

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**IDENTIFICACIÓN Y CORRELACIÓN DE LOS PRODUCTOS
VOLCÁNICOS CON LA SÍSMICA DEL VOLCÁN EL
REVENTADOR DURANTE EL PERIODO OCTUBRE 2020-
MARZO 2021**

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

SANTIAGO MAURICIO SARMIENTO LAPO

santiago.sarmiento@epn.edu.ec

DIRECTORA: PhD. Silvia Ximena Vallejo Vargas

svallejo@igeptn.edu.ec

QUITO, OCTUBRE 2022

DECLARACIÓN

Yo, Santiago Mauricio Sarmiento Lapo, 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 bibliográficas que se incluyen en este documento.

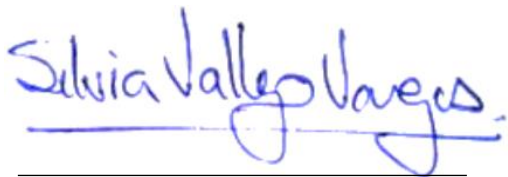
La Escuela Politécnica Nacional tiene derecho de propiedad intelectual del presente trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente



Santiago Mauricio Sarmiento Lapo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por Santiago Mauricio Sarmiento Lapo, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink that reads "Silvia Vallejo Vargas". The signature is written in a cursive style and is positioned above a solid horizontal line.

PhD. Silvia Ximena Vallejo Vargas

Directora del Proyecto

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación del proyecto.....	1
1.2 Área de estudio	2
1.3 Acceso	3
1.4 Clima.....	4
1.5 Vegetación	4
1.6 Objetivos	5
1.6.1 Objetivo General	5
1.6.2 Objetivos Específicos	5
1.7 Estudios Anteriores	5
1.8 Alcance Del Proyecto	7
CAPÍTULO 2	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Geodinámica y tectónica regional.....	9
2.2 Marco geológico de la zona de estudio.....	11
2.2.1 Volcanismo en los Andes Ecuatorianos.....	11
2.2.1.1 Frente Volcánico	12
2.2.1.2 Arco Volcánico	12
2.2.1.3 Tras arco.....	13
2.3 Geología del Volcán El Reventador.....	13
2.3.1 El complejo Volcánico Basal (CVB)	14
2.3.2 El Volcán Paleo-Reventador (VPR)	15
2.3.3 El Volcán Reventador (VER) o cono actual.....	15
2.4 Fases Eruptivas Del Volcán.....	16
2.4.1 Fase A: 2002	16
2.4.2 Fase B: Nov 2004 – Dic 2005.....	17
2.4.3 Fase C: Mar 2007- Ago2007.....	18
2.4.4 Fase D: Jul 2008 – Oct 2009	19
2.4.5 Fase E: 2009 – 2010	20
2.4.6 Fase F: 2011 – 2012.....	21
2.4.7 Fase G: 2012 – 2017	22
2.4.8 Fase H: 2018 – Actualidad.....	23
2.5 Monitoreo del Volcán El Reventador	24
2.5.1. Técnicas de monitoreo del volcán.....	25

2.5.1.1 Sísmico	25
2.5.1.2 <i>Satelital</i>	26
2.5.1.3 Infrasonido	28
2.5.1.4 Geoquímico	28
2.5.1.5 Detección de lahares	28
2.5.1.6 Visual y térmico	29
2.5.1.7 Colección de ceniza	30
2.6 Productos volcánicos recurrentes en el volcán El Reventador	32
2.6.1 Columnas eruptivas	33
2.6.2 Emisión de gases	34
2.6.3 Bloques balísticos	35
2.6.4 Flujos de lavas	36
2.6.5 Domos de lava	37
2.6.6 Corrientes de densidad piroclástica	38
2.6.7 Lahares	40
CAPITULO 3	41
3. VIGILANCIA SÍSMICA, VISUAL Y TÉRMICA DEL VOLCÁN	41
3.1 Señales sísmicas asociadas al volcán	41
3.1.1 Tremor volcánico	42
3.1.2 Eventos de largo periodo (LP)	42
3.1.3 Eventos volcanotectónicos (VT)	43
3.1.4 Eventos Híbridos	43
3.1.5 Explosiones	44
3.2 Productos volcánicos identificados a través de cámaras visuales y térmicas fijas	44
3.2.1 Vigilancia Visual	45
3.2.2 Vigilancia Térmica	46
CAPITULO 4	48
4. MATERIALES Y METODOLOGIA	48
4.1 Datos a ser utilizados	48
4.2 Selección de imágenes	50
4.2.1 Requisitos de imágenes para ser seleccionadas	50
4.3 Análisis de imágenes visibles seleccionadas	50
4.3.1 Identificación de productos volcánicos	50
4.3.2 Valoración de productos volcánicos	51
4.4 Análisis de imágenes térmicas seleccionadas	54

4.4.1	Identificación de productos volcánicos	54
4.4.2.	Valoración de productos volcánicos.....	54
4.5	Selección de señales sísmicas asociadas	56
4.5.1	Estaciones sísmicas utilizadas	56
4.5.2	Corte de trazas de señales sísmicas	56
4.5.3	Determinación de parámetros sísmicos.....	56
4.5.3.1	Amplitud	56
4.5.3.2	Duración de eventos.....	57
CAPITULO 5	58
5. RESULTADOS	58
5.1	Periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020	58
5.1.1	Imágenes disponibles.....	58
5.1.2.	Análisis y valoración de imágenes visuales	59
5.1.2.1	Productos volcánicos identificados	59
5.1.2.2	Valoración y Análisis	61
5.1.3	Análisis y valoración de imágenes térmicas	62
5.1.3.1	Productos volcánicos identificados	62
5.1.3.2	Valoración y Análisis	63
5.1.4	Señales sísmicas asociadas.....	65
5.1.4.1	Identificación de señales sísmicas	65
5.2	Periodo 01 al 08 de diciembre 2021	69
5.2.1	Imágenes disponibles.....	69
5.2.2	Análisis y valoración de imágenes visuales	70
5.2.2.1	Productos volcánicos identificados	70
5.2.2.2	Valoración y Análisis.....	72
5.2.3	Análisis y valoración de imágenes térmicas.....	73
5.2.3.1	Productos volcánicos identificados	73
5.2.3.2	Valoración y Análisis.....	74
5.2.4.1	Identificación de señales sísmicas	76
CAPITULO 6	80
6. DISCUSION	80
6.1	Pérdida de información por frecuencia de toma de datos	80
6.2	Pros y contras del análisis utilizando imágenes visuales o térmicas	80
6.3	Caracterización de actividad según el análisis visual y térmico	81
6.3.1	Periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020	81
6.3.2	Periodo 01 al 08 de diciembre 2021.....	87

CAPITULO 7	93
7.1 Conclusiones.....	93
7.2 Recomendaciones.....	95
7.3 Referencias	96
7.4 Anexos	106

Índice de Figuras

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio (Modificado de Estrella, 2021).....	3
Figura 1.2 Volcán El Reventador Tomado el 09/10/2021.	4
Figura 2.1 Marco geodinámico del Ecuador (Tomado de Yepes et al., 2016).	10
Figura 2.2 Geología del volcán El Reventador donde se muestra los principales edificios volcánicos. De Izq a Der. (Complejo Volcánico Basal, Paleo-Reventador, Cono Actual) (Tomado de Almeida et al., 2019).	14
Figura 2.3 FASE A. Generación de dos flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).....	17
Figura 2.4 FASE B. Formación de cinco flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).	18
Figura 2.5 FASE C. Formación de tres flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).....	19
Figura 2.6 FASE D. Primeras señales de la formación de un cono piroclástico (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).	20
Figura 2.7 FASE E. Formación de un cono piroclástico en el cráter (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).	21
Figura 2.8 FASE F Formación de un domo de lava dentro del cono (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).	21
Figura 2.9 FASE G. Formación de veinte flujos de lava y numerosos PDC's (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).	22
Figura 2.10 FASE H. Foto actual del Volcán El Reventador. Tomado el 10/11/2021. .	24
Figura 2.11 Ubicación de las estaciones de monitoreo del volcán El Reventador (Tomado de IG-EPN, 2019).	25
Figura 2.12 Técnicas de monitoreo presentes en el volcán El Reventador donde se aprecia una imagen térmica/visual obtenida de la cámara REBECA (Tomado de IG-EPN, 2019).	32
Figura 2.13 Columna eruptiva del Volcán El Reventador. Tomado el 10/11/2021.....	34
Figura 2.14 a) Emisión de gases del volcán El Reventador. b) Esquema de una nube producida por una erupción pliniana donde se aprecia la dirección a la cual va a moverse la columna de gases. (Tomado de Parfitt & Wilson, 2008).	35
Figura 2.15 Imagen térmica que muestra el depósito de bloques balísticos correspondientes al volcán El Reventador. Tomada el 28/10/2020.	36

Figura 2.16 Depósitos del volcán El Reventador. Las líneas amarillas muestran un flujo piroclástico, mientras que las elipses muestran antiguos flujos de lava. Tomado el 11/11/2021.....	37
Figura 2.17 Formación del domo de lava en el 2011 del volcán El Reventador (Tomada de Almeida et al., 2019).....	38
Figura 2.18 Corriente de densidad piroclástica presente en el Volcán El Reventador. (Tomada de IG-EPN, 2017).	39
Figura 3.1 Representación de un tremor volcánico ocurrido en el volcán El Reventador el día 02 de diciembre del 2021.	42
Figura 3.2 Evento sísmico de Largo Periodo.....	43
Figura 3.3 Representación de un sismo tectónico regional ocurrido a las 06:05:10 (UTC) del día 30 de octubre del 2020.....	43
Figura 3.4 Evento sísmico correspondiente a una explosión registrada en el volcán El Reventador el día 9 de noviembre del 2020.....	44
Figura 3.5 Espectro electromagnético mostrando los rangos visible e infrarrojo. (Tomado de Chirif, 2010).	45
Figura 3.6 Columna eruptiva que muestra el volcán El Reventador. Tomada el 1/12/2021.....	46
Figura 3.7 Imagen térmica del volcán El Reventador tomada por la cámara REBECA ubicada al Noreste del volcán sobre el borde del escarpe en la cual se observa un flujo de lava activo y el inicio de una columna eruptiva. La paleta utilizada corresponde a la de "hierro" en la cual los colores más claros representan las temperaturas más altas y los más oscuros las temperaturas más frías. Tomada el 2/12/2021.....	47
Figura 4.1 Diagrama de flujo sobre la clasificación de las imágenes visuales de la cámara visible REBECA con su valoración respectiva.....	53
Figura 4.2 Diagrama de flujo indicando la clasificación de las imágenes térmicas proporcionadas por la cámara REBECA con su valoración respectiva.....	56
Figura 5.1 Representación del número de imágenes visibles por día dentro del periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020.....	58
Figura 5.2 Representación del número de imágenes térmicas por día dentro del periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020.....	59
Figura 5.3. Imágenes obtenidas a través de la cámara Rebeca entre el 28 de octubre - 10 de noviembre del 2020. A) Imagen nocturna, volcán nublado. B) Imagen nocturna, volcán despejado con presencia de bloques rodados. C) Imagen diurna, volcán nublado. D) Volcán despejado con la presencia de una columna eruptiva. E) Imagen nocturna con la presencia de una explosión representada por una columna eruptiva sobre la cumbre F) Imagen diurna, volcán despejado.	60
Figura 5.4a) Representación del número de columnas eruptivas y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara visual REBECA	61
Figura 5.4b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas y los bloques rodados registrados dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara visual REBECA.	62
Figura 5.5 Imágenes térmicas obtenidas del volcán El Reventador a través de la cámara térmica REBECA entre 28 de octubre -10 de noviembre del 2020 A) Imagen nublada. B)	

Imagen de una columna eruptiva. C) Imagen de bloques rodados. D) Imagen de un flujo de lava.....	63
Figura 5.6 a) Representación del número de columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara térmica REBECA. b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara térmica REBECA.....	64
Figura 5.7 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 29 de octubre del 2020 a las 16:07:00 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a un temblor volcánico registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica.	65
Figura 5.8 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 9 de noviembre del 2020 a las 03:49:35 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a una explosión volcánica registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de una columna eruptiva.....	66
Figura 5.9 Duración de los productos volcánicos registrados en la sísmica dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020. En la figura se muestra una concentración del tiempo de duración de los bloques rodados y de las columnas eruptivas dentro de un rango de 1-2 minutos que es registrado en la sísmica.....	67
Figura 5.10A. Representación de la amplitud de los bloques rodados en el volcán El Reventador con respecto al tiempo dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020. En la Figura se puede identificar que existe una mayor acumulación de los bloques rodados en un rango inferior a las 1500 cuentas o unidades lo que representa eventos de muy poca magnitud.	68
Figura 5.10 B. Representación de la amplitud de las columnas eruptivas en el volcán El Reventador con respecto al tiempo dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020. En la Figura se puede identificar que existe una mayor concentración de dicho producto volcánico entre los 5000-45000 unidades.	69
Figura 5.11 Representación del número de imágenes visuales por día dentro del periodo 01 al 08 de diciembre 2021 obtenidas por la cámara visual REBECA.....	70
Figura 5.12 Representación del número de imágenes térmicas por día dentro del periodo 01 al 08 de diciembre 2021 obtenidas por la cámara visual REBECA.	70
Figura 5.13 Imágenes obtenidas a través de la cámara Rebeca entre el 1-8 de diciembre del 2021 A) Imagen diurna, volcán despejado con columna eruptiva. B) Imagen diurna, volcán nublado. C) Imagen diurna, volcán despejado. D) Imagen nocturna con bloques rodados bajo la cumbre. E) Imagen nocturna con columna eruptiva sobre la cumbre.	71
Figura 5.14 a) Representación del número de columnas eruptivas y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara visual REBECA. b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas y bloques rodados registrados dentro del periodo 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara visual REBECA.....	73

Figura 5.15 Imágenes térmicas obtenidas del volcán El Reventador a través de la cámara térmica REBECA entre el 1-8 de diciembre del 2021 A) Imagen de un flujo de lava. B) Imagen nublada. C) Imagen de una columna eruptiva. D) Imagen de bloques rodados.....	74
Figura 5.16 a) Representación del número de columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio periodo 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara térmica REBECA.	75
Figura 5.16 b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados del 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara térmica REBECA.....	75
Figura 5.17 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 2 de diciembre del 2021 a las 21:10:00 (hora local) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a un tremor volcánico registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica.	76
Figura 5.18 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 2 de diciembre del 2021 a las 23:38:10 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a una explosión volcánica registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de una columna eruptiva.....	77
Figura 5.19 Duración de los productos volcánicos registrados en la sísmica dentro del periodo 1 -8 de diciembre del 2021. En la figura se muestra una distribución aleatoria del tiempo de duración de los bloques rodados y de las columnas eruptivas registrado en la sísmica. Posiblemente se deba a la ausencia de productos volcánicos en el periodo de estudio ocasionadas o por las malas condiciones climáticas que impidieron su visualización.	78
Figura 5.20 Representación de la amplitud de las columnas eruptivas y de los bloques rodados en el volcán El Reventador a través del tiempo dentro del periodo 1-8 de diciembre del 2021. En la Figura se puede identificar que existe un amplio rango para la concentración de las amplitudes de los productos volcánicos mencionados.....	79
Figura 6.1 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 29 de octubre del 2020. Las pendientes altas tanto de los flujos de lava y de bloques rodados son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja de las columnas eruptivas son la ausencia de los mismos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo, es decir, un momento en el tiempo en el que no hubo actividad registrada. Se puede apreciar una relación de la línea de los bloques rodados con la de los flujos de lava.	82
Figura 6.2 Representación de una imagen térmica y su señal sísmica asociada del evento ocurrido a las 00:08:11 (UTC) del día 29 de octubre del 2020. 6.2A) Imagen térmica del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste. 6.2B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos anteriores a la captura de la imagen térmica de 6.2A. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de los bloques rodados, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.2A. La línea verde indica la hora en la que se tomó la imagen.	83

Figura 6.3 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 30 de octubre del 2020. Las pendientes altas tanto de los flujos de lava y de bloques rodados son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja, casi horizontal refleja la ausencia de columnas eruptivas. Los cuadros negros indican ventanas de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos. Se puede apreciar una relación de la línea de los bloques rodados con la de los flujos de lava. 84

Figura 6.4 Representación de una imagen térmica de las secuelas de una explosión y clara señal sísmica asociada del evento ocurrido 06:04:10 (UTC) del día 30 de octubre del 2020. 6.4A) Imagen térmica del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste con probable penacho remanente de ceniza y/o gas flotando hacia el noreste. 6.4B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos anteriores a la captura de la imagen térmica de 6.4A. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.4A. La línea verde indica la hora en la que se tomó la imagen. 85

Figura 6.5 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 4 de noviembre del 2020. Las pendientes altas son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja, casi horizontal refleja la ausencia de dichos eventos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos. Se puede apreciar una ligera correlación de la línea de acumulación los bloques rodados, columnas eruptivas y la de los flujos de lava. 86

Figura 6.6 Representación de una imagen térmica de las secuelas de una explosión y clara señal sísmica asociada del evento ocurrido a las 11:28:09 (UTC) del día 4 de noviembre del 2020. Transmitidas cada 4 minutos 6.6A) Imágenes térmicas del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste que inicia con una explosión y posteriormente un remanente de ceniza y/o gas flotando hacia el noreste. 6.6B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.6A. La señal indica la probable manifestación sísmica una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.6A. 87

Figura 6.7 Representación de las columnas eruptivas, bloques rodados y flujos de lava del día 1 y 2 de diciembre del 2021. En esta figura se puede resaltar como ha ido incrementando la cantidad de columnas eruptivas desde el día 1 de diciembre hasta el 2 de diciembre del 2021. Se tomó como punto de origen de esta cadena de columnas eruptivas al primer punto señalado por la flecha y registrado a las 21:52:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021. Las líneas de tendencia son el resultado de la acumulación de productos volcánicos registrados durante este periodo. Una pendiente baja, casi horizontal, demuestra la ausencia de dichos productos mientras que las pendientes altas reflejas una acumulación importante de eventos. Los cuadros negros indican ventanas de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos. 89

Figura 6.8A Representación de imágenes térmicas del volcán El Reventador posteriores al evento ocurrido a las 21:52:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021 transmitidas cada 4 minutos. El volcán presenta poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste que inició con una pequeña explosión en su cumbre. 6.8B. Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 13 minutos posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.8A. La región sombreada en azul indica la

probable manifestación sísmica de una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.8A.	90
Figura 6.9 Representación de las columnas eruptivas, bloques rodados y flujos de lava del día 1 de diciembre del 2021. En esta figura se puede resaltar como ha ido incrementando la cantidad de columnas eruptivas tomando como punto de origen de esta cadena de columnas eruptivas al punto señalado por la flecha y registrado a las 22:16:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021. Las líneas de tendencia son el resultado de la acumulación de productos volcánicos registrados durante este periodo. Una pendiente baja, casi horizontal, demuestra la ausencia de dichos productos mientras que las pendientes altas reflejas una acumulación importante de eventos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo en donde no se registraron las columnas eruptivas.....	91
Figura 6.10A Representación de imágenes térmicas a través del tiempo del volcán El Reventador posteriores al evento ocurrido a las 22:16:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021 transmitidas cada 4 minutos. El evento inicia con una explosión seguida de una alternancia de emisiones de columnas de gases y/o cenizas con explosiones de menor intensidad hasta una relativa calma. También se puede evidenciar material caliente evacuado en el flanco noreste. 6.10B. Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.10A. La región sombreada en azul indica el inicio de la probable manifestación sísmica de una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.10A.	92

Índice de Tablas

TABLA 1 Clasificación de las imágenes visibles en el día.....	51
TABLA 2 Clasificación de las imágenes visuales en la noche.....	52
TABLA 3 Clasificación de las imágenes térmicas.	54

Índice de Anexos

ANEXO I Código para cortar trazas sísmicas.....	106
ANEXO II Representación de los diferentes productos volcánicos entre el 28 de octubre- 10 de noviembre del 2020.....	108
ANEXO III Representación de los diferentes productos volcánicos entre el 1-8 de diciembre del 2021.....	114

RESUMEN

El volcán El Reventador, es un cono andesítico joven que se encuentra situado entre las provincias de Napo y Sucumbíos y es parte de uno de los muchos edificios volcánicos que componen la Cordillera Oriental del arco volcánico de Ecuador. El 03 de noviembre del 2002, tuvo una reactivación volcánica que es considerada una de las erupciones más grandes registradas en el Ecuador en los últimos años caracterizada por la emisión de grandes columnas eruptivas, bloques rodados, lahares y ceniza que llegó incluso hasta la ciudad de Quito.

Debido a ello, el presente trabajo tiene la finalidad de realizar la caracterización de la actividad volcánica en superficie del volcán El Reventador mediante las señales sísmicas registradas durante los periodos: 28 de octubre - 10 de noviembre del 2020 y del 1-8 de diciembre del 2021, para rastrear anomalías, precursores eruptivos o monitorear erupciones volcánicas en curso. Para ello se optó por trabajar en base a los datos proporcionados por el IG-EPN obtenidos de la estación sísmica LAV4 y mediante imágenes visuales e infrarrojas proporcionadas por la cámara REBECA.

El periodo 1-8 de diciembre del 2021 se caracteriza por presentar una etapa efusiva con una mayor presencia de eventos de flujos de lava, poca presencia de eventos de columnas eruptivas y bloques rodados. Además, dentro de esta etapa se destaca la presencia del inicio de una explosión registrada tanto por las cámaras visuales-térmicas y correlacionadas con la sísmica dentro de la noche y madrugada del 1 al 2 de diciembre del 2021 que en base a la interpretación de sus gráficas y al comportamiento de los productos volcánicos que aparecen en dicho periodo se establece que a las 22:16 (UTC) es el inicio de la cadena de eventos eruptivos.

Por otro lado, el periodo entre el 28 de octubre al 10 de noviembre del 2020 se caracteriza por ser un periodo efusivo siendo el 4 de noviembre uno de los días con mayor actividad. Se puede destacar que los principales productos volcánicos observados en superficie son flujos de lava, columnas eruptivas y sobre bloques rodados. Los bloques rodados han sido bastante comunes en este lapso de tiempo lo cual que se concluye que es producto de un evento eruptivo importante previo que se registró antes del 28 de octubre del 2020.

ABSTRACT

El Reventador volcano is a young andesitic cone that is located between the provinces of Napo and Sucumbíos and is part of one of the many volcanic edifices that make up the Eastern Cordillera of the Ecuadorian volcanic arc. On November 3, 2002, it had a volcanic reactivation that is considered one of the largest eruptions recorded in Ecuador in recent years characterized by the emission of large eruptive columns, rolled blocks, lahars and that even reached the city of Quito.

Due to this, the present work has the purpose of carrying out the characterization of the volcanic activity on the surface of El Reventador volcano through the seismic signals recorded during the periods: October 28 - November 10, 2020, and December 1-8. from 2021, to track anomalies, eruptive precursors or monitor ongoing volcanic eruptions. For this, it was decided to work based on the data provided by the IG-EPN obtained from the LAV4 seismic station and through visual and infrared images provided by the REBECA camera.

The period December 1-8, 2021 is characterized by presenting an effusive stage with a greater presence of lava flow events, little presence of eruptive column events and rolled blocks. In addition, within this stage, the presence of the beginning of an explosion recorded both by the visual-thermal cameras and correlated with the seismic during the night and early morning from December 1 to 2, 2021 stands out, which, based on the interpretation of their graphs and the behavior of the volcanic products that appear in said period, it is established that at 22:16 (UTC) is the beginning of the chain of eruptive events.

On the other hand, the period between October 28 and November 10, 2020, is characterized by being an effusive period, with November 4 being one of the busiest days. It can be noted that the main volcanic products observed on the surface are lava flows, eruptive columns and on rolled blocks. The rolled blocks have been quite common in this period of time, which is concluded to be the product of a previous major eruptive event that has been recorded before October 28, 2020.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del proyecto

El Reventador se encuentra ubicado en la zona Sub-Andina y es en la actualidad uno de los dos volcanes en erupción del Ecuador que forma una fila de volcanes junto con el Pan de Azúcar, Sumaco y los Conos de Puyo (Hall et al., 2008). Este complejo volcánico está constituido por tres edificios: el Complejo Volcánico Basal (CVB), el Volcán Paleo Reventador (VPR) y el cono actual o Volcán El Reventador (INECEL, 1988). El cono actual tras la erupción del 03 de noviembre del 2002 ha mostrado diferentes procesos de construcción y destrucción del cono volcánico debido a su actividad efusiva y explosiva (Hall et al., 2004; Arnold et al., 2019) y significantes cambios a nivel de la cumbre (Arnold et al., 2019; Vallejo et al., in prep.).

El episodio eruptivo ocurrido el 03 de noviembre del 2002, es considerado uno de los más repentinos y violentos, convirtiéndose en el más importante en Ecuador desde la erupción de 1887 del Cotopaxi, alcanzando un índice de explosividad volcánica VEI=4 (Hall et al., 2004). Desde entonces el volcán ha permanecido en un proceso eruptivo continuo de tipo efusivo y explosivo, generando una afectación tanto local como regional (IG-EPN, 2020).

A los casi veinte años desde que inició su más reciente proceso eruptivo, El Reventador continúa generando flujos de lava, columnas eruptivas, corrientes de densidad piroclástica, entre los principales; generando así señales sísmicas que se registran en las diferentes estaciones sísmicas, cuya respuesta en superficie está siendo monitoreada por cámaras de vigilancia ubicadas alrededor del volcán. Teniendo en cuenta que por su ubicación geográfica la zona del volcán se encuentra nublada la mayor parte del tiempo, resulta imposible en muchas ocasiones determinar cuál es la respuesta en superficie a determinados episodios con intensa actividad sísmica. Por lo tanto, la presente investigación se enfoca en la identificación y caracterización de la actividad superficial del volcán en base a las señales sísmicas emitidas para poder tener una idea mucho más clara de la actividad del volcán a pesar de las malas condiciones climáticas.

La importancia del proyecto radica en generar una base de datos, un insumo a partir del cual se pueda desarrollar un sistema inteligente para una identificación automática de las señales sísmicas y posible respuesta en superficie. Este procedimiento servirá de apoyo para los sistemas de alerta temprana en varios volcanes que se encuentren en erupción en Ecuador.

Una red de monitoreo en volcanes tiene que ir constantemente evolucionando por lo que mejorar u optimizar este sistema sería de mucha ayuda al personal que se encuentra monitoreando estos volcanes, ya que uno de los principales problemas del país es la falta de un presupuesto adecuado y flexible para dicha actividad, lo que limita la aplicación de la tecnología disponible. Este estudio podría beneficiar a largo plazo tanto a vulcanólogos como sismólogos para tener una idea más clara sobre el comportamiento y la actividad eruptiva y finalmente a la población aledaña a los volcanes.

1.2 Área de estudio

El área de estudio comprende al volcán El Reventador que se encuentra localizado en la zona sub-andina en el borde occidental de la cuenca del Amazonas aproximadamente a 90 km al Este de Quito en las coordenadas 0,08° S; 77, 657° W, entre las provincias de Napo y Sucumbíos con una altura aproximada de 3562 metros y un diámetro de 17 km (IG-EPN, 2019) (Figura 1.1).

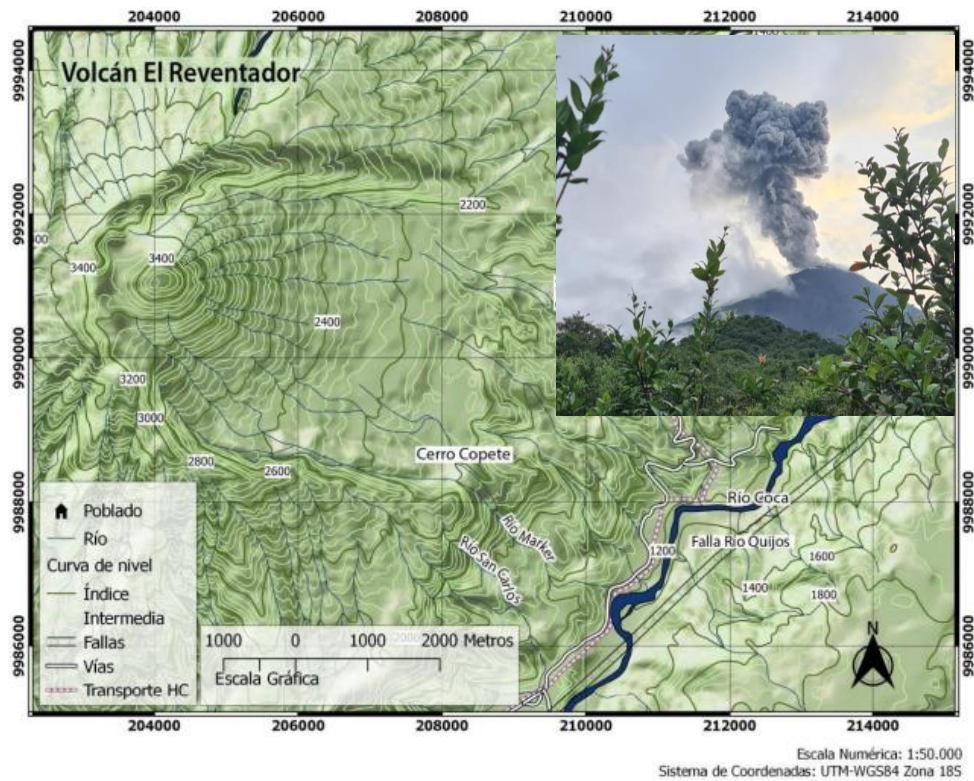


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio (Modificado de Estrella, 2021).

1.3 Acceso

La remota ubicación del volcán El Reventador, las persistentes malas condiciones climáticas como fuertes lluvias y la densa vegetación del bosque nuboso que caracterizan a la región han causado que el acceso a la zona de estudio sea de muy difícil y también ha impedido observaciones visuales de una forma directa desconociendo el número exacto de erupciones registradas en el pasado.

Actualmente, la forma más directa de llegar tomando como punto de inicio Quito, es a través de la ruta hacia Papallacta – Lago Agrio, hasta llegar al límite entre las provincias de Sucumbíos y Napo para finalmente realizar una caminata de 5 horas entre densa vegetación hasta la base del volcán (Figura 1.2).



Figura 1.2 Volcán El Reventador Tomado el 09/10/2021.

1.4 Clima

Las condiciones típicas en los Andes ecuatorianos, como en muchas otras regiones volcánicas, son bastante cambiantes. Para el caso del volcán El Reventador, ubicado en la región subandina, “el clima puede variar entre 17 °C a 22 °C y una pluviosidad entre los 3000 hasta 5500 mm anuales” (MAE, 2013), donde predomina un clima nublado y parcialmente despejado entre los meses de octubre y noviembre. Las fuertes lluvias y la humedad también se encuentran presentes en la zona de estudio ocasionando un gran riesgo para los instrumentos de monitoreo y, por lo tanto, dificultad para observaciones visuales.

1.5 Vegetación

A pesar de las malas condiciones climáticas y a la constante actividad volcánica del volcán que ocasiona un reinicio en el crecimiento ecológico luego de cada evento eruptivo, la mayoría de las plantas cercanas a la cumbre han podido generar un crecimiento exponencial (Lozano et al., 2020).

La zona volcánica se encuentra rodeada por una densa vegetación que corresponde a una serie de unidades vegetales y asociaciones florísticas que se encuentran agrupados en diferentes estratos vegetales como arbustos altos y bajos y suelos desnudos poblados por líquenes, musgos. La colonización de estas especies se inicia a partir de la dispersión de semillas por el viento o por la fauna existente en el sitio (Lozano et al., 2020) que van asentándose incluso sobre los propios flujos de lava.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Correlacionar los productos volcánicos con sus respectivas señales sísmicas registradas en el volcán El Reventador en los periodos: 28 de octubre - 10 de noviembre del 2020 y del 1-8 de marzo del 2021.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar, identificar y clasificar las fotografías e imágenes térmicas que contengan diferentes productos volcánicos, así como las que presenten nubosidad.
- Identificar y caracterizar las señales sísmicas del periodo de tiempo de estudio.
- Generar una base de datos que sirva como insumo para hacer una clasificación automática de los productos volcánicos en superficie basados en el análisis de la sísmica e imágenes visuales y térmicas.

1.7 Estudios Anteriores

Desde 1983, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional ha sido el principal gestor para el diagnóstico y la vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en el Ecuador, manteniendo un programa de monitoreo permanente, activo y en tiempo real. En Ecuador, la vigilancia de los volcanes a través de fotografías e imágenes térmicas (e.g. Tungurahua, Cotopaxi, Reventador, Sangay) no solo ha mejorado la evaluación de peligros eruptivos, sino que también ha aportado en el entendimiento de una gran variedad de procesos volcánicos. En especial el almacenamiento de imágenes obtenidas en tiempo casi real ha permitido determinar la evolución de la actividad eruptiva casi

inmediatamente. Adicionalmente, ha permitido consolidar una base de datos de fotografías e imágenes térmicas, que permite realizar un sinnúmero de análisis detallados de periodos eruptivos de interés.

Algunos trabajos previos realizados en el volcán El Reventador han servido como una base de investigación y aportes de puntos claves a la hora de realizar el presente proyecto de investigación. Uno de los primeros trabajos pioneros sobre la geología, petrografía y geoquímica del volcán El Reventador fue realizado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL, 1988).

Los estudios más destacables relacionados con la actividad eruptiva del volcán se encuentran por ejemplo en: Hall et al. (2004), Delpit et al. (2008) en los que se describe a detalle la dinámica y el proceso eruptivo del volcán El Reventador ocurrido el 3 de noviembre del 2002. La implementación de técnicas de teledetección basadas en imágenes satélites ha sido estudiada por ejemplo en Naranjo et al. (2016) con el fin de realizar un mapeo de los productos volcánicos y medir los volúmenes de lava entre 2002 a 2009. Asimismo, en Arnold et al. (2017, 2019) donde se describe la morfología y el desarrollo de los flujos de lava en el volcán El Reventador.

Los trabajos relacionados con la actividad sismo-acústica del volcán se describen en cambio en los trabajos de Welsh et al. (2005), Johnson et al. (2006), Werner-Allen et al. (2006), Lees et al. (2008), Manzanillas (2011), Ruiz & Manzanillas (2011), Ruiz et al. (2013), Ortiz et al. (2019), Flores (2019), Ruiz et al. (2019), Ortiz et al. (2021). La geoquímica y petrografía de los productos volcánicos se describen en los trabajos de Samaniego et al. (2008), Naranjo (2013), Estrella (2021).

En Vallejo et al. (2016) se abarcó las diferentes fases eruptivas del volcán ocurridas entre 2002 a 2014 tomando como base el monitoreo con cámaras visuales y térmicas, reportes del IG-EPN, trabajos en campo, entre otros.

Cabe resaltar que la contribución de la teledetección en base al monitoreo térmico como lo menciona en Wright et al. (2001) facilita el estudio de los volcanes activos. Es por ello que trabajos que empleen técnicas de teledetección térmica son muy importante para el presente proyecto de investigación. Entre ellos se tiene: Calvari (2005) donde trata de evaluar la

amenaza volcánica mediante cámaras térmicas y su posterior enfoque en el estudio del volcán Stromboli a través de la comparación de características sísmo-acústicas con respecto a imágenes de cámaras y datos satelitales como se resume en Calvari et al. (2022). En Ramsey & Harris (2013), se discute sobre las ventajas de la evolución de la teledetección térmica de la actividad superficial volcánica durante los próximos años. Ganci et al. (2013) hace referencia a la importancia de la cámara térmica con el fin de determinar las huellas dactilares térmicas de los flujos de lava y su fuente. Alpala & Montenegro (2017) hace una estimación de anomalías térmicas por medio de imágenes Landsat 7 con el fin de determinar los periodos eruptivos del volcán Nevado Huila. En Vásconez et al. (2022) se discute sobre la combinación del análisis de imágenes térmicas infrarrojas con el análisis de señales sísmicas y flujo de SO₂ con el fin de determinar la descarga de ceniza y gas durante la actividad del volcán El Reventador. Además, un artículo de Vásconez et al. (2022) en donde se detalla acerca del sistema VIGIA, un sistema de imágenes térmicas y visibles usado para rastrear explosiones volcánicas.

1.8 Alcance Del Proyecto

El alcance de este estudio es comprender la caracterización de la actividad volcánica en superficie del volcán El Reventador mediante las señales sísmicas registradas durante los periodos: 28 de octubre - 10 de noviembre del 2020 y del 1-8 de diciembre del 2021. Esto permitirá rastrear anomalías, precursores eruptivos o monitorear erupciones volcánicas en curso, ofreciendo ventajas sobre las técnicas in situ, especialmente durante actividades peligrosas o cuando exista un mal clima.

Se consideraron los dos lapsos de tiempo porque son periodos en los cuales el volcán presentó actividad superficial importante, adicionalmente que son periodos en los cuales el clima juega un factor importante a considerar. Por lo general en la zona de estudio predomina un clima nublado y parcialmente despejado entre los meses de octubre y noviembre. Es por ello que se trabajó con un periodo en el que aparentemente se encuentra despejado el volcán como lo es entre octubre a noviembre lo que facilita la identificación de productos volcánicos y la explosividad en superficie y otro periodo en el que generalmente

el volcán pasa la mayor parte de su tiempo nublado como lo es en el mes de diciembre.

Por otro lado, en cuanto se refiere al ámbito social, Ecuador se caracteriza por ser un país rodeado de volcanes, los cuales muchos de ellos son activos ocasionando en el peor de los casos daños en las infraestructuras y la pérdida de vidas humanas. Es por ello que este proyecto permitiría generar una base de datos y esta a su vez, un modelo de sistema automático de identificación de productos volcánicos en base a sus señales sísmicas. Este insumo podría ser utilizado dentro de un sistema de alerta temprana relacionado con la vigilancia de volcanes tanto en el Ecuador como fuera de él.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Geodinámica y tectónica regional

Ecuador se encuentra localizado dentro de un margen convergente activo lo que ha influenciado en la formación de regiones sismo-tectónicas y volcanogénicas activas, con ángulos de subducción que varían desde los 25°-35° debido principalmente a la heterogeneidad de la placa Nazca (Gutscher et al., 1999).

La subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana desde principios del Mioceno ha sido el proceso geodinámico más importante que se ha dado lugar en el noroeste de América del Sur (Yepes et al., 2016) generando dos importantes procesos: a) la acumulación de grandes esfuerzos tensionales que ha generado grandes terremotos dentro del límite de las placas ya mencionadas y b) la apertura del Golfo de Guayaquil (Nocquet et al., 2014). De hecho, la colisión del Ridge de Carnegie (Figura 2.1) (cuyo origen se asocia con el Punto Caliente de Galápagos) con el continente ha provocado dicha apertura ocasionada por el desplazamiento hacia el NE del Bloque Norandino (NAB), hacia el Caribe oriental a lo largo de un importante sistema de fallas, conocida como CCPP (Yepes et al., 2016).

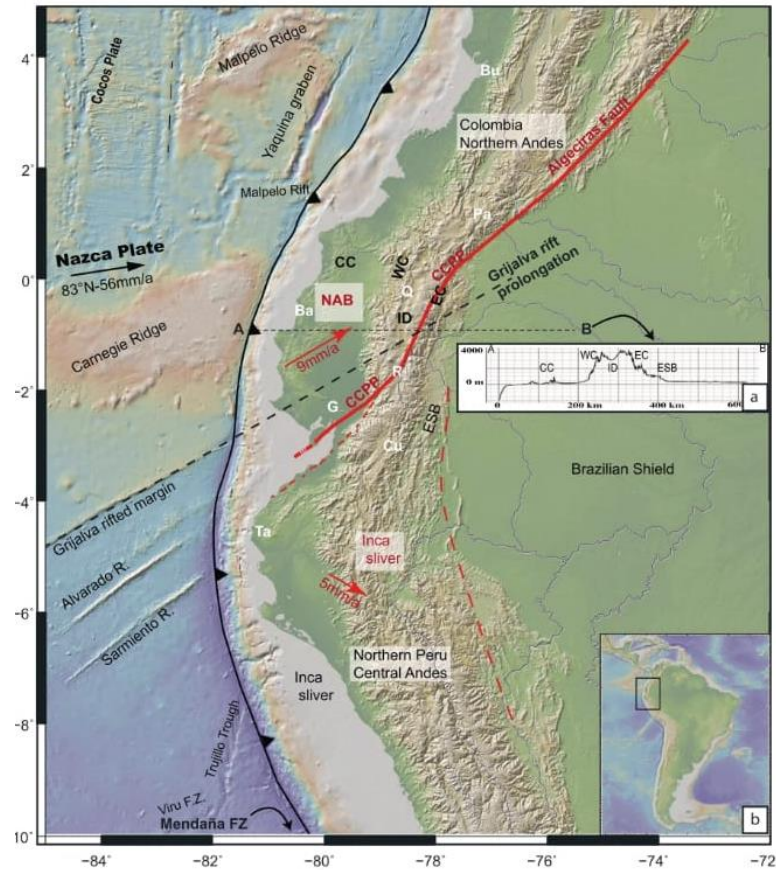


Figura 2.1 Marco geodinámico del Ecuador (Tomado de Yepes et al., 2016).

Ecuador se subdivide en cinco zonas tectono-estratigráficas: Costa, Cordillera Occidental, Valle interandino, Cordillera Real y Cuenca Oriente (Vallejo et al., 2009).

La región de la Costa y la Cordillera Occidental comprenden los diversos terrenos oceánicos acrecionados, separados entre sí por sistemas de fallas del Cretácico. La Cordillera Occidental está compuesta por rocas volcánicas e intrusivas máficas e intermedias mientras que la Cordillera Real está compuesta por rocas metamórficas paleozoicas y granitoides mesozoicos (Aspden & Litherland, 1992; Litherland et al., 1994; Pratt et al., 2005; Vallejo et al., 2007).

El Valle Interandino comprende la zona Volcánica Plio-Cuaternaria que se separa de la Cordillera Real por la falla Peltetec (Vallejo et al., 2007).

Por último, la cuenca de Oriente, incluida la zona subandina, es una cuenca foreland del Cretácico tardío-holoceno que se ubica en una zona estructuralmente muy compleja, justo al norte de la charnela entre los Andes centrales y los Andes septentrionales (Barragán & Baby, 2004).

Estructuralmente, la zona subandina es un cinturón de deformación NNE-SSW que separa la Cordillera Real (CR) al oeste de la cuenca foreland amazónica al este cuya zona corresponde a la parte deformada de la Cuenca Oriente, resultado de la inversión tectónica de estructuras pre-existentes extensivas asociadas al sistema de rift del Triásico Superior-Jurásico Inferior de orientación NNE-SSO (Balkwill et al., 1995; Baby et al., 1998; Christophoul, 1999). Esta franja deformada es más evidente en Colombia, donde constituye un sistema autónomo denominado Cordillera Oriental. En Ecuador, el sistema subandino se presenta en una forma más discontinua, formado por dos estructuras en flor positivas en-echelón (levantamiento Napo y Cordillera de Cutucú), desarrolladas mayormente durante el Mio-Plioceno y Cuaternario (Baby et al., 1999).

Alrededor del volcán El Reventador, una serie de fallas llamativas de N-S a NNE, en su mayoría con buzamiento al oeste, han estado activas en tiempos del Plio-Cuaternario. La mayor de estas fallas aflora alrededor de la parte occidental del volcán y afecta el edificio volcánico (Tibaldi, 2005). Al este del volcán, el límite con la cuenca foreland amazónica es una gran flexión, con estratos que se echan hasta 50° hacia el este, que representa la manifestación superficial de un cabalgamiento ciego (Rivadeneira & Ramírez, 1985). Al norte del volcán se encuentra el segmento ecuatoriano de la falla cuaternaria principal Chingual caracterizada por movimientos dextrales y una componente menor de levantamiento del bloque occidental (Tibaldi, 2005). También están presentes algunas fallas sinestrales con rumbo NNO. Son más antiguas que las fallas dextrales porque son desplazadas sistemáticamente por estas últimas.

2.2 Marco geológico de la zona de estudio

2.2.1 Volcanismo en los Andes Ecuatorianos

Los Andes ecuatorianos se caracterizan por presentar dos cadenas montañosas principales: la Cordillera Occidental al oeste y la Cordillera Real al este, sin contar además de una tercera cadena de volcanes desarrollada hacia la parte más externa del arco magmático actual, a lo largo de la zona subandina norte (levantamiento Napo) (Barragán & Baby, 2004). A pesar de estar desarrollados sobre un mismo basamento, correspondiente a la sección fanerozoica de la

Cuenca Oriente, dichos volcanes subandinos presentan una fuerte variación composicional, tanto geoquímica como petrográfica, desde magmas típicamente calco-alcalinos-andesíticos evidenciados en el volcán Reventador, a magmas fuertemente alcalinos tipo basanitas y fonolitas presentes en el volcán Sumaco (Colony & Sinclair, 1928; Barragán et al., 1998).

El vulcanismo del Plioceno tardío del Ecuador continental hasta hoy en día se presenta a lo largo de grupos lineales cada uno con una morfología característica, estilo eruptivo y diversidad petrográfica y química (Hall et al., 2008) dichos grupos lineales se componen de un frente, un arco y un tras arco volcánico.

2.2.1.1 Frente Volcánico

El Frente Volcánico está conformada por grandes y complejos edificios volcánicos de edades variables pertenecientes a la Cordillera Occidental. Según Hall & Beate (1991) el Frente Volcánico tiene un rumbo N-NE cuyos principales volcanes comprenden de norte a sur: Chiles-Cerro Negro, Chachimbiro, Cotacachi-Cuicocha, Pululagua, Casitagua, Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Corazón, Illiniza, Quilotoa, Carihuayrazo y El Chimborazo.

Morfológicamente, la mayoría de los centros eruptivos tienen calderas de 2 a 3 km de ancho y espaciados de manera sistemática 30-35 km a lo largo de la parte frontal, especialmente en su sección central. Las rocas jóvenes de este grupo tienden a caer dentro de los rangos 60-66 wt. % de SiO₂ y 0.9 -1.5 wt. % de K₂O. Muchos de estos centros fueron de composición andesítica silícea y dacítica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, ortopiroxeno y ocasionalmente biotita y cuarzo (Hall et al., 2008).

2.2.1.2 Arco Volcánico

El Arco Volcánico se compone de volcanes que conforman la Cordillera Real y el Valle Interandino (Monzier et al. 1999; Hidalgo et al. 2012). Morfológicamente son estratovolcanes andesíticos grandes, cada uno de 15- 20 km de ancho que llegan a 5700-5900m de altitud. Algunos volcanes que se destacan son el Cayambe, Antisana, Tungurahua, Cotopaxi y El Sangay (Hall et al., 2008).

Los volcanes del Valle Interandino por otro lado son estratoconos simples y grupos de volcanes generalmente viejos y muy erosionados de 10-20 km de

ancho con elevaciones de 3.800-4.700 m, que suelen tener calderas remanentes con domos de lava (Hall et al., 2008). En general su composición es de andesitas básicas con piroxenos, anfíbol y plagioclasa. Cerca de Quito se puede distinguir una línea de edificios volcánicos del Pleistoceno medio que son: el Ilaló, Pasochoa y Rumiñahui. En otros lugares se agrupan donde hay una curva axial en la cordillera de los Andes, como cerca de Otavalo se ubican los volcanes Cusín, Mojanda-Fuya Fuya e Imbabura. Entre Ambato y Riobamba son el Igualata y los centros Mul-Mul y Ilimpi-Huisla (Hall et al., 2008).

2.2.1.3 Tras arco

Esta zona está conformada por estratovolcanes de entre 2000-4000m de elevación de composición alcalina como es el caso del Sumaco y los Domos del Puyo, que se encuentran localizados hacia la parte oriental de la Región Amazónica (Hall et al., 2008), aunque otros representantes de esta zona son Pan de Azúcar y Yanaurcu. Estos volcanes se han construido sobre una pequeña cordillera conocida como Levantamiento Sub-Andino, la cual representa el pie oriental de Los Andes Ecuatorianos.

Los edificios del Tras-Arco están constituidos por rocas como las basanitas y las tefritas (42–53% SiO₂; 1–5% K₂O) con grandes fenocristales de Na-piroxeno y hauina en una masa fundamental de plagioclasa, óxidos de Fe-Ti y ± olivino (Hall et al., 2008).

2.3 Geología del Volcán El Reventador

El volcán El Reventador es un estratovolcán formado por una sucesión de depósitos de lava, piroclásticos y volcanoclastos, que sufrió dos colapsos laterales principales que produjeron enormes avalanchas de escombros, ambos seguidos de fases de rebrote (INECEL, 1988). En dicho complejo se puede identificar lavas de composición basálticas-andesítica, andesitas, riolitas y dacitas, de una serie calco-alcalina de mediana a alta K₂O y con afinidad adakítica (Barragán & Baby, 2004). Además, se puede apreciar una secuencia de productos efusivos y explosivos que alcanzan espesores de alrededor de 1000m.

Las rocas de El Reventador están caracterizadas por presentar un contenido de elementos incompatibles (i.e., Ba Sr, Zr) y tierras raras (i.e., La, Sm) más elevado

que aquellos correspondientes a los volcanes de la Cordillera Occidental (i.e., Volcán Atacazo) (Barragán & Baby, 2004).

Se ha podido distinguir tres grandes unidades (Figura 2.2) correspondientes a otros tantos edificios volcánicos que representan las principales etapas de evolución del complejo volcánico (INECEL, 1988). Entre ellas se tiene:

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



Figura 2.2 Geología del volcán El Reventador donde se muestra los principales edificios volcánicos. De Izq a Der. (Complejo Volcánico Basal, Paleo-Reventador, Cono Actual) (Tomado de Almeida et al., 2019).

2.3.1 El complejo Volcánico Basal (CVB)

El complejo volcánico basal (CVB) aparece en la parte norte y occidental del actual sistema eruptivo. Está limitado al este por un gran lineamiento tectónico conformadas por fallas arqueadas y alineadas en dirección N-S. En cuanto a su petrografía está constituida por ignimbritas, lavas e intercalaciones de brechas volcánicas. Al SE del cono actual se encuentra el Cerro Copete de apariencia en forma de domo de composición andesítica. En cambio, en la ladera norte aparece una fase magmática tardía del CVB representados por los cerros Líder y Mirador ya que presentan una morfología mucho más preservada. Además, una porción del edificio volcánico del CVB se presenta como un gigantesco

depósito de avalancha de escombros de ~20 km³, como resultado del colapso que afectó a los sectores oriental y central del antiguo volcán (INECEL, 1988).

Las lavas del CVB presentan una mayor variación en la composición de las lavas, puesto que su secuencia varía entre basaltos y riolitas incluyendo andesitas basálticas, andesitas y dacitas.

2.3.2 El Volcán Paleo-Reventador (VPR)

La segunda etapa proviene inmediatamente después de que concluyera la fase tectónica de tipo compresivo que afectó al Complejo Volcánico Basal constituyendo una secuencia mixta de productos explosivos y efusivos que se localizan en la parte occidental del anfiteatro. Las familias de fallas NW-SE y NE-SW que están desarrolladas sobre el flanco oriental del VPR son el resultado de dicha actividad. También este edificio fue afectado por un gran colapso volcanotectónico cuyos productos se desplazaron hacia el oriente y alcanzaron el valle del río Coca. 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 (INECEL, 1988).

Las lavas del VPR muestran una variación mucho más limitada respecto a las de la unidad anterior, están conformadas por basaltos, andesitas basálticas y andesitas siendo estas últimas las más difundidas.

2.3.3 El Volcán Reventador (VER) o como actual

El complejo volcánico El Reventador comprende en la actualidad de una estructura de 16-20 km de diámetro como consecuencia de la construcción y el colapso sucesivos de dos diferentes edificios volcánicos dejando un gran escarpe de deslizamiento y la construcción posterior del actual como cuya actividad toda sigue presente hoy en día que ha crecido dentro del anfiteatro dejado por dichos deslizamientos (INECEL, 1988).

Cabe resaltar que dichos colapsos han dejado una caldera de unos 4km de diámetro abierto y alargado en dirección este-sureste cuya composición de los productos volcánicos generados durante la actividad eruptiva del 2002 son predominantemente andesitas con un rango de sílice entre 53-62.1% (Samaniego et al., 2005).

Las lavas del cono actual son principalmente andesitas y andesitas basálticas. El cono tiene una forma alargada hacia el Este, con pendientes de hasta 34°. Previa a la erupción del 3 de noviembre del 2002 la altura del cono era de 3560 msnm, tras la erupción la parte superior del cono fue destruida reduciéndose a 3450 msnm. Desde entonces, se ha vuelto a construir el cono gracias a la efusión de al menos 26 flujos de lava y al momento se estima que alcanza una altura de 3600 msnm (IG-EPN, 2019).

2.4 Fases Eruptivas Del Volcán

Como es bien conocido debido a la remota ubicación del volcán El Reventador y a las persistentes malas condiciones climáticas que rodean la zona estimar el número exacto de erupciones volcánicas ha sido una tarea exhaustiva, remontándose en artículos de periódicos, notas informativas e incluso narraciones con los propios moradores de la zona que iban pasando de generación en generación en aquel tiempo eran formas de transmitir toda la información acerca de la actividad del volcán. Hoy en día se estima que el volcán ha tenido al menos 16 erupciones volcánicas entre 1541 y el 2002. Durante el siglo XX se reportaron erupciones en los periodos: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974, 1976, (Hall et al., 2004), y 2002, representadas por flujos de lava, flujos de lava tipo bloques, caídas de ceniza y lahares, siendo la erupción del 2002 una de las más importantes registradas en los últimos años lo cual ha conducido a realizar un monitoreo mucho más constante para poder así evidenciar y registrar las etapas o fases evolutivas que predominan en el volcán desde su gran erupción del 3 de noviembre del 2002. En base a Samaniego et al., 2008, Naranjo et al., 2016, Vallejo et al., 2016, Arnold et al., 2017. Se establece que, en base a la sismicidad, análisis de imágenes visuales- térmicas, características de la actividad superficial y campañas de trabajo de campo, se ha podido identificar ocho fases eruptivas entre 2002 hasta la actualidad. Las cuales se presentan a continuación.

2.4.1 Fase A: 2002

Esta fase inicia el 3 de noviembre del 2002 la cual tuvo una serie de erupciones de diferente magnitud en el volcán El Reventador considerándose el mayor evento eruptivo registrado en los últimos años (Hall et al., 2004). Esta fase se caracterizó por un alto nivel de actividad compuesto por una fase subpliniana y

una posterior fase efusiva entre noviembre y diciembre produciendo PDC's como se muestra en la Figura 2.3, debido a la destrucción del cono y dos flujos de lava (LF1 y LF2) (Vallejo et al., 2016).

Una vez culminada esta etapa la actividad superficial se relacionó más bien con un periodo de calma con emisiones de gas y vapor hasta mediados de 2004, con un promedio de 16 eventos por día y baja actividad térmica a principios del 2003.

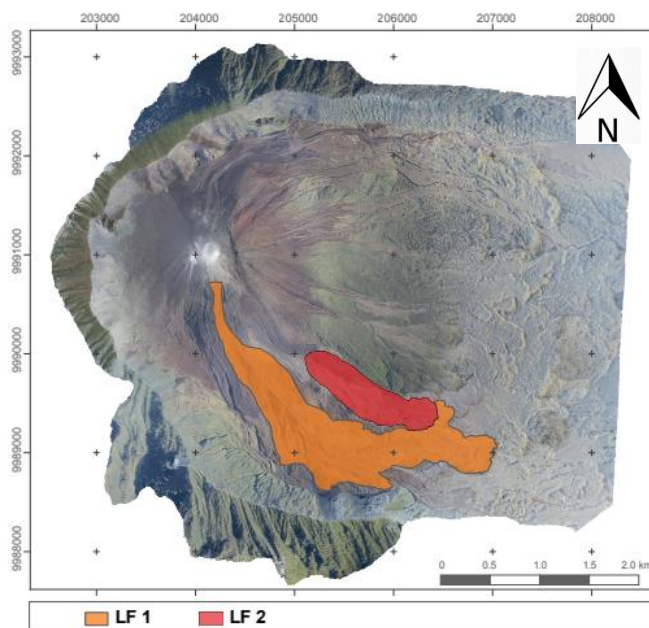


Figura 2.3 FASE A. Generación de dos flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.2 Fase B: Nov 2004 – Dic 2005

Esta fase se caracterizó por una actividad tanto efusiva como eruptiva dando lugar a la formación de 5 nuevos flujos de lava de composición andesítica basáltica y una ausencia de PDC's a diferencia de la anterior fase. Mediante los ensamblajes de minerales y elementos traza han demostrado que una segunda intrusión de magma máfico tuvo lugar durante 2004– 2005 (Samaniego et al., 2008), aunque no hay un gran cambio en las asociaciones minerales observado en secciones delgadas durante este período. El nuevo flujo de lava denominado (LF3) fue emitido desde la muesca sur y viajó sobre la lava 1 (LF1), en noviembre de 2004, alcanzando un número máximo de 446 sismos diarios en noviembre. En 2005 en cambio se emitieron tres flujos más a través de la muesca sur (LF4-LF6) (Samaniego et al. 2008) y uno a través de la muesca norte, la LF7 (Naranjo et al., 2016) (Figura 2.4).

Por otro lado, la actividad térmica fue predominantemente moderada entre noviembre de 2004 y mayo de 2005 y entre finales de 2005 y principios de 2006, la actividad térmica fue variable.

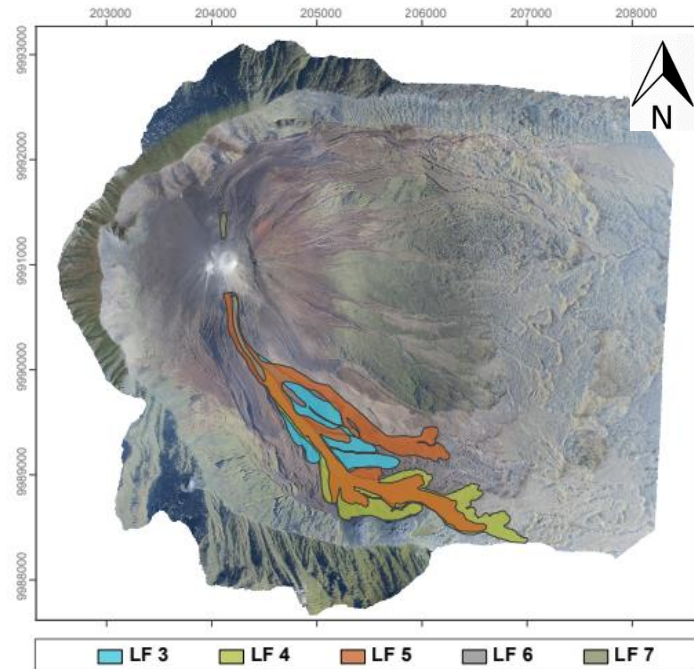


Figura 2.4 FASE B. Formación de cinco flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.3 Fase C: Mar 2007- Ago2007

Este nuevo episodio eruptivo es muy similar al del 2005 con actividad efusiva en el inicio y termina con la actividad explosiva dando como resultado la formación de tres nuevos flujos de lava (LF8-LF10). En marzo de 2007 es cuando se emitió el flujo de lava (LF8) a través de la muesca sur, y pocos días después uno nuevo en el flanco norte (LF9) (Naranjo et al., 2016), ambos mostrando un alto nivel de actividad térmica y alcanzando un pico de 698 eventos por día al final del mes. Esta fase terminó con un pequeño caudal hacia el norte en agosto de 2007 (LF10) con actividad térmica baja a moderada. Después de LF10, y durante casi un año no se observó actividad superficial y se registró un promedio de 26 eventos diarios (Figura 2.5).

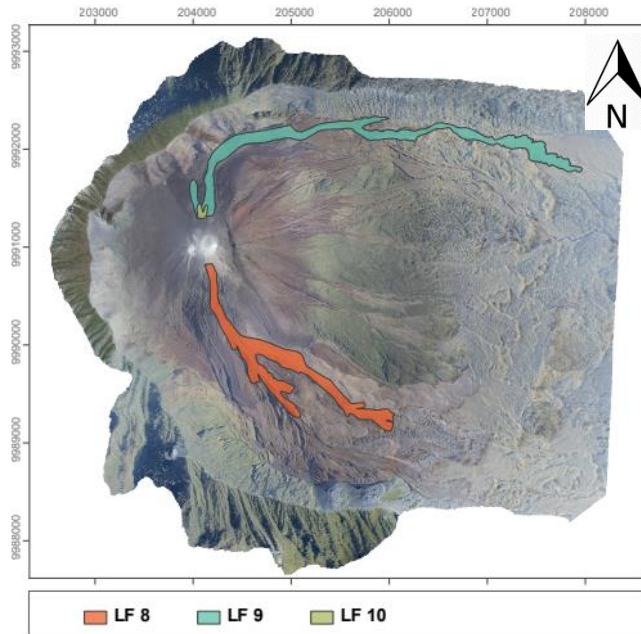


Figura 2.5 FASE C. Formación de tres flujos de lava (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.4 Fase D: Jul 2008 – Oct 2009

Un nuevo flujo de lava fue emitido en julio del 2008, el LF11 y más tarde el LF12, ambos al flanco sureste. Posteriormente, en 2009, se emitieron cinco flujos más, el LF13 y LF15 a los flancos noreste y los LF14, LF16 y LF17 al sureste. En esta fase se registró una actividad térmica moderada y alta en asociación con la emisión de flujos. Se identificaron alertas esporádicas entre los flujos (Figura 2.6).

La composición de las muestras de campo de durante estos años muestra un aumento menor en contenido de SiO_2 (Naranjo et al., 2013). Las observaciones de disminución de la tasa de efusión en el transcurso de cada fase de actividad pueden estar relacionadas con el aumento del contenido de SiO_2 , y por lo tanto aumentando la viscosidad (Naranjo et al., 2016).

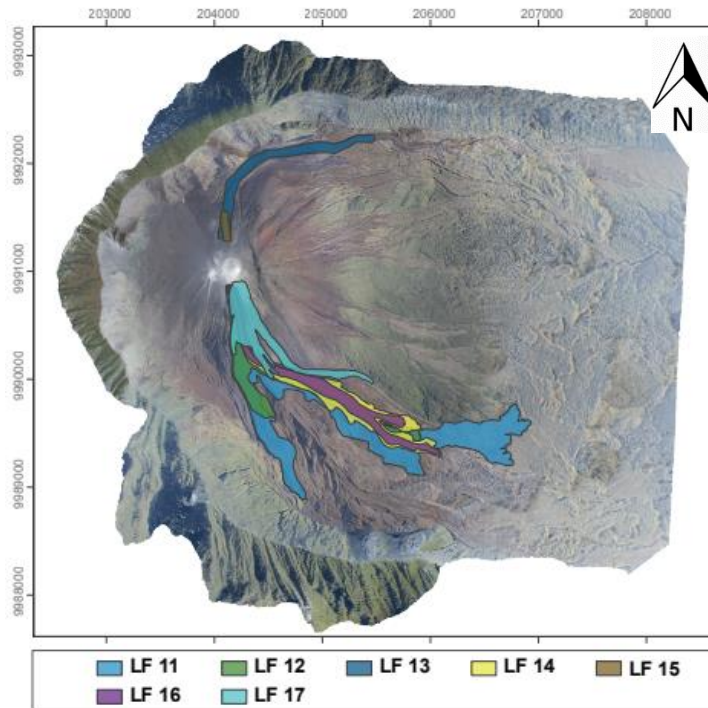


Figura 2.6 FASE D. Primeras señales de la formación de un cono piroclástico (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.5 Fase E: 2009 – 2010

Esta fase es representada como una actividad netamente explosiva. Aquí después de la formación de la lava LF17, se observó gradualmente la incorporación de un cono de tefra sobre la base del cráter (Figura 2.7). Esta nueva característica se formó por acumulación de material piroclástico mostrando una forma de cono truncado simétrico. Sus flancos estaban suavemente inclinados, mientras que las paredes interiores eran empinadas y la base del cráter mostraba pequeños pozos de explosiones. El cono tefra se observó por primera vez el 31 de octubre de 2009 y hasta el 22 de octubre de 2010. Además, por primera vez después del paroxismo de 2002, se observó la aparición de pequeños PDC (<300 m de longitud). La actividad térmica mostró un nivel bajo a moderado con pocos valores altos mientras que la temperatura más alta medida a lo largo de este tiempo fue de 247.8 ° C (Naranjo et al., 2016).

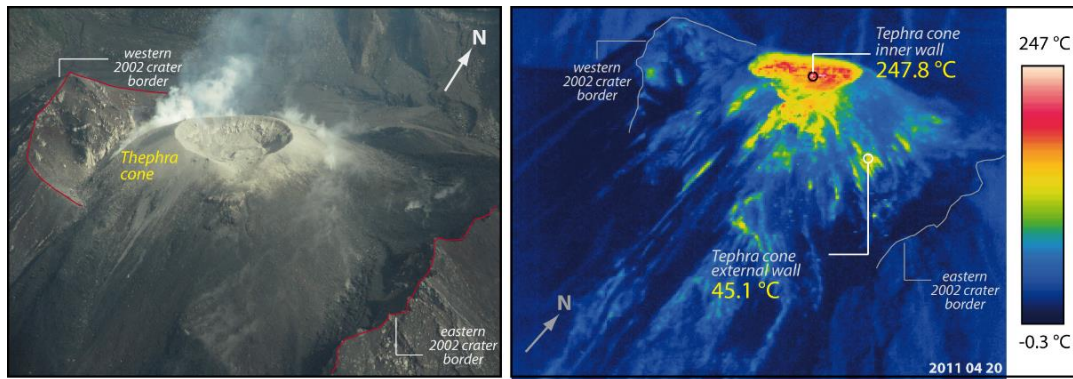


Figura 2.7 FASE E. Formación de un cono piroclástico en el cráter (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.6 Fase F: 2011 – 2012

A inicios del 2011 fue identificada de nuevo la actividad efusiva en el volcán. Dichas observaciones superficiales hasta marzo de 2011 revelaron un pequeño domo de lava que crecía dentro del cono de tefra (Vallejo et al., 2016). El domo cubría todo el piso del cono de tefra y mostraba una superficie áspera y bloqueada en la parte superior con algunos puntos caliente. Además, la morfología del domo se había transformado durante los meses posteriores incrementándose de tamaño, asimismo, la parte superior del domo mostró una superficie inclinada hacia el este con una intensa anomalía térmica. Esta anomalía se relacionó con un pequeño flujo de lava originado en el lado oriental del domo (Figura 2.8).

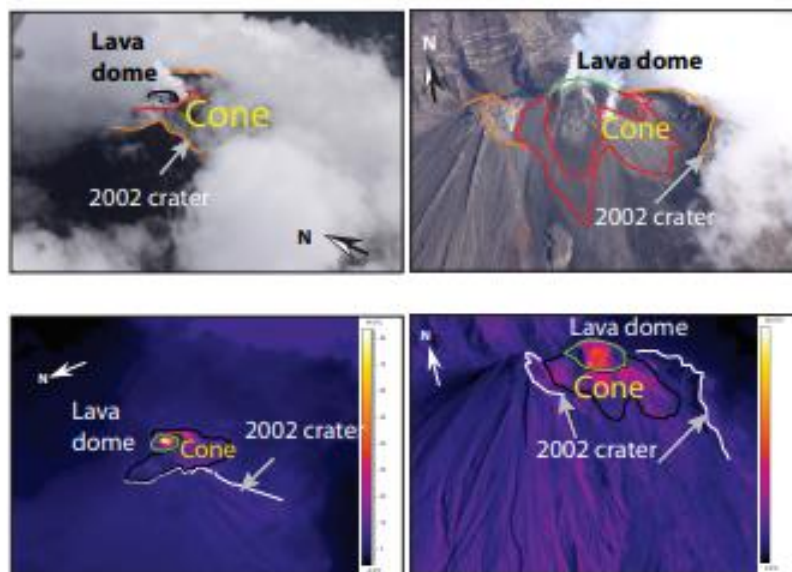


Figura 2.8 FASE F Formación de un domo de lava dentro del cono (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.7 Fase G: 2012 – 2017

En esta fase eruptiva hubo una actividad combinada de efusiva y explosiva. En ella se pudieron identificar 20 flujos de lava y una gran cantidad de PDC's marcando el estilo de esta fase de cinco años (Vallejo et al., 2016). Entre 2012 y 2015, se identificó la actividad superficial en un ventó, ubicado en el centro del cráter que se formó como continuación de la extrusión del domo de lava en 2011. Además, en el 2016 se confirmó la existencia de dos ventos activos, el North Vent (NV) y el South Vent (SV) (Almeida et al., 2019). El NV generalmente mostró actividad efusiva con actividad explosiva intermitente mientras que el SV la actividad era generalmente explosiva. Sin embargo, para el 21 de julio de 2017, no se identificó ninguna actividad efusiva y que ambos ventos contenían una actividad explosiva.

La ocurrencia de PDC fue identificada en septiembre de 2013, en los flancos sur y sureste. Desde este año su ocurrencia fue continua y se extendió por casi todos los flancos (Figura 2.9).

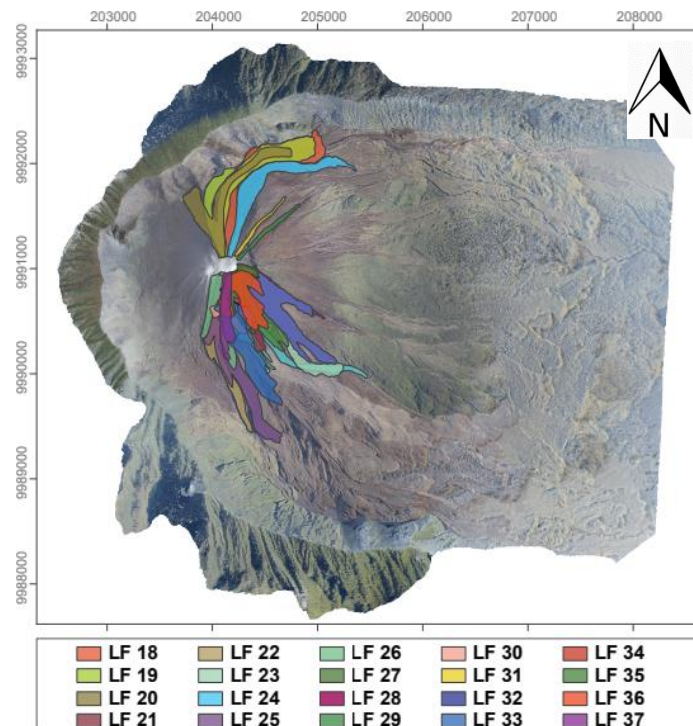


Figura 2.9 FASE G. Formación de veinte flujos de lava y numerosos PDC's (Tomado de Vallejo V. et al., 2016).

2.4.8 Fase H: 2018 – Actualidad

En junio de 2018, durante un sobrevuelo, se había identificado un escarpe en el flanco occidental del volcán junto a un nuevo flujo de lava. Sin embargo, los datos obtenidos desde la red de monitoreo, e información satelital analizada, sugirieron que el principal cambio habría ocurrido entre el 15 y el 27 de abril del 2018 y este escarpe sería el resultado de eventos explosivos sucesivos que pudieron haber producido columnas de emisión con alto contenido de ceniza (IG-EPN, 2018).

Además, se pudo determinar la presencia de tres ventos activos dentro del escarpe. Los dos ventos, ubicados en la parte superior de la escarpa mostraron actividad explosiva y se asociaron a NV y SV descritos por Almeida et al., 2019. Un tercero West Vent (WV), fue identificado en su parte inferior y mostró actividad explosiva y efusiva. Se identificaron altas temperaturas en los ventos NV, SV y WV con 119, 144 y 165.2 °C respectivamente.

Desde inicios del 2020, la actividad del volcán ha sido variable empezando con una actividad ligeramente alta con la generación de explosiones, y la presencia de bloques rodados y bloques balísticos en los flancos del volcán. Entre abril e inicios de junio, se observó la presencia de emisiones de gas/vapor y ceniza, señales tipo explosiones pero no lo suficientemente fuertes como para expulsar piroclastos de tamaño considerado hacia los flancos del volcán. Desde aproximadamente la segunda semana de junio hasta finales de agosto, se notó un incremento en la actividad superficial del volcán. Esta estaba relacionada a la presencia de explosiones fuertes que desencadenaban la expulsión de bloques que rodaban por los flancos del volcán o que eran expulsados y tomaban una trayectoria de proyectil. Adicionalmente, a inicios de agosto se observó la generación de un pequeño flujo de lava y la formación de un domo de lava a nivel de la cumbre (IG-EPN, 2020) (Figura 2.10).

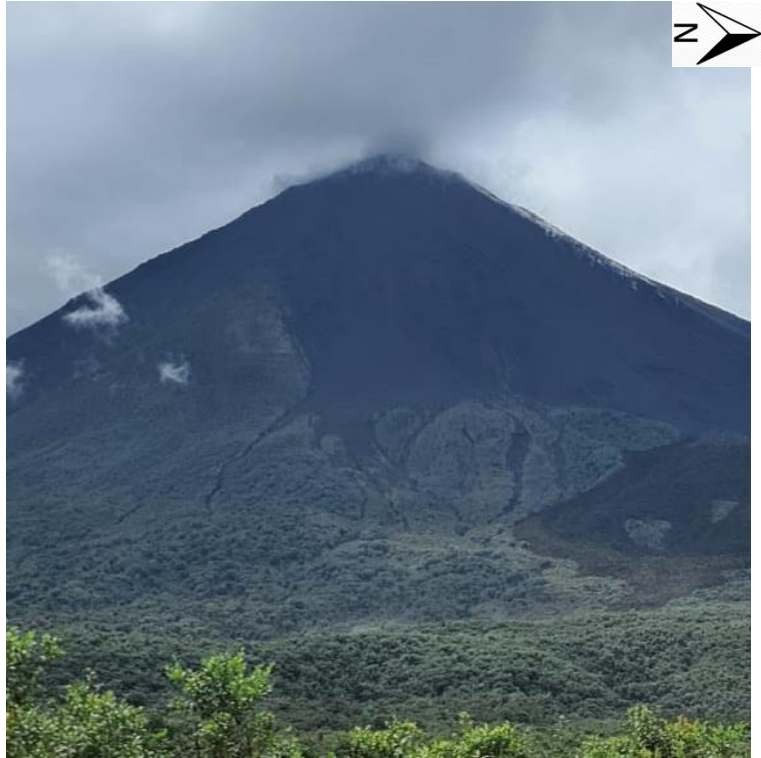


Figura 2.10 FASE H. Foto actual del Volcán El Reventador. Tomado el 10/11/2021.

2.5 Monitoreo del Volcán El Reventador

Hasta el día de hoy, en los diferentes volcanes se han aplicado muchas técnicas de teledetección ya sea para rastrear anomalías, precursores eruptivos y monitorear erupciones volcánicas en curso, lo que ofrece ventajas obvias sobre las técnicas in situ, especialmente durante pulsos eruptivos importantes potencialmente peligrosos (Spampinato et al., 2011). Para el caso del volcán El Reventador después de su reactivación en el año 2002 se inició su vigilancia volcánica (Figura 2.11) por medio de cámaras térmicas y visuales de forma aérea y no fue hasta el año 2012 cuando se instalaron las primeras cámaras fijas con LAVCAM, seguidas de COPETE en el 2013, la cámara térmica REBECA fue instalada en el 2016 y hace dos años la cámara visual REBECA, las cuales se encuentran distribuidas en los diferentes flancos del volcán cuyas imágenes son transmitidas por vía telemétrica a las oficinas del IG-EPN (Vallejo et al. in prep.).

Asimismo, se estableció una red de monitoreo permanente a través de la instalación de múltiples sismómetros de período corto y banda ancha, detectores de lahares, estaciones DOAS y medidores de ceniza los cuales se complementan con las observaciones vía satélite y mediciones sobre el terreno. Los datos satelitales comprenden alertas térmicas, dispersión de columnas de

cenizas y dispersión de SO₂, mientras que los datos de campo incluyen la recolección de muestras, mediciones de SO₂ e imágenes térmicas y visuales durante los sobrevuelos (Vallejo et al. in prep.).

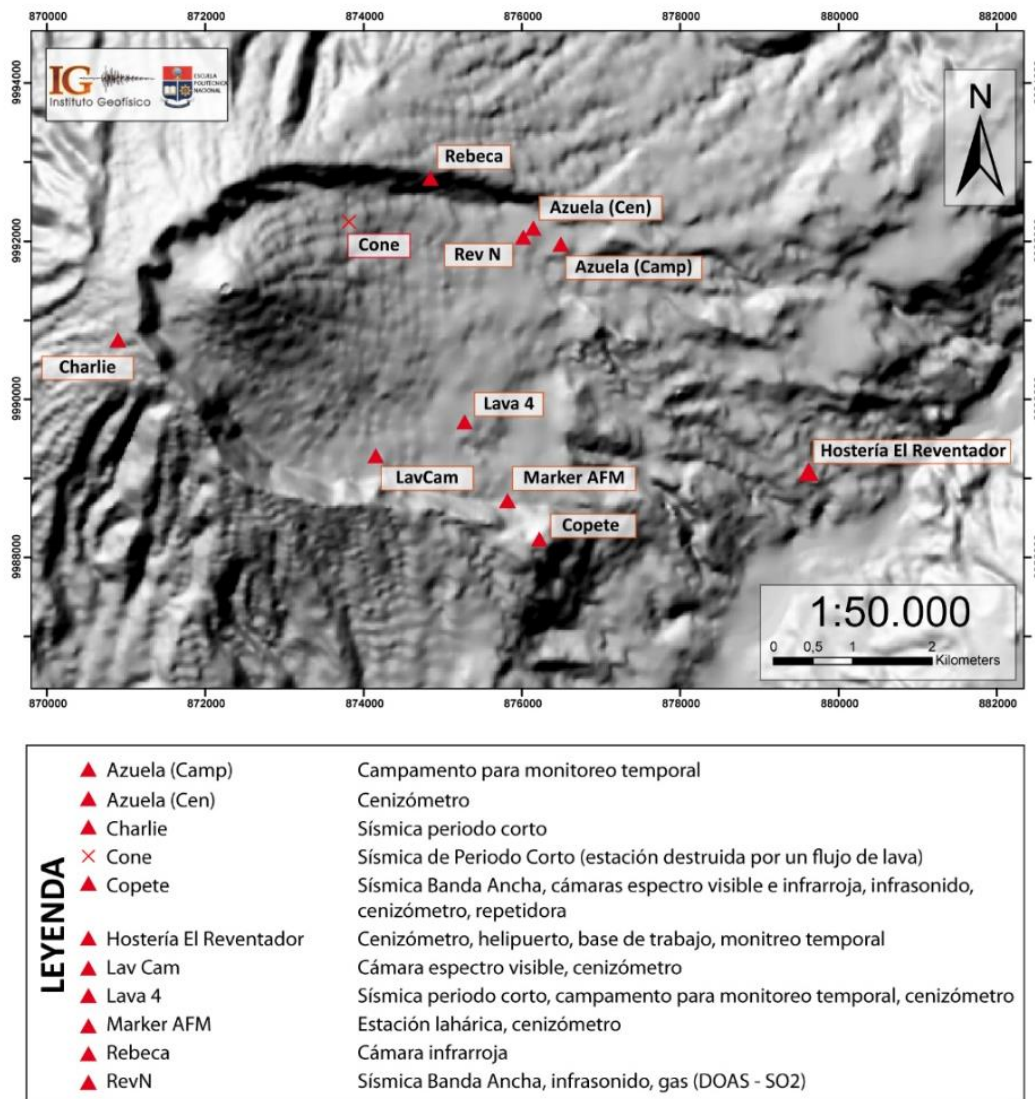


Figura 2.11 Ubicación de las estaciones de monitoreo del volcán El Reventador (Tomado de IG-EPN, 2019).

2.5.1. Técnicas de monitoreo del volcán

2.5.1.1 Sísmico

El monitoreo sísmico es la interpretación de los resultados de la actividad sísmica que ocurre en la tierra con zonas mucho más propensas que otras cuya naturaleza puede ser considerada de alta o baja sismicidad (Pin, 2018). Regiones de alta sismicidad son zonas activas en las que convergen las placas tectónicas y además donde existe la presencia de algunas fallas locales que pueden tener una longitud de decenas a cientos de kilómetros. La vigilancia

sísmica se realiza mediante la instalación de sismómetros sobre y en los alrededores del edificio volcánico por lo que el incremento y/o disminución de los sismos volcánicos y su frecuencia, podrían indicar la ocurrencia de una probable erupción volcánica (Gonzales, 2022).

Según Pin, 2018 existen tres principales objetivos para los cuales se implementan redes sísmicas de monitoreo: para emitir avisos, establecer las características de la sismicidad de una región para evaluar el peligro sísmico, e investigar la estructura interna de la tierra para comprender su funcionamiento.

2.5.1.2 Satelital

2.5.1.2.1 InSAR

La técnica InSAR consiste en la combinación de dos imágenes radar adquiridas sobre una misma zona, pero en fechas diferentes con el propósito de determinar la topografía o la deformación del terreno. Cada imagen mide la distancia existente entre la posición del satélite y la posición del suelo. Es así que, al hacer la diferencia de estas dos imágenes, se obtiene una tercera imagen llamada Interferograma, en el cual los valores de fase que se presenten a manera de franjas pueden traducir cambios en la posición del suelo que hayan ocurrido entre las fechas en las cuales fueron tomadas ambas imágenes (Gonzales, 2009).

Pueden medirse miles de puntos por Km², dependiendo de la superficie del terreno y el periodo de estudio. La deformación del terreno puede ser calculada con una precisión de milímetros a centímetros debido a que las mediciones son llevadas a cabo con una fracción de la longitud de onda de la señal.

Algunas de las ventajas de utilizar esta técnica según Manso A., 2020 son:

- No se ve afectada por la climatología
- No es invasiva
- Precisión milimétrica
- Cobertura de grandes áreas
- Entrega de resultados en pocos días.
- Herramienta para ayudar a una mejor gestión de los recursos de monitoreo disponibles

- Aporta información complementaria a las herramientas de monitoreo convencionales

2.5.1.2.2. Alertas de Puntos Calientes

Otra técnica de vigilancia registradas por diferentes sensores satelitales es el MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) que es un instrumento ubicado en órbita terrestre a bordo de los satélites Terra (EOS AM) y Aqua, que permite registrar las alertas termales durante erupciones volcánicas. La frecuencia de recolección de datos es de 4 observaciones cada 48 horas y es adquirida a través de 36 bandas espectrales con una resolución de 1km por pixel (Flynn et al., 2002; Wright et al., 2004; Lyons et al., 2009).

Generalmente estas alertas se asocian a las altas temperaturas derivadas de los flujos de lava emitidos por los volcanes (IG-EPN, 2022).

2.5.1.2.3. Alertas relacionadas a emisión de cenizas (VAAC)

VAAC (Centros de asesoramiento o aviso de ceniza volcánica) son centros de investigación que supervisan las nubes de ceniza volcánica en tiempo real con el fin de mitigar posibles efectos nocivos sobre la población y en especial en aviones que se encuentran sobrevolando continuamente dentro del espacio aéreo mundial (Martín, 2011).

Cada vez que un volcán entra en erupción, una nube de ceniza es generada por lo que la finalidad del VAAC es generar informes breves y transmitir dicha información directamente a los centros de control de aire.

Existen 9 diferentes VAAC ubicados en Londres, Toulouse, Tokio, Darwin, Wellington, Anchorage, Washington, Montreal y Buenos Aires (Pfeiffer, 2022).

La detección de nubes de cenizas se realiza principalmente mediante el análisis de datos satelitales, recopilación de informes pilotos, así como información de terreno. El pronóstico del desarrollo de la nube de ceniza combina esta información con modelos y datos meteorológicos (Pfeiffer, 2022).

2.5.1.2.4. Alertas relacionadas a emisión de gases (OMI)

OMI (Instrumento de monitoreo de ozono), es un espectrómetro ultravioleta y visual que se encuentra a bordo de la nave espacial Aura de la NASA que utiliza sensores satelitales con una región espectral de 264 a 504 nm con una resolución espectral de entre 0,42 nm y 0,63 nm (Bhartia et al., 2022). Se

encarga de monitorear la capa de ozono, el clima de la Tierra y la contaminación atmosférica (NASA, 2022). Además de otros gases traza como dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, aerosoles (partículas finas), y también radiación ultravioleta en superficie.

Una de las ventajas de OMI, es que permite detectar cenizas volcánicas y dióxido de azufre producido en erupciones volcánicas lo que facilita al igual que en caso anterior para la seguridad de las aeronaves (NASA, 2022).

2.5.1.3 Infrasonido

Una red de infrasonido permite registrar ondas acústicas en frecuencias bajas imperceptibles por los seres humanos pero lo suficientemente notables para ser registradas durante erupciones volcánicas por lo que son utilizadas como herramientas de monitoreo para comprender de mejor manera el comportamiento del volcán, sobre todo en fases explosivas (IG-EPN, 2016).

Una de las ventajas de implementar este tipo de monitoreo es que se suele emplear en volcanes cuyas explosiones son lo suficientemente potentes como lo es en el caso del volcán Tungurahua. Asimismo, el infrasonido puede alcanzar distancias globales y regionales en donde el monitoreo sísmico tiene una capacidad limitada (Johnson & Ripepe, 2011).

2.5.1.4 Geoquímico

Esta técnica de monitoreo consiste en cuantificar las emisiones de gases volcánicos emitidos. Los detectores de gases son importantes porque pueden identificar y localizar gases como por ejemplo el SO_2 y CO_2 , así como también proporcionar información útil sobre los cambios en el comportamiento de un volcán. Uno de los sistemas que permite cuantificar emisiones de SO_2 es el sistema DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Un sistema aplicado en estudios geofísicos y estimación de emisiones de gases utilizando espectroscopía de absorción por luz UV. El sistema contiene un espectrómetro óptico, (Rango espectral: 278-424 nm (UV), PC integrada para adquisición de espectros, almacenamiento de datos y comunicación Ethernet y RS232, receptor GPS, fibra óptica y telescopio (IG-EPN, 2014).

2.5.1.5 Detección de lahares

La detección de lahares se basa en un sistema que monitorea y analiza la amplitud y frecuencia de la tierra causada por las vibraciones al momento que

pasa el flujo de lodo en tiempo real. Este sistema consiste en la recepción de una señal a través de un sensor que indicará si sobrepasa o no un umbral. Si ese es el caso, se envía un mensaje de alerta a la estación base (cada minuto), Los datos adquiridos por el sistema ayudan a emitir alertas tempranas a las personas en zonas de alto riesgo (IG-EPN,2014).

Un sistema diseñado para detectar específicamente las anomalías sísmicas generadas por los lahares en movimiento es el Acoustic Flow Monitor (AFM) que es un sismómetro sensible a la vibración del suelo en frecuencias más altas (10-300Hz) que un sismómetro convencional (<10Hz) usado para detectar sismos o actividad volcánica y se basan en las ondas acústicas que genera un lahar a su paso y que viajan a través del suelo (Marcial et al., 1996, Lavigne et al., 2000).

Según Flores (2019), cada estación AFM consta de: un sismómetro que detecta las vibraciones del suelo producidas por un lahar acercándose y pasando, un microprocesador electrónico que analiza la señal producida, un radio de la estación, que envía y recibe información de una estación base, un panel solar que alimenta el sistema y una batería de 12V, cargada por el panel solar.

2.5.1.6 Visual y térmico

Monitoreo visual

Aunque parece ser una de las técnicas más básicas, el monitoreo visual es uno de los recursos más necesarios en cuanto se refiere al seguimiento de la actividad volcánica superficial (Romero, 2018) en especial en el día donde se puede apreciar de una mejor manera las columnas eruptivas tanto de gases como de cenizas, flujos de lodo e incluso el recorrido de los flujos de lava. Esta actividad se lo realiza mediante observaciones a simple vista, vuelos de reconocimiento en el aire, acompañado por registros fotográficos y/o videos o por medio de una cámara situada cerca del volcán (IG EPN, 2018). Dicha información permite un reconocimiento visual más claro del entorno. En la actualidad se suelen combinar el uso de las cámaras visibles con las cámaras térmicas para mejorar la exactitud a la hora de la toma de datos.

Cabe resaltar que para el año 2000, la tasa de publicaciones de artículos científicos con esta técnica ya era alta y constante y esto significó que una serie

de metodologías establecidas estaban disponibles para su aplicación a la nueva conjuntos de datos (Ramsey & Harris, 2013).

La teledetección aérea es otra de las técnicas para obtener imágenes visuales en el terreno ya que ofrecen información complementaria sobre los cambios que provienen de una erupción volcánica. Con estos sistemas los vulcanólogos pueden estudiar y monitorizar toda la actividad volcánica de una zona dada. (Ramsey & Harris, 2013).

Monitoreo térmico

La implementación de las imágenes térmicas para el monitoreo de los volcanes ha sido todo un avance, sin contar los grandes beneficios que presentan. Entre ellas se tiene: son muy fáciles de operar, recopilación de datos con resoluciones que van desde mm hasta m, permite determinar la temperatura de los cuerpos para su respectivo análisis.

El primer uso de este tipo de cámaras para detectar actividad volcánica se menciona en McGimsey et al. (1999), poco después, el Observatorio de Volcanes de Alaska (AVO) en el año 2000 también implementó en sus equipos una cámara térmica portátil (ThermaCAM™ 595 de FLIR Systems. Asimismo, en los papers de Dehn et al. (2002), Nye et al. (2002) se detallan cómo se podía usar la cámara AVO para ayudar en el seguimiento de la actividad durante la erupción de Shishaldin del 2001 (Ramsey & Harris, 2013).

A partir de entonces, las publicaciones con datos de cámaras térmicas para ayudar a rastrear la actividad volcánica han incrementado año tras año superando incluso a los radiómetros (instrumentos para medir la intensidad de energía térmica emitida) y colocándose entre una de las principales herramientas dentro del campo de la vulcanología (Ramsey & Harris, 2013).

2.5.1.7 Colección de ceniza

Los cenizómetros son recipientes especialmente diseñados para la recolección de muestras de caídas de ceniza. Las redes de cenizómetros han sido colocadas cerca a los principales centros volcánicos para medir o calcular diferentes parámetros como el espesor, la carga y la densidad de la ceniza acumulada, así como también coleccionar muestras sin contaminación para realizar diferentes tipos de análisis sean granulométricos, geoquímicos o morfológicos. Por tanto, en

base a los datos obtenidos permitir a los técnicos llevar un control periódico de la dispersión, el volumen de ceniza que emiten los volcanes y evaluar la actividad de los volcanes en erupción junto con la peligrosidad de la ceniza volcánica emitida para finalmente diseñar posibles escenarios y comportamientos de este fenómeno en las zonas aledañas al volcán (IG EPN, 2015).

En la Figura 2.12 se puede identificar las técnicas de monitoreo y vigilancia que se encuentran presentes hoy en día en el volcán El Reventador. Las técnicas de monitoreo están conformadas por estaciones sísmicas de periodo corto, banda ancha, cámaras de vigilancia de espectro visible e infrarrojo, cenizómetros, geoquímico con el DOAS, detector de lahares y el infrasónico.

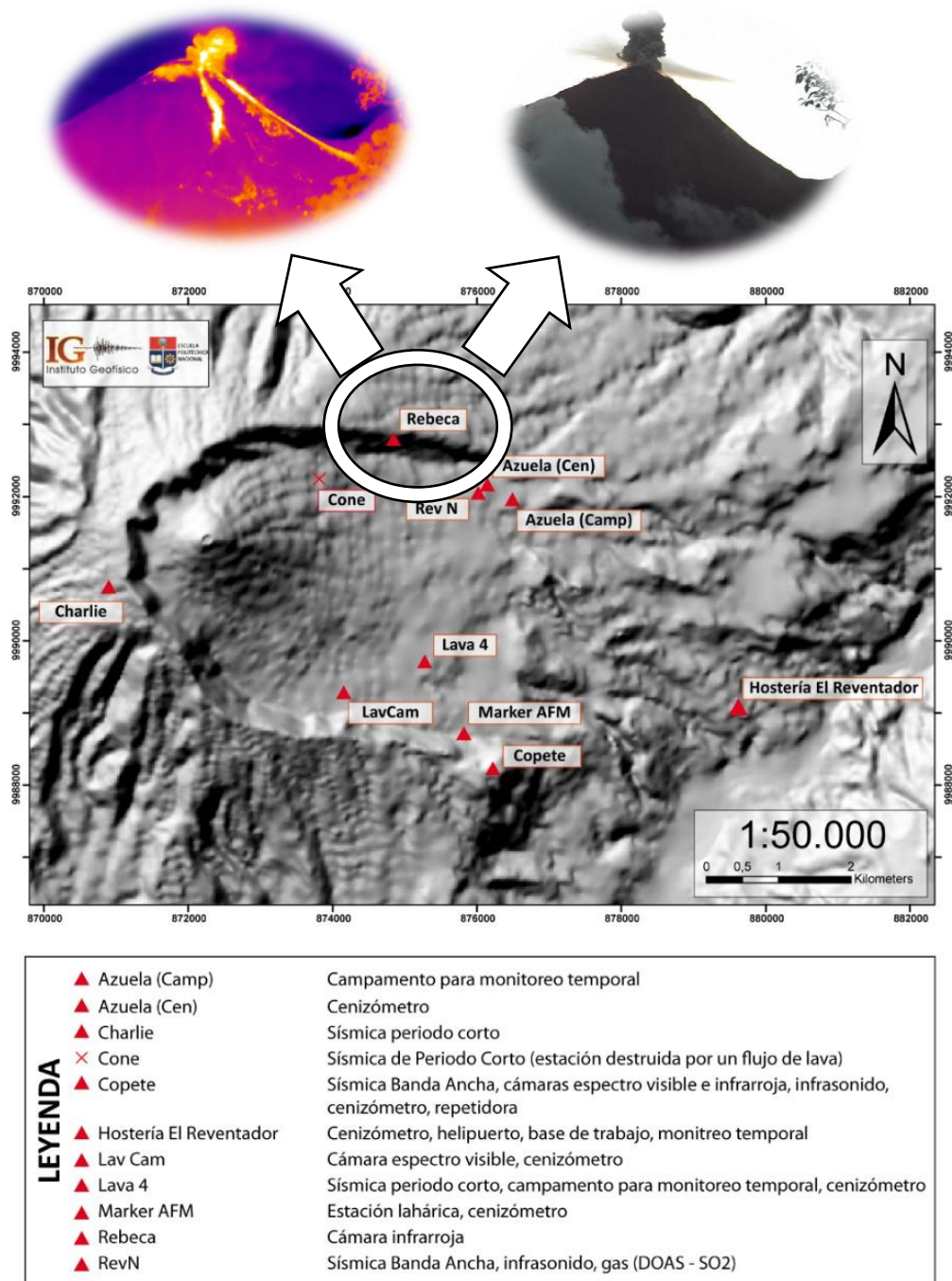


Figura 2.12 Técnicas de monitoreo presentes en el volcán El Reventador donde se aprecia una imagen térmica/visual obtenida de la cámara REBECA (Tomado de IG-EPN, 2019).

2.6 Productos volcánicos recurrentes en el volcán El Reventador

Los productos volcánicos corresponden al material resultante de la erupción de un volcán los cuales pueden identificarse en base a imágenes visuales, térmicas y observaciones directas. Como resultado de la actividad superficial del volcán El Reventador, los productos volcánicos más comunes que se pueden encontrar son los siguientes:

- Columnas eruptivas (emisión de gases)
- Bloques balísticos
- Flujos de lava
- Domos de lava
- Corrientes de densidad piroclástica
- Lahares

2.6.1 Columnas eruptivas

Una columna eruptiva es la expulsión de gases tras explosiones volcánicas emitidos a gran velocidad alcanzando grandes temperaturas y alturas entre 2-45km las cuales controlan la dispersión de los piroclastos. Dichas columnas pueden transportar fragmentos de roca, gases y ceniza dependiendo de la altura de la columna (Figura 2.13). En todas las erupciones altamente explosivas, la energía térmica liberada dominante sobre la energía cinética inicial por la descompresión y expansión de la fase gaseosa (Cas & Wright, 1988).

Las columnas de erupción se pueden dividir en tres partes según Sparks (1986):

- Una parte inicial de empuje de gas, debido a la rápida descompresión de la fase gaseosa
- Una zona convectiva impulsada por la liberación de energía térmica
- Una región paraguas donde la columna se extiende radialmente para formar una nube paraguas a favor o en contra del viento.



Figura 2.13 Columna eruptiva del Volcán El Reventador. Tomado el 10/11/2021.

2.6.2 Emisión de gases

Antes, durante y después de una erupción el volcán puede generar una gran cantidad de gases siendo el vapor de agua el principal. Estos 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 (Figura 2.14). 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 & Hazlett, 2010).

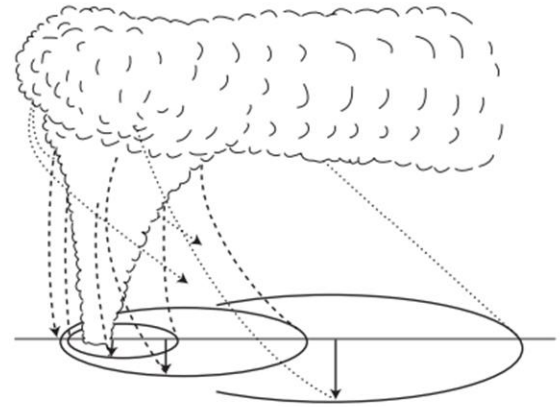


Figura 2.14 a) Emisión de gases del volcán El Reventador. b) Esquema de una nube producida por una erupción pliniana donde se aprecia la dirección a la cual va a moverse la columna de gases. (Tomado de Parfitt & Wilson, 2008).

2.6.3 Bloques balísticos

Los bloques balísticos son fragmentos expulsados al aire producidos por las explosiones volcánicas, que se depositan generalmente a las cercanías del volcán. (Figura 2.15) Estos fragmentos pueden ser de diferentes tamaños siguiendo una trayectoria balística desde pequeños guijarros hasta bloques métricos en los eventos explosivos más energéticos que vienen acompañadas por columnas eruptivas que generan depósitos de caída. Sin embargo, como se menciona en Parfitt & Wilson (2008) este material se depositará muy cerca de la erupción, por lo que solo representará una amenaza muy localizada para las personas y los edificios aledaños al volcán.

El principal peligro de las erupciones que generan depósitos de caída proviene de la acumulación de grandes volúmenes de piroclastos de grano fino en los techos de los edificios en un área amplia a favor del viento de la chimenea. Los clastos generalmente habrán sido transportados a lo alto de la nube de erupción y habrán tardado de decenas de minutos a horas en llegar a su destino final en el suelo (Parfitt & Wilson, 2008). Por tanto, lo que realmente importa es la tensión que ejerce el peso del propio material lo que ocasiona el colapso de las estructuras como edificios y el problema se agrava cuando la lluvia cae sobre el material antes de ser retirado de los techos (Cas & Wright, 1988).

No obstante, no solo afecta a las edificaciones sino también a automóviles y un caso que se registra es cuando se produjo la acumulación de ceniza alrededor de los vehículos cerca del Monte St Helens durante la erupción de 1980 ocasionando el derretimiento de las llantas (Parfitt & Wilson, 2008).

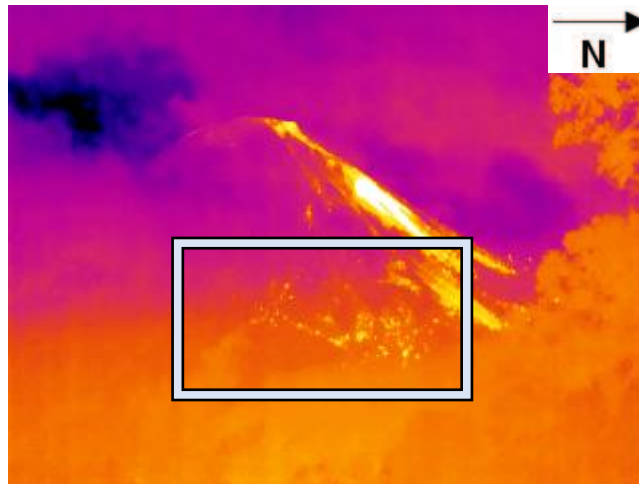


Figura 2.15 Imagen térmica que muestra el depósito de bloques balísticos correspondientes al volcán El Reventador. Tomada el 28/10/2020.

2.6.4 Flujos de lavas

Los flujos de lavas son corrientes de roca fundida originados en un cráter o en las fracturas de los flancos del volcán por erupciones generalmente no explosivas (IG-EPN, 2020). La forma más sencilla en que se puede formar un flujo de lava es cuando el magma se desborda de un vento volcánico en la superficie circundante y se mueve cuesta abajo bajo gravedad (Parfitt & Wilson, 2008).

Hay varios tipos de flujos de lava que pueden diferir mucho en términos de longitud, volumen, morfología, velocidad de avance y amenaza potencial, entre ellos se tiene los flujos Pahoehoe, 'a'a y flujos en bloques.

Las lavas pahoehoe son generalmente lavas muy fluidas de composición basáltica que se caracterizan por presentar superficies lisas y onduladas. Internamente, las lavas pahoehoe se caracterizan por un gran número de vesículas esferoidales regulares y lisas. Muchos flujos contienen más del 20% de vesículas (Cas & Wright, 1988).

Por otro lado, las lavas 'a'a tienen una composición basáltica con superficies extremadamente rugosas, espinosas, fragmentadas y un avance mucho más rápido producido por acumulaciones y desmoronamientos sucesivos del frente de lava. Los flujos aa son generalmente más gruesos (de 2 a 3 m, hasta unos 20 m) que los flujos pahoehoe. Internamente, la lava 'a'a se caracteriza por vesículas alargadas irregulares que se extraen en respuesta al flujo interno, y una estratificación que consiste en un cuerpo sólido de lava masivo intercalado entre capas de clinker fragmentado que pueden soldarse entre sí (Cas & Wright, 1988).

Finalmente, los flujos en bloque son lavas que son muy típicas en la zona de estudio (Figura 2.16). Presenta características de magmas intermedios a ácidos y una superficie fragmentada en grandes bloques con bordes angulosos. Suelen presentar mayores espesores que las lavas 'a'a y pahoehoe, con recorridos normalmente inferiores (Carracedo, 2015).



Figura 2.16 Depósitos del volcán El Reventador. Las líneas amarillas muestran un flujo piroclástico, mientras que las elipses muestran antiguos flujos de lava. Tomado el 11/11/2021.

2.6.5 Domos de lava

Un domo de lava es un montículo de forma redondeada formado por la acumulación de lava altamente viscosa en el conducto de salida debido a una erupción lenta de un volcán generalmente de composición andesítica, dacítica o

riolítica. Los domos se pueden clasificar en domos intrusivos y extrusivos. Los domos intrusivos son aquellos en los que el magma petrifica a lo largo del conducto de salida, sin que salga al exterior. Por otro lado, los domos extrusivos son aquellos en los que el magma sí alcanza la superficie, y por ende se acumula en el conducto de salida. Si los domos extrusivos se forman en un terreno en pendiente (por ejemplo, en los flancos de los volcanes), pueden llegar a fluir, dando lugar a coladas de escaso recorrido y gran espesor, conocidas como coulées (Carracedo & Pérez, 2015).

Los domos suelen presentar numerosos colapsos, tanto por inestabilidades gravitacionales como por inyección de nuevo magma en su interior. Estos colapsos suelen provocar erupciones explosivas con formación de corrientes de densidad piroclástica, con frecuencia muy peligrosas (Figura 2.17).

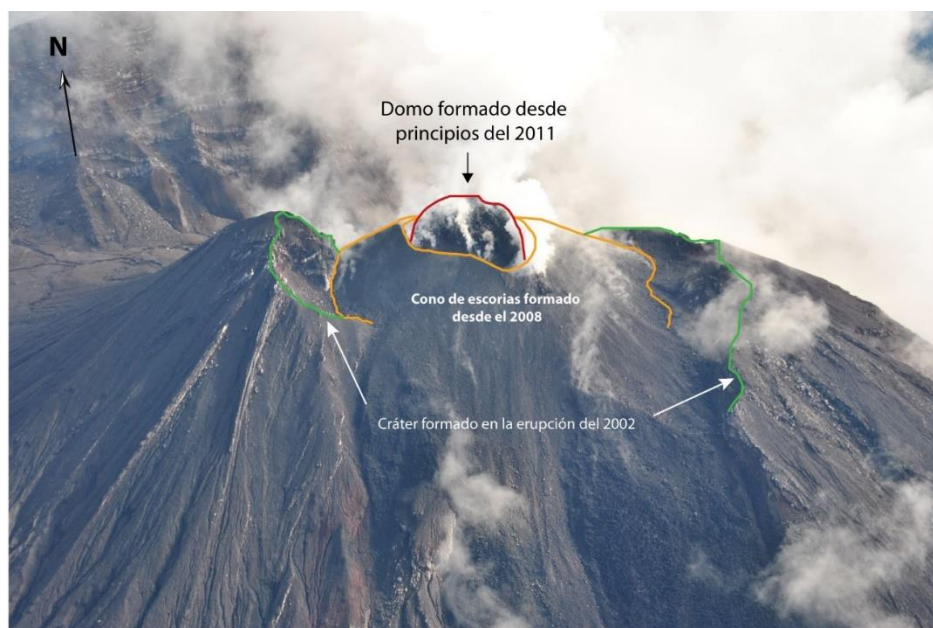


Figura 2.17 Formación del domo de lava en el 2011 del volcán El Reventador (Tomada de Almeida et al., 2019).

2.6.6 Corrientes de densidad piroclástica

Las corrientes de densidad piroclástica están compuestas por gases y material sólido (ceniza y rocas de diverso tamaño) capaces de fluir a grandes temperaturas y velocidades y de sobrepasar obstáculos a su paso. La velocidad que alcanzan varía según la proporción de los sólidos y gases. En el extremo más diluido (mucho más gas que sólidos) se encuentran las oleadas

piroclásticas, las cuales alcanzan mayor velocidad y distancia (Figura 2.18). En algunos casos pueden superar los 100 km/h. Otro aspecto que influye en el alcance de estos flujos es la energía de la erupción y la pendiente del terreno por el cual fluyen (RSN,2019).¹

En cuanto se refiere a la naturaleza del depósito los tres principales términos que son usados para describirlos son las ignimbritas, los depósitos de oleada piroclástica y depósitos de flujo de bloques y cenizas. Los depósitos están dominados por material juvenil pero comúnmente también contienen líticos y los magmas que los originan son casi siempre de composición evolucionada. Las ignimbritas son generalmente ricas en cenizas y muy mal clasificados, formando láminas extensas o ventiladores que cubren grandes áreas, hasta decenas de miles de kilómetros cuadrados (Parfitt & Wilson et al., 2008).

Los depósitos de oleaje piroclástico están algo mejor clasificados que las ignimbritas, aunque siguen estando mal clasificados, y muestran una estratificación interna distinta. Pueden ocurrir dentro o inmediatamente adyacentes a los depósitos de ignimbrita (Parfitt & Wilson et al., 2008).

Los depósitos de flujo de bloques y cenizas difieren de los otros dos tipos en que generalmente contienen clastos que son menos vesiculares. Tienden a ser de pequeño volumen y se asocian principalmente con eventos en los que colapsan domos de lava o frentes de flujo de lava (Parfitt & Wilson et al., 2008).

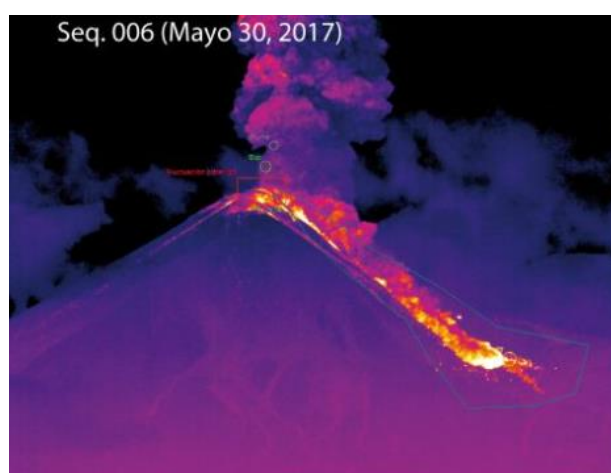


Figura 2.18 Corriente de densidad piroclástica presente en el Volcán El Reventador. (Tomada de IG-EPN, 2017).

¹ Red de Sismología Nacional de Costa Rica.

2.6.7 Lahares

Los lahares son mezclas de agua con una alta concentración de sedimentos y escombros de rocas volcánicas los cuales se desplazan pendiente abajo en los volcanes, influenciados por la gravedad (Vallance & Iverson, 2015).

Los lahares pueden generarse de diversas formas ya sea a través de una fuente considerable de agua, abundante material no consolidado, pendientes acentuadas o por un mecanismo desencadenante como erupciones, sismos, inestabilidad de los edificios y/o fuertes lluvias (Almeida et al., 2017).

Los lahares tienen propiedades reológicas algo similares a los de los flujos de lava, pero generalmente tienen viscosidades mucho más bajas y pueden moverse a velocidades de hasta unas pocas decenas de metros por segundo, pero pueden viajar distancias considerables, al menos decenas de kilómetros (Parfitt & Wilson, 2008).

Un problema que suelen presentar los lahares es que aún siguen siendo una amenaza persistente mucho después de que termina una erupción volcánica, debido a que, si la ceniza que se desprende del volcán no está consolidada, entonces cada vez que exista una tormenta, es probable que se origine un nuevo lahar (Parfitt & Wilson, 2008).

CAPITULO 3

3. VIGILANCIA SÍSMICA, VISUAL Y TÉRMICA DEL VOLCÁN

Como se mencionó en el Capítulo 2, existen diferentes técnicas de monitoreo de los volcanes que permiten conocer con cierto detalle la actividad eruptiva del volcán. Por ello, es importante conocer las técnicas más adecuadas para el estudio ya que no todas son aplicables en todos los volcanes.

Para el siguiente proyecto de investigación se utilizó las técnicas de vigilancia visual, térmica y sísmica en el volcán porque permiten reconocer e interpretar el tipo de actividad que tuvo el volcán en un corto lapso e incluso determinar la aparición de productos volcánicos de una forma rápida y sencilla.

3.1 Señales sísmicas asociadas al volcán

Una de las técnicas más importantes a la hora de monitorear los volcanes es el análisis de la sismicidad. La sismología es una rama de la geofísica que se encarga del estudio de la propagación de las ondas sísmicas a través de un medio tanto en el interior de la Tierra o superficialmente.

La fuente y el medio son dos grandes procesos que gobiernan la gran variedad de éstas señales (Tavera & Antayhua, 2000). Es por ello que mediante el análisis de las distintas señales sísmicas asociadas a la actividad volcánica se puede obtener información de posibles intrusiones magmáticas, alteraciones de una cámara magmática pre-existente o el ascenso del magma ante una inminente erupción (IGN, 2018²). Por tanto, la detección continua de las señales sísmicas generadas por un volcán mediante la operación de una o varias estaciones sísmicas, que transmitan en tiempo real o casi real los datos y que estos sean analizados en forma sistemática para su consiguiente interpretación es lo que se conoce como monitoreo sísmico.

Algunas de las señales sísmicas típicas que se pueden registrarse en un volcán, son:

² IGN (Instituto Geográfico Nacional de Madrid-España).

3.1.1 Tremor volcánico

Existe una gran variedad de tremores volcánicos que van desde los pocos minutos hasta varias horas, pudiendo diferenciarse por su contenido espectral con rangos de frecuencia menor de 1 Hz, de 1 a 6 Hz o mayores de 6 Hz (Figura 3.1). También se distinguen los monocromáticos (vibrando a una frecuencia única), los armónicos (vibrando en varias bandas estrechas de frecuencia) y los de amplio espectro (vibrando en un amplio rango de frecuencias). El tremor puede tener muy distintos orígenes debido a la variedad de sus manifestaciones. En ocasiones es considerado una suma continua de eventos LP y se explicarían como la resonancia en un determinado conducto relleno de fluidos magmáticos como: vapor, gas con partículas, magma con burbujas o incluso fluidos trifásicos. También se ha asociado a la salida del magma a superficie, siendo su origen la interacción del magma con la roca circundante (IGN, 2018).

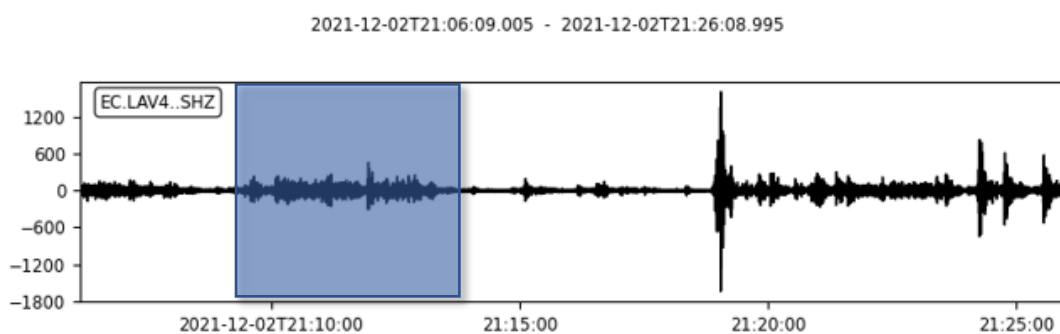


Figura 3.1 Representación de un tremor volcánico ocurrido en el volcán El Reventador el día 02 de diciembre del 2021.

3.1.2 Eventos de largo periodo (LP)

Son eventos caracterizados por tener una duración entre los pocos segundos hasta algo más de un minuto, y con un contenido espectral muy limitado a unas bandas de frecuencia relativamente estrechas ($0.5 < f < 5$ Hz). (Ferrazzini et al., 1992). Su comienzo suele ser emergente, por lo que resulta muy difícil determinar el momento exacto del comienzo de la señal. No presentan llegadas de ninguna fase, ni P ni S (Ibáñez & Carmona, 2000) (Figura 3.2).

El origen de estas señales sugiere que se producen debido a resonancias en fracturas cerradas en sus extremos y rellenas de fluidos volcánicos con cierto contenido de gas. La frecuencia y el tiempo de duración de la señal dependerán del tamaño de la fractura resonante y del tipo de fluido encerrado en ella. Son

comunes en volcanes que presentan erupciones de magmas evolucionados, con presencia de cámaras magmáticas (IGN,2018).

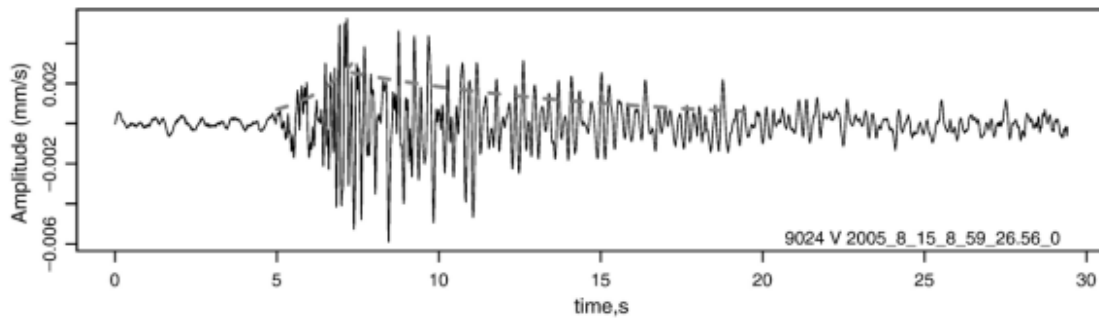


Figura 3.2 Evento sísmico de Largo Periodo.

3.1.3 Eventos volcanotectónicos (VT)

Los eventos volcanotectónicos, también llamados eventos de alta frecuencia o eventos tipo A, son eventos que se asocian con el fracturamiento de la roca en respuesta a los esfuerzos tensionales y se caracterizan por tener una señal de duración variable, con un arribo de la onda P más o menos impulsiva y se puede identificar el arribo de la onda S; tienen una gran variedad de frecuencias, desde 1 hasta 15 Hz aproximadamente y su decaimiento generalmente es de tipo exponencial (Ibáñez, 2000) (Figura 3.3).

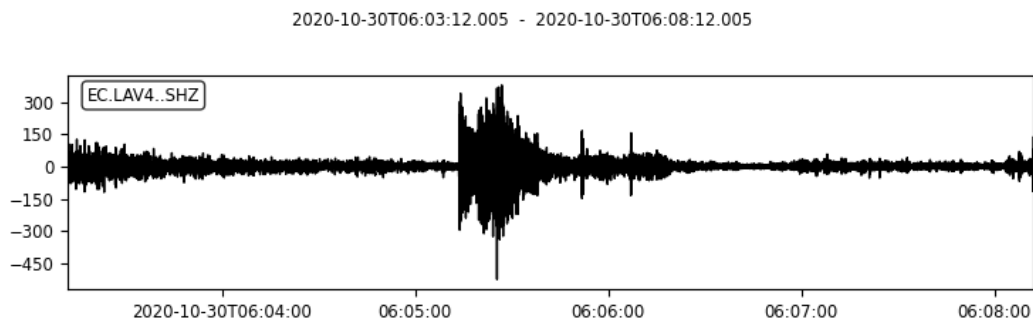


Figura 3.3 Representación de un sismo tectónico regional ocurrido a las 06:05:10 (UTC) del día 30 de octubre del 2020.

3.1.4 Eventos Híbridos

Estos eventos presentan características tanto de los eventos tipo VT como de los eventos LP. Tienen un inicio de altas frecuencias con fases definidas, normalmente una amplia banda espectral (más de 10Hz), en donde se puede identificar claramente fases P y S, por lo que se asocia con un pequeño sismo (Ibáñez & Carmona, 2000) y un cuerpo y coda de bajas frecuencias. Para

explicar su origen se usa una combinación del modelo de origen de ambos tipos de señales. Se produce una ruptura en una fractura sometida a la presión de fluidos volcánicos, generando un primer sismo, después la fractura se rellena del fluido y la subsecuente resonancia del mismo origina la señal de baja frecuencia equivalente a un LP (IGN, 2018).

La presencia espacial y espectral de estas señales es muy similar a los eventos de largo periodo (LP). Por tanto, están asociados a episodios pre-eruptivos muy inminentes (Ibáñez & Carmona, 2000).

3.1.5 Explosiones

Las señales provenientes de explosiones en los edificios volcánicos corresponden, junto al tremor, a las señales sísmicas más características cuando se encuentra en marcha un proceso eruptivo (Ibáñez & Carmona, 2000).

Por regla general tienen al menos 2 llegadas diferentes y claras, la primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión, y la segunda es lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras con una velocidad de 340 m/s (Ibáñez, 2000) (Figura 3.4).

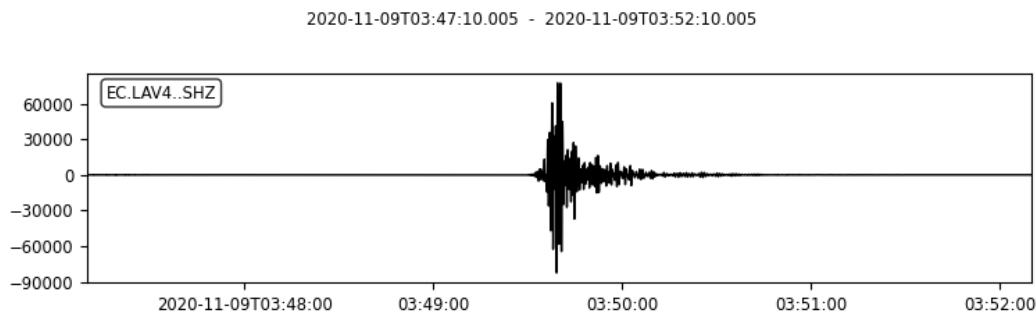


Figura 3.4 Evento sísmico correspondiente a una explosión registrada en el volcán El Reventador el día 9 de noviembre del 2020.

3.2 Productos volcánicos identificados a través de cámaras visuales y térmicas fijas

La identificación de los productos volcánicos está relacionada con el tipo de vigilancia con la que se trabaje: visual o térmica. Estas técnicas presentan ventajas y desventajas en función de las condiciones climáticas de la locación, como se describió anteriormente en el Capítulo 2. Es así que, algunos productos

volcánicos se pueden observar con mayor facilidad en ciertos rangos electromagnéticos que en otros, como se indica en la Figura 3.5.

Las cámaras de vigilancia visuales usan el espectro visible para la identificación de productos volcánicos con una longitud de onda entre 400-700 nm. Este tipo de cámaras permite la detección de columnas eruptivas de gases y/o cenizas y bloques rodados. En cuanto a las cámaras de vigilancia térmica, que trabajan con ondas infrarrojas que varían entre 0.7-1000 μm , se usan para la identificación de columnas eruptivas, flujos de lava, bloques balísticos o rodados, domos de lava y los PDC's.

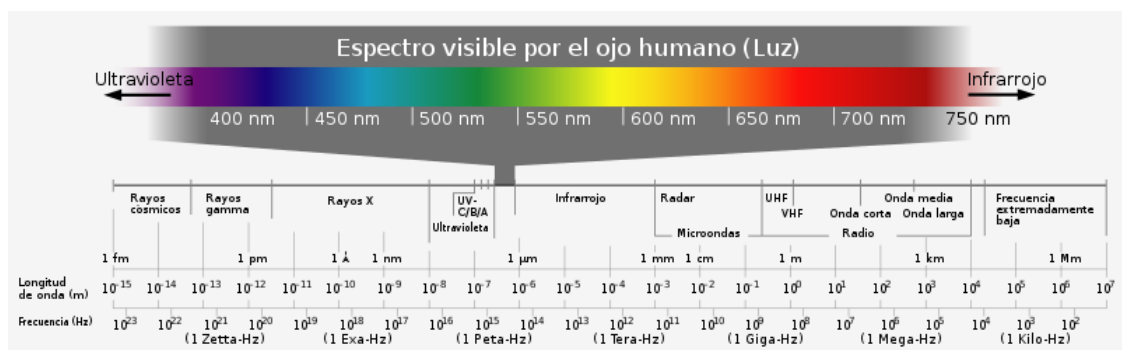


Figura 3.5 Espectro electromagnético mostrando los rangos visible e infrarrojo. (Tomado de Chirif, 2010).

3.2.1 Vigilancia Visual

Las cámaras visuales son uno de los instrumentos más básicos para la vigilancia ya que son muy fáciles de utilizar y ofrecen grandes ventajas. A lo largo de la historia dentro del volcán El Reventador ha ido evolucionando su monitoreo yendo de la obtención de imágenes aéreas hasta llegar a implementar cámaras de vigilancia fijas ubicadas en los alrededores del volcán. Dichas cámaras fijas son equipos que permiten obtener imágenes de una misma zona que funcionan las 24 horas, es decir tanto de día como en la noche mediante el modo nocturno que es una opción que permite amplificar la luz dentro del espectro visible.

Para el caso del volcán El Reventador se cuenta desde hace varios años con tres cámaras visibles: REBECA, COPETE y LAVCAM que se encuentran monitoreando la parte noreste, sureste y sur del volcán respectivamente.

Las cámaras de vigilancia visual disponibles permiten la identificación de la dirección de las columnas de eruptivas de gases y/o ceniza, la determinación de

la cantidad variable de ceniza y presencia de flujos de lava, bloques balísticos, y bloques rodados por colapsos de frente de lava.

En la Figura 3.6 se puede apreciar un ejemplo de una imagen visual del volcán El Reventador que muestra una pequeña columna de ceniza generada desde el cráter del volcán.



Figura 3.6 Columna eruptiva que muestra el volcán El Reventador. Tomada el 1/12/2021.

3.2.2 Vigilancia Térmica

Una imagen térmica es una representación visual del calor emitido por un cuerpo que se puede medir dentro del espectro infrarrojo. Dado que cada objeto emite energía en forma de calor, las cámaras térmicas tienen la capacidad de detectar y medir la temperatura de dichos objetos. Las cámaras infrarrojas permiten medir la temperatura a través de una imagen térmica de los objetos en el día o en la noche dado que miden la cantidad de radiación infrarroja; de esta manera se puede vigilar cualquier actividad de un volcán sin necesidad de tener un contacto próximo (Vásconez et al., 2022).

Existen diferentes modelos de cámaras infrarrojas que aportan diferente tipo de información en las imágenes con diferente resolución, rango de temperatura y tamaño de imagen.

La interpretación de las de las imágenes se realiza a través de una paleta de colores que permite distinguir variaciones de temperatura e identificar patrones térmicos. Los tonos de colores hacen referencia a las temperaturas superficiales

de un objeto. La Figura 3.7 representa una imagen térmica con una paleta de colores “hierro”, donde las tonalidades negras representan temperaturas bajas y a medida que incrementa la temperatura de los cuerpos se observan tonalidades azules, violetas, rojizas, anaranjadas, amarillas hasta culminar en blancas.

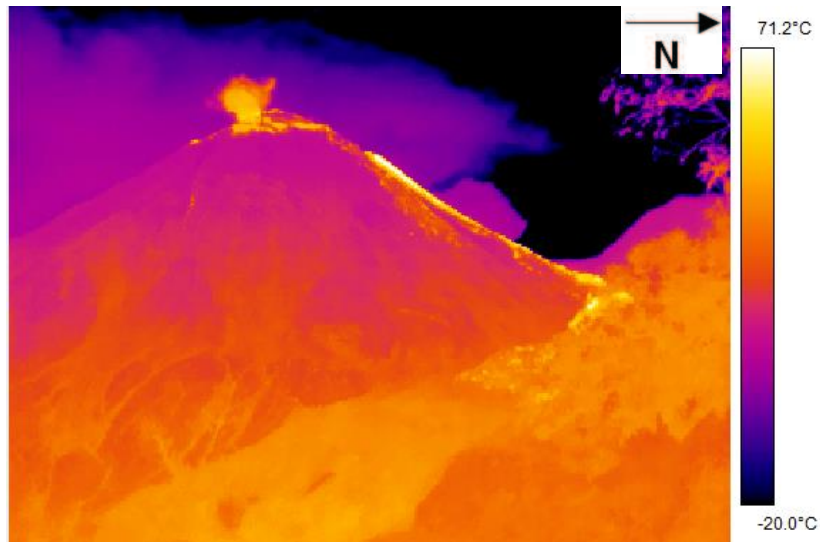


Figura 3.7 Imagen térmica del volcán El Reventador tomada por la cámara REBECA ubicada al Noreste del volcán sobre el borde del escarpe en la cual se observa un flujo de lava activo y el inicio de una columna eruptiva. La paleta utilizada corresponde a la de “hierro” en la cual los colores más claros representan las temperaturas más altas y los más oscuros las temperaturas más frías. Tomada el 2/12/2021.

CAPITULO 4

4. MATERIALES Y METODOLOGIA

4.1 Datos a ser utilizados

Desde 1983, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional ha sido el principal gestor para el diagnóstico y la vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en el Ecuador, manteniendo un programa de monitoreo permanente, activo y en tiempo casi real. En Ecuador, la vigilancia de los volcanes (e.g. Tungurahua, Cotopaxi, Reventador, Sangay) a través de imágenes infrarrojas térmicas aéreas y terrestres han demostrado ser una herramienta eficaz y poderosa para monitorear la actividad volcánica. Se ha utilizado para observar cambios superficiales alrededor de los cráteres de los volcanes, ubicar y rastrear flujos de lava, identificar depósitos de corrientes de densidad piroclástica, estimar tasas de efusión de lava, estudiar el crecimiento y colapso de domos de lava, caracterizar erupciones explosivas y describir la forma y la dinámica de la pluma. La mayoría de estos resultados se han obtenido durante campañas de medición, ya sea con instrumentos fijos o montado en aeronaves tripuladas o autónomas (Vásconez et al., 2022).

Para el caso del volcán El Reventador se cuenta desde hace varios años con tres cámaras visibles (Copete, LavCam y REBECA) y una cámara térmica (REBECA) (ver Figura 2.11), distribuidas en los flancos del mismo lo que permite una mayor cobertura. Además de varias estaciones sísmicas como LAV4, REVN, REVS (ver Figura 2.11). Para el siguiente trabajo de investigación se optó por trabajar en base a los datos proporcionados por el IG-EPN obtenidos de la estación sísmica de LAV4 que es un sensor de periodo corto que se encuentra a 3.4 km de distancia al SE de la cumbre del volcán y la cámara REBECA para imágenes visuales e infrarrojas que muestra la parte noreste del volcán. Se utilizó la estación LAV4 porque mostraba menos cortes o pérdida en la transmisión respecto a las estaciones REVN y REVS en los diferentes periodos de estudio. Por otro lado, la cámara REBECA infrarroja es una cámara FLIR A310, con una resolución 320 x 240px, con dos rangos de temperaturas: -20 a 120 y de 0 a 350 °C. Para una correcta estimación de la temperatura a través de estas imágenes es necesario utilizar ciertos parámetros de calibración

como son la temperatura atmosférica, humedad, distancia al objeto, temperatura ambiental.

Por medio de los datos obtenidos de la cámara REBECA se contó con un total de 5568 imágenes visuales en ambos periodos de estudio con una frecuencia cada 5 minutos y un peso de aproximadamente entre 30-50 KB por imagen en formato .jpg. Mientras que para las imágenes térmicas se tuvo a disposición 7551 imágenes, transmitidas cada 4 minutos igualmente entre ambos periodos de estudio, con un peso alrededor de 154 KB por imagen en formato .fff. El formato .fff se utiliza principalmente para almacenar una imagen captada por una cámara digital.

Se trabajó con el software ThermaCam Researcher 2002 porque proporcionó herramientas detalladas para el análisis, la medición, y la visualización de las imágenes infrarrojas.

El nombre de las imágenes estuvo establecido bajo el siguiente formato: aammdd_hhmss lo que facilitó su identificación y tanto las imágenes visibles como infrarrojas estuvieron en tiempo universal UTC.

Los dos periodos de estudio en el volcán El Reventador corresponden a:

- 28 de octubre -10 de noviembre del 2020

El número de imágenes visuales para este periodo de tiempo fue de 3415 mientras que para las imágenes térmicas se trabajó con un total de 4779.

- 1-8 de diciembre del 2021

El número de imágenes térmicas para este periodo de tiempo fue de 2772 mientras que las imágenes visibles se conformaron de un total de 2153.

Lo que se pretende realizar es identificar un producto volcánico en una imagen visual/térmica y conociendo la hora en la que se produjo dicho fenómeno se busca su respectivo evento sísmico y analizar si mediante ello existe la presencia de un patrón que indique que producto volcánico se está emitiendo. Este patrón debe coincidir en la mayoría de los eventos que se produzcan en los diferentes periodos de estudio, es por ello que se analiza tanto la amplitud y la duración de los eventos, parámetros que puede facilitar la comprensión de las señales

sísmicas que pudieron haber generado los diferentes productos volcánicos en el volcán Reventador.

4.2 Selección de imágenes

4.2.1 Requisitos de imágenes para ser seleccionadas

Una vez obtenida la data proporcionada por el IG-EPN se procedió a realizar la primera selección de imágenes cuyo primer requisito fue conocer si la imagen se encontraba despejada o nublada. En el caso de que fuese una imagen despejada se observó si esta imagen presentaba o no productos volcánicos en superficie. Si cumplía únicamente esta condición pasaba a ser seleccionada y clasificada en base a su producto volcánico.

4.3 Análisis de imágenes visibles seleccionadas

4.3.1 Identificación de productos volcánicos

En cuanto se refiere a imágenes visibles registradas en la noche se pudo identificar algunos inconvenientes. Uno de ellos corresponde al hecho del registro de los bloques rodados incandescentes. En el registro de imágenes visuales se pudo observar que algunos de estos productos mostraban más luminosidad que otros por lo que la selección de productos volcánicos no fue precisa y solo fue clasificada y etiquetada las imágenes en las que se mostraba claramente más del 70% de luminosidad.

Por otro lado, las imágenes obtenidas en el día tuvieron una ligera incertidumbre. El hecho de que algunas imágenes presentaban productos volcánicos cubiertos parcialmente por nubes provocaba que se mezclasen con el entorno, es por ello, para que una imagen fuese identificada fue necesario que el producto volcánico estuviese al menos un 50% visible.

Además, la hora del día juega un rol importante para la identificación de productos volcánicos ya que no es lo mismo observar tanto de día como en la noche. Es por lo que las imágenes visuales están calibradas para identificarse de mejor manera a través del cambio de tonalidades. En consecuencia a ello, el día se consideró entre las 10:43 - 23:11 y la noche entre las 23:12 -10:42 (UTC).

4.3.2 Valoración de productos volcánicos

En la Tabla 1 se muestra una clasificación resumida de los productos volcánicos con su respectiva valoración, en ella se puede identificar dos grandes grupos dentro de las imágenes visuales: imágenes captadas por la cámara durante el día e imágenes captadas por la cámara durante la noche. Además, ambas categorías se las pudo agrupar en subcategorías todo ello con el fin de poder abarcar las imágenes, los escenarios en los que se puedan presentar los eventos. TABLA 1.

Imágenes que presentan nula visibilidad ya sea por fallas en la cámara o por las malas condiciones climáticas (neblina o nubes) que impiden que se pueda apreciar observar el volcán y por ende los productos volcánicos entran a la categoría de 'imágenes nubladas' y se le asigna un valor de 0.

Las imágenes en las que se muestran claramente los productos volcánicos como los son para esta categoría las columnas eruptivas y los PDC's, corresponden a 'imágenes despejadas', con un valor de 1.

Las imágenes que muestran una visibilidad clara del volcán, pero no muestran alguna actividad superficial entran en la categoría de 'imágenes sin actividad' con una valoración de 2.

Las Imágenes que muestran una visibilidad clara del volcán y se identifique claramente las columnas eruptivas entran en la categoría de 'columnas eruptivas' con una valoración de 3.

TABLA 1 Clasificación de las imágenes visibles en el día.

EN EL DIA

Nublado 0	Despejado 1	
	Sin Actividad 2	Con Actividad
		Columnas Eruptivas 3

Por otro lado, dentro de la categoría de imágenes observadas en la noche, existe una subclasificación de imágenes que presentan incandescencia y las que no, como se puede resumir en la TABLA 2.

Las imágenes que presentan incandescencia fueron clasificadas en las categorías ‘sobre la cumbre’ con un valor de 6 y/o ‘bajo la cumbre’ con un valor asignado de 7. Estas categorías representan los productos volcánicos que se puedan observan en el volcán, recordando que sobre la cumbre podemos encontrar columnas eruptivas mientras que bajo la cumbre se encontrará únicamente bloques rodados.

Las imágenes que no presentan incandescencia fueron etiquetadas con un valor de 0 entrando en la categoría de ‘Nublado’.

TABLA 2 Clasificación de las imágenes visuales en la noche.

EN LA NOCHE

Incandescencia		Sin Incandescencia 0
sobre la cumbre 6	bajo la cubre 7	

El siguiente diagrama de flujo (Figura 4.1) es una representación del proceso de identificación, clasificación y su posterior valoración de la data obtenida. Esta valoración sirvió para identificar la cantidad exacta de imágenes tanto disponibles como descartadas en un determinado lapso de tiempo.

Dentro de las imágenes visibles se tomó a consideración si la imagen fue tomada en el día o en la noche. Si la imagen fue tomada en el día cabe dos posibilidades: que se encuentre despejada la imagen o bien se encuentre nublada. Si fuese el segundo caso tomaría la etiqueta con el número 0 mientras que la primera opción tomaría la etiqueta con el número 1. Esta última opción a su vez plantearía un nuevo escenario sobre la actividad existente en el volcán. Si existe actividad volcánica identificada correspondería a una columna eruptiva asignándole la etiqueta con el número 3, caso contrario no representaría ninguna actividad por lo que se le asignaría el número 2.

Por otro lado, si las imágenes fueron tomadas durante la noche, se plantearía dos posibilidades: o bien en la imagen se muestra incandescencia o no presenta. Si fuese el segundo caso correspondería a la etiqueta con número 0, mientras que si fuese el primer caso se clasificaría en dos grandes grupos: “sobre la cumbre” o “bajo la cumbre” con etiquetas de 6 y 7 respectivamente. “Sobre la cumbre” significa que se encuentran productos volcánicos como las columnas eruptivas. Mientras que “bajo la cumbre” se van a encontrar productos volcánicos como flujos de lava y bloques rodados.

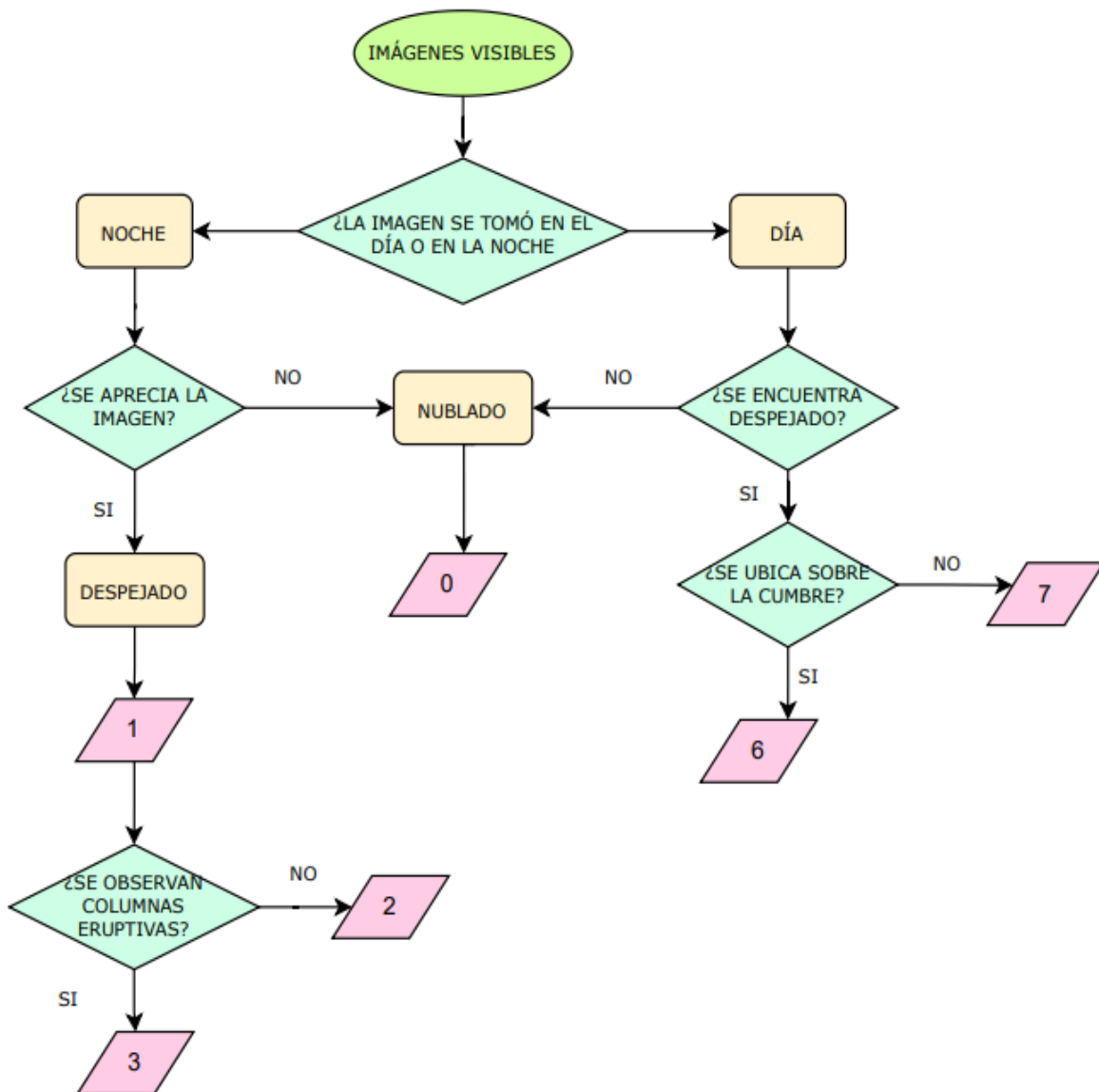


Figura 4.1 Diagrama de flujo sobre la clasificación de las imágenes visuales de la cámara visible REBECA con su valoración respectiva.

4.4 Análisis de imágenes térmicas seleccionadas

4.4.1 Identificación de productos volcánicos

En el caso de las imágenes térmicas solo hubo 3 productos volcánicos que se podrían distinguir en superficie y esos son columnas eruptivas, los flujos de lava y los bloques rodados debido a que son productos que presentan incandescencia lo cual facilita su identificación por medio de la cámara térmica.

A la hora de identificación de las columnas eruptivas se observó que provenían del cráter, el cual mostraba columnas eruptivas de algunos metros mayormente desarrolladas. En cuanto se refiere a los flujos de lava, estaban presentes en prácticamente todas las imágenes en el flanco nororiental. Los bloques rodados en cambio son productos volcánicos que después de su emisión suelen mantener aun su temperatura la cual es captada por la cámara infrarroja y se los reconoce por ser productos que se muestran en superficie como puntos bastante dispersos.

4.4.2. Valoración de productos volcánicos

Asimismo, se realizó la clasificación de las imágenes térmicas en base a dos categorías como se puede resumir en la TABLA 3.

‘Imágenes nubladas’, con un valor asignado de 0 es decir imágenes en las que no se pudo identificar claramente los productos volcánicos debido a la presencia de nubes.

‘Imágenes despejadas’, es decir, imágenes en las que sí es posible identificar los productos volcánicos como lo son las columnas eruptivas, los flujos de lava, bloques rodados con el valor asignado de 11, 12, 13 respectivamente.

TABLA 3 Clasificación de las imágenes térmicas.

Nublado 0	Despejado 1		
	Sobre la cumbre	Bajo la cumbre	
	Columnas eruptivas 11	Flujo de lava 12	Bloques rodados 13

Asimismo, el siguiente diagrama de flujo (Figura 4.2) es una representación del proceso de identificación, clasificación y su posterior valoración de la data obtenida.

Dentro de las imágenes térmicas se planteó dos posibilidades: si bien se encuentre despejada la imagen o bien se encuentre nublada. Si fuese el segundo caso tomaría la etiqueta con el número 0 mientras que la primera opción tomaría la etiqueta con el número 1. Ahora bien, es importante conocer en donde se observa los productos volcánicos: “sobre la cumbre” o “bajo la cumbre”. “Sobre la cumbre” significa que se encuentran productos volcánicos como las columnas eruptivas y a ellos se les asigna el número 11. Mientras que “bajo la cumbre” se pueden encontrar productos volcánicos como flujos de lava asignándole la etiqueta con el número 12 y/o bloques rodados con una etiqueta del número 13.

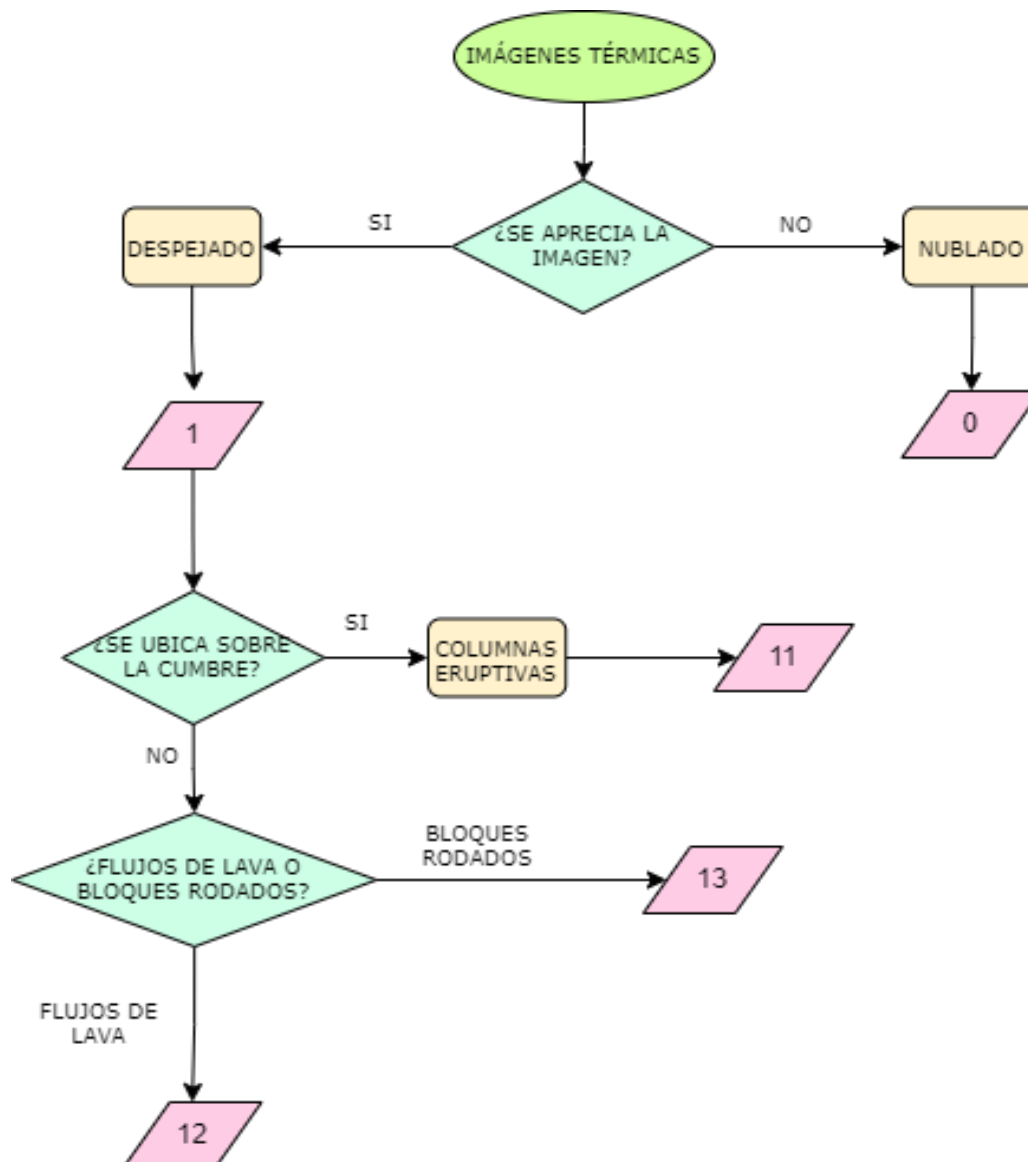


Figura 4.2 Diagrama de flujo indicando la clasificación de las imágenes térmicas proporcionadas por la cámara REBECA con su valoración respectiva.

4.5 Selección de señales sísmicas asociadas

4.5.1 Estaciones sísmicas utilizadas

La estación LAV4 fue la encargada de proporcionar información sobre las señales sísmicas, las cuales fueron tratadas con scripts en Python porque permitió establecer de una manera más rápida la determinación de parámetros sísmicos como la amplitud, frecuencia, duración de los eventos y estos a su vez sirvieron para la identificación y análisis de las señales sísmicas obtenidas.

4.5.2 Corte de trazas de señales sísmicas

Dentro del lenguaje de programación de Python se realizó un código gracias al software ObsPy (ver Anexo I) que es una herramienta que permitió el procesamiento de datos sismológicos, así como cortar trazas de señales sísmicas a determinados lapsos de tiempo. Para el proyecto de investigación se trabajó con un lapso de 5 minutos previos a la hora de la toma de la imagen, es decir, por ejemplo, si una imagen del volcán EL Reventador fue capturada a las 15:00, la sísmica indicará el lapso entre las 14:55-15:00. El corte de las trazas sísmicas se hizo con el fin de identificar la señal sísmica que pudieran haber disparado o estar relacionadas con el producto volcánico observado en superficie a través de las imágenes visuales o térmicas.

4.5.3 Determinación de parámetros sísmicos

4.5.3.1 Amplitud

La amplitud es la variación máxima de un desplazamiento que experimenta un punto de una onda respecto a la posición media o de equilibrio (Chang & Goldsby, 2017). Es importante conocer la amplitud de la onda puesto que permite calcular la intensidad de los sismos y determinar su alcance. Además, está íntimamente relacionado con la magnitud de una explosión. La magnitud de cualquier evento sísmico es un valor que cuantifica la energía de dicho evento, es decir, es un número singular que no varía de estación a estación. Por otro lado, la intensidad es la amplitud que se mide en una estación de cualquier fenómeno. La magnitud se calcula a base de varias mediciones de intensidades

en diferentes estaciones. Para calcular la magnitud se aplica una “corrección” a esos diferentes valores de intensidad con una ecuación predeterminada que depende principalmente en la distancia a la fuente. Por tanto, al tener una mayor amplitud de una onda mayor será la magnitud de la explosión y viceversa.

4.5.3.2 Duración de eventos

La duración de los eventos es el tiempo que perduran los eventos sísmicos registrados en las trazas sísmicas a lo largo de los dos periodos de estudio. La finalidad de obtener la duración de dichos eventos es para identificar si las columnas eruptivas u otro producto volcánico son apreciables tanto en las imágenes visuales y/o térmicas. El tiempo de duración de los eventos se midió en base a la observación de cada corte de la traza sísmica.

CAPITULO 5

5. RESULTADOS

En base a la metodología descrita en el Capítulo 4, en este capítulo se presentan y se detallan los resultados obtenidos junto con un análisis de los productos identificados asociados con sus señales sísmicas para los dos periodos de estudio en el volcán El Reventador los cuales constan entre:

- 8 de octubre -10 de noviembre del 2020
- 1-8 de diciembre del 2021

5.1 Periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020

5.1.1 Imágenes disponibles

Al obtener las imágenes de las cámaras de vigilancia visual y térmica dentro de un intervalo de 4 minutos se determinó un promedio de imágenes que fueron recibidas por día. Es así que, en base a la data recibida de un total de 3415 imágenes visibles se estableció un promedio de 244 imágenes disponibles por día, con un número máximo y mínimo de 274 y 116 imágenes respectivamente como se muestra en la Figura 5.1.

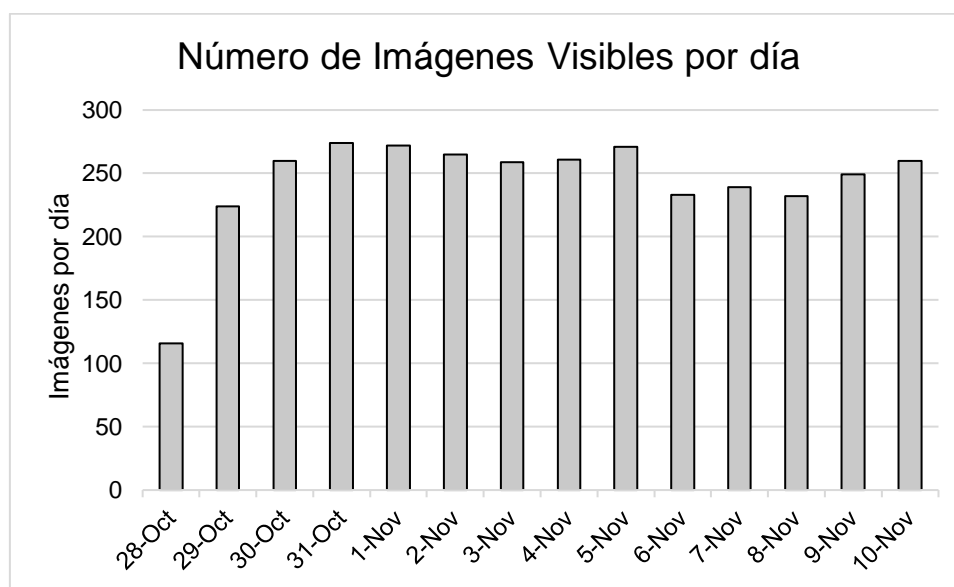


Figura 5.1 Representación del número de imágenes visibles por día dentro del periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020.

En cuanto se refiere a las imágenes térmicas dentro de dicho periodo se contó con un promedio de 341 imágenes recibidas por día, con un número máximo y mínimo de 360 y 236 imágenes respectivamente de un total de 4779 imágenes, como se muestra en la Figura 5.2.

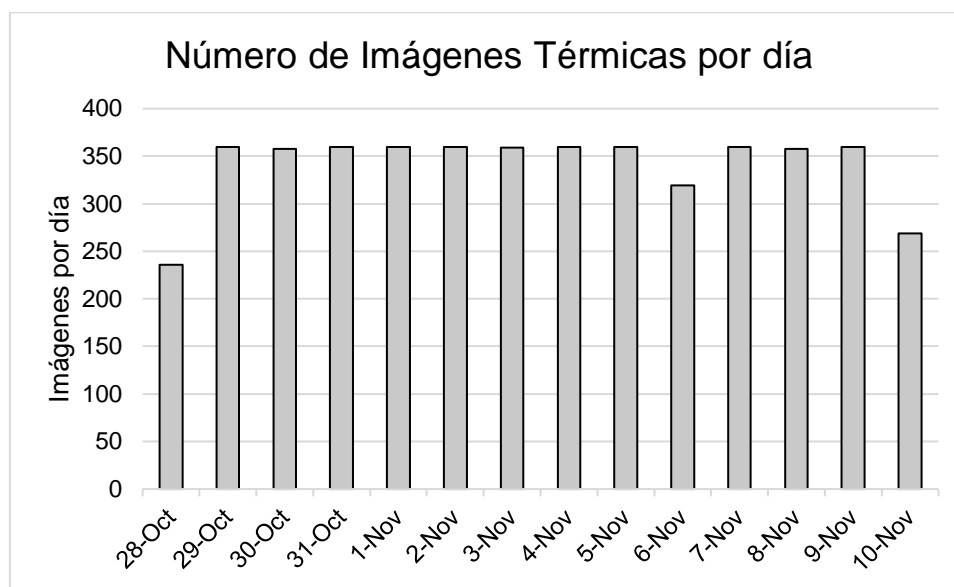


Figura 5.2 Representación del número de imágenes térmicas por día dentro del periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020.

5.1.2. Análisis y valoración de imágenes visuales

5.1.2.1 Productos volcánicos identificados

Los productos volcánicos que se pudieron identificar dentro de las imágenes visuales fueron columnas eruptivas tanto de gases como de ceniza, con una mayor proporción de gases en el día. En la noche se pudo distinguir productos volcánicos que presentaban incandescencia sobre la cumbre como columnas de gases y bajo la cumbre se pudo distinguir bloques rodados que avanzaron por todos los flancos resultado de las diferentes explosiones del volcán.

En la Figura 5.3 se muestran seis diferentes tipos de imágenes visuales representativas de la actividad superficial del volcán a lo largo del periodo estudiado tanto en el día como en la noche, destacando así diferentes formas en las que se pueden presentar los productos volcánicos ya mencionados anteriormente siendo las más comunes como se presentan a continuación:

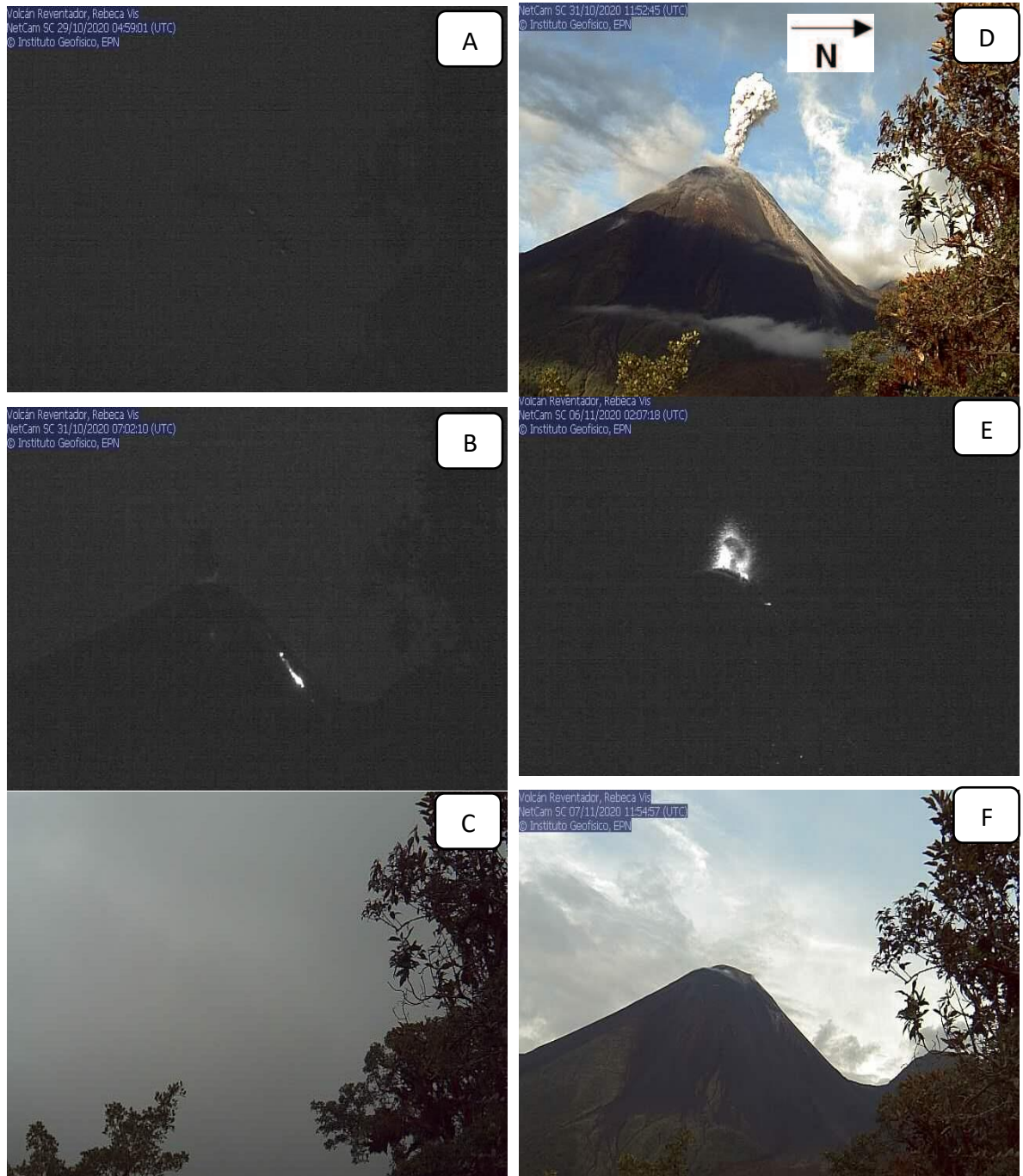


Figura 5.3. Imágenes obtenidas a través de la cámara Rebeca entre el 28 de octubre -10 de noviembre del 2020. A) Imagen nocturna, volcán nublado. B) Imagen nocturna, volcán despejado con presencia de bloques rodados. C) Imagen diurna, volcán nublado. D) Volcán despejado con la presencia de una columna eruptiva. E) Imagen nocturna con la presencia de una explosión representada por una columna eruptiva sobre la cumbre F) Imagen diurna, volcán despejado.

5.1.2.2 Valoración y Análisis

En base a la identificación y clasificación de los diferentes productos volcánicos durante este periodo, se construyó una imagen (Figura 5.4a) en donde se resume la cantidad de productos que se identificaron por día. Con un promedio dentro de este periodo de 30 eventos correspondientes a bloques rodados y 11 eventos referentes a columnas eruptivas. Siendo el 31 de octubre un día donde los bloques rodados tuvieron una mayor predominancia, el 4 de noviembre donde existió un predominio de columnas eruptivas y el 28y 01 de noviembre donde no se identificaron productos volcánicos.



Figura 5.4a) Representación del número de columnas eruptivas y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara visual REBECA.

Por otro lado, en la Figura 5.4b se muestra un diagrama de pastel representando la cantidad de productos volcánicos totales. Se puede observar que del 100% de las imágenes el 74% de productos volcánicos corresponden a bloques rodados mientras que el 26% corresponde a columnas eruptivas en donde se puede destacar que en todos los días dentro del periodo de estudio existió una mayor proporción de bloques rodados y esto se asocia a más un evento eruptivo precedente que dejó dichos productos como evidencias de su explosión.

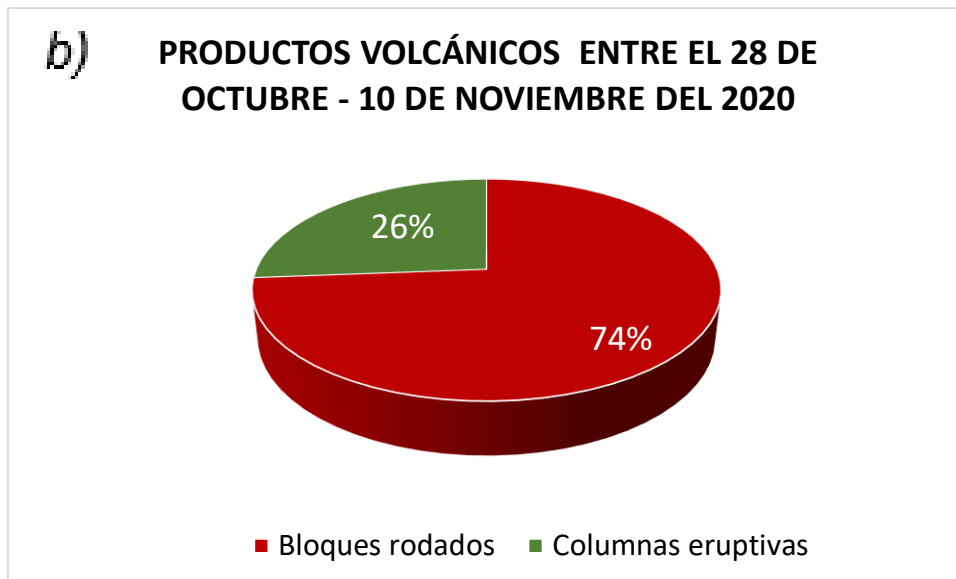


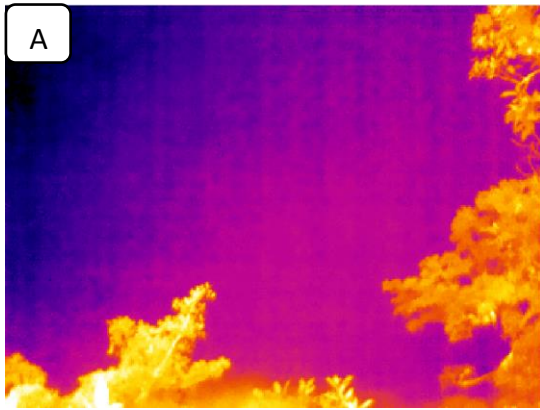
Figura 5.4b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas y los bloques rodados registrados dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara visual REBECA.

5.1.3 Análisis y valoración de imágenes térmicas

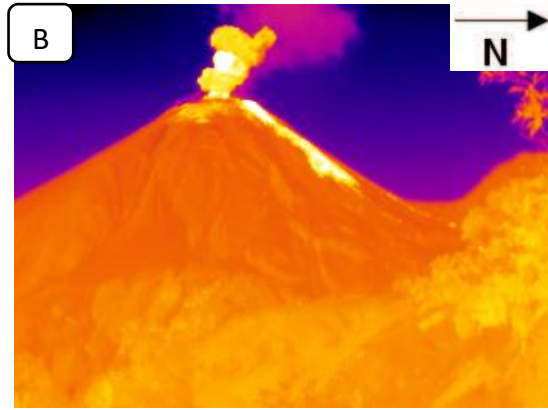
5.1.3.1 Productos volcánicos identificados

La identificación de productos volcánicos a través de la cámara de vigilancia térmica REBECA dependió netamente de las condiciones climáticas del sector, teniendo imágenes nubladas y despejadas. En las imágenes despejadas se logró identificar columnas eruptivas de diversos tamaños, bloques rodados dispersados en los flancos y flujos de lava. Estos tres tipos de productos volcánicos se identificaron por la presencia de anomalías térmicas, es decir que sus temperaturas son más altas que sus zonas adyacentes. Las columnas eruptivas se identificaron sobre la cumbre con diferente intensidad, mientras que los bloques rodados o balísticos se identificaron por presentar anomalías dispersas sobre los flancos. El flujo de lava presentó una anomalía constante y regular a lo largo del flanco nor oriental.

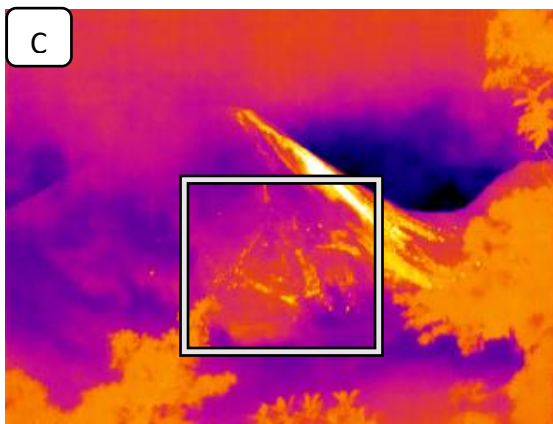
En la Figura 5.5 se muestran algunas de las imágenes térmicas obtenidas del volcán El Reventador con los diferentes productos volcánicos que se pueden distinguir.



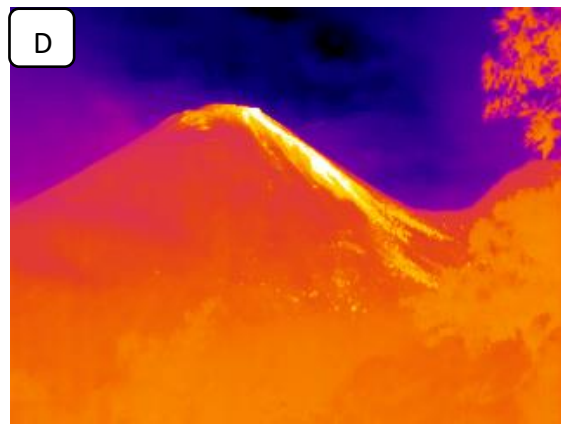
RV_rebeca_20201028_082010



RV_rebeca_20201104_062809



RV_rebeca_20201028_174410



RV_rebeca_20201028_232010

Figura 5.5 Imágenes térmicas obtenidas del volcán El Reventador a través de la cámara térmica REBECA entre 28 de octubre -10 de noviembre del 2020 A) Imagen nublada. B) Imagen de una columna eruptiva. C) Imagen de bloques rodados. D) Imagen de un flujo de lava.

5.1.3.2 Valoración y Análisis

En base a los datos obtenidos de las imágenes infrarrojas se puede apreciar en la Figura 5.6a, que existe un importante número de imágenes que presentan flujos de lava siendo el 7 de noviembre un día donde se pudo encontrar el máximo de estos eventos y el día 1 de noviembre donde no se registraron muchos eventos posiblemente debido a las malas condiciones climáticas, destacando un promedio de 28 eventos correspondientes a columnas eruptivas, 159 eventos pertenecientes a flujos de lava y 78 eventos referentes a bloques rodados dentro de este periodo.

En la Figura 5.6b se muestra un diagrama de pastel representando la distribución de los productos volcánicos totales dentro de este periodo con un 11% de columnas eruptivas, 29% bloques rodados y 60% de flujos de lava.

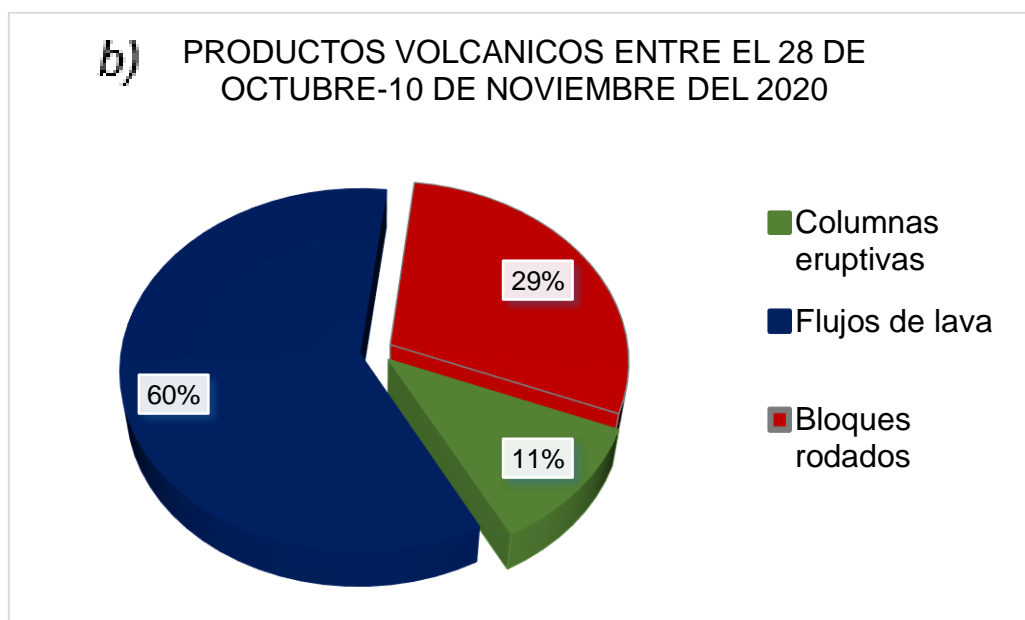
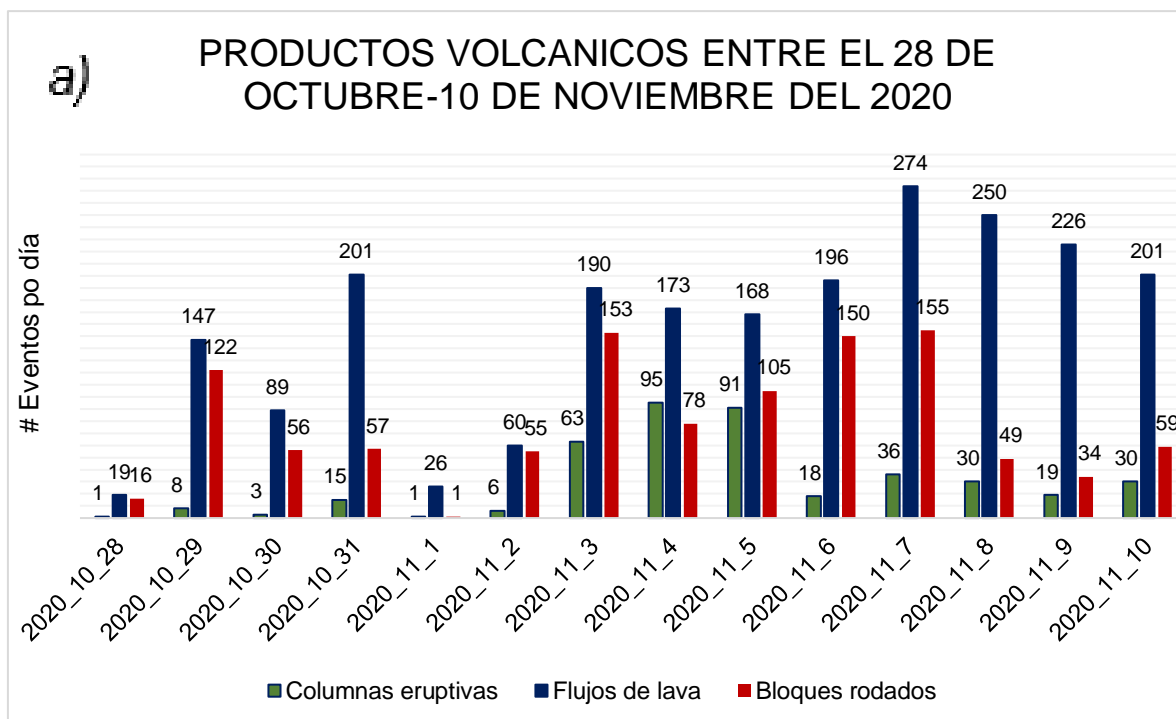


Figura 5.6 a) Representación del número de columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara térmica REBECA. b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020 obtenidos por la cámara térmica REBECA.

5.1.4 Señales sísmicas asociadas

5.1.4.1 Identificación de señales sísmicas

Como se mencionó en el Capítulo 3 existen diferentes tipos de señales sísmicas asociadas al volcán. Entre los tipos de señales que se pudieron identificar están los tremores volcánicos y las explosiones.

Los tremores volcánicos se caracterizaron por presentar amplitudes variables por largos periodos de tiempo desde 1-5 minutos entre diferentes trazas sísmicas (Figura 5.7). Cabe resaltar que, si un evento tuviera una duración más de 5 minutos, la técnica empleada no la puede detectar ya que las trazas son cortadas como máximo al valor mencionado. Generalmente los tremores son eventos que preceden a las explosiones por lo que muchos de estos eventos suelen estar asociados a los mismos y por ende eventos eruptivos de gases o ceniza en el interior del volcán como se menciona en Caballero (2019).

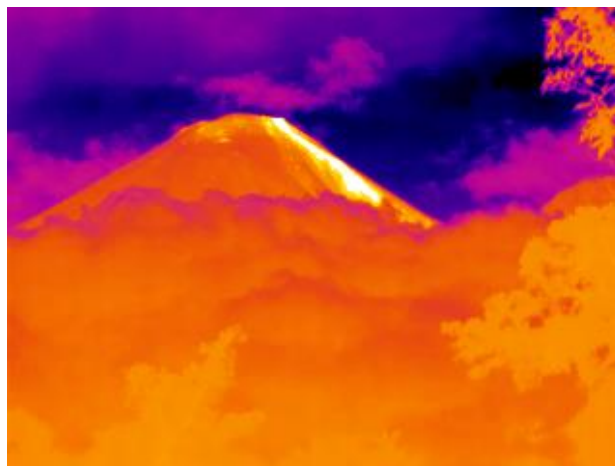
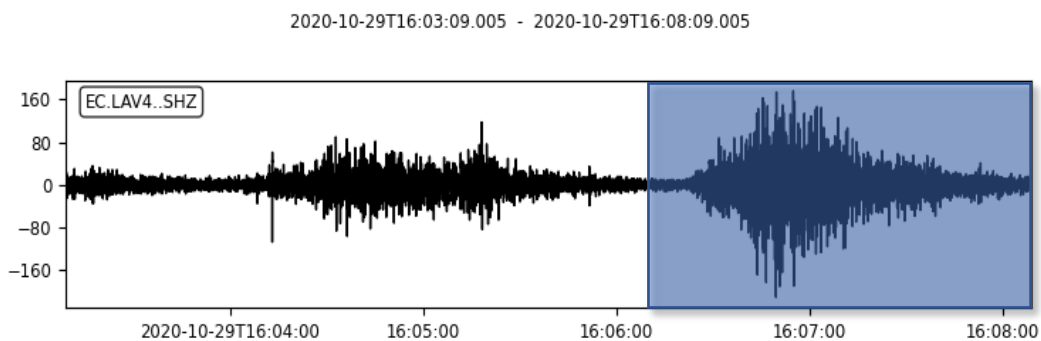


Figura 5.7 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 29 de octubre del 2020 a las 16:07:00 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a un tremor volcánico registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica.

Las explosiones en cambio fueron eventos que se caracterizaron por presentar altos valores en su amplitud como se puede ver en la Figura 5.8 cuya amplitud máxima registrada en este periodo fue de 77243 unidades. La duración de los eventos explosivos en cambio duró un par de minutos.

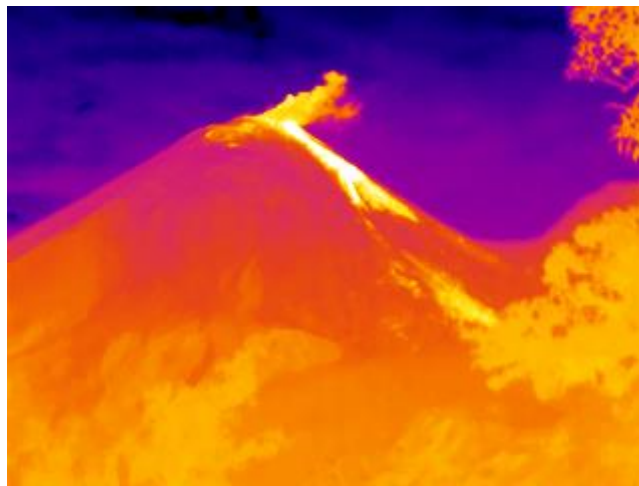
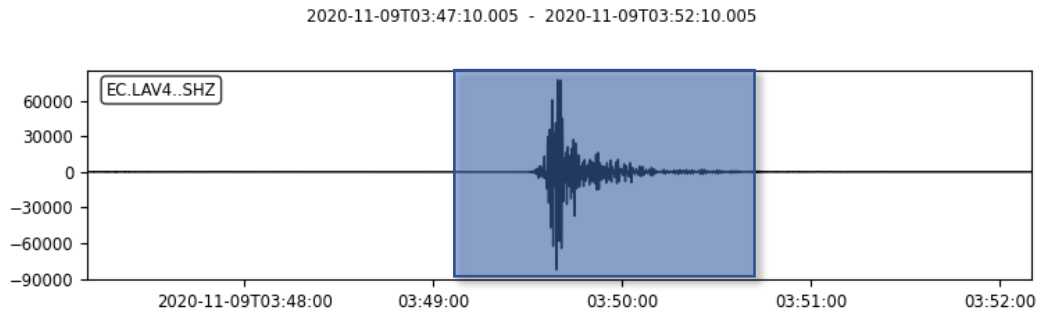


Figura 5.8 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 9 de noviembre del 2020 a las 03:49:35 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a una explosión volcánica registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de una columna eruptiva.

La Figura 5.9 es una representación del tiempo de duración de las columnas eruptivas y el rodar de los bloques balísticos registrados en la sísmica a través del tiempo que concierne al periodo de estudio. Se puede apreciar que tanto las columnas eruptivas y los bloques rodados ploteados con respecto al tiempo de duración registrada en la sísmica muestra una cierta concentración dentro de un intervalo de 1-2 minutos. Por otro lado, los productos volcánicos representados fuera de este intervalo de tiempo pueden ser considerados mas bien como eventos atípicos ya que no siguen ningún patrón establecido.

A) REPRESENTACION DE LA AMPLITUD VS TIEMPO DE LOS BLOQUES RODADOS

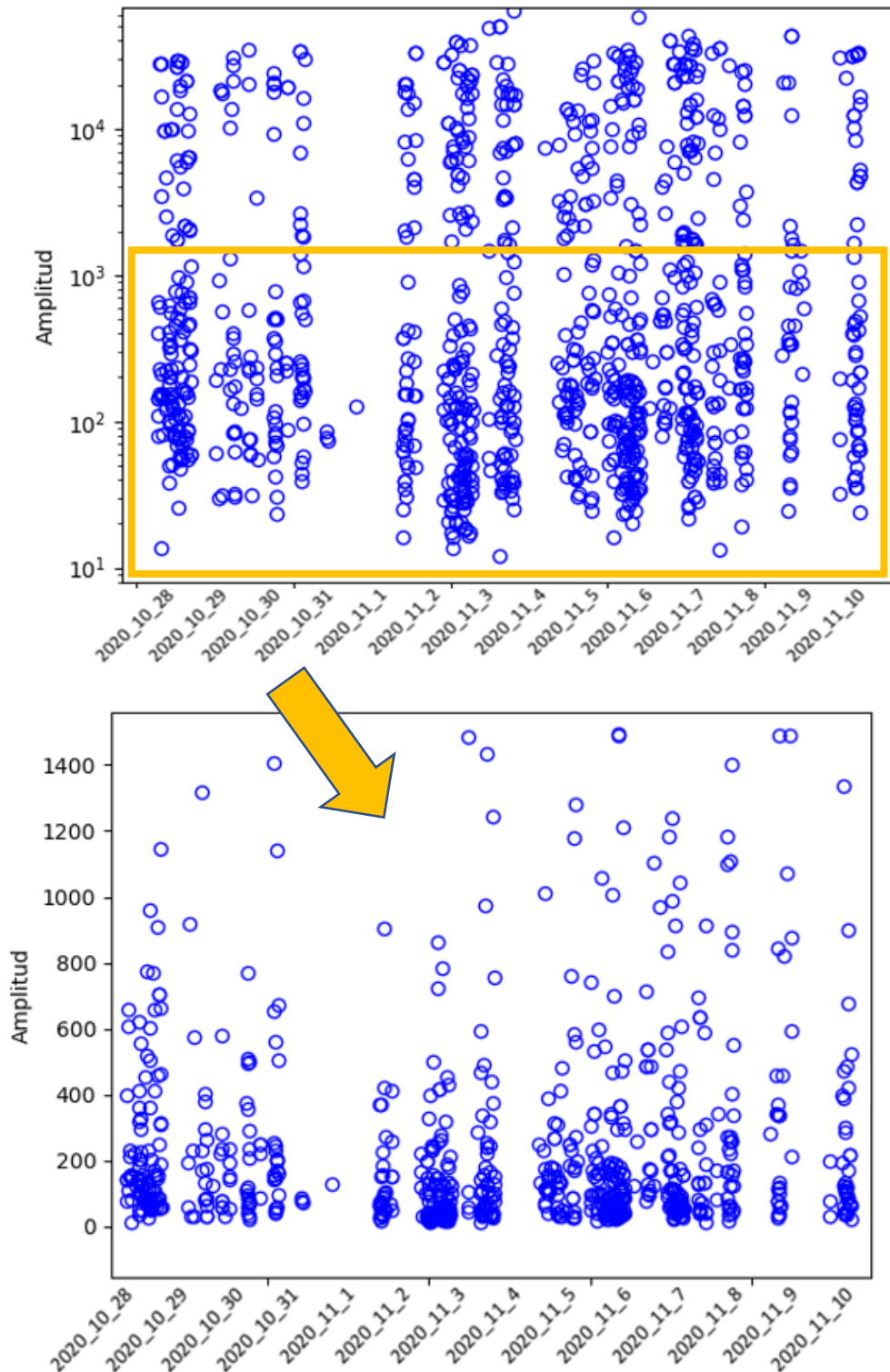


Figura 5.10A. Representación de la amplitud de los bloques rodados en el volcán El Reventador con respecto al tiempo dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020. En la Figura se puede identificar que existe una mayor acumulación de los bloques rodados en un rango inferior a las 1500 cuentas o unidades lo que representa eventos de muy poca magnitud.

B) REPRESENTACION DE LA AMPLITUD VS TIEMPO DE LAS COLUMNAS ERUPTIVAS

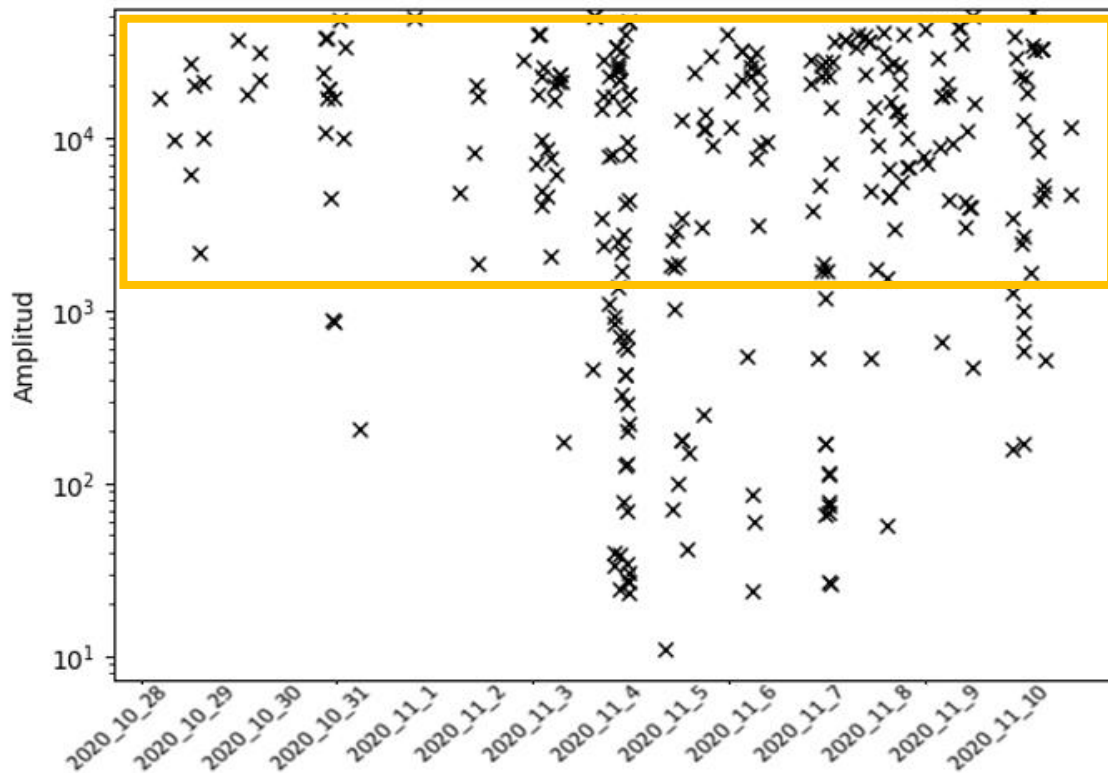


Figura 5.10 B. Representación de la amplitud de las columnas eruptivas en el volcán El Reventador con respecto al tiempo dentro del periodo 28 de octubre-10 de noviembre del 2020. En la Figura se puede identificar que existe una mayor concentración de dicho producto volcánico entre los 5000-45000 unidades.

5.2 Periodo 01 al 08 de diciembre 2021

5.2.1 Imágenes disponibles

Al obtener las imágenes de las cámaras de vigilancia visual y térmica dentro de un intervalo de 4 minutos se determinó un promedio de imágenes que fueron recibidas por día. Es así que, en base a la data recibida de un total de 2153 imágenes visibles se estableció un promedio de 269 imágenes obtenidas por día, con un número máximo y mínimo de 282 y 263 imágenes respectivamente como se muestra en la Figura 5.11.

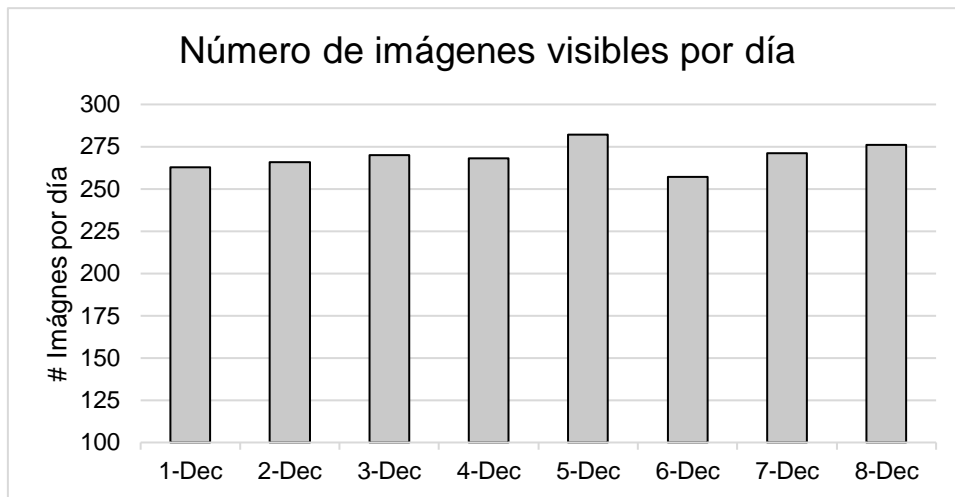


Figura 5.11 Representación del número de imágenes visuales por día dentro del periodo 01 al 08 de diciembre 2021 obtenidas por la cámara visual REBECA.

En cuanto se refiere a las imágenes térmicas dentro de dicho periodo se contó con un promedio de 346 imágenes recibidas por día, con un número máximo y mínimo de 360 y 265 imágenes respectivamente de un total de 2772 imágenes, como se muestra en la Figura 5.12.

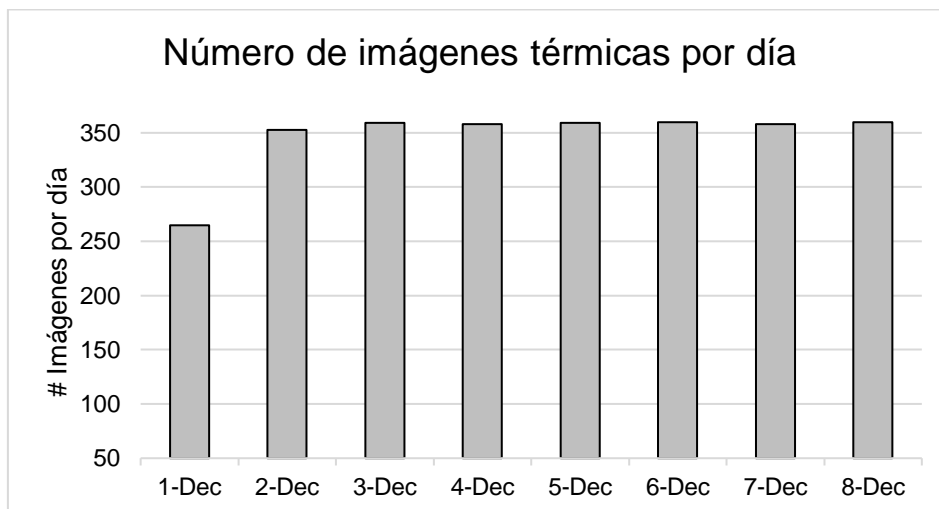


Figura 5.12 Representación del número de imágenes térmicas por día dentro del periodo 01 al 08 de diciembre 2021 obtenidas por la cámara visual REBECA.

5.2.2 Análisis y valoración de imágenes visuales

5.2.2.1 Productos volcánicos identificados

Los productos volcánicos que se pudieron identificar dentro de las imágenes visuales fueron columnas eruptivas tanto de gases como de cenizas con una mayor proporción de gases en el día, mientras en la noche se pudo distinguir productos volcánicos que presentaban incandescencia sobre la cumbre como

columnas de gases y bajo la cumbre se pudo distinguir bloques rodados que avanzaron por todos los flancos resultado de las diferentes explosiones del volcán.

En la Figura 5.13 se muestran cinco diferentes tipos de imágenes que se pueden obtener dentro de las imágenes visuales a lo largo del periodo estudiado tanto en el día como en la noche, destacando así diferentes formas en las que se pueden presentar los productos volcánicos ya mencionados anteriormente siendo las más comunes como se presentan a continuación.

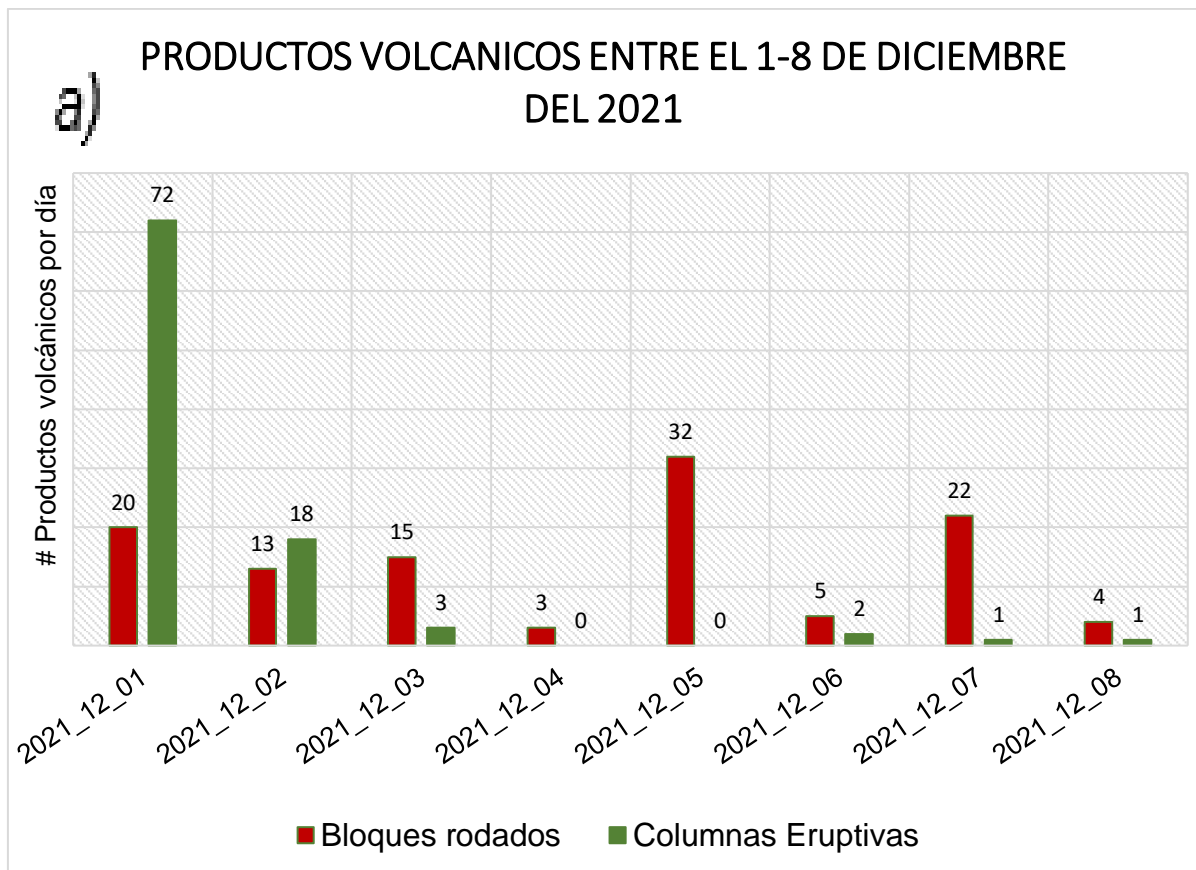


Figura 5.13 Imágenes obtenidas a través de la cámara Rebeca entre el 1-8 de diciembre del 2021 A) Imagen diurna, volcán despejado con columna eruptiva. B) Imagen diurna, volcán nublado. C) Imagen diurna, volcán despejado. D) Imagen nocturna con bloques rodados bajo la cumbre. E) Imagen nocturna con columna eruptiva sobre la cumbre.

5.2.2.2 Valoración y Análisis

En la Figura 5.14a se puede observar la distribución de los productos volcánicos en cada día dentro del periodo estudiado, donde se puede destacar que existe una importante cantidad de eventos eruptivos el primer día y conforme va transcurriendo el tiempo se observa que esa cantidad va disminuyendo hacia un periodo de relativa calma. Los bloques rodados son productos que aún se encuentran presentes en todo este periodo. Asimismo, los días 4 y 8 de diciembre son días en donde casi no se observa productos volcánicos debido a condiciones climáticas. El promedio total de los bloques rodados y de las columnas eruptivas identificadas dentro de este periodo son de 14 y 12 respectivamente.

Si se realiza una comparación de ambos productos volcánicos se puede concluir que el 54% de los mismo son bloques rodados mientras que el 46% son columnas eruptivas como se indica en la Figura 5.14b.



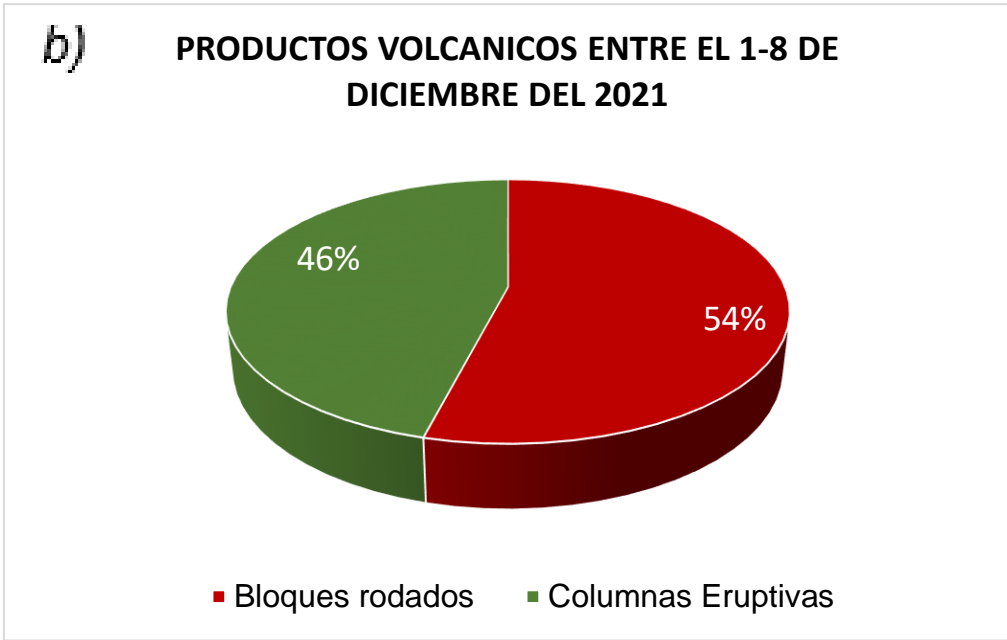


Figura 5.14 a) Representación del número de columnas eruptivas y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara visual REBECA. b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas y bloques rodados registrados dentro del periodo 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara visual REBECA.

5.2.3 Análisis y valoración de imágenes térmicas

5.2.3.1 Productos volcánicos identificados

Los productos volcánicos que se pudieron identificar utilizando la cámara de vigilancia térmica REBECA dio como resultado la presencia de columnas eruptivas de diversos tamaños, bloques rodados que se identifican porque se presentan en formas de pequeños puntos dispersos en los flancos del volcán con altas temperaturas como se muestra en la Figura 5.15 y flujos de lava.

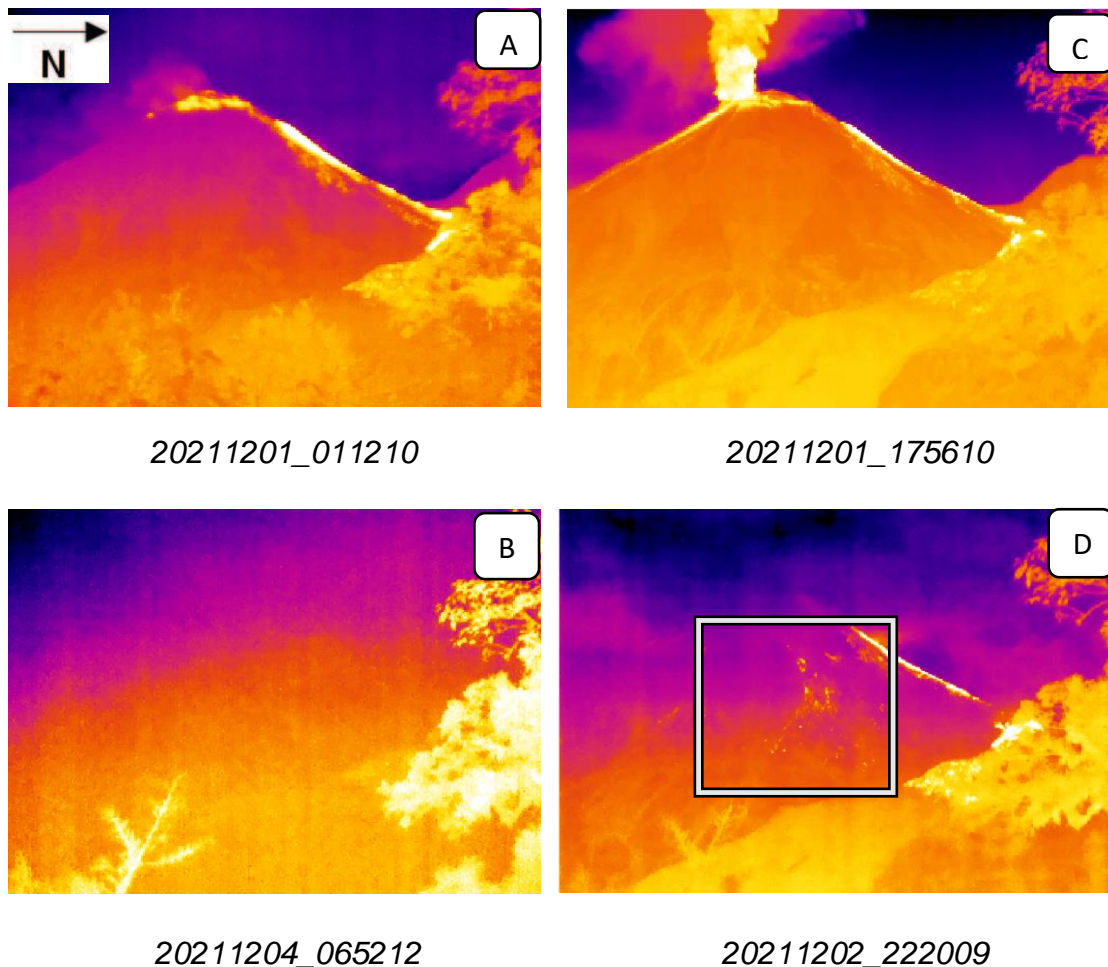


Figura 5.15 Imágenes térmicas obtenidas del volcán El Reventador a través de la cámara térmica REBECA entre el 1-8 de diciembre del 2021 A) Imagen de un flujo de lava. B) Imagen nublada. C) Imagen de una columna eruptiva. D) Imagen de bloques rodados.

5.2.3.2 Valoración y Análisis

En base a los datos obtenidos de la cámara térmica se puede apreciar en la Figura 5.16a, la representación de los productos volcánicos que existen por día dentro de este periodo estableciendo un promedio de 16, 153 y 4 eventos referentes a columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados respectivamente.

En comparación a los datos vistos en la cámara visual en la Figura 5.16b, se observa que se aprecia de mejor manera la cantidad de productos volcánicos que existen dentro de este periodo sobre todo la cantidad de bloques rodados. En el caso anterior se veía una importante cantidad de dichos productos, pero ahora se ve de mejor cual es la distribución con un 2% de bloques rodados, acompañados de un 10% columnas eruptivas, 88 % de flujos de lava.

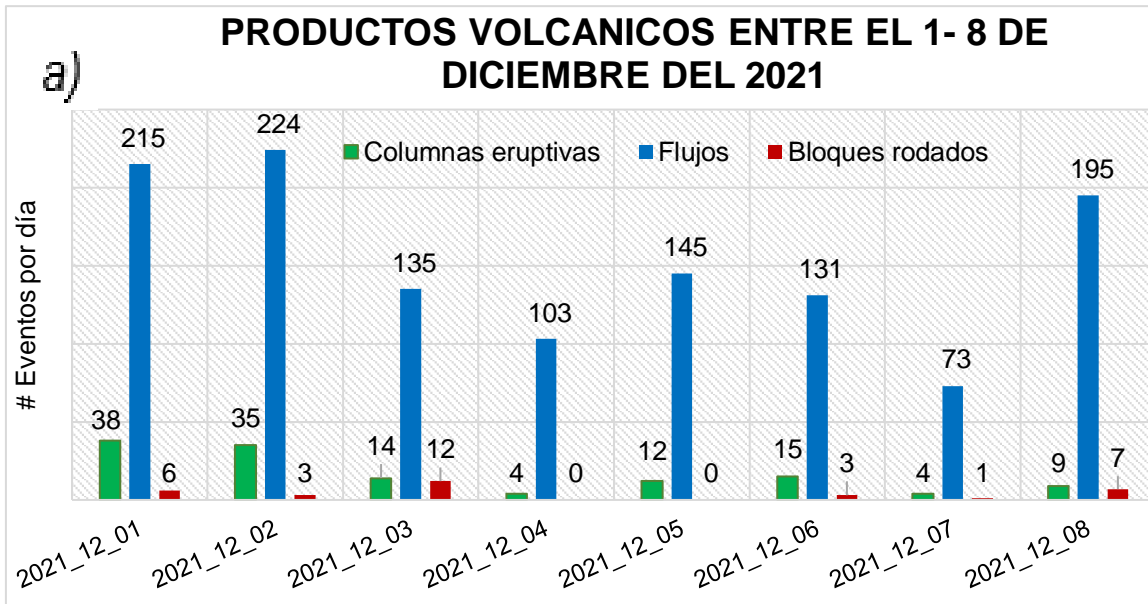


Figura 5.16 a) Representación del número de columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados por día dentro del periodo de estudio periodo 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara térmica REBECA.

PRODUCTOS VOLCANICOS ENTRE EL 1- 8 DE DICIEMBRE DEL 2021

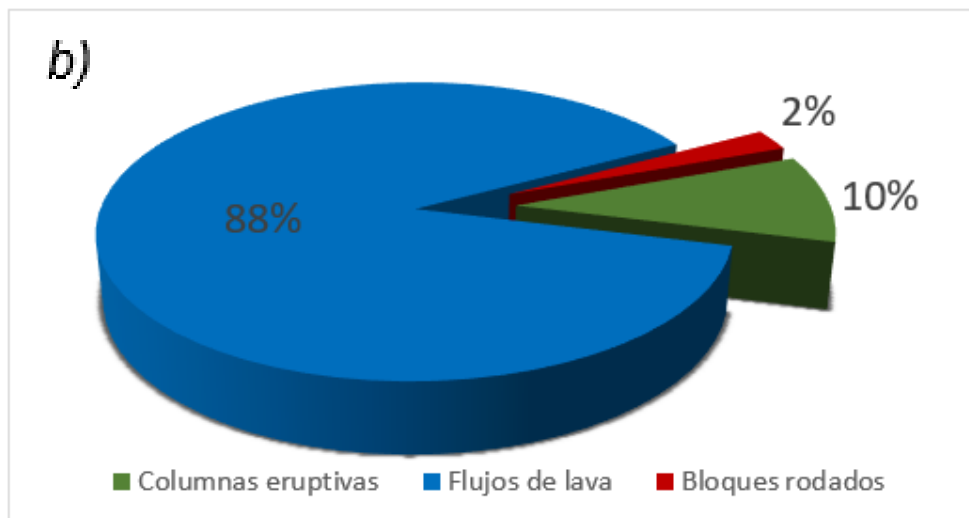


Figura 5.16 b) Diagrama de pastel que indica la cantidad total de las columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados registrados del 1-8 de diciembre del 2021 obtenidos por la cámara térmica REBECA.

5.2.4 Señales sísmicas asociadas

5.2.4.1 Identificación de señales sísmicas

De manera análoga a lo explicado en el periodo anterior entre los diferentes tipos de señales sísmicas que se pudieron identificar estuvieron predominando los tremores y las explosiones volcánicas. Los tremores volcánicos se caracterizaron por presentar amplitudes variables desde 1-5 minutos entre diferentes trazas sísmicas (Figura 5.17). Mientras que las explosiones fueron eventos cuya amplitud máxima registrada en este periodo fue de 35416 unidades (Figura 5.18).

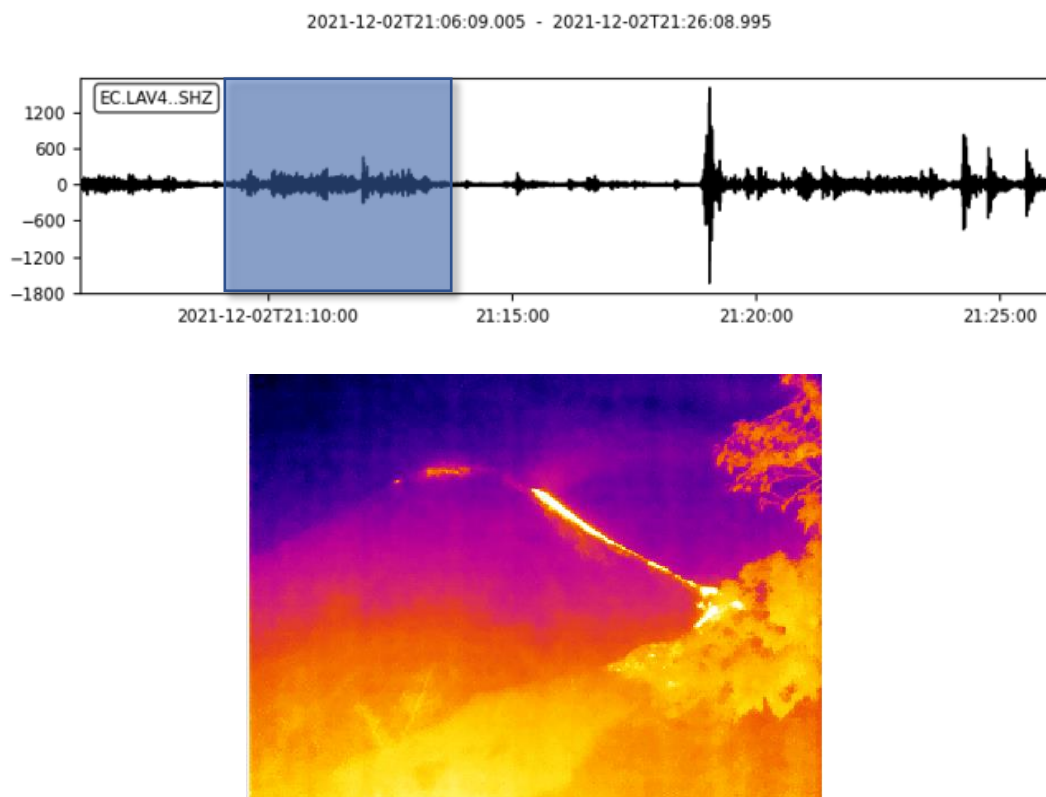


Figura 5.17 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 2 de diciembre del 2021 a las 21:10:00 (hora local) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a un tremor volcánico registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica.

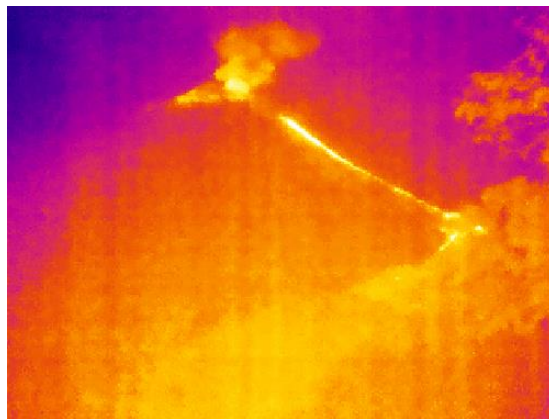
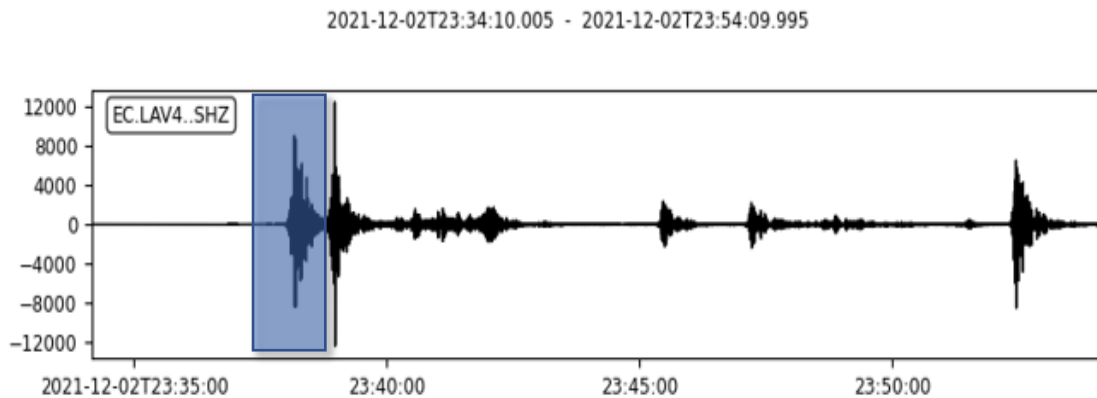


Figura 5.18 Representación de una imagen térmica registrado por la cámara térmica REBECA del volcán El Reventador con evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste ocurrido el día 2 de diciembre del 2021 a las 23:38:10 (UTC) y su señal sísmica asociada del evento correspondiente a una explosión volcánica registrado por la estación sísmica LAV4. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de una columna eruptiva.

La Figura 5.19 es una representación del tiempo de duración de las columnas eruptivas y el rodar de los bloques balísticos registrados en la sísmica a través del tiempo que concierne al periodo de estudio. Se puede apreciar que la relación de cada columna eruptiva y de cada bloque rodado con respecto al tiempo de duración registrada en la sísmica se presenta de forma aleatoria y dispersa y no sigue ningún patrón. Esto se debe posiblemente a la baja cantidad de productos volcánicos registrados durante este periodo de tiempo. Los diferentes eventos registrados en un lapso varían dependiendo de su intensidad. Cabe resaltar que la distribución de los flujos de lava no fue incluida puesto que son eventos que estuvieron ya presentes durante todo el periodo de estudio por lo que no se considera significativo para esta representación.

DURACIÓN DE LOS PRODUCTOS VOLCANICOS A TRAVÉS DEL TIEMPO

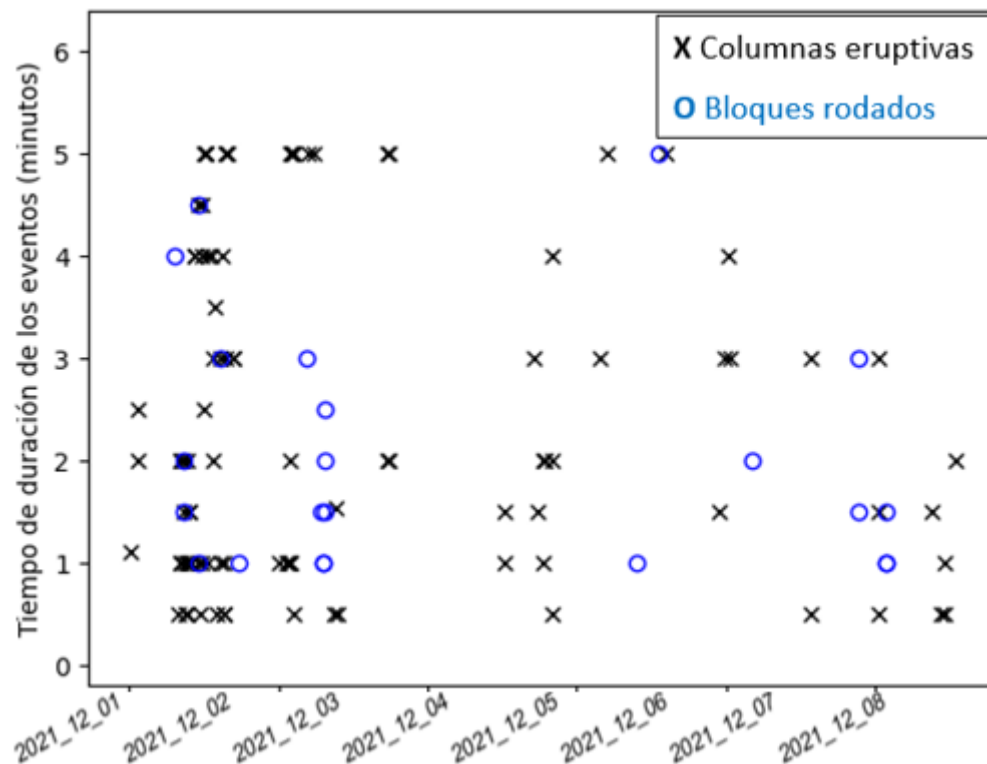


Figura 5.19 Duración de los productos volcánicos registrados en la sísmica dentro del periodo 1 -8 de diciembre del 2021. En la figura se muestra una distribución aleatoria del tiempo de duración de los bloques rodados y de las columnas eruptivas registrado en la sísmica. Posiblemente se deba a la ausencia de productos volcánicos en el periodo de estudio ocasionadas o por las malas condiciones climáticas que impidieron su visualización.

La Figura 5.20 en cambio es una representación de las amplitudes máximas obtenidas en la sísmica representadas a través del tiempo en donde se puede apreciar que la mayor parte de los bloques rodados se presentan de forma aleatoria sin mostrar algún patrón en particular debido al número bajo de productos volcánicos observables. Para este periodo de estudio el clima juega un rol importante ya que la ventana de observación de dichos productos volcánicos es realmente limitada que a diferencia del caso anterior fue mucho más factible observar en las imágenes visibles y esto da como resultado que los bloques rodados se extiendan en un rango más disperso que a comparación del caso anterior tuvo un rango inferior a las 1500 unidades.

Por otro lado, las columnas eruptivas para este periodo se concentraron en rangos de los 1000-13000 unidades lo que representan eventos de magnitud e

intensidad dentro de rangos variables. Donde más se puede notar esta concentración son en los dos primeros días del estudio: 1-2 de diciembre del 2021.

Realizando una comparación con el periodo de estudio anterior para este periodo el rango de amplitudes es mucho menor en cuanto se refiere a columnas eruptivas lo que indica que es un periodo con explosiones no tan fuertes.

AMPLITUD VS TIEMPO DE LOS PRODUCTOS VOLCANICOS

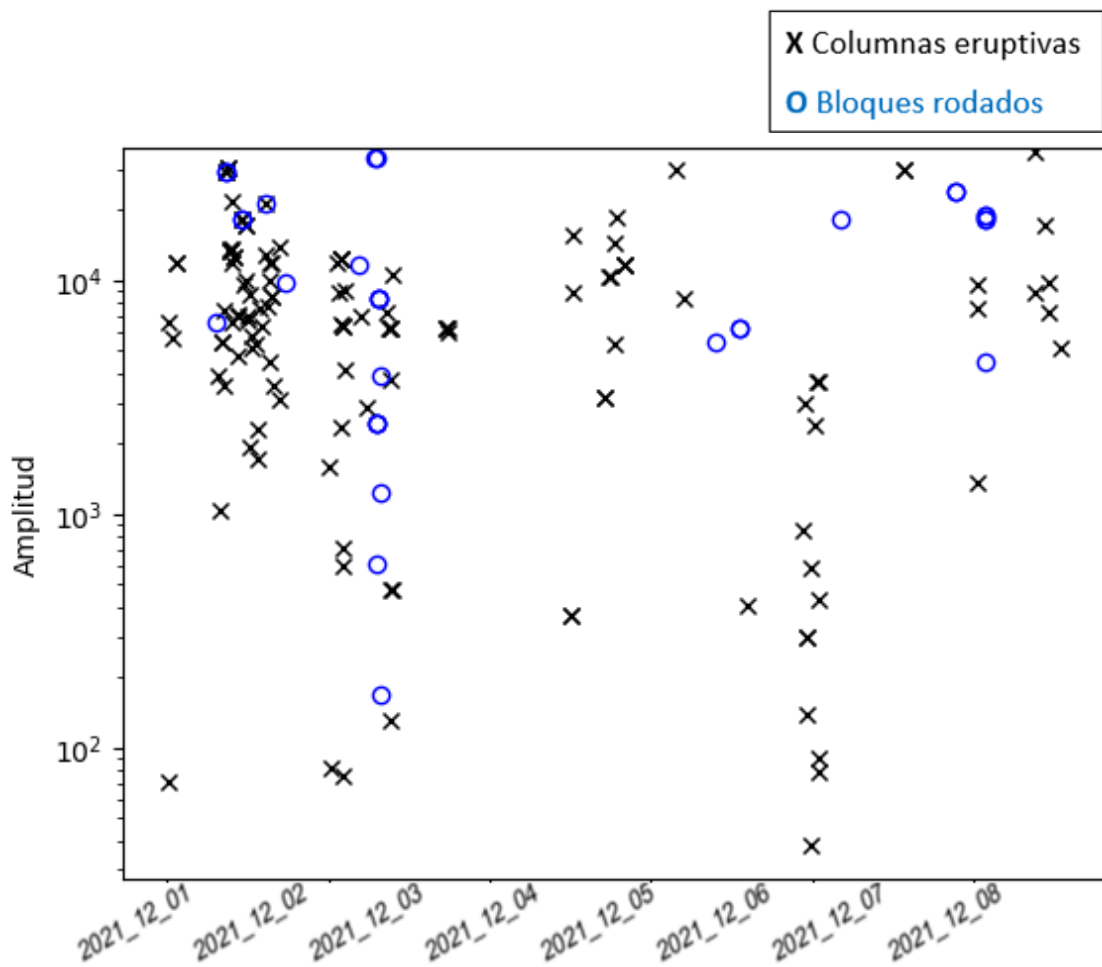


Figura 5.20 Representación de la amplitud de las columnas eruptivas y de los bloques rodados en el volcán El Reventador a través del tiempo dentro del periodo 1-8 de diciembre del 2021. En la Figura se puede identificar que existe un amplio rango para la concentración de las amplitudes de los productos volcánicos mencionados.

CAPITULO 6

6. DISCUSION

6.1 Pérdida de información por frecuencia de toma de datos

Un problema al momento de la transmisión de información es la pérdida de datos. Generalmente la pérdida de datos se caracteriza por la eliminación accidental o sobreimposición de información, presencia de archivos dañados debido al funcionamiento anormal o la avería del dispositivo lo cual provoca que tanto imágenes y señales sísmicas se corten al momento de su transmisión. Actualmente se pierde aproximadamente 1 de cada 20 imágenes. Tomando en consideración con los miles de datos con los que se trabaja dicho error es bastante despreciable.

Asimismo, otro factor que provoca la pérdida de información es la frecuencia con la que se genera. Todos los datos obtenidos por parte de las cámaras de vigilancia y de las estaciones sísmicas son transmitidos vía telemétrica a las oficinas del IG-EPN con una frecuencia cada 4 minutos lo que se considera como un flujo de información bastante estable. Sin embargo, para el presente trabajo, dentro de ese pequeño lapso de tiempo donde no se transmite información pudieron haber ocurrido diferentes productos eruptivos.

6.2 Pros y contras del análisis utilizando imágenes visuales o térmicas

En cuanto se refiere a las ventajas que ofrece este análisis es que permite realizar un seguimiento de la actividad volcánica de forma rápida y sencilla ya que las cámaras visuales y/o infrarrojas son muy fáciles de operar, fáciles de encontrarlas en el mercado aunque un poco costosas, permite recopilar información con altas resoluciones y sobre todo emitir una gran cantidad de información de forma constante sean imágenes o videos. Además, al analizar la información utilizando este tipo de imágenes permite ahorrar mucho tiempo ya que se puede trabajar de forma remota.

La desventaja de realizar en base a este análisis son que no se conoce el momento preciso en el que se produjo la generación de productos volcánicos tales como columnas eruptivas o bloques rodados porque son emitidas las imágenes cada cierto intervalo y como se mencionó anteriormente en cada

intervalo se debe asumir que pueden ocurrir una cierta cantidad de eventos volcánicos, aunque la diferencia de precisión sea relativamente pequeña. Otra desventaja que suele ofrecer este tipo de análisis es que solo permite trabajar con los productos que se muestran en determinado flanco del volcán, es por ello, que es necesario trabajar con todas las cámaras presentes en el volcán para englobar todos los productos que salen del cráter, un caso muy especial son los bloques rodados que pueden rodar en cualquier flanco del volcán.

6.3 Caracterización de actividad según el análisis visual y térmico

Conforme a los datos presentados durante el periodo de estudio se pudo identificar y caracterizar de la mejor manera posible los diferentes productos volcánicos que aparecen en superficie estableciendo algunas correlaciones importantes como se muestra a continuación.

6.3.1 Periodo 28 de octubre a 10 de noviembre 2020

En este periodo se puede apreciar que los bloques rodados muestran una tendencia a asociarse a los flujos de lava y no tanto a las columnas eruptivas a pesar de que existe una gran presencia de los mismos (ver Anexo II). Cabe destacar para que exista la expulsión de los bloques rodados es necesaria la presencia de columnas eruptivas que acompañen a dicho explosión pero en este caso se puede observar que no cumple con dicho parámetro, posiblemente se deba a que hubo una gran erupción predecesora que hizo que los bloques se mantengan calientes incluso días después, y no sería imposible pensar en esta idea ya que como se mencionó anteriormente estos productos suelen mantener incandescencia después de una expulsión.

Tomemos por ejemplo el caso del día 29 de octubre del 2020 (ver Figura 6.1). Esta figura representa el ploteo de los productos volcánicos identificados en las imágenes de esta fecha que corresponde a columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados. Adicionalmente se muestran las líneas de tendencia acumulada que reflejan el número de productos volcánicos que aparecieron en un día. En esta imagen se puede observar que existe una acumulación de eventos producidos por flujos de lavas que tiende a incrementarse conjuntamente con los bloques rodados. Estos bloques rodados iniciaron aparentemente desde las 00:08:11 (UTC) de esta fecha, cuyos eventos

sísmicos no fueron registrados ya que presentan una amplitud relativamente baja (ver Figura 6.2A y B) lo cual hace difícil su interpretación. Por tanto, se puede establecer que es complicado registrar la señal sísmica de los bloques rodados ya que están asociados al avance del flujo de lava que desciende por el flanco nor oriental. En este caso, se puede observar que la actividad predominante para esta fecha es la generación de un flujo de lava y su avance registrado por el rodar de bloques. Las pendientes de las gráficas son indicadores de si la actividad es predominante en el volcán, por lo que una pendiente alta representa una gran cantidad de productos volcánicos presentes. Por otro lado, se puede observar que la pendiente baja de la curva de columnas eruptivas es muy baja, y eso se relaciona con la falta de emisiones en el registro.

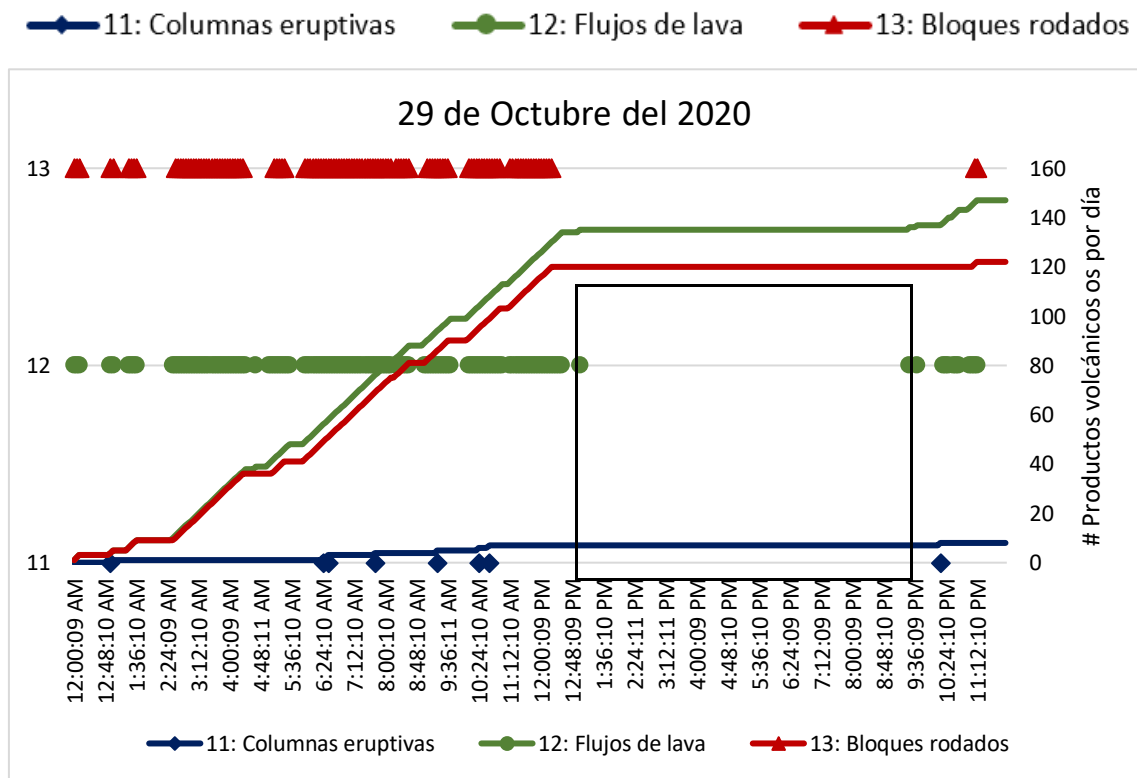


Figura 6.1 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 29 de octubre del 2020. Las pendientes altas tanto de los flujos de lava y de bloques rodados son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja de las columnas eruptivas son la ausencia de los mismos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo, es decir, un momento en el tiempo en el que no hubo actividad registrada. Se puede apreciar una relación de la línea de los bloques rodados con la de los flujos de lava.

Figura 6.2A

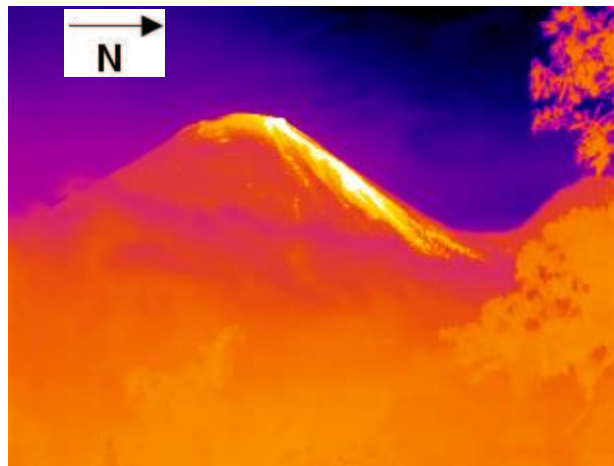


Figura 6.2B

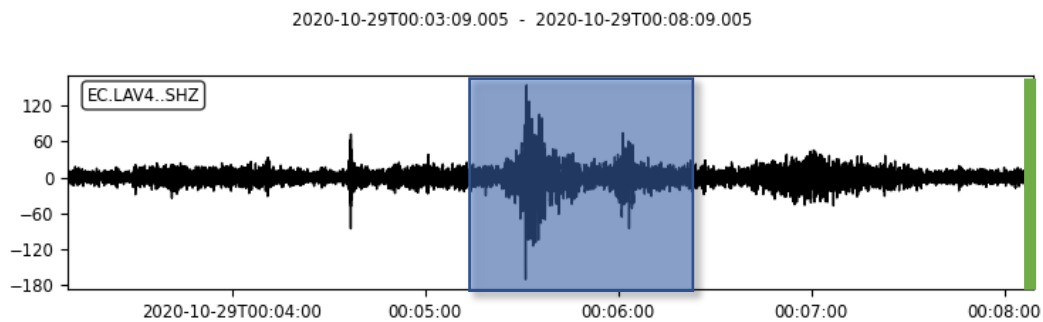


Figura 6.2 Representación de una imagen térmica y su señal sísmica asociada del evento ocurrido a las 00:08:11 (UTC) del día 29 de octubre del 2020. 6.2A) Imagen térmica del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste. 6.2B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos anteriores a la captura de la imagen térmica de 6.2A. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de los bloques rodados, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.2A. La línea verde indica la hora en la que se tomó la imagen.

Otro ejemplo puntual de ello es el caso del día 30 de octubre del 2020 (ver Figura 6.3). Esta figura igualmente representa el ploteo de los productos volcánicos identificados correspondientes a flujos de lava, bloques rodados y columnas eruptivas. Adicionalmente se muestran las líneas de tendencia acumuladas de éstos. En esta imagen se puede apreciar que existe una correlación de los eventos producidos por flujos de lava que tiende a incrementarse con los bloques rodados durante todo el día, mientras que las columnas eruptivas casi no aparecen dentro de esta fecha por lo que su pendiente es casi horizontal, la

acumulación de eventos para este caso es muy baja. En la figura 6.4A se puede observar el momento en el que se produjo una explosión y la posterior generación de bloques rodados provenientes del cráter acompañado de varios flujos de lava que descienden por los diferentes flancos del volcán cuyo evento sísmico fue registrado alcanzando una amplitud bastante alta (ver Figura 6.4B).

Si bien no hay alguna correlación de las columnas eruptivas respecto a los bloques rodados, se puede discernir que las señales sísmicas propias de los bloques rodados son difíciles de captar a través de únicamente imágenes visuales y térmicas por lo que para su identificación debe ser acompañada generalmente por otras técnicas de monitoreo como la del infrasonido ya que se conoce que la presencia de los bloques rodados puede estar relacionada con las explosiones.

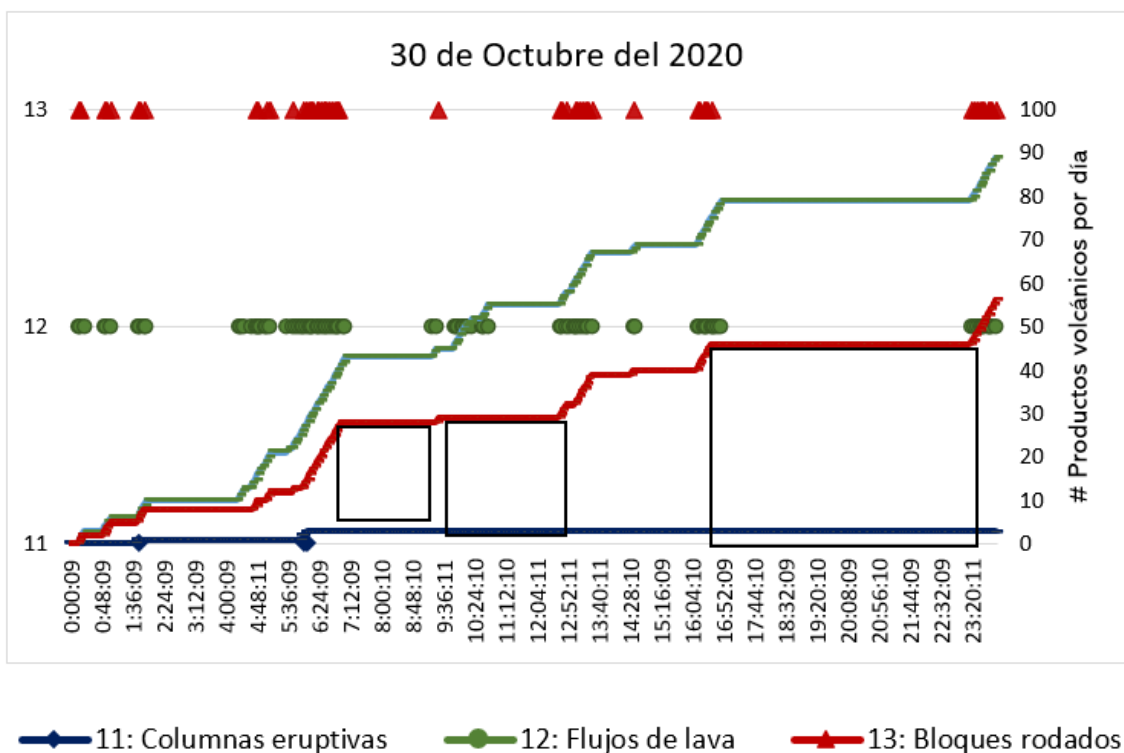


Figura 6.3 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 30 de octubre del 2020. Las pendientes altas tanto de los flujos de lava y de bloques rodados son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja, casi horizontal refleja la ausencia de columnas eruptivas. Los cuadros negros indican ventanas de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos. Se puede apreciar una relación de la línea de los bloques rodados con la de los flujos de lava.

Figura 6.4A

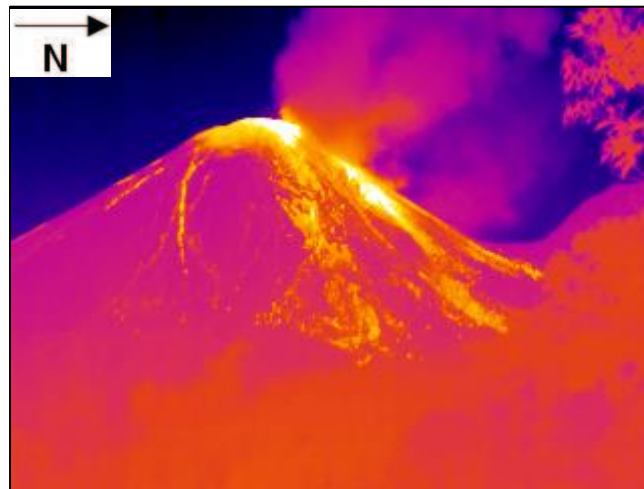


Figura 6.4B

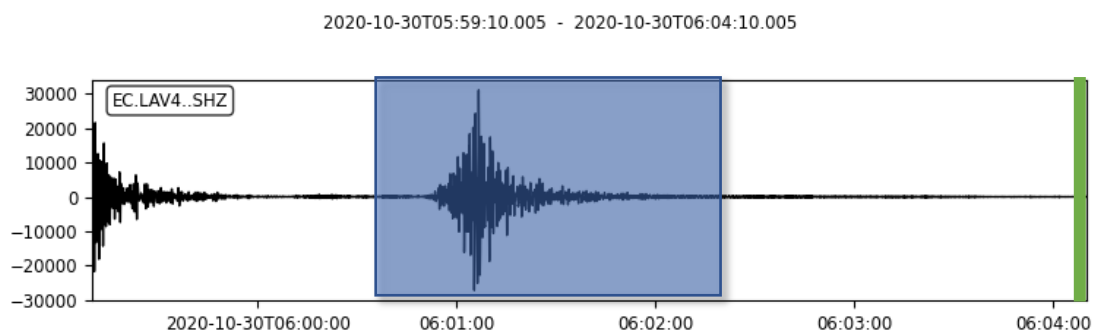


Figura 6.4 Representación de una imagen térmica de las secuelas de una explosión y clara señal sísmica asociada del evento ocurrido 06:04:10 (UTC) del día 30 de octubre del 2020. 6.4A) Imagen térmica del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste con probable penacho remanente de ceniza y/o gas flotando hacia el noreste. 6.4B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos anteriores a la captura de la imagen térmica de 6.4A. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.4A. La línea verde indica la hora en la que se tomó la imagen.

Por otro lado, un claro ejemplo del comportamiento de las columnas eruptivas a través del tiempo es el caso del día 4 de noviembre del 2020 (ver Figura 6.5). La figura representa el ploteo de los productos volcánicos identificados en las imágenes de esta fecha que corresponde a columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados. Adicionalmente se muestran las líneas de tendencia acumuladas de éstos. Si bien la figura muestra una mayor actividad explosiva

que en los otros dos ejemplos anteriores, pero también el registro de flujos de lava y de bloques tiende a incrementar, mostrando una ligera correlación entre tres eventos producidos por lo que se puede estimar que a partir de las 00:00:11 (UTC) inició dicha tendencia hasta las 12:34:09 (UTC) hora en que culminó la mayor parte eruptiva de ese día. Los eventos sísmicos reflejan como fue la evolución de la actividad sísmica después de la generación de una columna eruptiva pasando de un periodo activo del volcán por medio de la emisión de gases, con presencia de bloques rodados que se deslizan por los flancos del volcán hasta el punto de una relativa calma, con amplitudes relativamente altas cuyo máximo valor fue registrado a las 11:28:09 (UTC) con una duración de aproximadamente un minuto (ver figura 6.6A y B). Las pendientes para este caso muestran que existen una acumulación de eventos lo que podría ser un indicador de una actividad predominantemente explosiva.

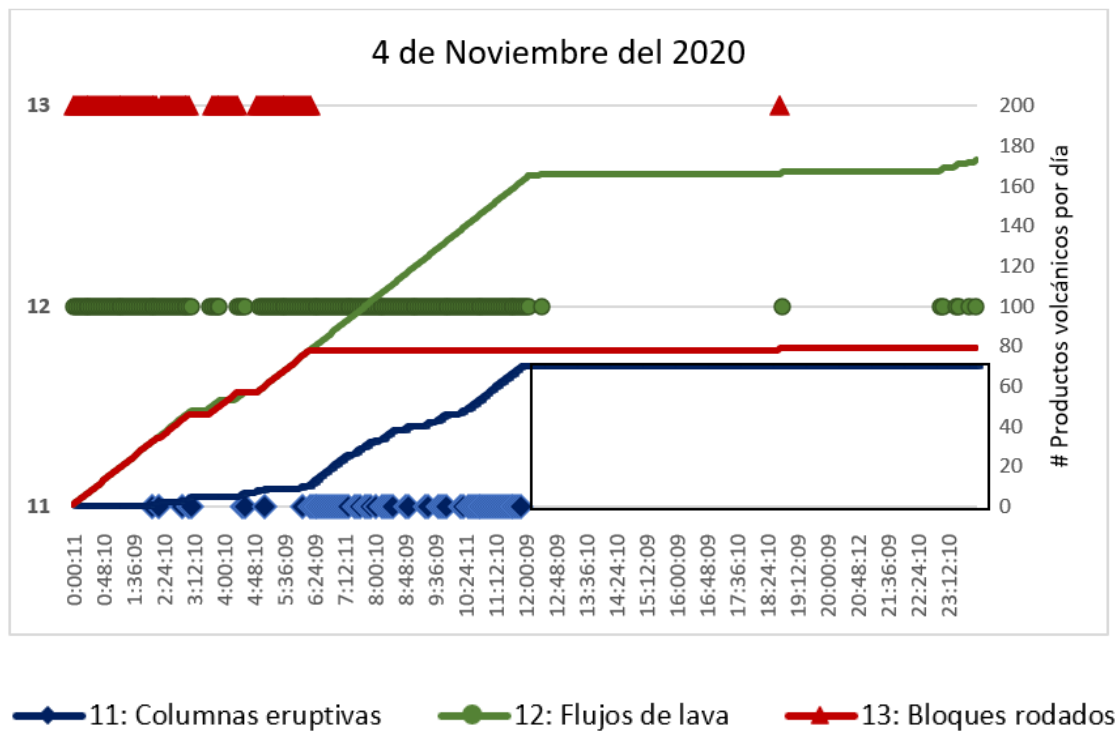


Figura 6.5 Representación de los diferentes productos volcánicos del día 4 de noviembre del 2020. Las pendientes altas son el resultado de la acumulación de eventos registrados durante este periodo mientras que la pendiente baja, casi horizontal refleja la ausencia de dichos eventos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos. Se puede apreciar una ligera correlación de la línea de acumulación los bloques rodados, columnas eruptivas y la de los flujos de lava.

Figura 6.6A

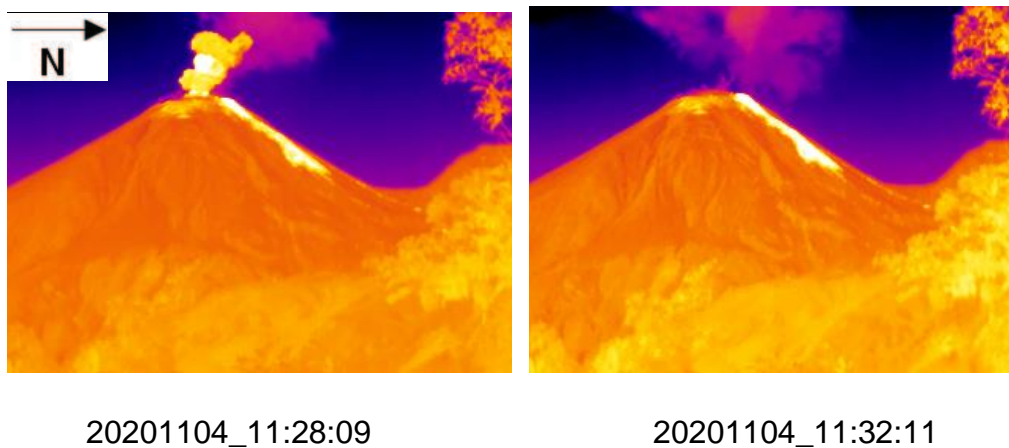


Figura 6.6B

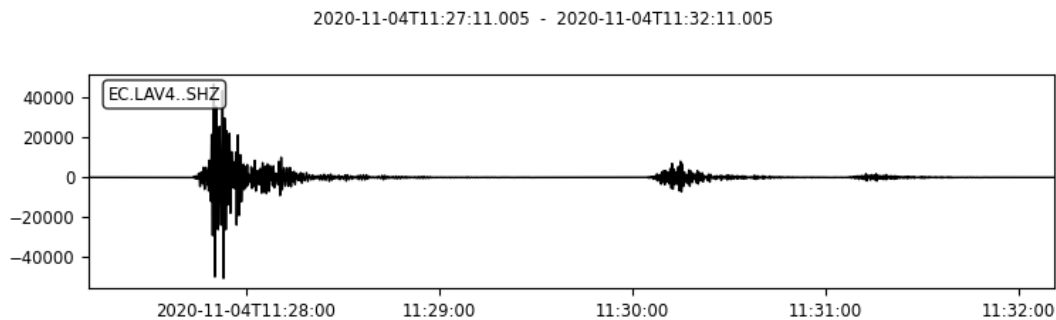


Figura 6.6 Representación de una imagen térmica de las secuelas de una explosión y clara señal sísmica asociada del evento ocurrido a las 11:28:09 (UTC) del día 4 de noviembre del 2020. Transmitidas cada 4 minutos 6.6A) Imágenes térmicas del volcán El Reventador con poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste que inicia con una explosión y posteriormente un remanente de ceniza y/o gas flotando hacia el noreste. 6.6B) Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 5 minutos posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.6A. La señal indica la probable manifestación sísmica una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.6A.

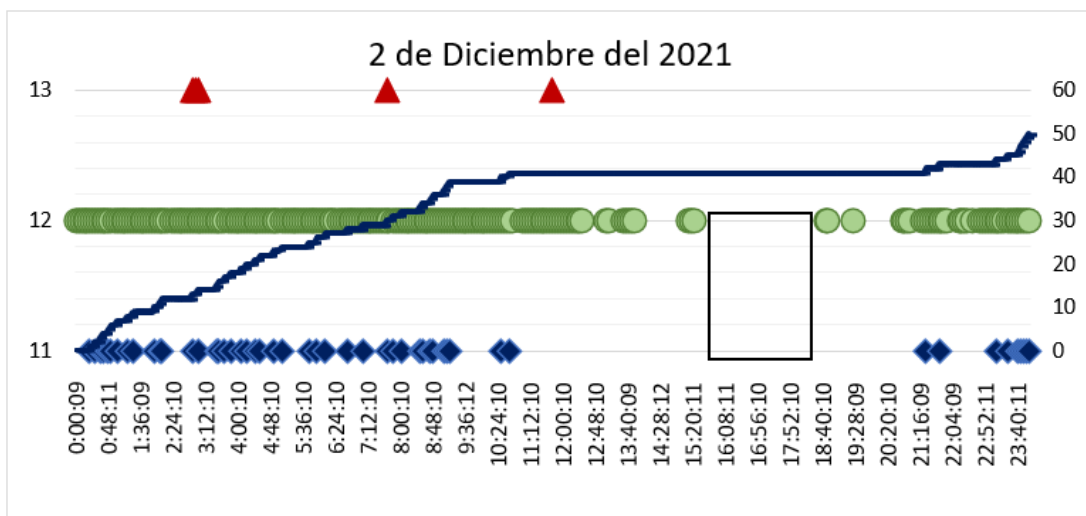
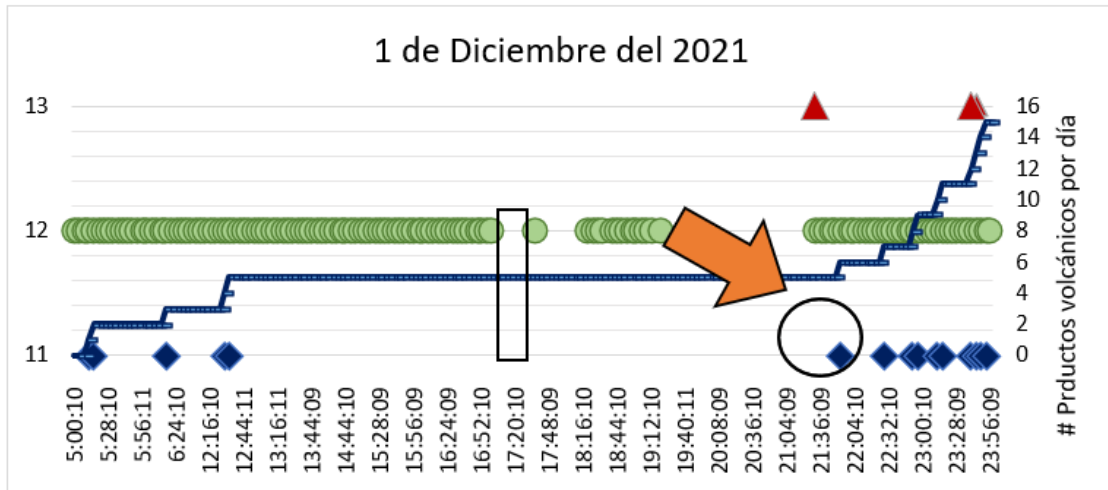
6.3.2 Periodo 01 al 08 de diciembre 2021

En base a la data obtenida del 1-8 de diciembre del 2021 (ver Anexo III), se puede apreciar que existe una tendencia alcista de los flujos de lava presentes y no tanto de los bloques rodados ni las columnas eruptivas, esto se debe principalmente al hecho de que a pesar de que no son visibles mediante cámaras tradiciones si toma relevancia el uso de cámaras térmicas y esto hace posible registrarlos gracias a su incandescencia que puede durar varios minutos o incluso horas, arrojando resultados que pueden ser considerados tantos

positivos como negativos. Resultados positivos porque se pueden apreciar estos productos desde lejos permitiendo identificarlos claramente y factores negativos porque no se registra únicamente el flujo de lava en el preciso momento. Como los flujos de lava mantienen el calor por un gran lapso de tiempo, la detección más temprana puede indicar cuando comenzó a descender el flujo de lava.

La Figura 6.7 es una representación de los productos volcánicos identificados del día 1 y 2 de diciembre del 2021 que corresponde a columnas eruptivas, flujos de lava y bloques rodados, donde se puede destacar que existen puntos de cambio de pendiente o puntos de inflexión lo que sugieren ventanas de tiempo en las cuales no es posible identificar productos volcánicos por la ausencia de los mismos o por malas condiciones climáticas que impiden su observación. Estas ventanas dan como resultado una tendencia completamente horizontal cuya pendiente es 0. Las pendientes son indicadores de si la actividad es predominante o no dentro del volcán por lo que para este caso es un indicador de la presencia de dichos productos volcánicos. En cuanto se refiere a las columnas eruptivas y a bloques rodados, muestran una relación completamente distinta a lo que se ha visto en los flujos de lava. Entre los días 3-8 de diciembre del 2021 (ver Anexo III), al no existir una gran cantidad de columnas eruptivas ni bloques rodados se muestra una pendiente baja, constante y sin muchos puntos de inflexión. Sin embargo, la noche del 01 y la madrugada del 02 de diciembre es un periodo bastante interesante ya que se puede apreciar de mejor manera el incremento de dichos eventos con una pendiente fuera de lo común lo que sugiere que posiblemente existió alguna actividad eruptiva importante la cual se puede interpretar de dos diferentes formas:

La primera opción sugiere que el primer evento que generó toda esta cadena de columnas eruptivas que se puede apreciar mediante la cámara térmica fue registrado a las 21:52:10 (UTC) (ver figura 6.8A), sin embargo correlacionando con la sísmica se puede observar que es un evento que no muestra alguna relación con respecto a eventos futuros sino más bien se trata de un evento aislado y esto se debe a una amplitud relativamente baja con una duración de 1 min y una amplitud máxima de 2150 unidades (ver figura 6.8B).



◆ 11: Columnas eruptivas
 ● 12: Flujos de lava
 ▲ 13: Bloques rodados

Figura 6.7 Representación de las columnas eruptivas, bloques rodados y flujos de lava del día 1 y 2 de diciembre del 2021. En esta figura se puede resaltar como ha ido incrementando la cantidad de columnas eruptivas desde el día 1 de diciembre hasta el 2 de diciembre del 2021. Se tomó como punto de origen de esta cadena de columnas eruptivas al primer punto señalado por la flecha y registrado a las 21:52:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021. Las líneas de tendencia son el resultado de la acumulación de productos volcánicos registrados durante este periodo. Una pendiente baja, casi horizontal, demuestra la ausencia de dichos productos mientras que las pendientes altas reflejas una acumulación importante de eventos. Los cuadros negros indican ventanas de tiempo en donde no se registraron los productos volcánicos.

Figura 6.8A

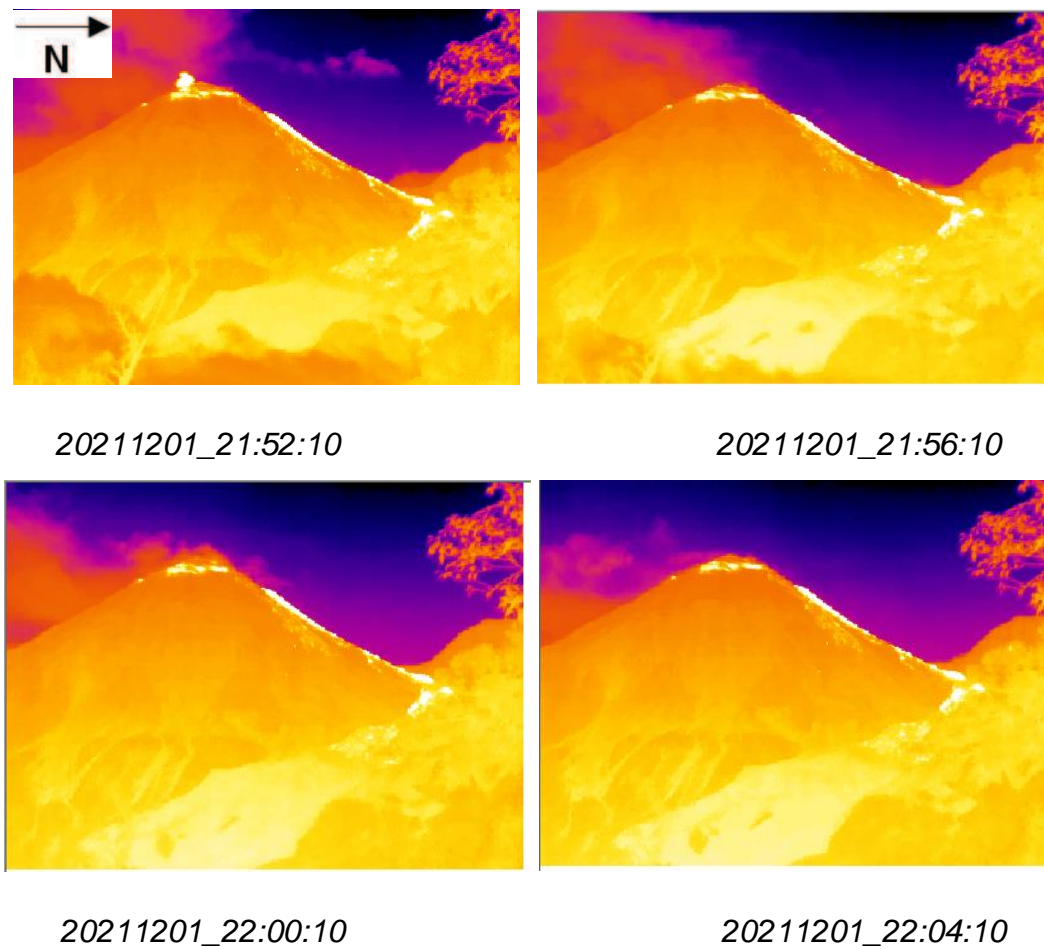


Figura 6.8B

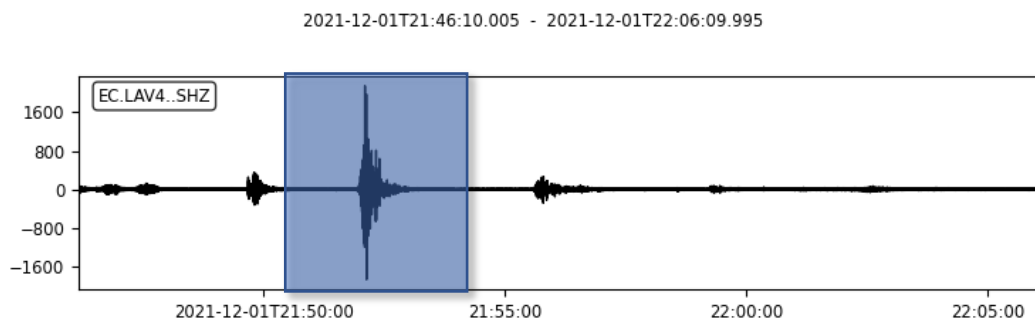


Figura 6.8A Representación de imágenes térmicas del volcán El Reventador posteriores al evento ocurrido a las 21:52:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021 transmitidas cada 4 minutos. El volcán presenta poca nubosidad y evidencia de material caliente evacuado en el flanco noreste que inició con una pequeña explosión en su cumbre. 6.8B. Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 durante los 13 minutos posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.8A. La región sombreada en azul indica la probable manifestación sísmica de una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.8A.

La segunda opción, sugiere que el primer evento de origen de las columnas eruptivas que concuerda más con la sísmica y muestra un cierto patrón es el evento ocurrido a las 22:16:10 (UTC) (ver figura 6.9) con una duración de 4.5 min y una amplitud máxima de 9000 unidades (ver figura 6.10A y B), y comparando con los eventos posteriores y la sísmica aun muestra que el volcán se encuentra más activo a partir de este lapso de tiempo. Por tanto, la segunda opción es la más aceptada porque si bien se considera que en la gráfica de la sísmica del caso anterior se logra observar una pequeña presencia de eventos sísmicos estos no muestran ser representativos ya que son muy pequeños presentando una amplitud máxima de hasta 250 unidades, lo que los hace eventos imperceptibles a la cámara térmica y estos eventos muy pequeños se presentan en los posteriores tomando desde las 21:52:10 (UTC) que se registra el primer evento con respecto al tiempo de llegada del segundo evento sísmico captado por la cámara térmica ocurrido a las 22:16:10 (UTC).

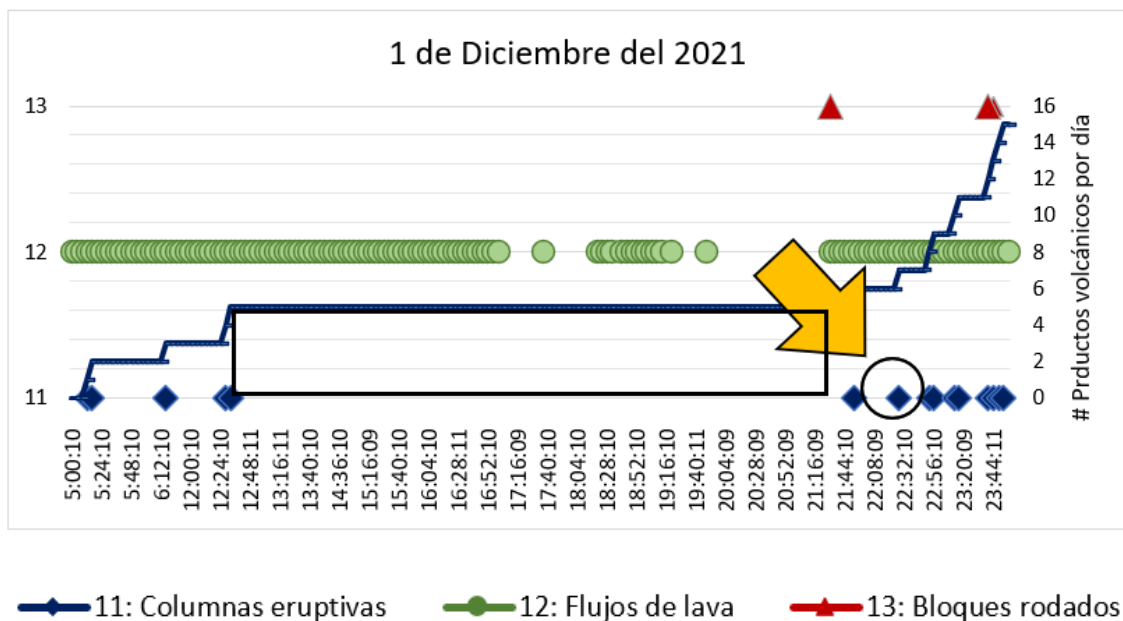


Figura 6.9 Representación de las columnas eruptivas, bloques rodados y flujos de lava del día 1 de diciembre del 2021. En esta figura se puede resaltar como ha ido incrementando la cantidad de columnas eruptivas tomando como punto de origen de esta cadena de columnas eruptivas al punto señalado por la flecha y registrado a las 22:16:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021. Las líneas de tendencia son el resultado de la acumulación de productos volcánicos registrados durante este periodo. Una pendiente baja, casi horizontal, demuestra la ausencia de dichos productos mientras que las pendientes altas reflejan una acumulación importante de eventos. El cuadro negro indica una ventana de tiempo en donde no se registraron las columnas eruptivas.

Figura 6.10A

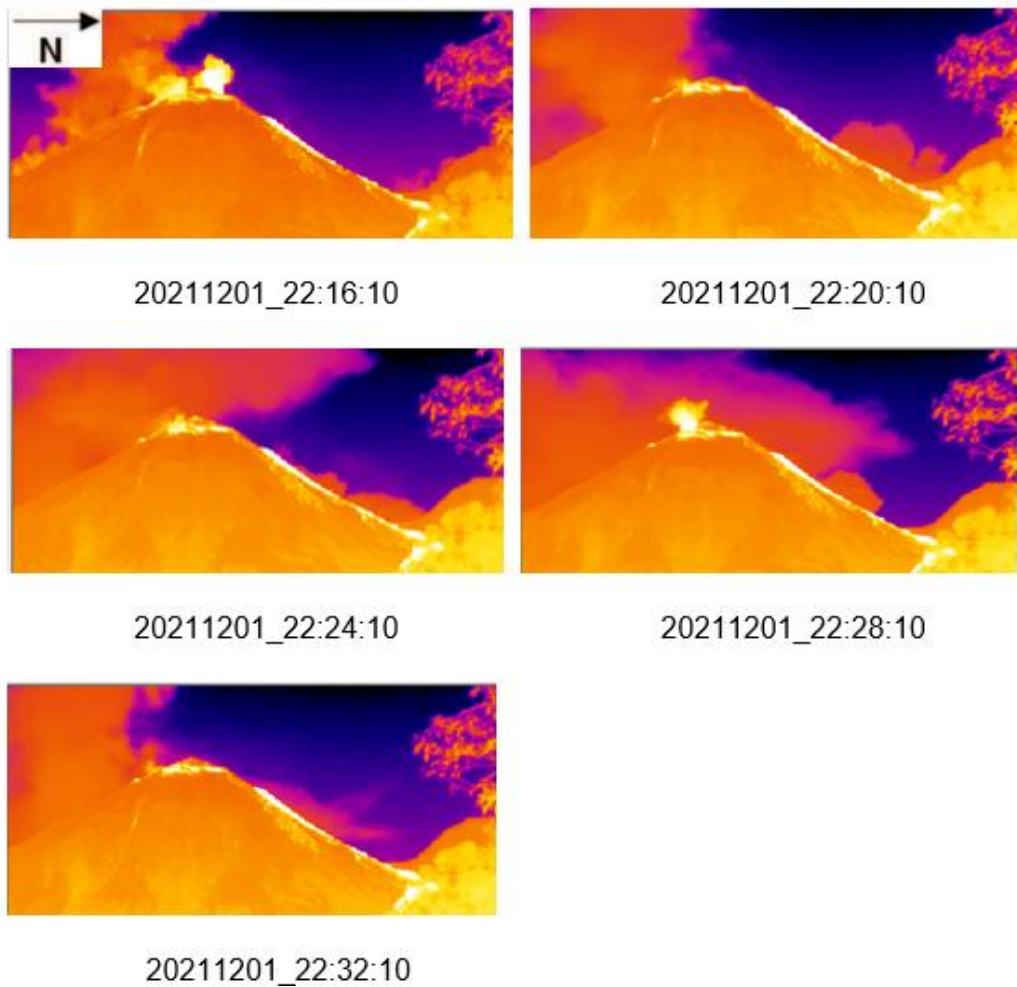


Figura 6.10B

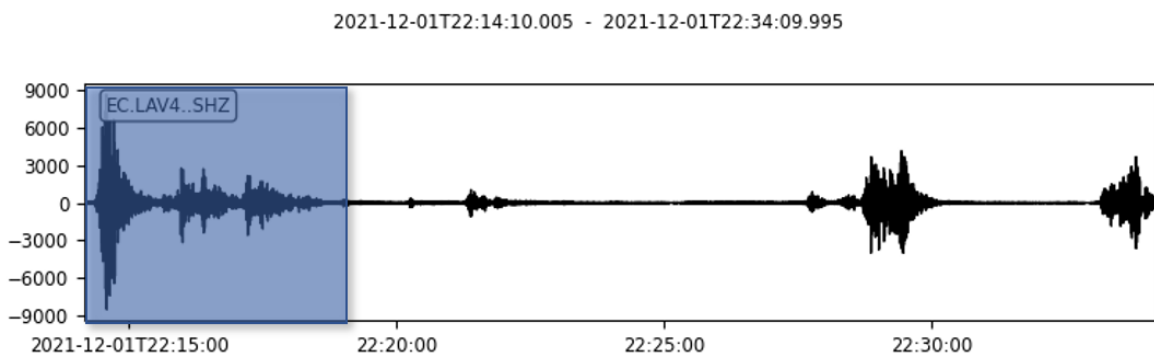


Figura 6.10A Representación de imágenes térmicas a través del tiempo del volcán El Reventador posteriores al evento ocurrido a las 22:16:10 (UTC) del día 1 de diciembre del 2021 transmitidas cada 4 minutos. El evento inicia con una explosión seguida de una alternancia de emisiones de columnas de gases y/o cenizas con explosiones de menor intensidad hasta una relativa calma. También se puede evidenciar material caliente evacuado en el flanco noreste. 6.10B. Registro sísmico de la estación sísmica LAV4 posteriores a la captura de la imagen térmica de 6.10A. La región sombreada en azul indica el inicio de la probable manifestación sísmica de una explosión, cuyas secuelas son visibles en la figura 6.10A.

CAPITULO 7

7.1 Conclusiones

- El periodo de 1-8 de diciembre del 2021 se caracteriza por presentar una etapa efusiva con una mayor presencia de eventos registrados correspondientes a flujos de lava, poca presencia de eventos de columnas eruptivas y bloques rodados. Además, dentro de esta etapa se destaca la presencia del inicio de una explosión registrada tanto por las cámaras visuales-térmicas y correlacionadas con la sísmica dentro de la noche y madrugada del 1 al 2 de diciembre del 2021 que en base a la interpretación de sus gráficas y al comportamiento de los productos volcánicos que aparecen en dicho periodo se establece que a las 22:16 (UTC) es el inicio de la cadena de eventos eruptivos. La pendiente de las columnas eruptivas como se mostró en las gráficas son indicadores de que la actividad vista es predominantemente explosiva dentro de ese lapso de tiempo.
- El periodo de 28 de octubre al 10 de noviembre del 2020 se caracteriza por ser un periodo con una etapa efusiva siendo el 4 de noviembre uno de los días con mayor actividad. Se puede destacar que los principales productos volcánicos observados en superficie son flujos de lava, columnas eruptivas y bloques rodados. Los bloques rodados han sido bastante comunes en este lapso de tiempo lo cual que se concluye que es producto de un evento eruptivo importante que se registra desde el 28 de octubre del 2020.
- La caída de rocas que se observan en superficie no son del todo registradas. Únicamente se registran los productos que presentan incandescencia y las que son vistas en la noche puesto que en el día empleando técnicas de monitoreo visuales no son registradas.
- Si bien las ondas sísmicas registradas son producidas por la actividad de las columnas eruptivas, caída de bloques rodados, lahares y corrientes de densidad piroclástica, dichos productos volcánicos no muestran una sísmica bien definida para poder ser diferenciadas por separado.

- Se determinó que las columnas eruptivas son más energéticas en el primer periodo de estudio: 28 de octubre -10 de noviembre del 2020 alcanzando amplitudes de hasta 45000 unidades. También se observa una mayor cantidad de columnas eruptivas.
- Se determinó que existe una mayor asociación de los bloques rodados con las columnas eruptivas en el periodo 1-8 de diciembre del 2021 y esto se corrobora ya que las amplitudes son bastante similares entre las 1500-1300 unidades, y esto se observa en especial entre el 1-2 de diciembre del 2021.
- Se determinó que las señales sísmicas más representativas al volcán El Reventador son los eventos explosivos que identificaron por presentar ondas de llegada bien definidas, mostrar amplitudes bastante altas alcanzando picos hasta las 35000-40000 unidades con una duración de dichos eventos de 1-2 minutos. Y por otro lado están los tremores volcánicos que se asociaron a eventos de baja amplitud (menores de 1500 unidades) con una duración entre los 1-5 minutos.

7.2 Recomendaciones

- Para poder realizar una correlación más efectiva de los productos volcánicos es necesario que se trabaje con el uso de las imágenes visuales/infrarrojas, la sísmica y adicionalmente un sistema de monitoreo de infrasonido que permita registrar las caídas de rocas en el volcán ya que son eventos que se desprenden de forma inmediata por lo que no es posible registrarlos tan solo con las cámaras de vigilancia tradicionales.
- Es recomendable trabajar con datos de diferentes estaciones sísmicas y cámaras de monitoreo ubicadas en diferentes ángulos hacia el volcán con el fin de abarcar la mayor cantidad de datos englobando de mejor manera los resultados obtenidos.
- Se sugiere utilizar cámaras de monitoreo con una transmisión continua para identificar el momento exacto de la generación de productos volcánicos en superficie.

7.3 Referencias

- Almeida, M., Gaunt, E., Ramon, P. (2019). *Ecuador's El Reventador Volcano Continually Remakes Itself*. Eos Transactions American Geophysical Union, 100. <https://doi.org/10.1029/2019EO117105>.
- Almeida, S. S. (2017). *Definición, Lahares Primarios Y Secundarios, Tipos De Flujo, Comportamiento, Afectación Y Monitoreo De La Amenaza*. Quito.Ecuador: Instituto Geofisico.Escuela Politécnica Nacional.
- Arnold, D. W. D., Biggs, J., Anderson, K., Vargas, S. V., Wadge, G., Ebmeier, S. K., Naranjo, M. F., Mothes, P. (2017). *Decaying Lava Extrusion Rate at El Reventador Volcano, Ecuador, Measured Using High-Resolution Satellite Radar*. Journal of Geophysical Research.
- Arnold, D.W.D., Biggs, J., Dietterich, H.R., Vallejo Vargas, S., Wadge, G., Mothes, P. (2019). *Lava flow morphology at an erupting andesitic stratovolcano:A satellite perspective on El Reventador, Ecuador*. Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- Aspden, J.A., and Litherland, M. (1992). *The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador, in Oliver, R.A., et al., eds., Andean Geodynamics: Tectonophysics*, v. 205, p. 187–204.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Bernal C., Christophoul, F., Davila, C., Galarraga, M., Marocco, R., Valdez, A., Vega, J., Barragán, R.(1998). *Structural style and timing of hydrocarbon entrapments in the Ecuadorian Oriente Basin*. American association of Petroleum geologist, Annual Meeting, Rio de Janeiro, Brazil, Abstracts: 464-465.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F., Barragán, R., (1999). *Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador*. Extended Abstract, ISAG99, Gottingen, 1: 68-72.
- Balkwill, H., Rodríguez, G., Paredes, F., Almeida, J. (1995). *Northern part of Oriente basin, Ecuador: reflection seismic expression of structures*. In: A. J. Tankard, R. Suarez S., and H. J. Welsink, *Petroleum basins of South america: AAPG Memoir 62*: 559-571.

- Barragán, R., Geist, D., 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.
- Barragán, R., Baby, P. (2004). *Evolución magmática actual de la zona subandina: volcanes El Reventador y Sumaco, modelos geodinámicos preliminares*, Institut français d'études andines, pag 183-201.
- Bhartia, PK., Levelt, PF., Tamminen, J., Torres, O. (2022). *Recent results from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on EOS Aura*. KNMI (The Royal Netherlands Meteorological Institute).
- Caballero, V. (2019). *Sistema de reconocimiento automático de señales sísmicas*. Mexico: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Carracedo, J., Pérez, F. (2015). *Peligros asociados a las coladas de lava*. LasPalmas de Gran Canaria: Dpto. de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017.
- Cas, Wright, J.V. (1988). *Volcanic Successions Modern and Ancient*. London SE 8HN, UK: Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row.
- Chirif, L. (2010). *Microscopía Óptica de Minerales*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Boletín No. 1, Serie J, Lima, Perú, 1-118.
- Christophoul, F., Baby, P., Davila, C. (1999). *Discrimination of eustatic and tectonic influences in the Ecuadorian Oriente Basin from Aptian to Oligocene times*, 4th International Symposium on andean Geodynamics (ISAG'99), Univ. Göttingen (Germany), Extended Abstracts Volume: 168-171.
- Colony, R., Sinclair, J. (1928). *The lavas of the volcano Sumaco, eastern Ecuador*. *am.J. Sci.*, 216: 299-312.
- Dehn, J., Dean, K.G., Engle, K., Izbekov, P. (2002). *Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano*. *Bulletin of Volcanology* 64, 525–534.

- Delpit, S., Le Penneç, L., Samaniego, P., Hidalgo, S., Robin, C. (2008). *Dynamics of the November 3, 2002 eruption of El Reventador volcano, Ecuador: Insights from the morphology of ash particles*. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts: 180-183.
- Estrella, M. (2021). *Caracterización Geoquímica Y Petrográfica De Los Productos Eruptivos del Volcán El Reventador: Periodo 2002-2018*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Ferrazzini, V., Aki, K., Chouet, B. (1991). *Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. doi:10.1029/90jb02781.
- Flores, J. (2019). *Evolución De La Actividad Sísmico-Acústica Del Volcán Reventador Durante Los Años 2015 –2017*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Flynn, L., Wright, R., Garbeil, H., Harris, A., Pilger, E. (2002). *A Global Thermal Alert System using MODIS: Inicial Results from 2000-2001*. Advances in Environment Monitoring and Modelling, 37-69.
- Gonzales, K. (2009). *Monitoreo INSAR de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani - 2009*. Obtenido de Monitoreo INSAR de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani - 2009 (ingemmet.gob.pe).
- Gutscher, M.-A., J. Malavieille, S. Lallemand, and J.-Y. Collot (1999). *Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision*, Earth Planet. Sci. Lett., 168 (3), 255– 270.
- Hall, M., Beate, B. (1991). *El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador*. Estudios de Cartografía.V4, Cooperacion Editora Nacional-Colegio de Geógrafos del Ecuador.
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., LePenneç, J., Garcia, A., Samaniego, P., Yepes, H. (2004). *Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador*. Revista Geológica de Chile, Vol. 31, No. 2, p. 349-.

- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. B. (2008). *Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>.
- Hidalgo, S., Gerbe, M. C., Martin, H., Samaniego, P., & Bourdon, E. (2012). *Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr–Nd–O isotopes*. *Lithos*, 132–133, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.019>.
- Ibañez, J.M. (2000). *Sismicidad Volcánica*. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.
- Ibañez, J.M., Carmona, E. (2000). *Sismicidad Volcánica*. Granada, España : Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. Campus de Cartuja s/n. 18071.
- IG-EPN. (2014). *Detectores de Gases*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/detectores-de-gases>.
- IG-EPN. (2014). *Detectores de Lahares*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/detectores-de-lahares>.
- IG-EPN. (2015). *Red de cenizómetros del volcán Cotopaxi*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1183-red-de-cenizometros-del-volcan-cotopaxi>.
- IG-EPN. (2017). *Informe Especial Reventador N. 2 - 2017*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1492-informe-especial-reventador-n-2-2017>.
- IG-EPN. (2018). *Informe especial del volcán Reventador-2017- N°4. Continúa la erupción, alternancia de actividad efusiva y explosiva*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e2017/19069-informe-especial-reventador-n-4-2017>.
- IG-EPN. (2019). *Reventador*. Obtenido de www.igepn.edu.ec/reventador.

- IG-EPN. (2020). *Breve Resumen De Su Historia, Geología Y Actividad Eruptiva. Peligros Potenciales Asociados*. Quito, Ecuador.
- IG-EPN. (2020). *Informe Especial del Volcán El Reventador No. 2-2020*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1831-informe-especial-del-volcan-el-reventador-n-2-2020>.
- IG-EPN. (2020). *Mapa Interactivo del Volcán El Reventador* . Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/mapas/amenaza-volcanica/mapa-volcan-reventador>.
- IG-EPN. (2022). *Informe especial volcán Wolf No. 2022-003*. Obtenido de <https://igepn.edu.ec/servicios/noticias/1931-informe-especial-volcan-wolf-no-2022-003>.
- INECEL. (1988). *Estudio Vulcanológico de El Reventador*. Quito, Ecuador: Estudio realizado por INECEL y la asociación de firmas consultoras de proyectos hidroeléctrico COCA CODO SINCLAIR.
- Instituto Geográfico Nacional de España. (2018). *Técnicas de vigilancia volcánica*. Madrid – España.
- Johnson, J. B., Lees, J. M., Yepes, H. (2006). *Volcanic eruptions, lightning, and a waterfall: Differentiating the menagerie of infrasound in the Ecuadorian jungle*. Geophysical Research Letters. <https://doi.org/10.1029/2005GL025515>.
- Lees, J. M., Johnson, J. B., Ruiz, M., Troncoso, L., & Welsh, M. (2018). *Reventador Volcano 2005: Eruptive activity inferred from seismo-acoustic observation*. Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- Litherland, M., Aspden, J., and Jemielita, R.A. (1994). *The Metamorphic Belts of Ecuador*: British Geological Survey Overseas Memoir 11, 147 p.
- Lockwood, J., Hazlett, R. (2010). *Volcanoes Global Perspectives*.
- Lozano, P., Bussmann, R., Peyre, G., Grefa, F. (2020). *Regeneración vegetal en la caldera del volcán Reventador en la cordillera subandina del norte de*

la Amazonía Ecuatoriana. Pastaza, Ecuador: Ciencias Ambientales/Environment Science.

Lyons , J., Rose, G., Chigna, G. (2009). *Patterns in open vent, strombolian behavior at Fuego Volcano, Guatemala, 2005-2007*. Bulletin of Vulcanology, 1-15.

Manso, A. (2020). *Tecnología satelital InSAR para la detección de deformaciones*. Obtenido de XXXV Congreso Nacional de Ingeniería: https://www.sci.org.co/wp-content/uploads/file/XXXVCongreso/tecnologia_insar.pdf

Martín, F. (2011). *Los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas: los VAAC*. Obtenido de <https://www.tiempo.com/ram/1755/volcn-en-islandia-en-erupcin-el-grimsvtn/>.

McGimsey, R.G., Schneider, D.J., Neal, C.A., Roach, A.L. (1999). *Use of FLIR observations during eruption response at two Alaskan volcanoes*. EOS, Transactions of the American Geophysical Union 80 (46) (Fall Meet. Suppl., Abstract V32A-07).

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). *Sistema de Clasificación del Ecuador Continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.

Monzier, M., Robin, C., Hall, M. L., Cotten, J., & Samaniego, P. (1999). *Geochemistry and tectonics at the southern termination of the northern volcanic zone (Riobamba volcanoes, Ecuador): Preliminary results*.

Naranjo, M. (2013). *Estudio petro-geoquímico y cronológico de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 y 2009*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.

Naranjo, M. F., Ebmeier, S. K., Vallejo, S., Ramón, P., Mothes, P., Biggs, J., Herrera, F. (2016). *Mapping and measuring lava volumes from 2002 to 2009 at El Reventador Volcano, Ecuador, from field measurements and satellite remote sensing*. Journal of Applied Volcanology. DOI 10.1186/s13617-016-0048-z.

- Nocquet, J-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguïña, J. M., Martinez, W., Tavera, H. (2014). *Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes*. Nature Geoscience. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>.
- Nye, C.J., Keith, T.E.C., Eichelberger, J.C., Miller, T.P., McNutt, S.R., Moran, S.C., Schneider, D.J., Dehn, J., Schaefer, J. (2002). The 1999 eruption of Shishaldin Volcano, Alaska: monitoring a distant eruption. Bulletin of Volcanology 64, 507–519. [http:// dx.doi.org/10.1007/s00445-002-0225-2](http://dx.doi.org/10.1007/s00445-002-0225-2).
- Ortiz, H. D., Matoza, R. S., Johnson, J. B., Hernandez, S., Anzieta, J. C., & Ruiz, M. C. (2021). *Autocorrelation Infrasound Interferometry*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126. <https://doi.org/10.1029/2020JB020513>.
- Pratt, W.T., Duque, P., and Ponce, M. (2005). *An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador: Tectonophysics*, v. 399, p. 251–278, doi: 10.1016/j.tecto.2004.12.025.
- Parfitt, E., Wilson, L. (2008). *Fundamentals of Physical Volcanology*. Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing company.
- Pfeiffer. (2022). VAAC. Obtenido de <https://www.volcanodiscovery.com/es/photoglossary/vaac.html>
- Pin, J. (2018). *Monitoreo Sísmico*. Obtenido de <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/monitoreo-sismico/>.
- Ramsey, M., Harris, A. (2013). *Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade?* Journal of Volcanology and Geothermal Research 249.
- Red de Sismología Nacional de Costa Rica. (2019). *¿Qué son los flujos de lava?* Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/vulcanologia/874-flujos-piroclasticos>.

- Ridolfi, F., Puerini, M., Renzulli, A., Menna, M., & Toulkeridis, T. (2008). *The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products*. *Journal of Volcanology and Geothermal*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.003>.
- Rivadeneria, M. V., Ramirez, F. H. (1985). *La zona subandina amazonica ecuatoriana y sus prospectos hidrocarburiferos, paper presented at VI Latin American Geological Congress, Int. Union of Geol. Sci., Bogotá, Colombia*.
- Romero, J. (2018). *Monitoreo volcánico*. Obtenido de <https://www.volcanochile.com/joomla30/index.php/contenidos/9-volcanologia/23-monitoreo-volcanico>
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J.-P., & Cotten, J. (2005). *Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador)*. *Journal of Petrology*, 46(11), 2225–2252. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi053>.
- 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*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004>.
- Spampinato, L. C. (2011). *Volcano surveillance using infrared cameras*. *Earth-Science Reviews*, 63-91.
- Sparks, R. S. J. (1986). *The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns*. *Bull. Volcanol.* 48, 3-15.
- Tavera, H., Antayhua, Y. (2000). *Señales sísmicas de volcanes activos: Ejemplos del volcán Sabancaya, Arequipa (Perú)*. Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología. Instituto Geofísico del Perú.

- Tibaldi, A. (2005). *Volcanism in compressional tectonic settings: Is it possible?* Milan, Italy: Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie, Università di Milano-Bicocca. doi:10.1029/2004GL021798.
- Vallance, J.W., Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. En: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, London, pp. 649-664.
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous–Paleogene)* [Ph.D. thesis]: Zürich, Switzerland, Institute of Geology, ETH Zürich, 208 p., <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=17023>.
- Vallejo Vargas, S., Kelfoun, K. (2016). *VolcFlow, an approach to simulate lava flows. Case of El Reventador volcano (Ecuador)*. Quito -Ecuador: Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional.
- Vallejo, S., Ramon, P., Naranjo, F., Kelfoun, K., Samaniego, P., Coppola, D., Diefenbach, A. (2016). *Eruptive activity of El Reventador volcano (Ecuador) between 2002 -2014*. Quito, Ecuador: Insitituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional.
- Vásconez, F., Moussallam, Y., Bani, P., Batatglia, Hidalgo, S., J., Benbakkar, M., Harris, A.J.L., Narvaez, D. (2022). *Ash and gas discharge during open vent activity at El Reventador (Ecuador): explosion-style transitions driven by conduit capping*. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01585-1>
- Vásconez, F., Moussallam, Y., Harris, A.J.L., Latchimy, T., Kelfoun, K., Bontemps, M., Macías, C., Hidalgo, S., Córdova, J., Battaglia, J., et al. (2022). *VIGIA: A Thermal and Visible Imagery System to Track Volcanic Explosions*. MDPI. . <https://doi.org/10.3390/rs14143355>.
- Wright, R. (2001). *Thermal remote sensing of active volcanoes*. U.S.A.: Hawai'i Institute of Geophysics and Planetology, Honolulu.
- Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., Pilger, E. (2004). *MODVOLC: near real time thermal monitoring of global vulcanism*. *Jornal of Vulcanology and Geothermal Research* 135, 29-49.

Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., Cotton, F. (2016). *A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment*. Ecuador Geodynamics and PSHA.

7.4 Anexos

ANEXO I Código para cortar trazas sísmicas

```
from obspy import read, UTCDateTime
import matplotlib.pyplot as plt
from obspy import read, UTCDateTime
from pandas import read_excel
#from os.path import join
import time

times_raw =
read_excel('C:/Users/santi/OneDrive/Documentos/octfecha.xlsx',header=None).
squeeze()
kstnm = 'LAV4'
kcmpnm = 'SHZ'
knetwk = 'EC'
khole = ''

datadir = 'C:/Users/santi/Desktop/DatosOct'
lengthOfTimes = len(times_raw)

for i in range(1):
    print(i)
    tic = time.perf_counter()
    firstColumn = times_raw.iloc[:,0];
    thisTime = firstColumn[i]
    yyyyStr = thisTime[0:4]
    yyyy = int(yyyyStr)
    mm = int(thisTime[4:6])
    dd = int(thisTime[6:8])
    HH = int(thisTime[9:11])
    MM = int(thisTime[11:13])
    SSS = int(thisTime[13:15])

    tStart = UTCDateTime(yyyy,mm,dd,HH,MM,SSS)+5*3600
    dayOfYearStr = str(tStart.julday)

    fullFileName = datadir+'/' +kstnm+'/' \
+knetwk+'.' +kstnm+'.' +khole+'.' +kcmpnm+'.' +'D'+ '.' +yyyyStr+'.' +dayOfYearStr

#CORTAR

#print(fullFileName)
readdataflag = True
if readdataflag:
    st = read(fullFileName)
```



```

st.merge()
st.split()
tr = st[0]

trcut = tr.copy()
t1= tStart-300
t2= tStart
trcut.trim(t1 ,t2)
trcut.detrend('linear')

if i < 10:
    outnumberStr = '000'+str(i)
elif i < 100:
    outnumberStr = '00'+str(i)
elif i < 1000:
    outnumberStr = '0'+str(i)
else:
    outnumberStr = str(i)

outfileName = 'figure_' + outnumberStr
outfileWaveforms = 'waveforms_'+thisTime
outfileNameSpectrogram = 'spectrogram_' + thisTime

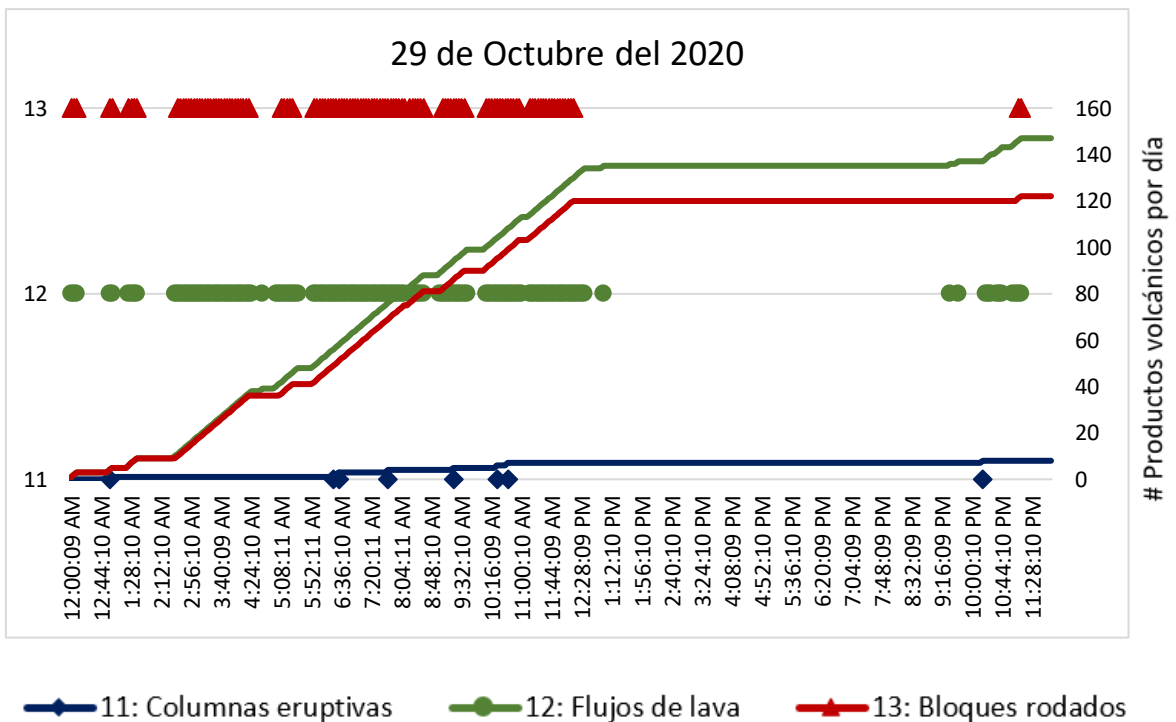
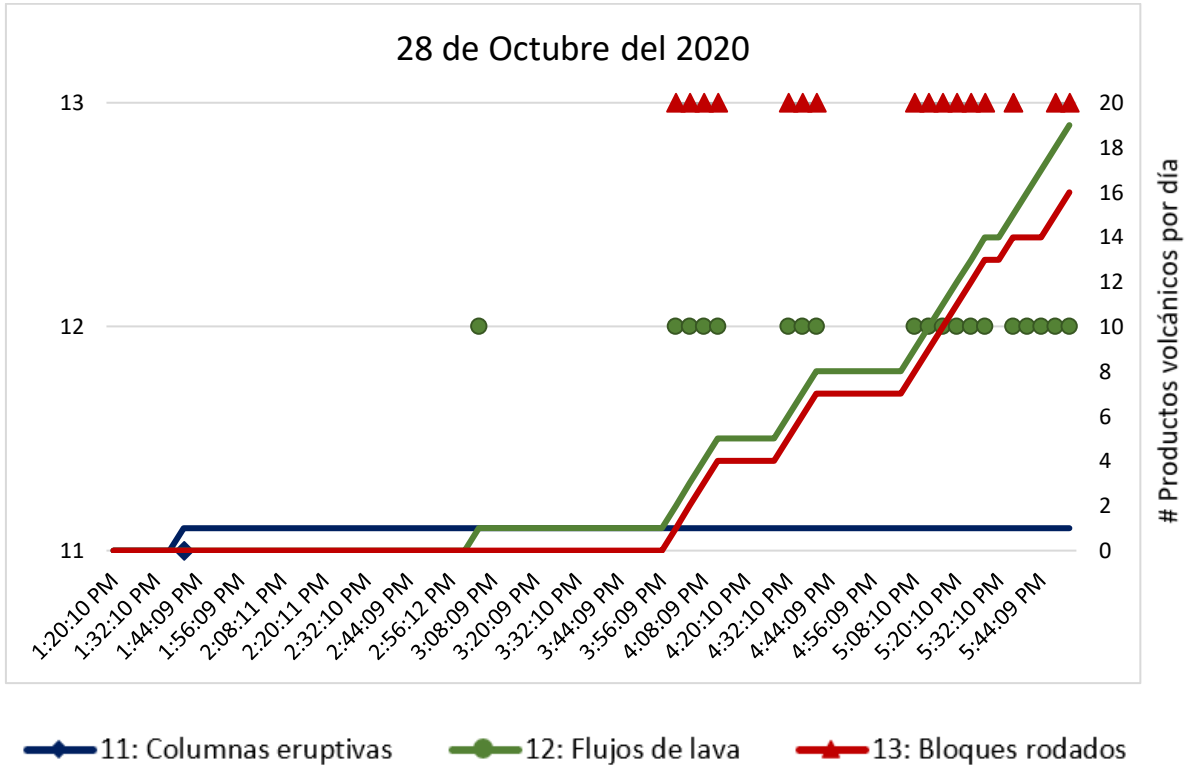
data = trcut.data

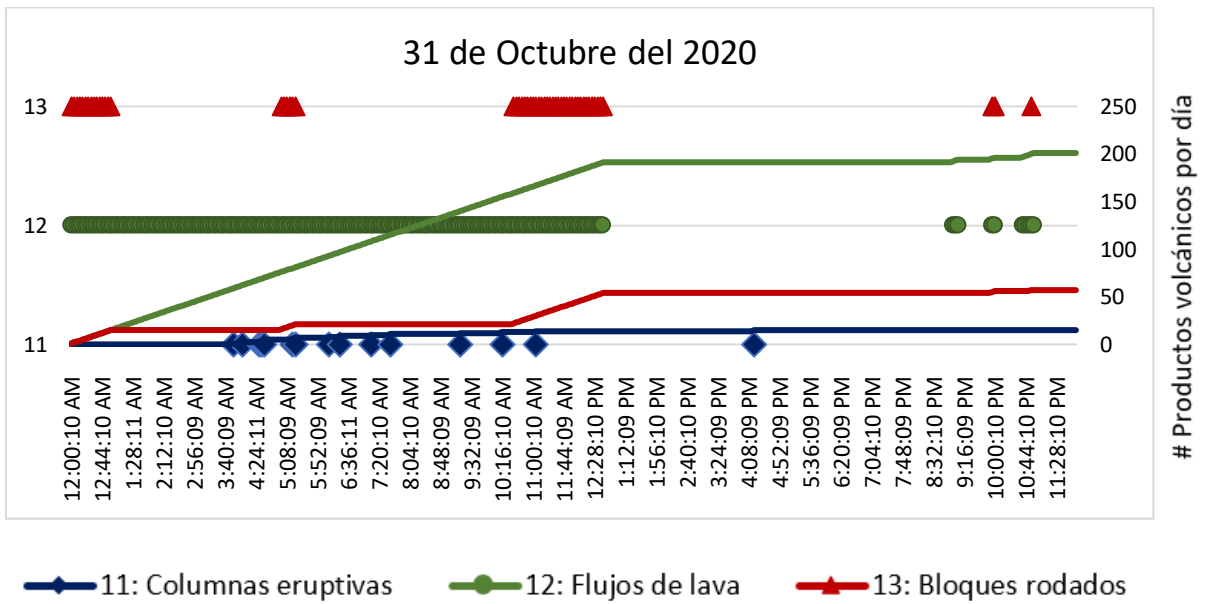
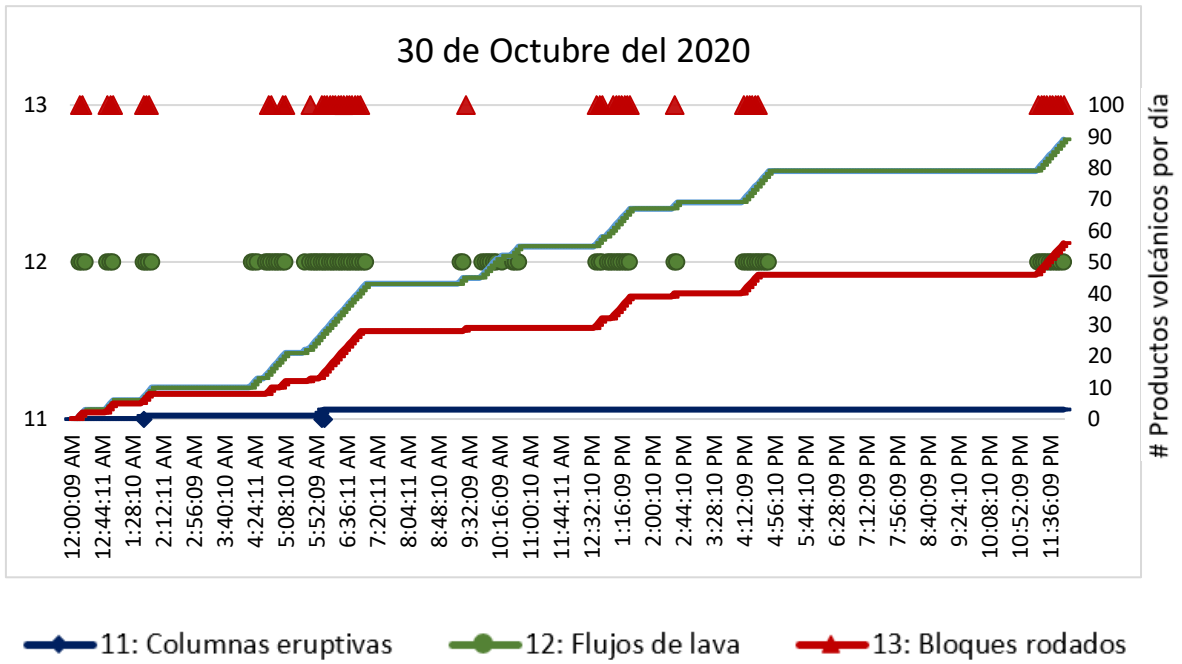
trcut.plot(outfile = outfileWaveforms,show=False)
plt.close("all")
trcut.spectrogram(log=True, title='SISMOGRAMA ' + str(trcut.stats.starttime),\
    outfile = outfileNameSpectrogram,show=False)

plt.close("all")
toc = time.perf_counter()
elapsedTime = toc - tic
print('elapsed time:'+str(elapsedTime)+' , '+str(max(data)))

```

ANEXO II Representación de los diferentes productos volcánicos entre el 28 de octubre- 10 de noviembre del 2020.

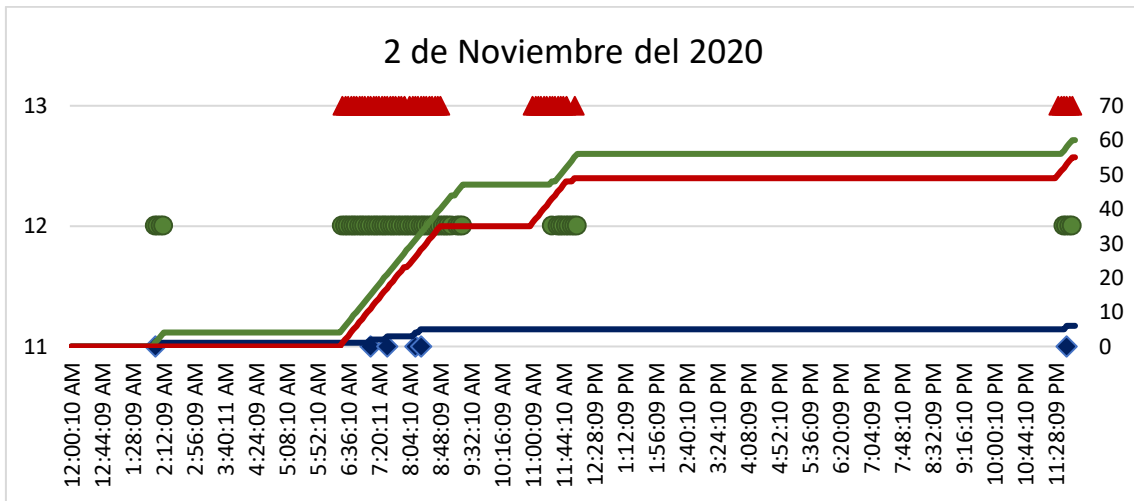






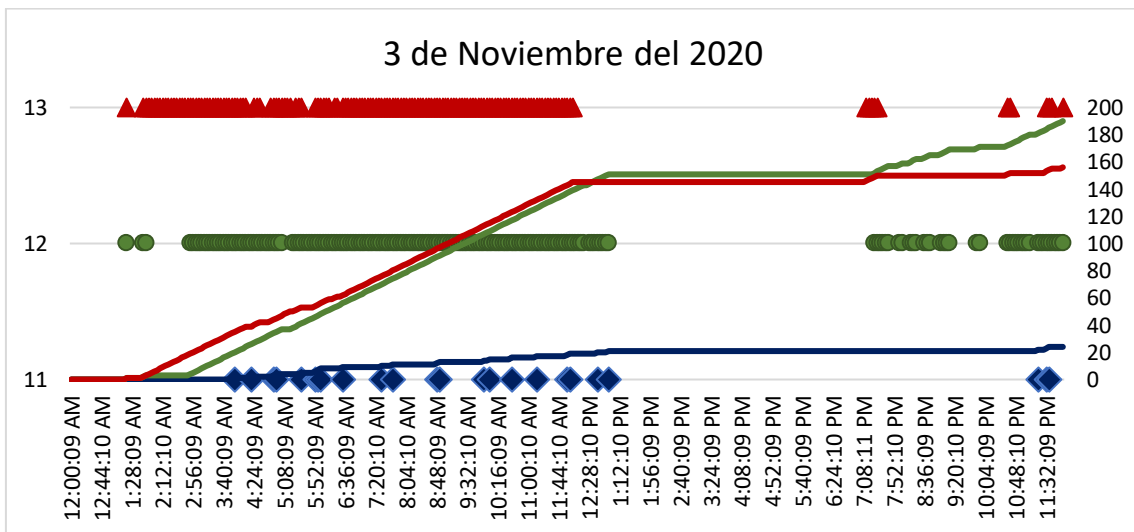
Productos volcánicos por día

◆ 11: Columnas eruptivas ● 12: Flujos de lava ▲ 13: Bloques rodados

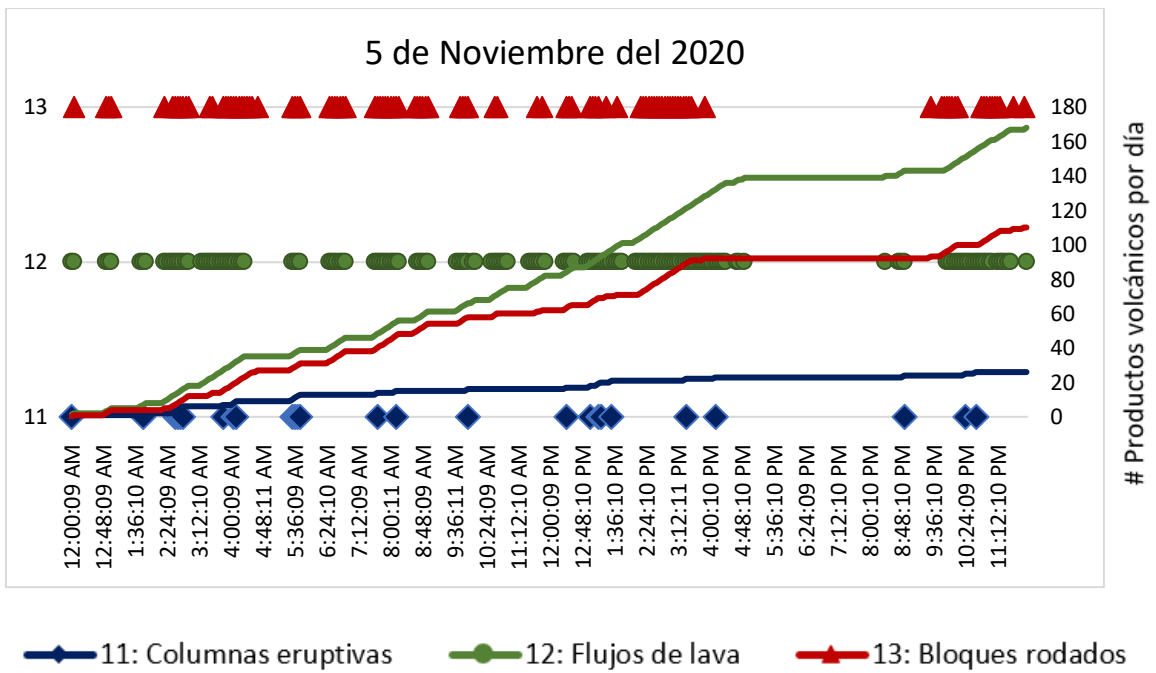
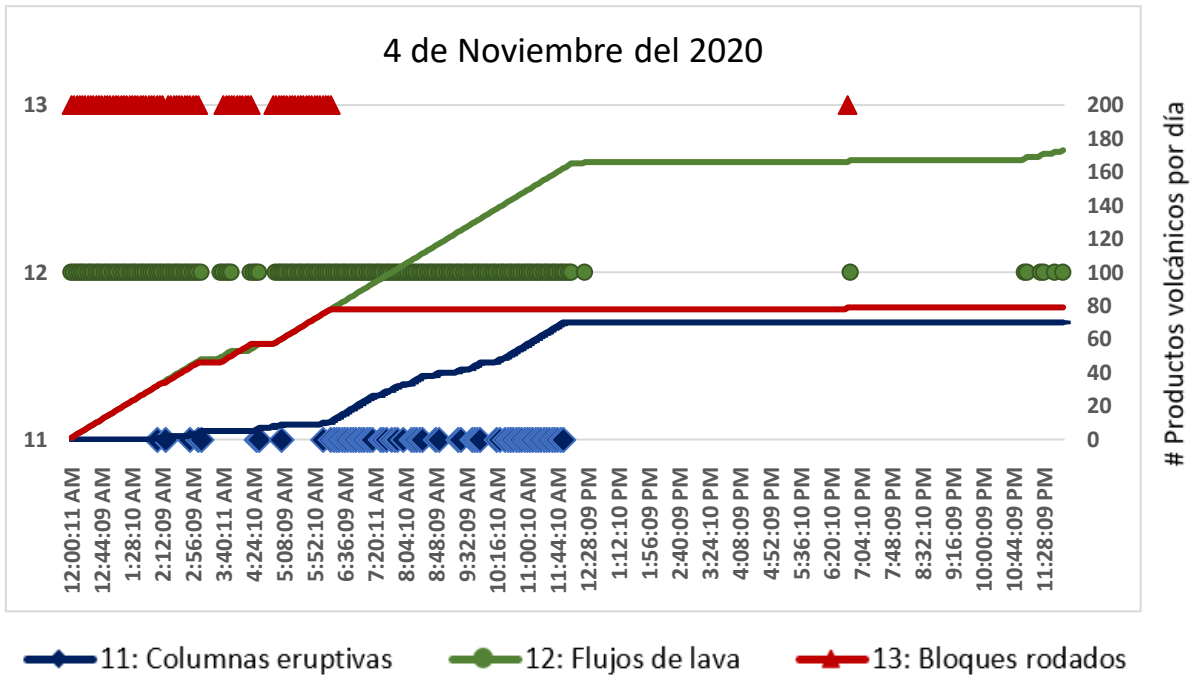


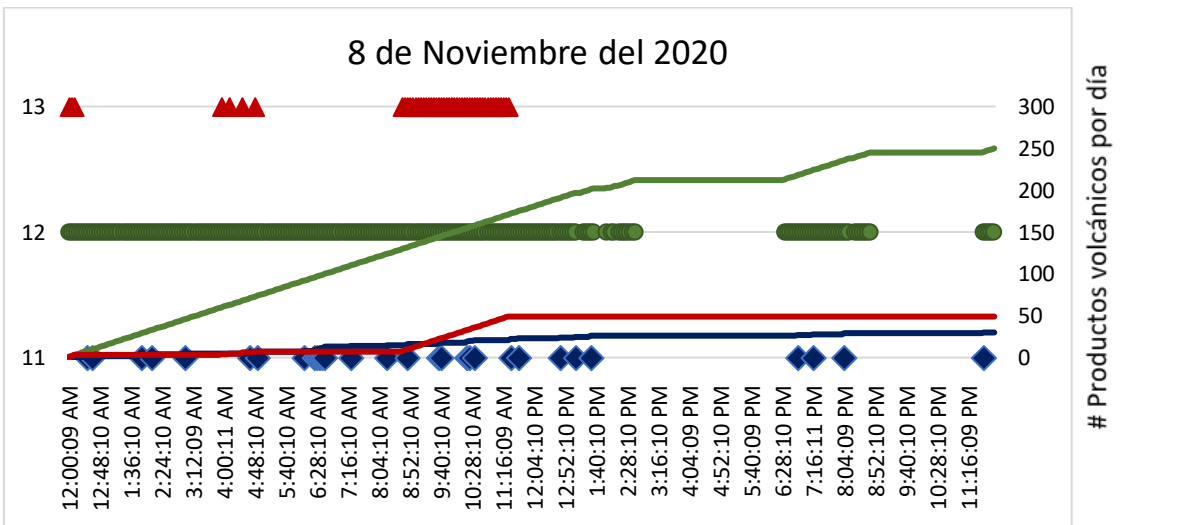
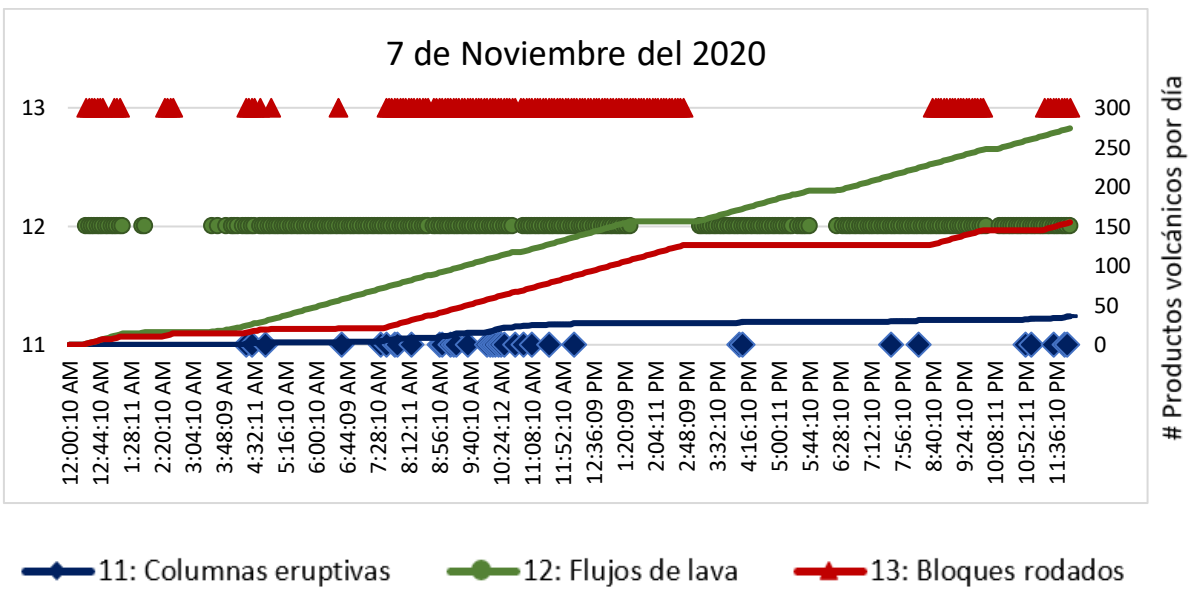
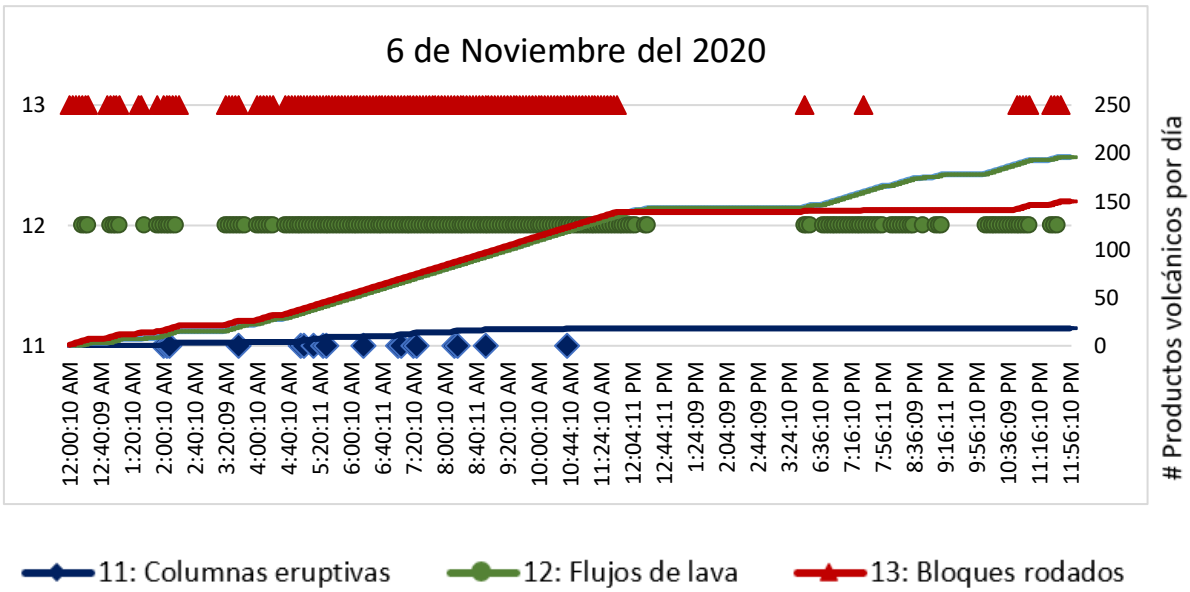
Productos volcánicos por día

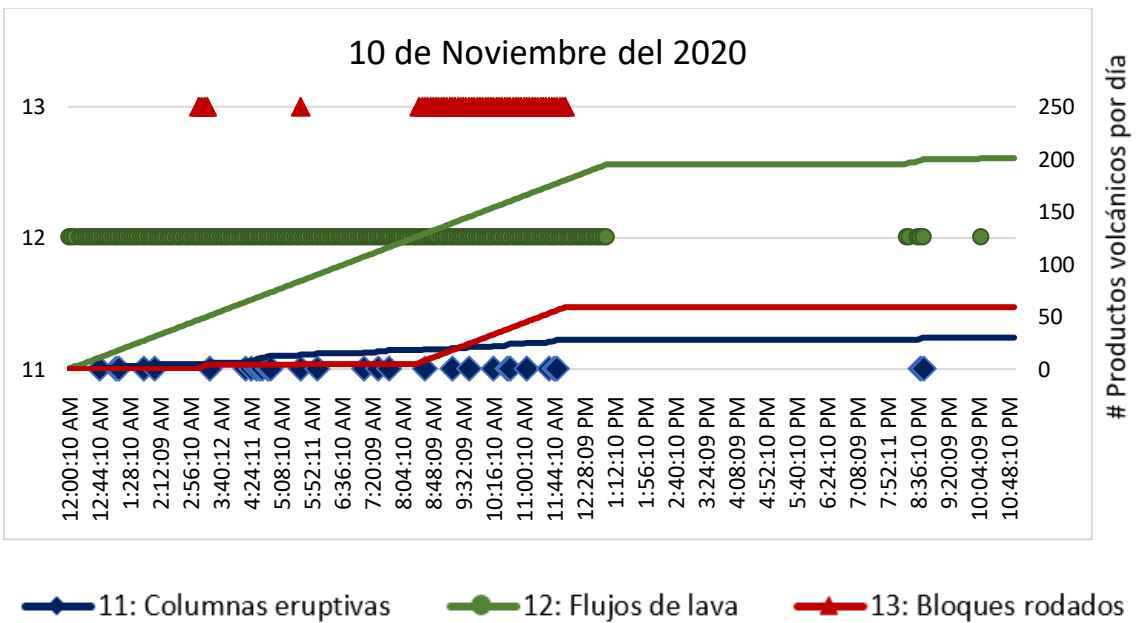
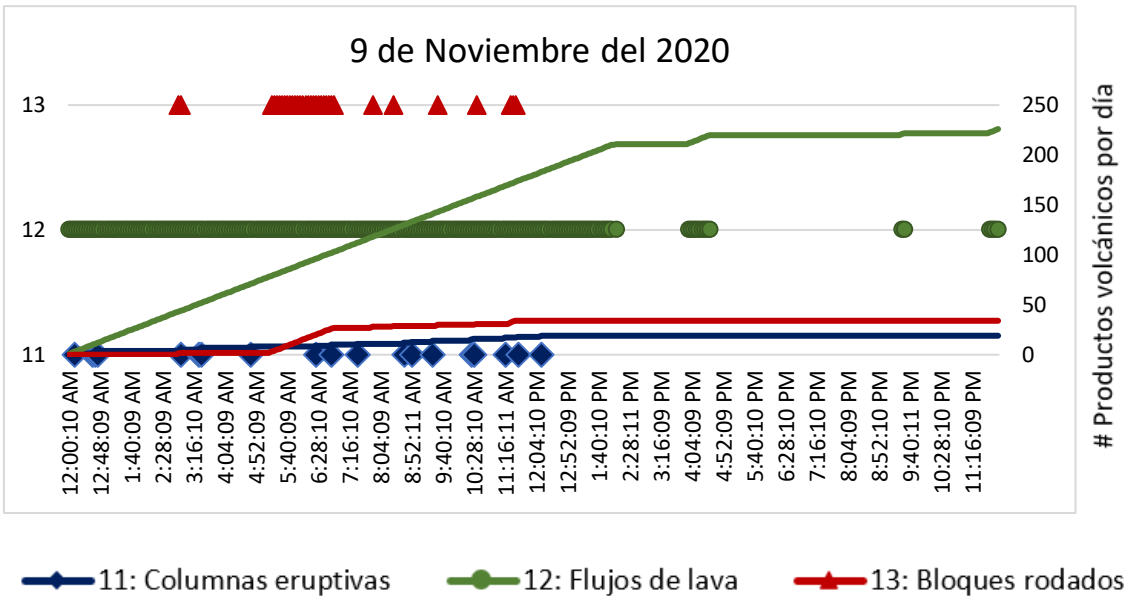
◆ 11: Columnas eruptivas ● 12: Flujos de lava ▲ 13: Bloques rodados



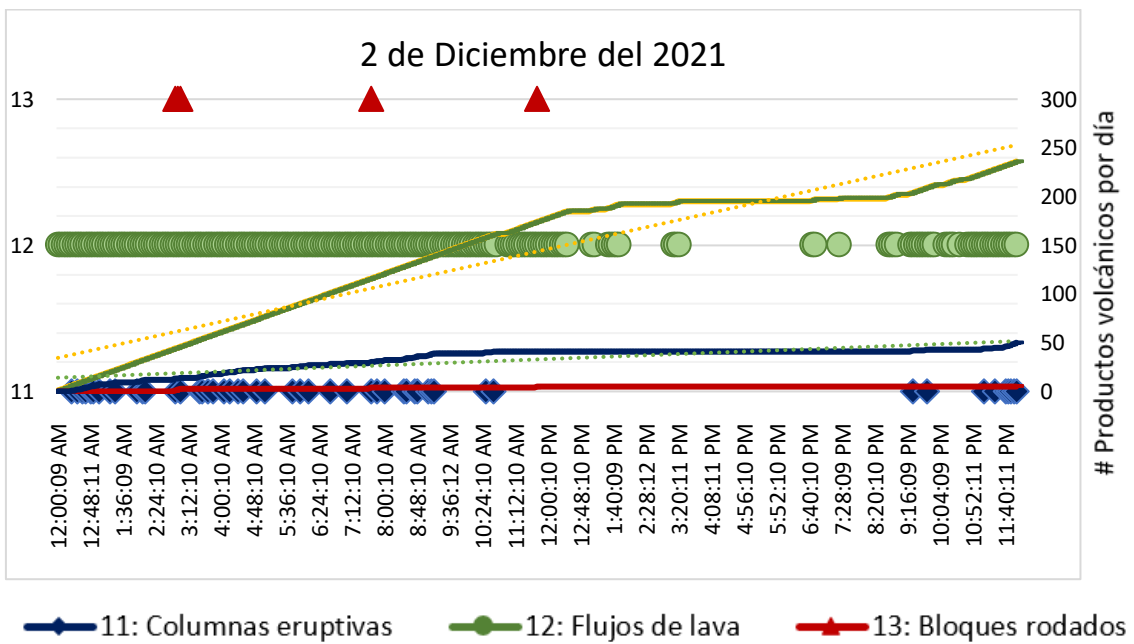
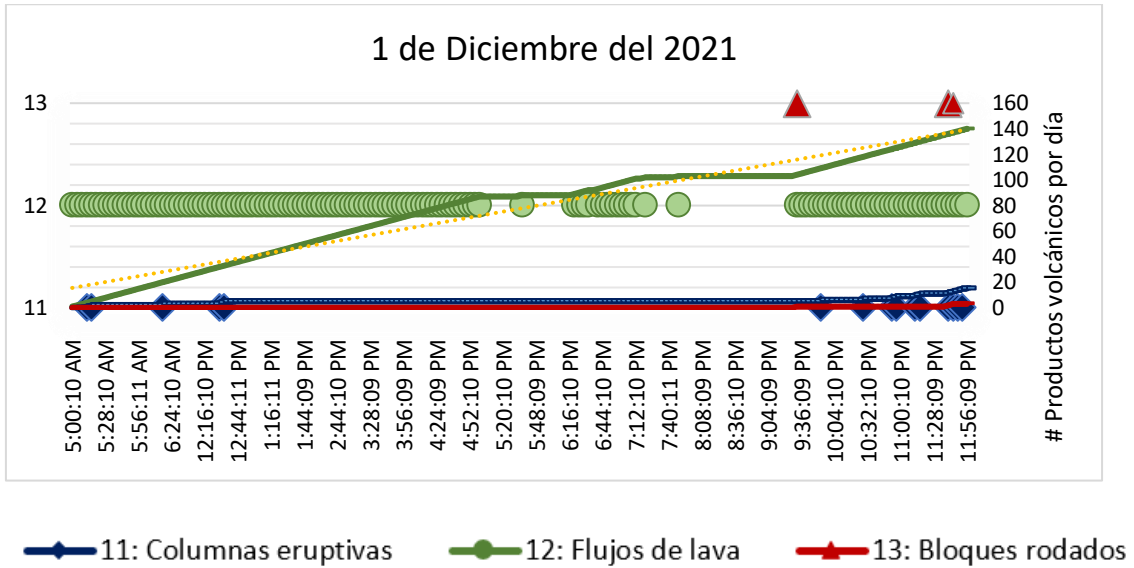
Productos volcánicos por día

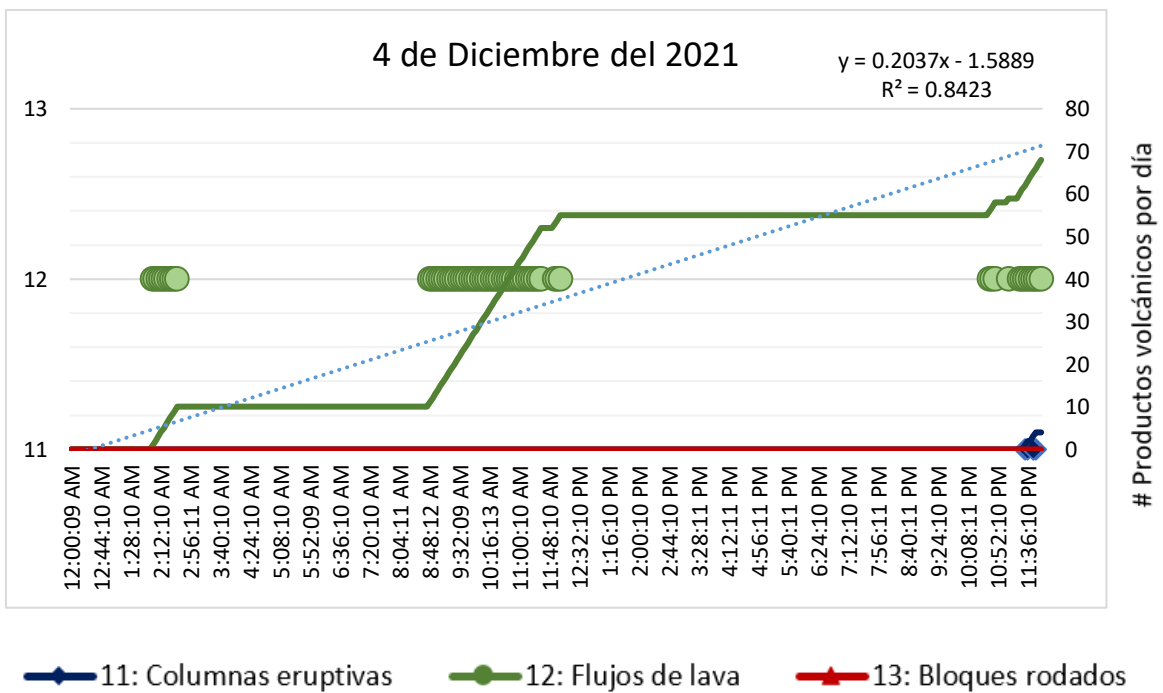
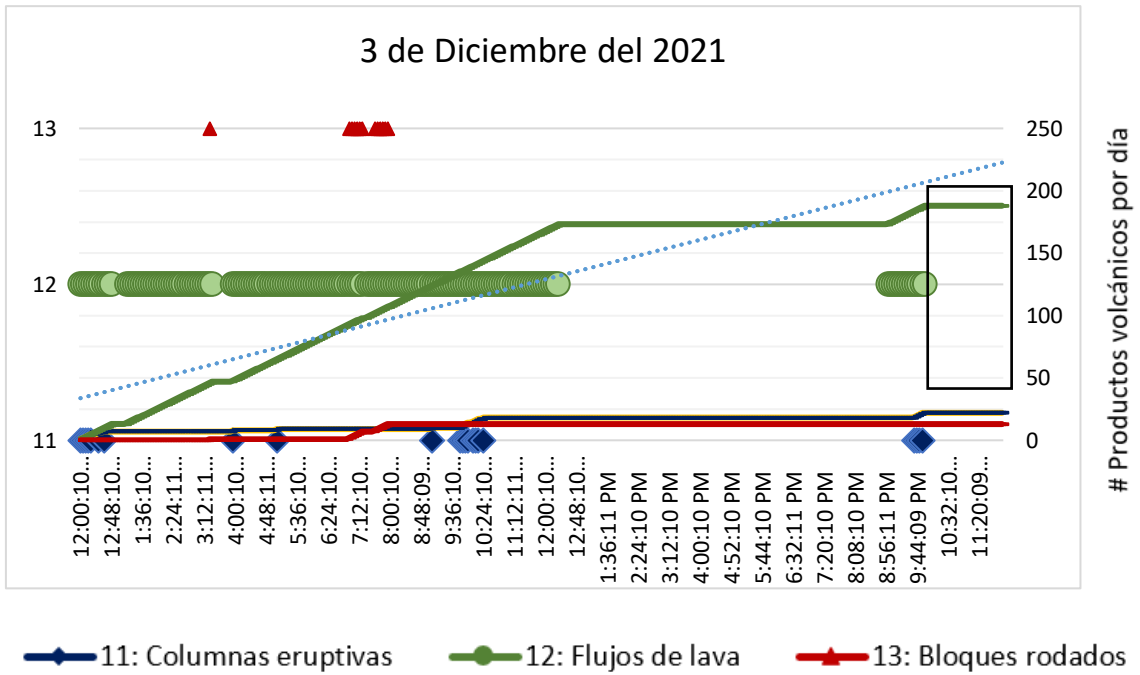


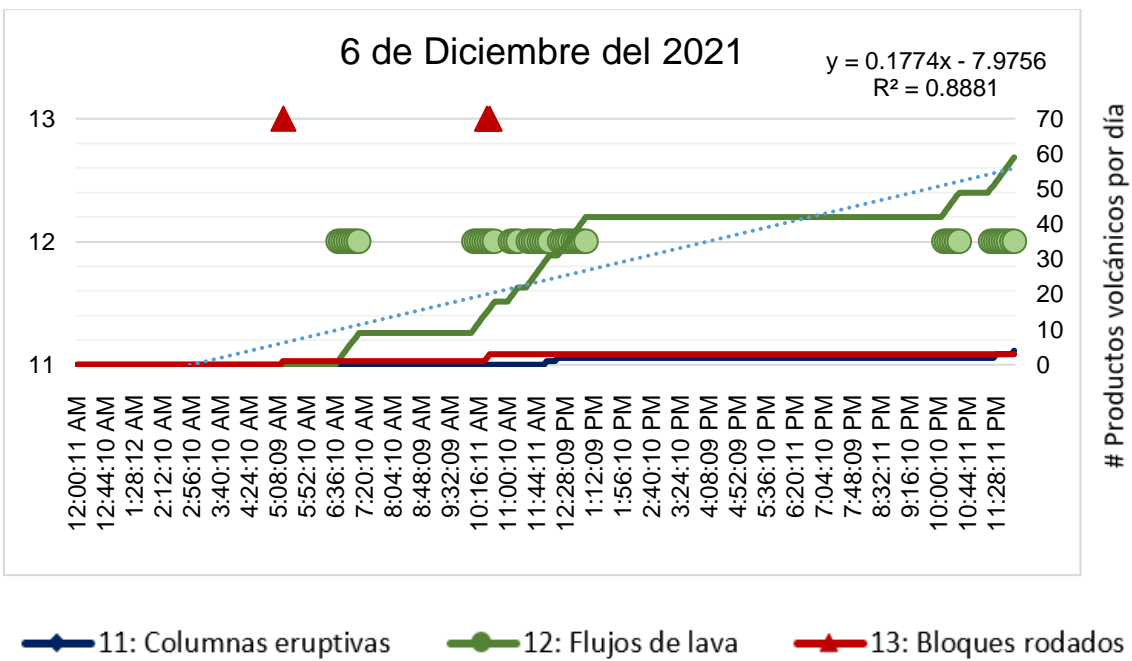
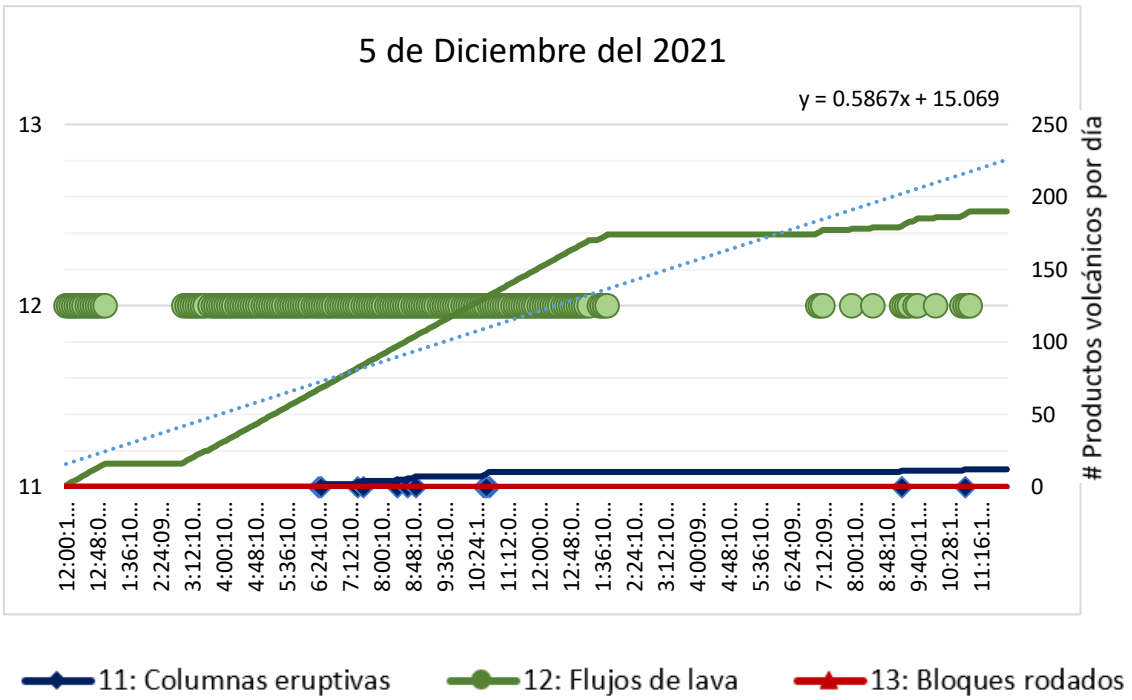


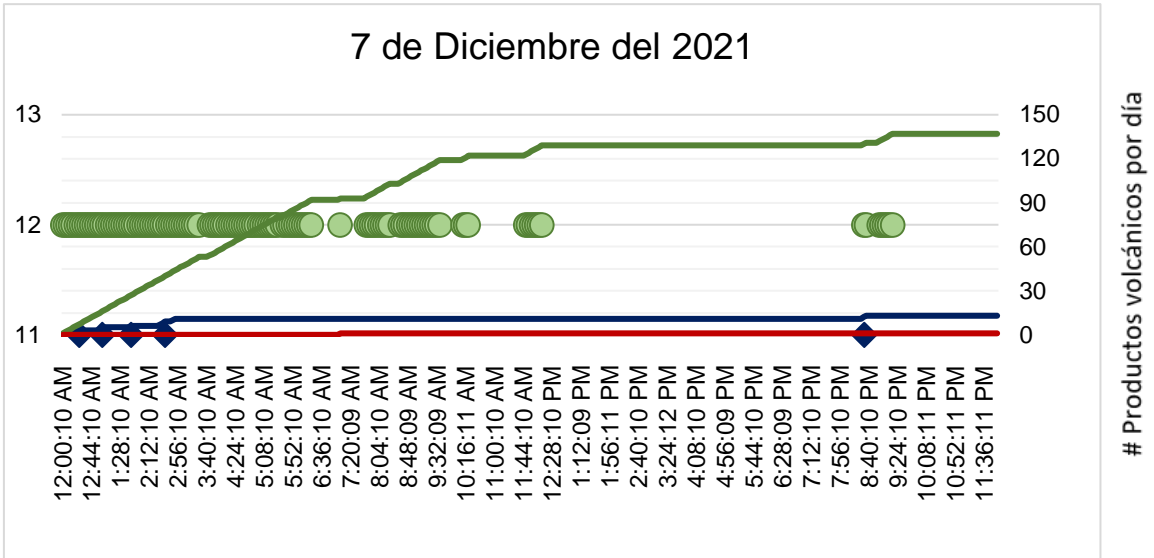


ANEXO III Representación de los diferentes productos volcánicos entre el 1-8 de diciembre del 2021.

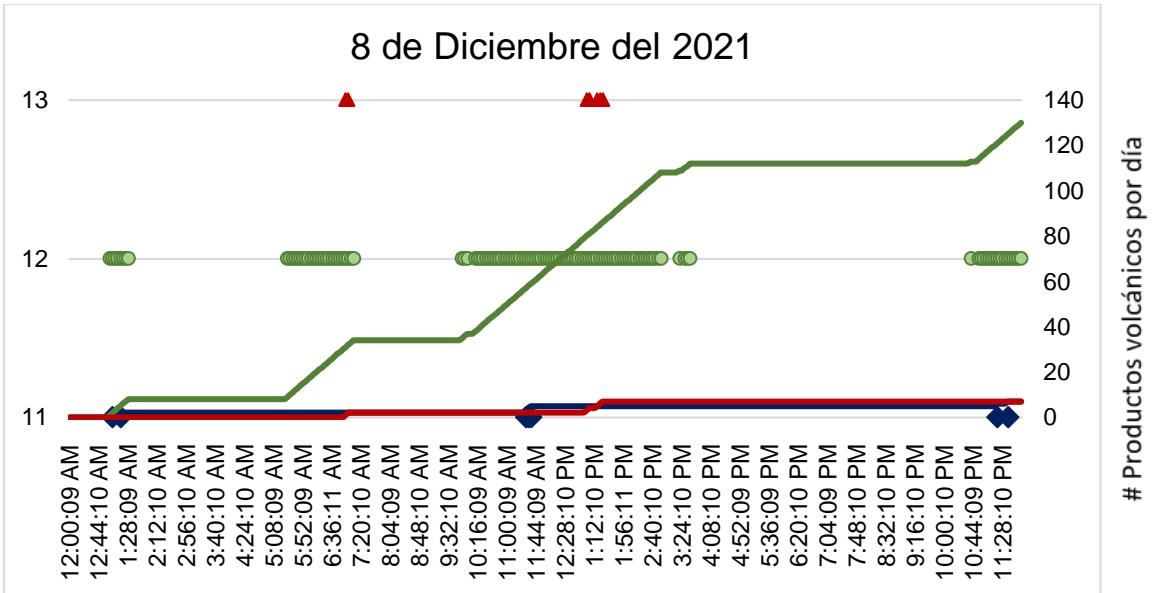








◆ 11: Columnas eruptivas
 ● 12: Flujos de lava
 ▲ 13: Bloques rodados



◆ 11: Columnas eruptivas
 ● 12: Flujos de lava
 ▲ 13: Bloques rodados