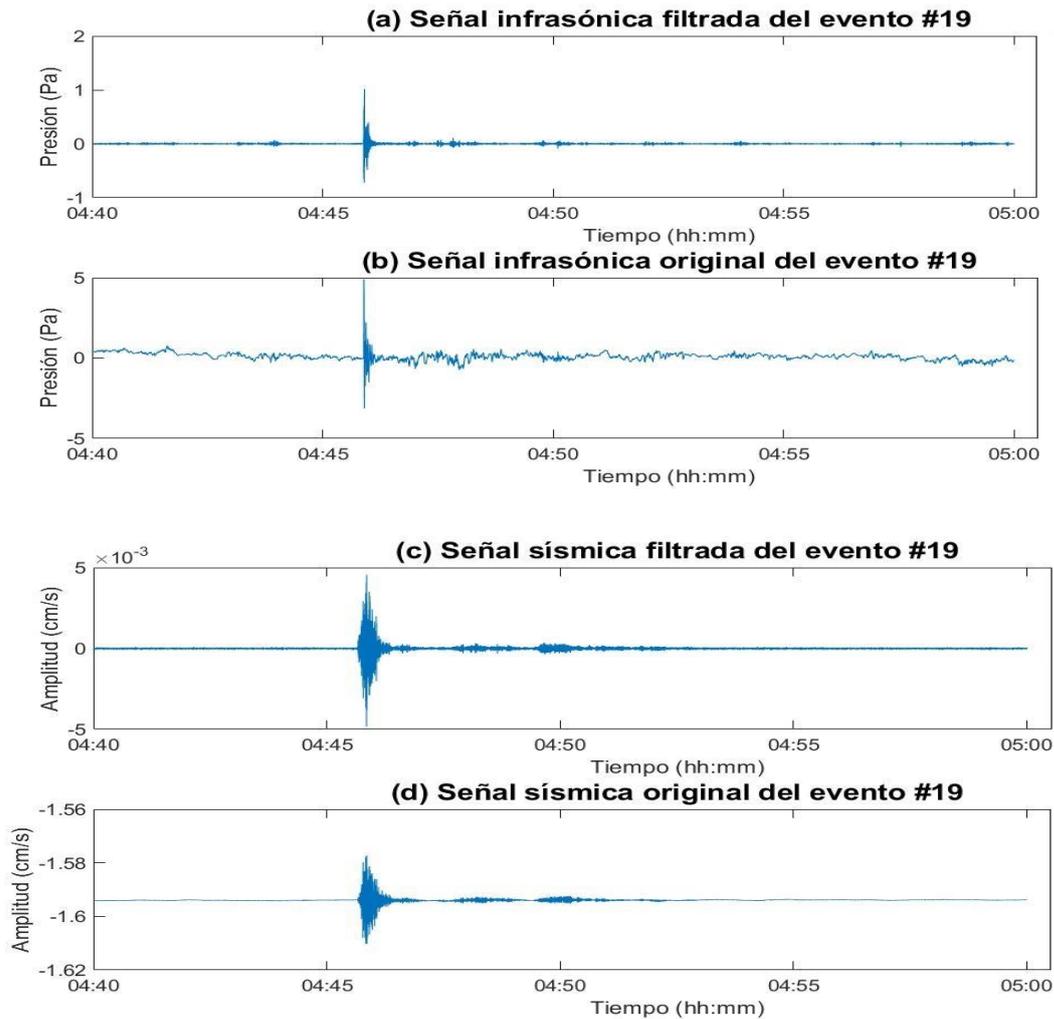


Figura 4.60: **(a)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(b)** Señal original del evento infrasónico. **(c)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(d)** Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #19

Este es un evento de corriente de densidad piroclástica (PDC) que presenta una amplitud máxima de 4.9 Pa (Figura 4.60b) y se presume que comenzó alrededor de las 04:46:20 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 04: 46:30 (UTC – hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. La frecuencia correspondiente al infrasonido es ~10 Hz (Figura 4.61a).

En cambio, el evento sísmico presenta una amplitud de 0.018 (cm/s) (Figura 4.60b) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es < 10 Hz. El PDC se presume que comenzó alrededor de las 04:46:10 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las

04: 46:20 (UTC – hh: mm: ss) con una duración ~10 segundos. El registro sísmico arribó ~10 segundos antes que el registro infrasónico y su envolvente decae exponencialmente (Figura 4.61b).

La distancia mayor que recorrió la corriente de densidad piroclástica se estimó en 650 metros a lo largo del flanco S.

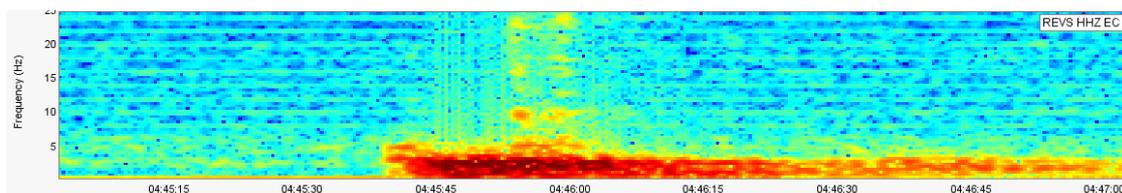
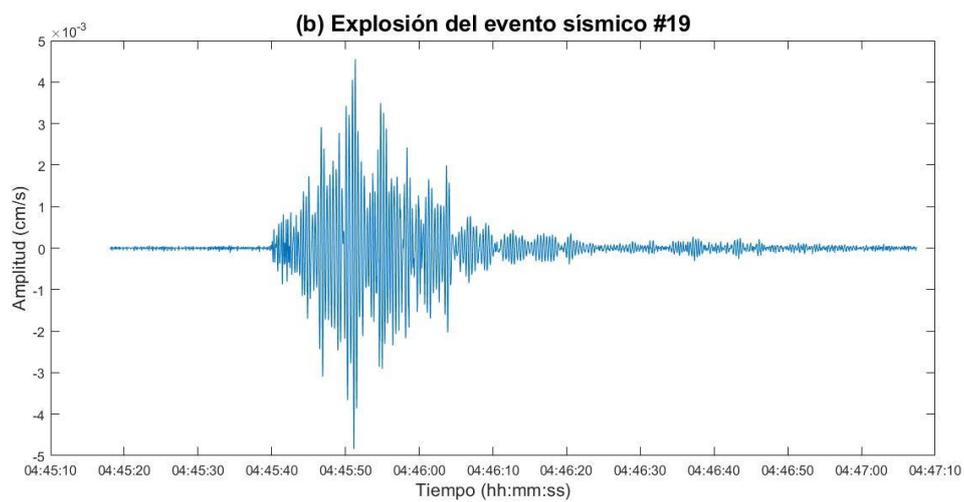
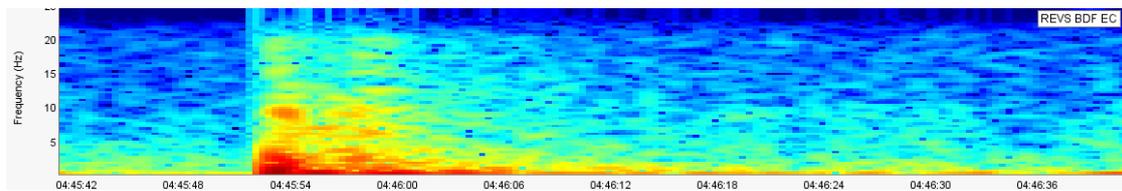
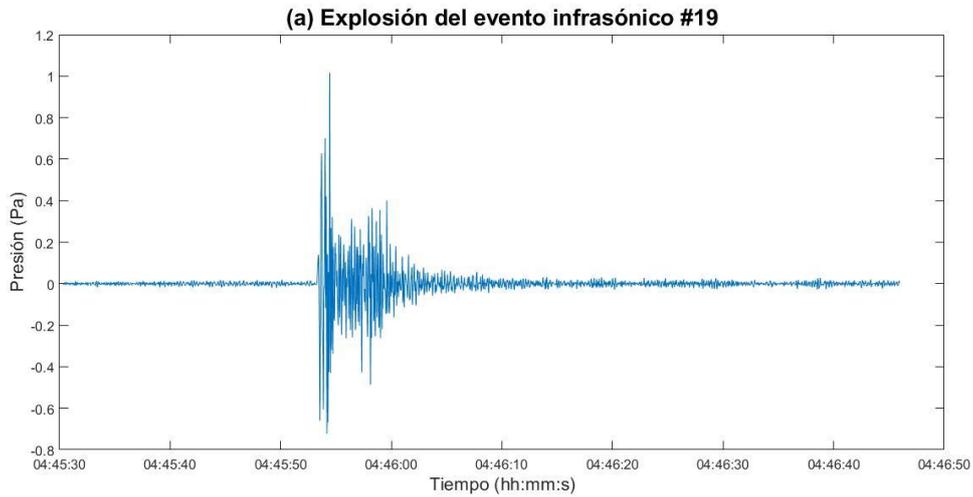


Figura 4.61: **a)** Registro infrasónico del Evento #19 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #19 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de PDC, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #20: 2017 08 20 – 07:39:42 (UTC).

La imagen muestra visiblemente material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento. La columna eruptiva alcanza una altura mínima de 2 km (Figura 4.62).

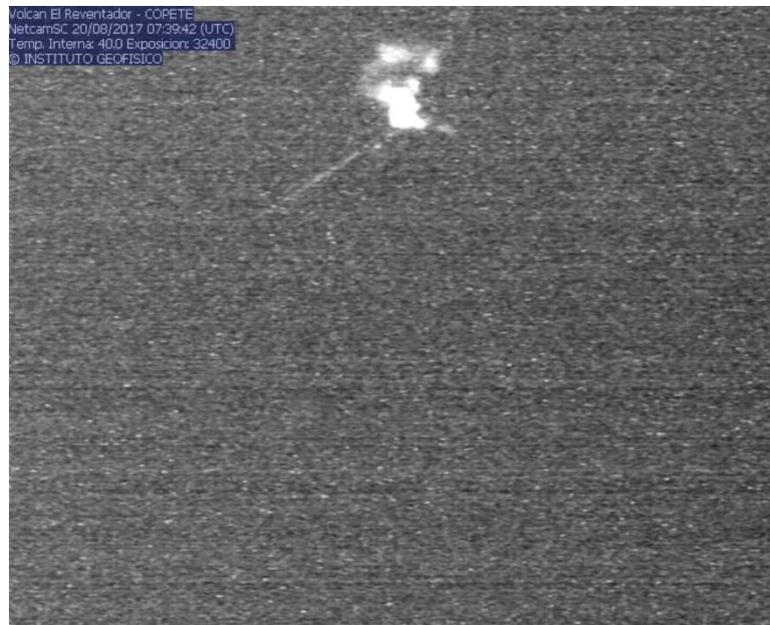


Figura 4.62: Imagen del 20 de agosto a las 07:39:42 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa visiblemente material incandescente a lo largo del flanco S e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.63).

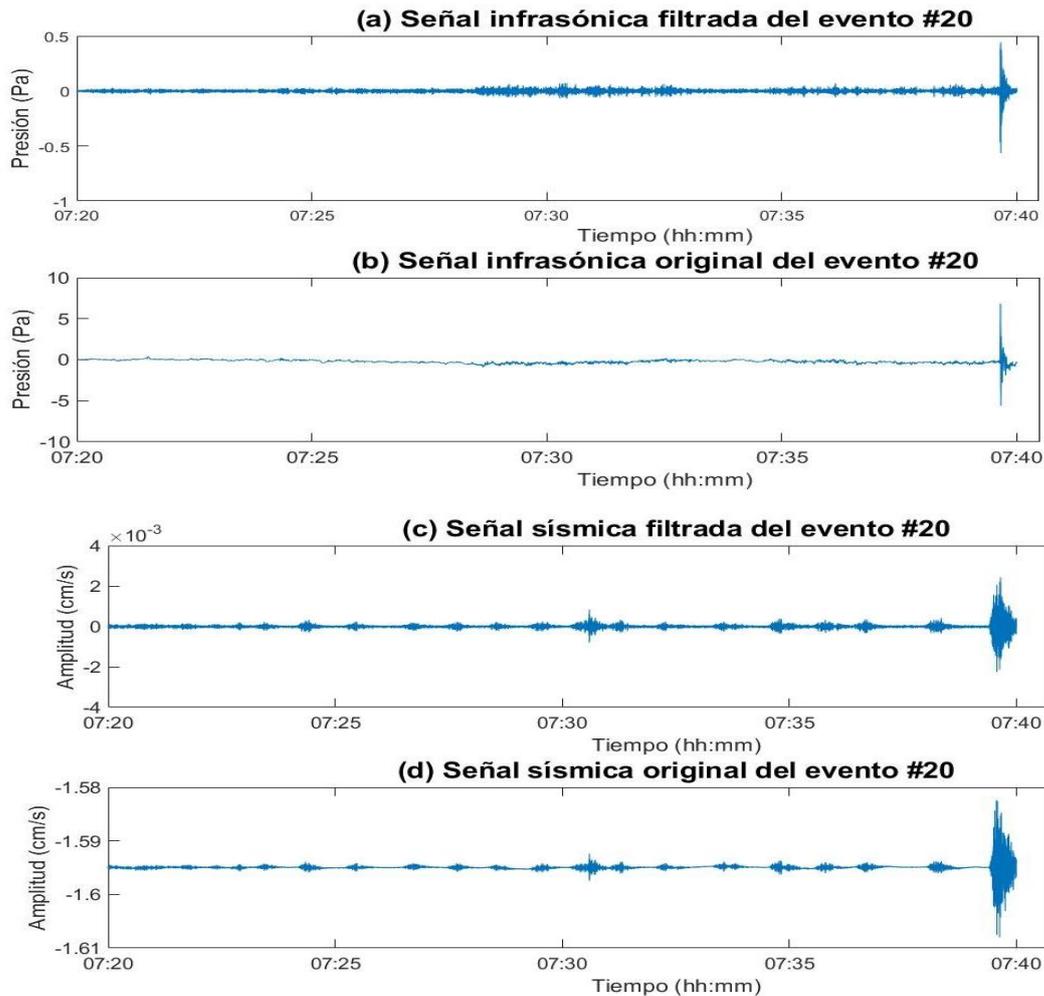


Figura 4.63: **(a)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(b)** Señal original del evento infrasónico. **(c)** Señal filtrada de 3 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). **(d)** Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #20

Este es un evento de caída de rocas que se presume inició alrededor de las 07:39:50 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó alrededor de las 07:40:00 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos y una amplitud máxima de 6.7 Pa del evento infrasónico (Figura 4.63b). Las frecuencias correspondientes al infrasonido son relativamente bajas para la caída de rocas (< 10 Hz) y pueden verse afectadas por la atenuación del infrasonido (Figura 4.64a).

En cambio, el evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.022 (cm/s) (Figura 4.63c) y su espectro de frecuencia correspondiente a la sísmica es <10 Hz. No se logra

visualizar a detalle la caída de rocas en el registro sísmico. Además, la señal sísmica llega ~15 segundos antes que la señal infrasónica. La señal sísmica en su mayoría de tiempo presenta ruido (Figura 4.64b).

La distancia mayor que recorrió la caída de rocas se estima que fue de 600 metros a lo largo del flanco S del volcán.

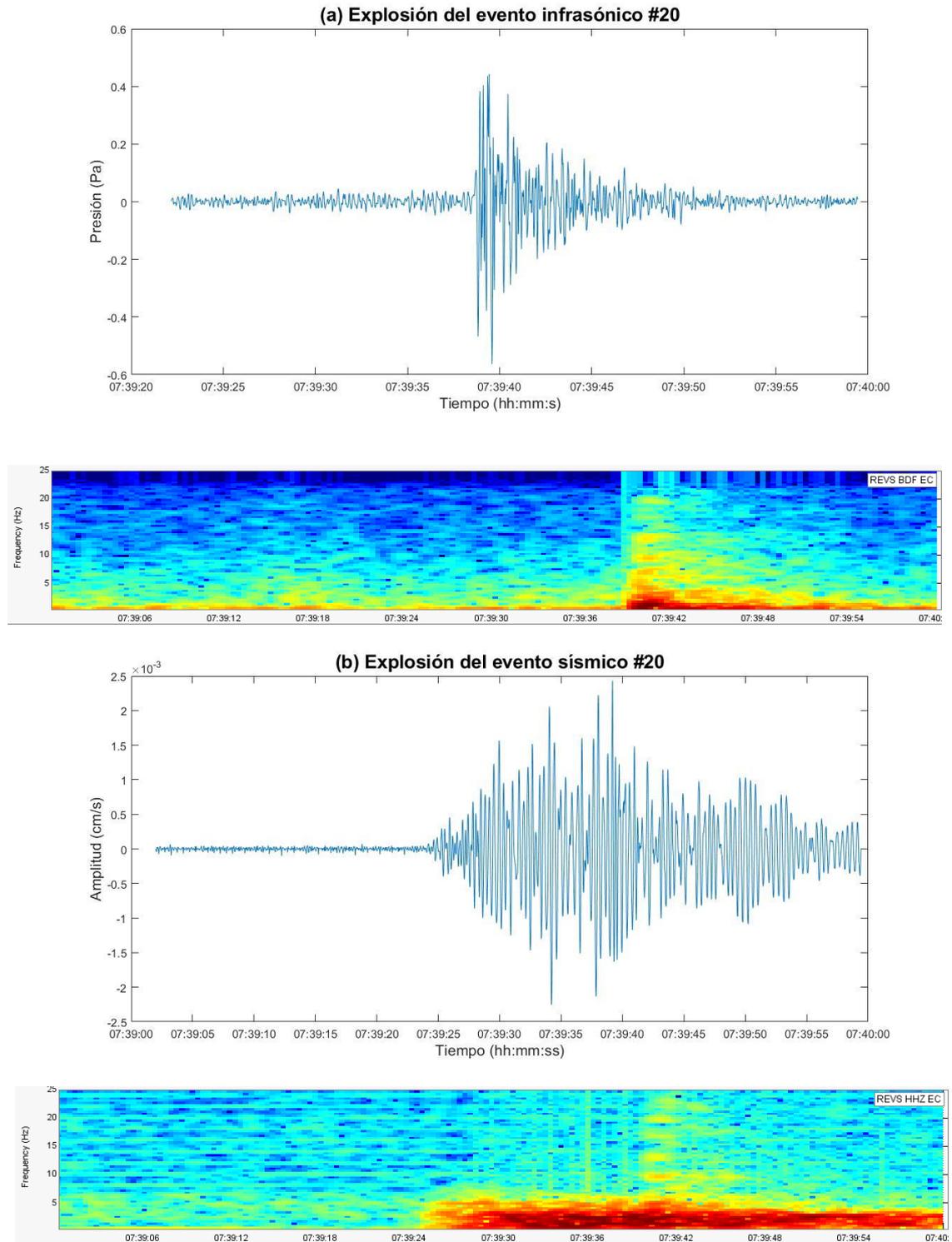


Figura 4.64: a) Registro infrasónico del Evento #20 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #20 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

Evento #21: 2017 08 23 – 01:16:46 (UTC)

En la imagen se observa gran cantidad de material incandescente a lo largo del flanco NE y poco material a lo largo de los flancos S y SE. El viento presenta incandescencia y la columna eruptiva alcanza una altura mínima de 2 km (Figura 4.65).



Figura 4.65: Imagen del 23 de agosto a las 01:16:46 (UTC) a través de la cámara COPETE. Se observa material incandescente a lo largo de los flancos S, SE, NE e incandescencia en el viento (Fuente: IG-EPN).

- **Señal infrasónica y señal sísmica.**

La señal infrasónica y la señal sísmica indicarían que el evento corresponde a una explosión (Figura 4.66).

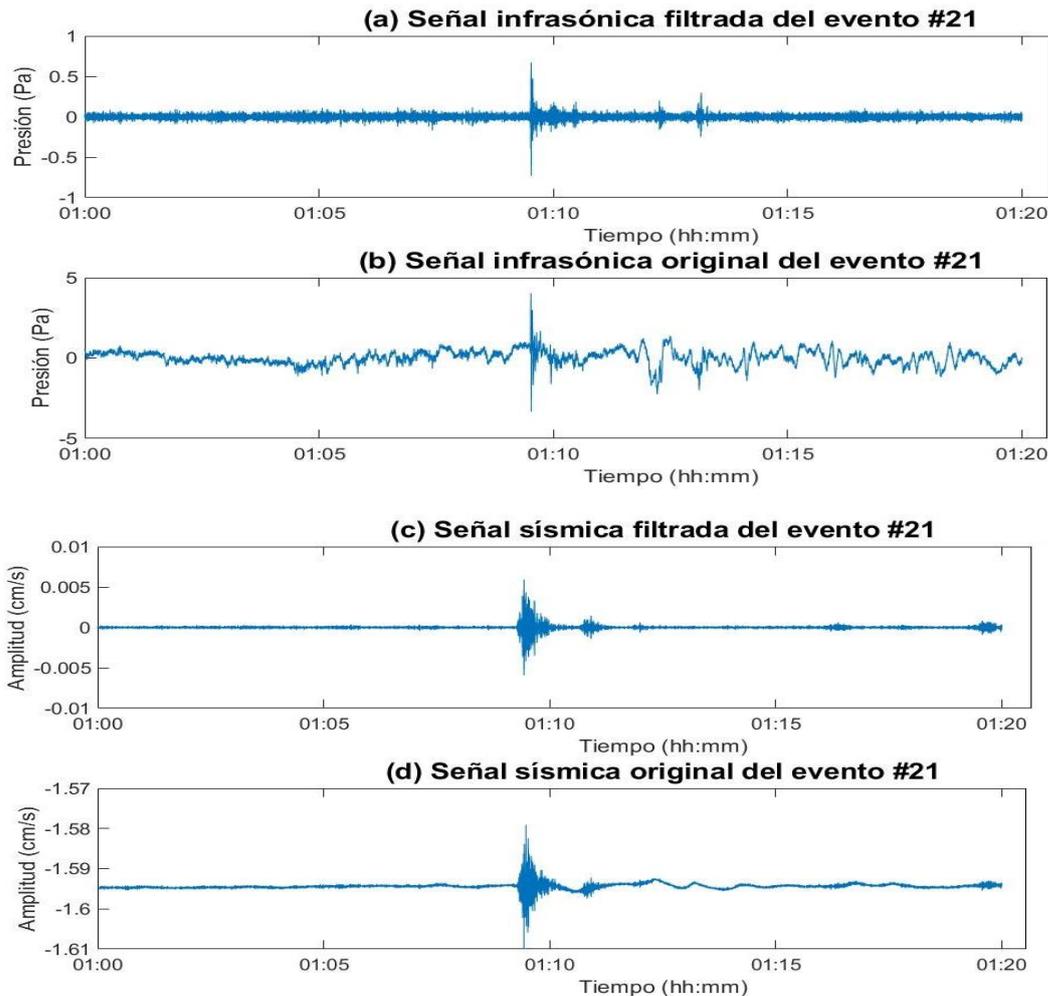


Figura 4.66: (a) Señal filtrada de 2 a 15 Hz del evento infrasónico, donde el eje y es la presión en (Pa) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (b) Señal original del evento infrasónico. (c) Señal filtrada de 2 a 20 Hz del evento sísmico, donde el eje y es la amplitud en (cm/s) y el eje x es el tiempo (hh:mm). (d) Señal original del evento sísmico.

Interpretación de la señal infrasónica filtrada y de la señal sísmica filtrada del Evento #21

Este es un evento de caída de rocas que se presume comenzó alrededor de las 01:10:05 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 01:10:15 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~10 segundos. Se reportó una explosión máxima de 4 Pa en términos de amplitud durante este evento (Figura 4.66b). El espectro de frecuencia correspondiente al infrasonido para la explosión es 5 Hz. La parte posterior del evento infrasónico puede ser ruido ocasionado por las condiciones meteorológicas de ese día o una reflexión de ondas en el anfiteatro (Figura 4.67a).

El evento sísmico tiene una amplitud máxima de 0.0051 (cm/s) (Figura 4.66c) y una envolvente que decae exponencialmente. La caída de rocas se presume que inició

alrededor de las 01:10:15 (UTC - hh: mm: ss) y finalizó a las 01:10:30 (UTC - hh: mm: ss) con una duración de ~15 segundos. La señal sísmica llega ~15 segundos antes que la señal infrasónica y su espectro de frecuencia es ~5 Hz (Figura 4.67b).

La distancia mayor que recorrió la corriente de densidad piroclástica se estimó en 700 metros a lo largo del flanco NE.

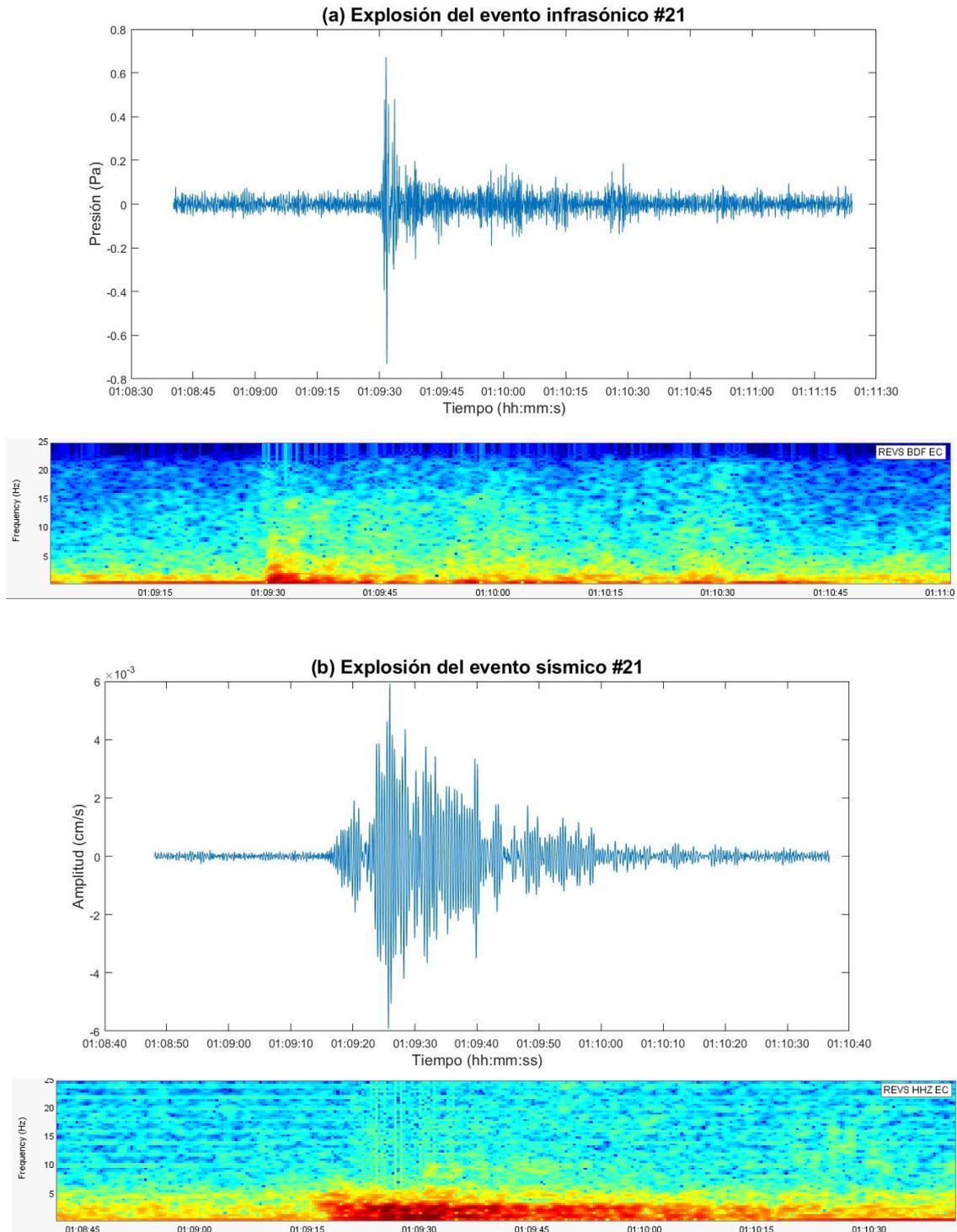


Figura 4.67: a) Registro infrasónico del Evento #21 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la presión (Pa), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión infrasónica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz). **b)** Registro sísmico del Evento #21 de la estación REVS, donde el eje y corresponde a la amplitud (cm/s), el eje x corresponde al tiempo en (hh: mm: ss) y su espectro de frecuencia que representa la explosión sísmica y la secuencia de la caída de rocas, como muestran los rangos de frecuencia (Hz).

4.6 Discusión

En este presente trabajo, se analizaron los datos acústicos y sísmicos de explosiones del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 – diciembre 2017. Se calcularon las energías acústicas y sísmicas utilizando sensores infrasónicos y sísmicos de banda ancha de la estación REVS. Además, se realizó una identificación y descripción entre corriente de densidad piroclástica y caída de rocas aplicando el análisis de registros acústicos, sísmicos de la estación antes mencionada y de fotos tomadas por la cámara Copete ubicada en el sector del mismo nombre a 5.2 km al SE del volcán durante el periodo febrero 2017 – agosto 2017.

El VASR es una medida repetible que no depende de la magnitud de la erupción para poder evaluar la actividad volcánica (Johnson y Aster, 2005). Durante el periodo mayo 2015 – diciembre 2017 se encontraron valores bajos del VASR (0.0001 – 9.81) en comparación con otros eventos en donde los valores del VASR son altos (10.82 – 2966.20).

Según Johnson y Aster (2005) sugieren que los valores del VASR < 10 indican que la fuente se localiza en profundidad. En cambio, Steele et al. (2014) sugieren que estos valores bajos del VASR indican que la actividad sísmica predominó a través del suelo, y sugieren que el conducto se encuentra restringido por una roca densa. Por lo tanto, Sciotto (2012) sugiere que si la fuente se encuentra en profundidad se produce una actividad efusiva con generación de flujos de lava, mientras que si el conducto se encuentra tapado se produce una actividad explosiva con la generación de PDCs, caídas de rocas, emisiones de gases y ceniza. Si VASR > 10 indican que la energía acústica es mayor que la energía sísmica y sugiere un sistema de conducto abierto durante la desgasificación explosiva. Estos valores altos de VASR están relacionados con actividades explosivas con la generación de flujos piroclásticos, caídas de roca, material balístico, columnas de ceniza, gases y actividades efusivas con la generación de flujos de lava.

Además, se cuantificó el VASR para los periodos mayo 2015 – junio 2016, julio 2016 – junio 2017 y julio 2017 – diciembre 2017. Durante el periodo mayo 2015 – junio 2016 (periodo 1), los valores de VASR indican que la actividad del volcán fue explosiva y sugiere que se generaron flujos piroclásticos y caídas de roca. En el periodo julio 2016 – junio 2017 (periodo 2) los valores del VASR sugieren que la etapa explosiva disminuyó y se dio una etapa efusiva, la cual se caracteriza por la generación flujos de lava. Finalmente, en el periodo julio 2017 – diciembre 2017 (periodo 3), los valores de VASR sugieren que la etapa efusiva disminuyó y se dio una fuerte etapa explosiva en comparación con el periodo 1, lo que provocó flujos piroclásticos y caídas de rocas (Johnson y Aster, 2005; Sciotto, 2012) (Sección 4.4, Tabla 4.1).

Se hizo una comparación con los trabajos realizados por Johnson y Aster (2005), Ripepe et al. (2005, 2009), Sciotto (2012) y Steele et al. (2014), los mismos que estudiaron la relación entre la actividad sísmico – acústica (VASR) y erupciones volcánicas.

Según Johnson y Aster (2005) sugieren que los valores del VASR son influenciados por cuatro variables:

- 1) Pérdidas de flujo viscoso. Sugieren que los valores de VASR bajos se debieron a que el conducto es largo y estrecho lo que impide que el magma ascienda con facilidad y los valores altos de VASR se debió a que el conducto es ancho y corto, por lo que el magma asciende con facilidad.
- 2) Contrastes de impedancia. Sugieren una impedancia alta en los flujos de lava si los valores de VASR son bajos y una impedancia baja si los valores de VASR son altos.
- 3) Transferencia de energía cinética dependiente de la densidad. Sugieren valores bajos de VASR al momento que se genera una pluma de alta densidad y valores altos de VASR cuando se genera una pluma de baja densidad.
- 4) Tamaño de la fuente. Sugieren que los valores bajos de VASR se dieron debido a que la fuente se encuentra en profundidad y los valores altos de VARS sugieren que la fuente se localiza cerca de la superficie. Se concluye que los estratovolcanes andesíticos presenta una fuente móvil (Steele et al., 2014).

El estudio que realizó Sciotto (2012) para el volcán Etna, refleja valores de VASR similares a los del volcán Reventador durante el periodo mayo 2015 – diciembre 2017. El periodo 1 de nuestro estudio arrojaron valores de VASR altos, lo que refleja que se dio una etapa explosiva. Se infirió que la actividad estromboliana en el viento permitió un proceso de despresurización interviniendo un magma más profundo y la profundización de la fuente de tremor volcánico sísmico. Además, Sciotto (2012) sugiere que la

generación de columnas de cenizas se caracteriza por presentar un porcentaje mayor de componentes juveniles (vidrio volcánico) en relación a los líticos, esto se debe a que los magmas presentan un alto contenido de sílice, agua (entre 6 y 8% en peso) y alta viscosidad.

En el periodo 2, el volcán Reventador presentó una etapa efusiva caracterizada por valores de VASR bajos. Estos valores sugieren un desacoplamiento entre las señales infrasónicas y sísmicas y la generación de flujos de lava (Sciotto, 2012). Según Ripepe et al. (2005), Ripepe et al. (2009) y Johnson y Aster (2005) para las erupciones volcánicas ocurridas en los volcanes Stromboli y Karymsky respectivamente, estos valores bajos de VASR se debe a que el magma dentro del conducto está en su nivel más bajo y la profundización del nivel de fragmentación provocaron una disminución de la sobrepresión de gas, y por consiguiente de la actividad explosiva.

Vergniolle et al. (2004) realizaron un estudio en el volcán Shishaldin localizado en Alaska y propone que este volcán presenta un modelo de vibración estromboliana de burbujas, por lo que plantea que los valores bajos del VASR se debe a que las ondas infrasónicas están estrechamente relacionadas con la sobrepresión y las dimensiones de las burbujas, y esto vinculado a la geometría del conducto y/o viento. Por lo tanto, con lo antes mencionado se propone que durante el periodo 1 la generación de las ondas infrasónicas fueron diferentes a la generación de las ondas infrasónicas del periodo 2 en el volcán Reventador.

En el periodo 3, los valores del VASR fueron los más altos debido a un aumento de la energía acústica y una disminución de la energía sísmica. Según Sciotto (2012); Johnson y Aster (2005) estos valores altos del VASR se deben al contenido de volátiles presurizados que se expanden sin llevarse consigo ceniza o también se presume que el nivel de fragmentación disminuyó, lo que implica que el volcán tenga una explosión fuerte. El aumento de los volátiles se debe a que el magma presentó un alto contenido de gas lo que provocó un incremento en la presión y por consiguiente en la actividad infrasónica.

Por lo tanto, con los periodos antes descritos y según estudios realizados por Sciotto (2012), Johnson y Aster (2005), Vergniolle et al. (2004), Ripepe et al. (2005, 2009) y Steele et al. (2014) para los volcanes Etna, Karymsky, Shishaldin Stromboli y Tungurahua respectivamente, se propone que el volcán Reventador presenta una fuente móvil o que el conducto posea un tapón durante un cierto periodo eruptivo y posteriormente ese tapón se elimine debido a una desgasificación fuerte lo que provoca

que el mismo tenga varios episodios de actividad eruptiva. Esto es muy común en estratovolcanes andesíticos alrededor del mundo.

En cambio, las corrientes de densidad piroclástica (PDC) y caídas de rocas las comparamos con estudios realizados por Johnson y Ronan (2015), Yamasato (1997), Oshima y Maekawa (2001) para los volcanes Santiaguito y Unzen respectivamente.

Johnson y Ronan (2015) proponen que la señal de infrasonido de caídas de rocas se distingue fácilmente del sonido de explosión, debido a que las señales de infrasonido de explosión poseen frecuencias < 7 Hz, mientras que el infrasonido de caída de rocas posee frecuencias entre 7,5 y 20 Hz siempre que el receptor se encuentre a una distancia menor. Las caídas de rocas tienden a producir señales infrasónicas de amplitud relativamente pequeñas, que a menudo se oscurecen por el ruido de los vientos, mientras que las corrientes de densidad piroclástica (PDC) presentan amplitudes más grandes que las caídas de rocas y la envolvente en la señal sísmica decae exponencialmente, característico para los PDCs.

Yamasato (1997) propone que las corrientes de densidad piroclástica incitan señales infrasónicas y sísmicas al momento de producirse fragmentación por la colisión de bloques. Además, la energía infrasónica es casi del mismo orden que la energía sísmica, pero la relación entre la energía infrasónica y la energía sísmica aumenta para flujos piroclásticos más grandes y más móviles. Esto significa que el desarrollo de los flujos piroclásticos está controlado no solo por el volumen de lava y de la fuerza gravitacional, sino también por la explosividad relacionada con el contenido de gases en la lava.

Finalmente, para lograr aclarar las características de las señales sísmicas de los flujos piroclásticos, Yamasato (1997) investigó las ubicaciones de sus fuentes y las variaciones de amplitud a partir de las formas de onda obtenidas por las redes sísmicas. Realizó la comparación entre la señal sísmica y las imágenes de video para lograr identificar la generación de flujos piroclásticos y propuso que los piroclastos fragmentados generaron ondas sísmicas de frecuencias > 2 Hz y que las amplitudes de estas señales se hicieron más grandes al momento del descenso de los piroclastos por la pendiente, pero tenían una frecuencia baja (~ 0.5 Hz).

Según Oshima y Maekawa (2001), las ondas sísmicas infrasónicas se incitan a causa de tres procesos. El primer proceso es la vibración del suelo provocado por la colisión de bloques de lava. Durante este proceso predomina la radiación sísmica a través del suelo. El segundo proceso se da por una fuerte explosión de gases internos debido a que la lava contiene gases de alta presión. Y el último proceso se da por el cambio volumétrico al momento del descenso de los bloques. Durante el descenso cambian su

volumen, debido a que adquieren material presente en la pendiente. Este cambio en el volumen puede actuar como una fuente acústica y la relación entre la energía acústica y sísmica es mayor, generando flujos piroclásticos.

Se concluye, que la generación de las señales acústicas y sísmicas de PDCs y caídas de rocas registradas en el volcán Reventador durante el periodo febrero 2017 – agosto 2017 (Capítulo 4, sección 4.5) se asemeja a los procesos antes descritos.

Capítulo 5- Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 Conclusiones

- La presente tesis es un claro ejemplo de la capacidad de análisis de los datos infrasónicos, sísmicos, VASR y de imágenes para realizar una evaluación a detalle de la evolución de la actividad volcánica, la dinámica de la fuente y los productos que se originan durante una erupción.
- Las técnicas aplicadas para realizar una caracterización de las señales infrasónicas y sísmicas durante el periodo mayo 2015 – diciembre 2017 incluyen el análisis de las señales antes mencionadas y la estimación de la partición de la energía sismo-acústica que está relacionada con la dinámica de la erupción.
- Se comprobó que las señales infrasónicas son más apropiadas para estudiar la dinámica explosiva y la desgasificación durante una erupción volcánica con respecto a las señales sísmicas.
- La partición de la actividad sismo- acústica no depende de la magnitud de los sismos volcánicos que se generan.
- El volcán Reventado se caracteriza por tener una transición entre VASR bajo (conducto restringido) y VASR alto (conducto abierto) producidos por diferentes tipos de actividad volcánica como explosiones estrombolianas, desgasificación y fuentes de lava.
- El periodo 1 (mayo 2015 – junio 2016) de esta investigación se caracteriza por presentar una etapa explosiva, el periodo 2 (julio 2016 – junio 2017) una etapa efusiva y el periodo 3 (julio 2017 – diciembre 2017) una etapa explosiva. Los valores altos de VASR para los periodos 1 y 3 se deben a que el volcán Reventador presentó una fuerte radiación acústica durante los períodos de desgasificación explosiva, relacionado con un sistema de conducto abierto o la fuente se encuentra cerca de la superficie. Para ambos casos se puede dar una actividad explosiva con generación de PDCs, caídas de rocas, emisiones de gases, ceniza o una actividad efusiva con la generación de flujos de lava y material incandescente. Los valores bajos de VASR en el periodo 2 se debe a que la viscosidad y el contenido de sílice en el magma disminuyeran a causa de un aumento de temperatura en la cámara magmática. También se debe: #1 la fuente se encuentre en profundidad o #2 el conducto presente un tapón. Para el caso #1 se puede dar una actividad efusiva con la generación de flujos de lava, material incandescente e incluso una actividad explosiva no tan relevante. En cambio, para el caso #2 se puede dar una actividad explosiva con la generación de PDCs, caídas de rocas, emisiones de gases, ceniza y material balístico.

- Por lo tanto, se ha demostrado mediante este estudio que las características de las señales sísmicas y acústicas dependen exclusivamente de la dinámica del magma, el contenido de gases y de las características del conducto.
- Las ondas sísmicas y acústicas son impulsadas por los flujos piroclásticos, caídas de rocas, lahares y flujos de lava que se presentan en los volcanes.
- En nuestro estudio el infrasonido para los PDCs y caídas de rocas tenían frecuencias entre 5 a 15 Hz, debido a que el receptor se encuentra a 5.2 km al SE del volcán.
- Las señales sísmicas y de infrasonido de los PDCs y caídas de rocas, presenta una forma de cigarro posterior a las explosiones.
- El tiempo de arribo de las ondas sísmicas con respecto a las ondas acústicas presentan una diferencia de ~14 segundos. Esto se puede deber a que, durante el proceso de las imágenes, la cámara fija de video COPTVS y/o la estación REVS experimentaron errores de almacenamiento.
- Los vientos fuertes y/o el ruido impiden la detección de las señales infrasónicas, por lo que se utiliza las señales sísmicas para la detección de PDCs o caídas de roca.
- Los PDCs y las caídas de rocas pueden ser incitadas por explosiones. Sin embargo, las caídas de rocas también ocurren debido al desprendimiento del frente de un flujo de bloque.
- Se relacionó en este estudio la actividad efusiva del volcán Reventador con la generación de flujos de lava y la actividad explosiva con la generación de corrientes de densidad piroclástica (PDC) y caídas de rocas. Además, el material incandescente en la cumbre del volcán se considera una actividad transitoria entre actividad efusiva y actividad explosiva.
- Los resultados obtenidos durante esta investigación sugieren que el método que se utilizó para realizar el análisis, descripción y cuantificación de la distancia recorridas por los PDCs y caídas de rocas proporcionan una información valiosa para comprender los fenómenos volcánicos superficiales.
- La dinámica de erupción y los productos volcánicos que se generan se pueden mitigar con el monitoreo constante de las señales acústicas y sísmicas para lograr establecer planes de emergencia en caso de una erupción volcánica.

5.2 Recomendaciones

- Es importante continuar analizando a profundidad la generación de las ondas acústicas y sísmicas con el fin de entender la dinámica de erupción y los productos volcánicos que se generan durante la misma.
- Es necesarios para futuros estudios cuantificar el rango de la fuente mediante el análisis de las ondas acústicas y sísmicas para mínimo tres estaciones ubicadas en las cercanías del volcán. Además, se sugiere realizar un análisis de cenizas que acompañe con lo propuesto en este estudio y poder corroborar de mejor manera los resultados obtenidos.
- Se sugiere realizar una tomografía del edificio volcánico para obtener una asignación de la velocidad de propagación de la onda P y emplearlo en la ecuación de la energía sísmica.
- Se sugiere instalar las estaciones acústicas dentro de un bosque denso o zonas alejadas, para así poder atenuar el ruido ocasionado por factores antropogénicos o condiciones climáticas.
- Se debe instalar las estaciones acústicas a una distancia mínima de 2 Km, para obtener unos registros claros y poder procesarlos de manera eficiente para cualquier estudio posterior.

CAPÍTULO 6

6.1 Referencias

- Aki K y Lee WHK (2003) Appendix 1 – Glossary of Interest to Earthquake and Engineering Seismologists. In: Lee WHK, Kanamori H, Jennings P, and Kisslinger C (eds.) International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part B, pp. 1793–1856. New York: Academic Press.
- Allstadt K., Matoza R., Lockhart A., Moran S., Caplan-Auerbach J., Haney M., Thelen W., Malone S. (2018). Seismic and acoustic signatures of surficial mass movements at volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 364 (2018) 76–106.
- Alvarado A., Ruiz M., Mothes P., Yepes H., Segovia M., Vaca C., Enríquez W., Ponce G., Aguilar A., Acero W., Vaca S., Singaicho J., Pacheco D. y Córdova A. (2018). Seismic, Volcanic, and Geodetic Networks in Ecuador: Building Capacity for Monitoring and Research. SRL Early Edition. DOI: 10.1785/0220170229.
- Arrowsmith, S., Johnson, J., Drob, D., Hedlin, M. (2010). The Seismo-Acoustic Wavefield: A new paradigm in studying geophysical phenomena. *Review of Geophysics*, doi:10.1029/2010RG000335.
- Aster R., Mah S., Kyle P., McIntosh W., Dundar N., Johnson J., Ruiz M y McNamara S. (2003). Very long period oscillations of Mount Erebus Volcano. *J. Geophys. Res.* 108 (B11), 2522.
- Baby P. y Barragán R. (2004). Evolución magmática actual de la zona subandina: volcanes el Reventador y Sumaco, modelos geodinámicas preliminares. Estudio realizado por Schlumberger con la asociación Ifea, Ird, Petroecuador y con el auspicio de Sipec Ecuador y Petrobras Ecuador.
- Barragán R., Geistd., Hall M., Larson P., Kurz M., (1998) - Subduction controls on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 154: 153-166.
- Bernard, B. y Andrade, D. (2011). Mapa Volcanes Cuaternarios Del Ecuador Continental. Instituto Geofísico.
- Branney M. & Kokelaar P. (2012). Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. *Geological Society Memoir* No.27.
- Büttner R., Dellino P. y Zinranowski B. (1999). "Identifying magma – water interaction from the surface features of ash particles". *Nature*, Vol., 401, No. 6754, pp. 688-690.

- De Martino S., Falanga M., Scarpa R., y Godano C. (2005). Very-Long-Period Volcanic Tremor at Stromboli, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, pp. 1186–1192, June 2005, doi: 10.1785/0120040063.
- Fee, D., Matoza, R.S. (2013). An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 249, 123-139, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002.
- Garces, M.A., McNutt, S.R. (1997). Theory of the airborne sound field generated in a resonant magma conduit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 78, 155–178.
- Garcés M., Hagerty M y Schwartz S. (1998). Magma Acoustic and time-varying melt properties at Arenal Volcano, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*, 25:2293-2296.
- Garcés M.A, Hansen, R.A., Lindquist, K., 1998. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. *Geophys. J. Int.* 135 (1), 255 – 263.
- Garza R., (2014). Distribución espacial del valor b debajo del volcán Popocatepetl y su relación con la estructura de la cámara magmática. Tesis de grado. Universidad Autónoma de México, 139.
- Gresta, S., Ripepe, M., Marchetti, E., D'Amico, S., Coltelli, M., Harris, A.J.L., Privitera, E. (2004). Seismoacoustic measurements during the July August 2001 eruption at Mt. Etna volcano, Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 137, 219–230, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.05.017.
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S. & Collot, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Laboratoire de Géophysique et Tectonique, Université Montpellier II, Cedex, France.*
- Guzzettir F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. (2002) STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences* 28 (2002) 1079–1093.
- Hagerty, M.T., Protti, M., Schwartz, S.Y., Garces, M.A. (2000). Analysis of seismic and acoustic observations at Arenal Volcano, Costa Rica, 1995–1997. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 101 (1–2), 27 – 65.
- Hall M.L. y Beate B., 1991. El Volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. In P. Mothes (ed.) "El Paisaje Volcánico de la sierra ecuatoriana", Corporación Editorial Nacional, Quito, Ecuador, Colegio de Geógrafos del Ecuador, 5-18.

- Hall M., Ramón P., Mothes P., Lepennec J., García A., Samaniego P., y Yopez H.(2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador, Rev. Geológica de Chile. 31
- Hall M., Samaniego P., Le Pennec J. y Johnson J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity: Journal of Volcanology and Geothermal Research 176, 1-6.
- Heiken G. y Eichelberger J. (1980). Eruptions at Chaos Crags, Lassen Volcanic National Park, California. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Volume 7, Issues 3–4, May 1980, Pages 443-481.
- Ibañez J., y Carmona E. 2000. Sismicidad Volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica.
- INECEL., 1988. Estudio Vulcanológico de El Reventador. Estudio realizado por INECEL y la asociación de firmas consultoras de proyectos hidroeléctrico COCA CODO SINCLAIR.
- IG-EPN. (2015). Informe Especial del Volcán Reventador N°1, 2015. Evaluación de la actividad eruptiva del volcán Reventador. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 10 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/noticias/959-informe-especial-del-volcan-reventador-n-1>
- IG-EPN. (2015). Informe Especial del Volcán Reventador N°2, 2015. Nuevo flujo de lava en el volcán Reventador. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 10 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e-2015/12900-infespreventador2-19mayo2015/file>
- IG-EPN. (2015). Informe Especial del Volcán Reventador N°3, 2015. Intensa actividad en el volcán Reventador. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 15 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e-2015/13046-infespreventador3-24junio2015/file>
- IG-EPN. (2016). Informe 2016-1. Actualización de la actividad eruptiva del volcán Reventador. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 15 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1270-actualizacion-de-la-actividad-eruptiva-del-volcan-reventador-informe-2016-1>
- IG-EPN. (2017). Informe 2017-01. Reporte de erupción del volcán Reventador. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 15 de

junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/reve-reportes/18907-reporte-de-erupcion-volcan-el-reventador-2017-01/file>

- IG-EPN. (2017). Informe Especial del Volcán Reventador N°3, 2017. Flujo de lava. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 25 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e-2017/18467-informe-especial-reventador-n-3-2017/file>
- IG-EPN. (2017). Informe del estado del volcán Reventador N°236, 2017. Resumen de la actividad del volcán. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 25 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-diarios/rev-d-2017/18674-informe-diario-reventador-24-08-2017/file>
- IG-EPN. (2017). Informe especial del volcán Reventador-2017- N°4. Continúa la erupción, alternancia de actividad efusiva y explosiva. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico. Recuperado el 25 de junio del 2018 de: <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e-2017/19069-informe-especial-reventador-n-4-2017/file>
- Johnson J. B, (2000). Interpretation of infrasound generated by erupting volcanoes and seismological energy partitioning during Strombolian Explosions. PhD Thesis, Univ. Of Washington, Seattle.
- Johnson J. y Lees J. (2000). Plugs and chugs—seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 101 (1–2), 67 – 82.
- Johnson, J.B. (2003). Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 121, 1-14.
- Johnson J., Aster R., Ruiz M. y Malone S. (2003). Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 121 (1–2), 15 – 63.
- Johnson J, Aster R y Kyle P. (2004) Volcanic eruptions observed with infrasound. *geophysical research letters*, VOL. 31, L14604, doi: 10.1029/2004GL020020, 2004.
- Johnson J. y Aster R. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 148: 334-354.
- Johnson, J., Ramon, P., Andrade, D., Hall, M.L., 2006. Reventador volcano: 2002 to present explosive and effusive activity. Fourth Conference Cities on

- Volcanoes, IAVCEI, Quito-Ecuador, Field Guide, Excursion A5, January 2006, p. 16.
- Johnson J., Ripepe M. (2011). Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 206: 61-69. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 206(2011)61-69.
 - Johnson J., y Ronan, T. (2015). Infrasound from volcanic rockfalls. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 2015JB012436. <https://doi.org/10.1002/2015JB012436>.
 - Johnson J., Ruiz M., Ortiz H., Watson L., Viracucha G., Ramón P. y Almeida M. (2018). nfrasound Tornillos Produced by Volcán Cotopaxi's Deep Crater. *Geophysical Research Letters*. 10.1029/2018GL077766.
 - Jolly, A.D., Thompson, G., Norton, G.E., 2002. Locating pyroclastic flows on Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies, using amplitude signals from high dynamic range instruments. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 118, 299–317.
 - Jiménez C. (2007). Procesamiento Digital de Señales Sísmicas con Matlab. *Revista de Investigación de Física*. Vol. 10 N° 2 (2007) 45-50.
 - Kilburn, CRJ (2000) Lava flows and flow fields. In: Sigurdsson, H (Editor-in-Chief). *Encyclopedia of Volcanoes*, p. 291-305. Academic Press, San Diego.
 - Kobayashi, T., Ida, Y., Ohminato, T. (2005). Small inflation sources producing seismic and infrasonic pulses during the 2000 eruptions of Miyake-jima, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240, 291–301.
 - Lane S., & Gilbert J., (2008). *Fluid Motions in Volcanic Conduits: A source of seismic and Acoustic Signal*. Geological Society, London, Special Publications, 307.
 - Lees J., Johnson J., Ruiz M., Troncoso L., y Welsh M. 2007. Reventador Volcano 2005: Eruptive activity inferred from seismic acoustic observation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 10.1016.
 - Lockwood J. & Hazlett R. (2010). *Volcanoes Global Perspectives*.
 - Macdonald, G. A. (1953) Pahoehoe, Aa, and Block Lava. *American Journal of Science*, 251, 169–191.
 - Mader, H., 2006. Volcanic processes as a source of statistical data. In: Mader, H., Coles, S., Connor, C., Connor, L. (Eds.), *Statistics in Volcanology*. IAVCEI Spec. Pub. 1. Geological Society, London, pp. 1 – 14.
 - Manzanillas L., 2011. Análisis de señales sísmicas y de infrasonido tipo chugging asociadas a la emisión de gases en el volcán El Reventador. (Tesis de Físico). Escuela Politécnica Nacional. Quito- Ecuador.

- Marchetti, E., Ripepe, M., Harris, A.J.L., Delle Donne, D. (2009a). Tracing the differences between Vulcanian and Strombolian explosions using infrasonic and thermal radiation energy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279, 273–281, doi: 10.1016/j.epsl.2009.01.004.
- McNutt SR (2005) Volcanic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33: 461–491.
- Minakami T. (1960). Fundamental research for predicting volcanic eruption. Part I. *Bulletin of the earthquakes research institute*, 38, 497-544
- Minakami T. (1974). Seismology of volcanoes in Japan. In L. Civetta P., Gasparini G., Luongo, A. Rapolla, *Physic Volcanology* (pp.1-27). Amsterdam: Elsevier.
- Moran S., Matoza S., Garcés A., Hedlin A., Bowers D., Scott E., Sherrod D. y Vallance J. (2008) Seismic and acoustic recordings of an unusually large rockfall at Mount St. Helens, Washington. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2008GL035176>
- Mount St. Helens, Washington. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 35, L19302, doi:10.1029/2008GL035176, 2008
- Nanzyo M. (2004). Unique properties of volcanic ash soils, *Global Environmental Research* Vol.6, No.2. Association of International Research Initiatives for Environmental Studies (AIRIES), Japan.
- Naranjo M., 2013. Estudio petro-geoquímico y cronológico de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 a 2009. (Tesis de ingeniera geóloga). Escuela Politécnica Nacional. Quito- Ecuador.
- Ortiz, H. D., Johnson, J. B., Ramón, P. G., & Ruiz, M. C. (2018). Using infrasound waves to monitor tropospheric weather and crater morphology changes at Volcán Tungurahua, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.11.001>.
- Oshima, H. y Maekawa, T. (2001). Excitation process of infrasonic waves associated with Merapi-type pyroclastic flow as revealed by a new recording system. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1099–1102. <https://doi.org/10.1029/1999GL010954>.
- Patanè, D., Barberi, G., Cocina, O., De Gori, P., Chiarabba, C. (2006). Time-Resolved Seismic Tomography Detects Magma Intrusions at Mount Etna. *Science*, 313, 821-823.
- Patanè, D., Aliotta, M., Cannata, A., Cassisi, C., Coltelli, M., Di Grazia, G., Montalto, P., Zuccarello, L. (2011). Interplay between Tectonics and Mount

- Etna's Volcanism: Insights into the Geometry of the Plumbing System. In: Schattner, U. (Ed.), *New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence*. Intech open access publisher.
- Palacios P., Díez M., Kendall J., Mader H. (2016). Seismic-acoustic energy partitioning during a paroxysmal eruptive phase of Tungurahua volcano, Ecuador. *Geophys. J. Int.* (2016) 205, 1900–1915 doi: 10.1093/gji/ggw136. Advance Access publication 2016 April 6. GJI Mineral physics, rheology, heat flow and volcanology
 - Paz y Miño, Guerrero J., Bonifaz C., (1931). *La exploración al Reventador: Informe de la Comisión del Comité Nacional de Geodesia y Geofísica*.
 - Pérez D., (2016). *Evolución del Espacio-Tiempo del Parámetro b en el volcán Cotopaxi*. (Tesis de ingeniero geólogo). Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
 - Ridolfi, F., M. Puerini, A. Renzulli, M. Menna, and T. Toulkeridis (2008), The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 176 (1), 94–106, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.003.
 - Riley, C. M., Rose, William I. y Bluth, Gregg J. S. (2003). "Quantitative shape measurements of distal volcanic ash". *Journal of Geophysical Research*, Volume 108, No. B10, pp. ECV8.1-ECV8.15.
 - Ripepe, M., Rossi, M. y Saccorotti, G. (1993). Image processing of explosive activity at Stromboli. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 54 (3–4), 335 – 351.
 - Ripepe M., Harris A., Carniel R., (2002). Thermal, seismic and infrasonic evidences of variable degassing rates at Stromboli volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 118: 285-297.
 - Ripepe, M., Marchetti, E., Ulivieri, G., Harris, A.J.L., Dehn, J., Burton, M., Caltabiano, T., Salerno, G. (2005). Effusive to explosive transition during the 2003 eruption of Stromboli volcano. *Geology*, 33, 341-344, doi:10.1130/G21173.1.
 - Ripepe, M., Delle Donne, D., Lacanna, G., Marchetti, E., Ulivieri, G. (2009). The onset of the 2007 Stromboli effusive eruption recorded by an integrated geophysical network. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 182, 131-136, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.02011.

- Ruiz, M.C., Lees, J.M., Johnson, J.B. (2006). Source constraints of Tungurahua volcano explosion events. *Bull. Volcanology*, 68, 480–490, doi:10.1007/s00445-005-0023-8.
- Sahetapy-Engel S., Harris A., Marchetti E. (2008). Thermal, seismic and infrasound observations of persistent explosive activity and conduit dynamics at Santiaguito lava dome, Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 173 (2008) 1–14.
- Samaniego, P., Eissen, J.-P., Le Pennec, J.-L., Robin, C., Hall, M.L., Mothes, P., Chavrit, D., Cotten, J., 2008. Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004-05 eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 176, 82–93 (this issue).
- Sciotto M. (2012). Insights into eruption dynamics and shallow plumbing system of Mt. Etna by infrasound and seismic signals. *Dottorato di ricerca in geodinamica e sismotettonica*. Università Degli Studi di Catania. Sicilia-Italia.
- Steele A., Ruiz M., Anzieta J., Johnson J. (2014). Similarities in Eruption Dynamics: A Seismo-Acoustic Analysis of Explosion Sequences at Tungurahua Volcano in May-July 2010 & December 2012. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 16, EGU2014-84, 2014. EGU General Assembly 2014.
- Vallejo S. (2017). Numerical models of volcanic flows for an estimation and limitation of volcanic hazards, the case of Reventador volcano (Ecuador). *Titulaire du master 2 recherche magmas et volcans*. UNIVERSITY CLERMONT AUVERGNE.
- Vergnolle, S., Boichu, M., Caplan-Auerbach, J. (2004). Acoustic measurements of the 1999 basaltic eruption of Shishaldin volcano, Alaska: 1) Origin of Strombolian activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 137, 109-134, doi: 10.1016/j.jvolgeores. 2004.05.003.
- Vidal, V., Ripepe, M., Divoux, T., Legrand, D., Gémard, J.C., Melo, F. (2010). Dynamics of soap bubble bursting and its implications to volcano acoustics. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07302, doi:10.1029/2009GL042360.
- Walker G., Huntingdon A., Sanders A., Dinsdale J. (1973). Lengths of lava flows. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 1973 274, doi: 10.1098/rsta.1973.0030
- Wolf T., (1873). *Crónica de los fenómenos volcánicos y terremotos en el Ecuador, con algunas noticias sobre otros países de la América central y meridional, desde 1533 hasta 1797*.
- Woessner J. y Wiemer S. (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogue: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty.

Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 684-698.
doi:10.1785/0120040007.

- Yamasato, H. (1997). Quantitative analysis of pyroclastic flows using infrasonic and seismic data at Unzen volcano Japan. *J. Phys. Earth*, 45, 397-416
- Zobin V. (2012). Introduction to Volcanic Seismology. In V. Zobin, *Introduction to Volcanic Seismology* (pp. 9-27, 49-63, 237-258,261-351. Colima: Elsevier.

CAPÍTULO 7- ANEXOS

7.1 ANEXO I: Tabla de los Parámetros utilizados para la estimación de energías acústicas y sísmicas del Volcán Reventador.

Reventador			
Símbolo	Variable	Valor	Unidad
r	Distancia desde la fuente al receptor	REVS =5249	m
ρ_{atmos}	Densidad atmosférica	REVS = 0.914	kg m ⁻³
C_{atmos}	Velocidad media de la onda acústica	343	m s ⁻¹
ΔP	Exceso de amplitud de presión		Pa
ρ_{earth}	Densidad del volcán	2500	kg m ⁻³
C_{earth}	Velocidad de la onda P	2500	m s ⁻¹
A	Coeficiente de atenuación	REVS = 0.35	adimensional
U	Velocidad de la partícula		m s ⁻¹
S	Respuesta del sitio	REVS = 1	adimensional
t	Frecuencia de muestreo	REVS HHZ = 100 REVS BDF = 50	1/s
dt	1 / frecuencia de muestreo	REVS HHZ = 0.01 REVS BDF = 0.02	s

Tabla 7.1: Parámetros utilizados para la estimación de energías acústicas y sísmicas del Volcán Reventador.

7.2 ANEXO II: Código del algoritmo en Matlab para cuantificar la partición de la energía acústica y sísmica.

```
path='C:\Users\DELL\Documents\Thesis\archivosmseed\2015\';
load('hhz15.mat');
j=find(HHZ15.AMP_CUENTAS>quantile(HHZ15.AMP_CUENTAS,0.68));
length (j);
j;
datei=datetime(HHZ15.FECHA(j))+HHZ15.HORA(j)-(1/3600);
datef=datei+(3/3600)+HHZ15.CODA(j)/3600/24;
i=10
jday=datetime(datestr(datei(i),'yyyy-mm-dd'))-datetime(datestr(datei(i),'yyyy-01-01'))+1;
tail=[num2str(datestr(datei(i),'yyyy')) '.' num2str(jday)];
[T,D,sps]=read_con(strcat(path,'BDF.D\EC.REVS.01.BDF.D.',tail)); % infrasonido
[T1,D1,sps1]=read_con(strcat(path,'HHZ.D\EC.REVS..HHZ.D.',tail)); % sísmica
[time,traces]=cutmseed(T,D,datei(i),datef(i));
[time1,traces1]=cutmseed(T1,D1,datei(i),datef(i));
p= 1/sps
q=1/sps1
npoles=2
fcs=[0.5 15];
[B,A] = butter(2,fcs/(1/p/2));
trace_filt = filtfilt(B,A,detrend(traces));
[B,A] = butter(2,fcs/(1/q/2));
trace_filt1 = filtfilt(B,A,detrend(traces1));

sensib_comp=790; % V/m/s
magnif=2.38e-6; % V/ctas
sis=2.38/sensib_comp;% (m/s)/cts
sensib_chan1=20/1000; % V/Pa
acus=magnif/sensib_chan1;% Pa
traces=trace_filt*acus; % presión en pascuales
traces1=((trace_filt1)*sis)/10000;% amplitud sísmica en cm/s
```

```

a=2;
b=pi;
r=2.7550e+07 % en m2
p=0.914 % en kg/m3
c=343 % en m/s
e= 1/sps
p1=2500; %en kg/m3
c1=2500; %en m/s
t=0.35; %adimensional
e1=1/sps1

```

```

Ea = (((a*b*r)/(p*c))*(sum((traces).^2))*e)
Es= ((a*b*r*p1*c1)/t)*(sum(traces1).^2)*e
n=Ea/Es

```

```

a= Ea;
s=Es;
v= n;
f= fopen('C:\Users\DELL\Documents\MATLAB\MATLAB\from_H\energy19.txt','a+');
fprintf(f, '%15.4s %15.4s %15.4s\n',a,s,v);

```

ANEXO III: Código del algoritmo en Matlab para abrir los archivos SAC (Seismic Analysis Code) y analizar las señales acústicas y sísmicas de la estación REVS.

- **Código para el análisis de la señal acústica (BDF).**

```

%read data
S=readsac('C:\Users\DELL\Documents\Thesis\DataFlows\Agosto\24114000\REVS.BD
F.EC.sac');
%get time from header
ti=datetime(strcat(num2str(S.NZYEAR),'-01-01'))+S.NZJDAY-1+
(S.NZHOUR*3600+S.NZMIN*60+S.NZSEC+S.NZMSEC/1000)/(3600*24);
tf=ti+S.DELTA*S.NPTS/(3600*24);
t=linspace(ti,tf,S.NPTS);
%filtering
npoles=2;
fcs=[0.5 15];

```

```

[B,A] = butter(2,fcs/(1/S.DELTA/2));
trace_filt = filtfilt(B,A,detrend(S.DATA1));

sensib_comp=790; % V/m/s
magnif=2.38e-6; % V/ctas
sis=2.38/sensib_comp;% uV/cts

sensib_chan1=20/1000; % V/Pa
acus=magnif/sensib_chan1;% Pa

sis_amp1=((trace_filt)*sis)/10000; % amplitud sismica en cm/s
sis_amp2=((S.DATA1)*sis)/10000;
pres1=trace_filt*acus; % presion en pascales
pres2= (S.DATA1)*acus;
%plotting
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,pres1)
datetick
xlabel('Tiempo (hh:mm)','FontName', 'Arial','FontSize',15)
ylabel('Presión (Pa)','FontName', 'Arial','FontSize',15)
title('(a) Señal infrasónica filtrada','FontName', 'Arial','FontSize',20)
subplot(2,1,2)
plot(t,pres2)
datetick
xlabel('Tiempo (hh:mm)','FontName', 'Arial','FontSize',15)
ylabel('Presión (Pa)','FontName', 'Arial','FontSize',15)
title('(b) Señal infrasónica original','FontName', 'Arial','FontSize',20)

```

- **Código para el análisis de la señal sísmica (HHZ).**

```

%read data
S=readsac('C:\Users\DELL\Documents\Thesis\DataFlows\Febrero\07040000\REVS.H
HZ.EC.sac');
%get time from header
ti=datetime(strcat(num2str(S.NZYEAR),'-01-01'))+S.NZJDAY-1+
(S.NZHOUR*3600+S.NZMIN*60+S.NZSEC+S.NZMSEC/1000)/(3600*24);
tf=ti+S.DELTA*S.NPTS/(3600*24);

```

```

t=linspace(ti,tf,S.NPTS);
%filtering
npoles=2;
fcs=[0.5 15];
[B,A] = butter(2,fcs/(1/S.DELTA/2));
trace_filt = filtfilt(B,A,detrend(S.DATA1));

sensib_comp=790; % V/m/s
magnif=2.38e-6; % V/ctas
sis=2.38/sensib_comp;% uV/cts

ensib_chan1=20/1000; % V/Pa
acus=magnif/sensib_chan1;% Pa

sis_amp1=((trace_filt)*sis)/10000;% amplitud sismica en cm/s
sis_amp2=((S.DATA1)*sis)/10000;
pres1=trace_filt*acus; % presion en pascales
pres2= (S.DATA1)*acus;
%plotting
figure (2)
subplot(2,2,1:2)
plot(t,sis_amp1)
datetick
xlabel('Tiempo')
ylabel('Amplitud en cm/s')
title('(a) Señal sísmica filtrada')
subplot(2,2,3)
plot(t,sis_amp2)
datetick
xlabel('Tiempo')
ylabel('Amplitud en cm/s')
title('(b) Señal sísmica original')
subplot(2,2,4);
plot
(t(cursor_info2.DataIndex:cursor_info3.DataIndex),sis_amp1(cursor_info2.DataIndex:c
ursor_info3.DataIndex))

```

```
title('(c) Explosión')  
xlabel('Tiempo')  
ylabel('Amplitud en cm/s')  
datetick
```