



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

“Análisis sísmico de lahares ocurridos en 2007,
Barranca Montegrando, Volcán de Colima”

TESIS PROFESIONAL

Presentada para obtener el grado de

Licenciatura en Ingeniería Geofísica

P R E S E N T A :

Alexa Sofía Sánchez Barrientos

Director de tesis: Dr. Víctor Hugo Márquez Ramírez

Asesora: M.C. Yleana Claudia Martínez Mirón



Ciudad Universitaria, Puebla, abril 2021.



BUAP

Oficio No. SAC/0695/2021

C. ALEXA SOFÍA SÁNCHEZ BARRIENTOS
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ANÁLISIS SÍSMICO DE LAHARES OCURRIDOS EN 2007, BARRANCA MONTEGRANDE, VOLCÁN DE COLIMA.”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como asesora de tema al Mtra. Yleana Claudia Martínez Mirón.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 11 de marzo de 2021

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ /barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

M. I. Angel Cecilio Guerrero
Zamora Director de la Facultad
de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla **P r e s e n t e.**

La que suscribe: Mtra. Yleana Claudia Martínez Mirón, directora del tema de tesis:

**"ANÁLISIS SÍSMICO DE LAHARES OCURRIDOS EN 2007, BARRANCA MONTEGRANDE,
VOLCÁN DECOLIMA."**

Presentada por el C. Alexa Sofía Sánchez Barrientos, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0695/2021 con fecha de emisión 11 de marzo de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 5 de abril de 2021



Firmado
digitalmente
por Yleana
Claudia
Martínez
Mirón Fecha:
2021.04.05
17:03:35 -05'00'

Mtra. Yleana Claudia Martínez
Mirón

Asesora

M'YCMM/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Dedicatoria

A mí mamá y a mí papá, por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A mis asesores Yleana y Víctor, por siempre estar disponibles para resolver mis dudas, por compartir su conocimiento, por brindarme su ayuda cada que la necesitaba, por su paciencia y su amabilidad.

A la BUAP por permitirme realizar mi carrera profesional, por todas las experiencias y oportunidades que me brindó.

Al Centro de Geociencias de la UNAM, por abrirme sus puertas para realizar una estancia y facilitarme los datos para realizar mi tesis.

A mis sinodales, el maestro José Serrano Ortiz y Raúl Soriano Garibo, por sus consejos y observaciones, por su amabilidad y accesibilidad.

A todos mis maestros y maestras de la carrera, por transmitirnos su conocimiento.

A mis amigos y amigas, que hasta ahora, hicieron de la universidad la etapa más bonita de mi vida.

Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	1
Lista de tablas y figuras.....	2
Capítulo 1. Introducción	2
Justificación.....	6
Objetivos	7
General.....	7
Específicos	7
Alcances y limitaciones	8
Capítulo 2. El Volcán de Colima.....	9
2.1 Situación geográfica	9
2.2 Marco tectónico	11
2.3 Marco Geológico.....	13
2.4 Complejo Volcánico de Colima.....	14
2.5 Barranca Montegrande.....	15
Capítulo 3: Lahares	16
3.1 Clasificación.....	17
3.1.1 Según la causa que lo origina	17
3.1.2 Según su composición	22
3.1.3 Según el tipo de Flujo.....	23
3.2 Estructura de un lahar.....	23

3.4 Recurrencia de lahares en el Volcán de Colima	25
3.3 Experimento CODEX	28
3.3.1 Sistemas de monitoreo del experimento CODEX	28
3.3.2 Especificaciones de las estaciones	28
3.3.3 Ubicación de las estaciones	29
Capítulo 4: Análisis sísmico	30
4.1 Análisis de señales sísmicas	30
4.2 Muestreo de señales y frecuencia de Nyquist	30
4.3 Análisis de Fourier	31
4.4 Análisis Espectral	32
4.5 Método de Welch	33
4.6 Señales sísmicas de lahares	34
Capítulo 5. Metodología	37
5.1 Lahares en el Volcán de Colima en 2007 en la barranca Montegrande.	37
5.2 Análisis de señales sísmicas de lahares en el Volcán de Colima	39
Capítulo 6. Resultados	42
Capítulo 7: Conclusiones	47
Apéndice A: Imágenes de señales sísmicas de lahares, espectrogramas y método de Welch.	49
Apéndice B: Código Python	64
Fuentes consultadas	68

Resumen

El Volcán de Colima es considerado uno de los volcanes más activos en México y Latinoamérica, en consecuencia, es uno de los más estudiados y monitoreados.

La actividad de los últimos 50 años del Volcán de Colima ha consistido en extrusión de domos, pequeñas explosiones y derrames de lava, en ocasiones se presentan flujos piroclásticos y lahares.

Los lahares son flujos compuestos por una mezcla de agua, rocas y sedimentos de diversos tamaños, estos se desplazan desde las laderas de un volcán y debido a la gran densidad y velocidad de estos flujos, tienen la capacidad de destruir y sepultar lo que encuentren a su paso, como viviendas, carreteras, puentes y terrenos de cultivo.

Esta tesis aborda el análisis de las señales sísmicas registradas por el experimento CODEX en 2007, específicamente en la estación de monitoreo “EBMG” en el Volcán de Colima, con la finalidad de identificar los lahares ocurridos en la barranca Montegrande y determinar sus características principales.

Todo el tratamiento de datos se realizará en el lenguaje de programación Python.

Los resultados de la investigación podrían ser utilizados para la creación de un sistema de alerta temprana para lahares.

Lista de tablas y figuras

Figuras

- Figura 1:** Volcán de Colima 9
- Figura 2:** Ubicación geográfica del Complejo Volcánico de Colima (CVC) dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). Universidad de Colima (2019). Recuperado de <https://portal.ucol.mx/cueiv/Volcan-colima.htm#Volcan-colima> el 26 de octubre de 2019. 10
- Figura 3:** Localización de la FVTM y la división de los tres sectores que la componen.... 11
- Figura 4:** Esquema de la porción oeste de la FVTM. Las estructuras volcánicas son: 1) San Juan, 2) Sangangüey, 3) Tepetitlic, 4) Ceboruco, 5) Tequila, 6) Caldera de la Primavera. Complejo volcánico de Colima: 7) Cántaro, 8) Nevado de Colima y 9) volcán de Colima. Las abreviaciones son: RTZ- rift Tepic-Zacoalco, GCh- graben de Chapala, GCi graben de Citala, y TM- Trinchera Mesoamericana (línea discontinua). Las líneas delgadas representan fracturas (modificado de DeMets y Stein, 1991; Lange y Carmichael, 1991 y Luhr et al., 1989, citados en Macías, 2005). 12
- Figura 5:** Imagen de satélite del occidente de México. Los triángulos blancos representan los centros volcánicos más importantes del área. En la porción central del rift o graben de Colima se pueden observar los volcanes que constituyen el complejo volcánico de Colima; Cántaro, Nevado y Colima. G: Guadalajara; T: Tepic; C: Colima; TMA: Trinchera Mesoamericana; DPE: Dorsal del Este del Pacífico; ZFR: zona de fractura de Rivera. (Tomado de López-Loera, Urrutia-Fucugauchi y Alva-Valdivia, 2011) 13
- Figura 6:** Imagen satelital del Volcán de Colima y sus alrededores inmediatos, muestra la barranca Montegrande y las comunidades aledañas. (Reyes-Dávila, 2016). Recuperado de <https://portal.ucol.mx/cueiv/Volcan-colima.htm#proyectos> el 26 de octubre de 2019. .. 15
- Figura 7:** Embalse de agua en el cráter del volcán Ruapehu. Copyright 2013 por Astronoo.com Recuperado de <http://www.astronoo.com/es/articulos/volcanes-nueva-zelanda.html> el 26 de septiembre de 2019. 17
- Figura 8:** Volcán Nevado del Ruiz, Colombia 1985. El pueblo de Armero en la desembocadura del río Lagunillas, luego del impacto del lahar generado por la erupción del

13 de noviembre de 1985 (Tomado del Servicio Geológico de los Estados Unidos, citada en Voight, Calvache, Hall, y Monsalve, 2013).	18
Figura 9: Lahar ocasionado por el deshielo del glaciar a causa del flujo de lava en Llaima, Chile (fuente: http://volcano.si.edu , citada en Portillo, 2016).	19
Figura 10: Lahar en el cráter del Volcán Katla (tomado de Portillo, 2016).	20
Figura 11: Daños ocasionados en octubre de 2015 por un lahar desencadenado por intensas precipitaciones en el Volcán de Colima (fotografía tomada de http://www.manzanillo.tv/1015/25/patricia-comala.html citada en Martínez, 2019).	21
Figura 12: Esquema de la estructura de un lahar (Tomado de Iverson, citado en Capra, Martin del Pozzo y Bonasia, 2016).	24
Figura 13: Localización de las estaciones que conformaron el experimento CODEX, se muestra en ícono amarillo la estación estudiada (EBMG), ubicada en barranca Montegrande.	29
Figura 14: Forma de onda de lahar registrado en octubre del 2015, destaca su larga duración (Tomado de Martínez, 2019).	36
Figura 15: Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa durante el año 2007, resalta Colima en amarillo, presentando las mayores precipitaciones de junio a diciembre (valores en mm). Recuperado de https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2007.pdf el 12 de julio de 2019.	38
Figura 16: Registro sísmico del 24 de junio de 2007, estación EBMG, se observa una señal proveniente de un lahar entre las 21:00 horas y las 22:30 horas.	39
Figura 17: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 22 de junio de 2007.	40
Figura 18: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch para el lahar registrado el 22 de junio de 2007.	41
Figura 19: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 22 de junio de 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Destacan tres picos de amplitudes mayores (0.1 mm/s, 0.07 mm/s 0.05 mm/s), correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos.	43

Figura 20: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~10 y 30 Hz.....	44
Figura 21: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 26 de julio de 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración de 2:55 horas. Destacan 5 picos de amplitudes mayores, correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos.	45
Figura 22: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~5 y 25 Hz.....	45

Tablas

Tabla 1: Tabla de resultados	46
---	----

Capítulo 1. Introducción

El Volcán de Colima forma parte del Complejo Volcánico de Colima, ubicado en el sector occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano, es considerado el Volcán más activo de México y por lo tanto es uno de los más estudiados.

La actividad de los últimos 50 años del Volcán de Colima ha consistido en extrusión de domos, pequeñas explosiones y derrames de lava, en ocasiones se presentan flujos piroclásticos y lahares.

Los lahares son flujos compuestos por una mezcla de agua, rocas y sedimentos de diversos tamaños, estos se desplazan desde las laderas de un volcán y pueden originarse de forma directa o indirecta por una erupción volcánica.

A través de los años se han llevado a cabo diversos estudios sobre lahares en el Volcán de Colima, como evaluación de peligro, análisis de su dinámica y distribución espacial, además del constante monitoreo sísmico de estos eventos que realiza la Universidad de Colima en conjunto con otras instituciones.

EN promedio, en el Volcán de Colima ocurren entre 15 y 20 lahares por año, algunas de las comunidades que se encuentran amenazadas son: La Becerra, Quesería y Montitlán.

En este trabajo se identificarán los lahares ocurridos en el año 2007 en la Barranca Montegrando, una de las barrancas que presentan este tipo de eventos con mayor frecuencia, la identificación será a través de las señales sísmicas registradas por CODEX, posteriormente estas señales se procesarán para obtener las principales características de los lahares y con esta información se realizará el análisis de la señal sísmica.

Justificación

En enero de 2006 la Universidad de Colima en conjunto con la Universidad de Alaska Fairbanks, colocaron estratégicamente 20 sismómetros alrededor del Volcán de Colima, registrando eventos de tipo local, regional, telesísmico y la sismicidad del volcán durante dos años (experimento CODEX).

Los registros permiten visualizar los movimientos del suelo a través de las trazas sísmicas. La ocurrencia de un lahar representa una señal importante en una traza sísmica y es aquí en donde nace el interés por analizar estos eventos, ya que el Volcán de Colima es uno de los más activos de México y se ve afectado por una marcada temporada de lluvias, haciendo de los lahares un fenómeno común.

Se sabe que la Barranca Montegrande es uno de los canales más activos en cuanto a la generación de lahares en el Volcán de Colima, se ha identificado la ocurrencia de lahares durante la temporada de lluvias los cuales llegan a recorrer distancias de hasta 15 km, provocando daños a la infraestructura civil, como puentes y torres de electricidad (Martínez, 2019).

El presente trabajo aportaría información sobre la dinámica de los lahares y la señal sísmica característica de este tipo de eventos. En ese sentido resultaría relevante ya que los resultados de la investigación podrían ser utilizados para la creación de un sistema de alerta de lahares, evitando así posibles daños y pérdidas a las comunidades aledañas al Volcán de Colima.

Objetivos

General

- Analizar los datos sísmicos registrados en la Barranca Montegrando, Volcán de Colima durante el año 2007 a través de Python para identificar los registros correspondientes a lahares y determinar sus características principales.

Específicos

- Determinar los meses con mayor precipitación en el año 2007 en Colima mediante los registros de precipitación proporcionados por CONAGUA para delimitar la búsqueda de señales sísmicas asociadas a lahares.
- Descargar los datos sísmicos de los meses con mayor precipitación registrados en la Barranca Montegrando a través de un software implementado en Python para visualizar las trazas sísmicas en periodos de 24 horas.
- Identificar las señales sísmicas correspondientes a lahares mediante características conocidas, como duración del evento y forma de onda para seleccionar y separar los registros de interés.
- Procesar los datos sísmicos de los lahares hallados a través de Python para obtener la forma de onda, el espectrograma y la densidad espectral de potencia.
- Realizar el análisis de cada evento encontrado a partir de su forma de onda, espectrograma y densidad espectral de potencia para determinar características principales como duración del evento, rango de frecuencias y amplitud máxima de la señal.
- Crear una tabla con las características principales de cada lahar encontrado para comparar cada evento.

Alcances y limitaciones

Alcances:

Al correlacionar y analizar las señales sísmicas y los espectrogramas de los distintos eventos obtenidos de la estación EBMG (Estación Barranca Montegrande, Volcán de Colima) se caracterizará la señal típica de un lahar y se determinarán las características principales de estos, como rango de frecuencias, velocidad máxima y duración del evento.

Limitaciones:

1. Ciertas imágenes del marco geológico y de la zona de estudio se adquirirán a partir de anteriores trabajos, pues el hacerlo de manera directa implicaría recursos materiales y económicos con los cuales no se cuentan.
2. El análisis comprende los eventos registrados únicamente en el año 2007, por lo que no se podrá hacer una correlación con eventos de otros años, limitando así las conclusiones.

Capítulo 2. El Volcán de Colima

2.1 Situación geográfica

El Volcán de Colima, también conocido como Volcán de Fuego (Figura 1), es un estratovolcán andesítico considerado el más activo de México, posee una altitud de 3860 m s.n.m.



Figura 1: Volcán de Colima, 2017. Elaboración propia.

Se ubica en el sector occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, entre los estados de Colima (municipios de Comala y Cuauhtémoc) y Jalisco (municipios de Tuxpan, Zapotitlán y Tonila).

El Volcán de Colima forma parte, junto con el Cántaro y el Nevado de Colima, de un complejo volcánico con orientación Norte-Sur llamado Complejo Volcánico de Colima (figura 2).

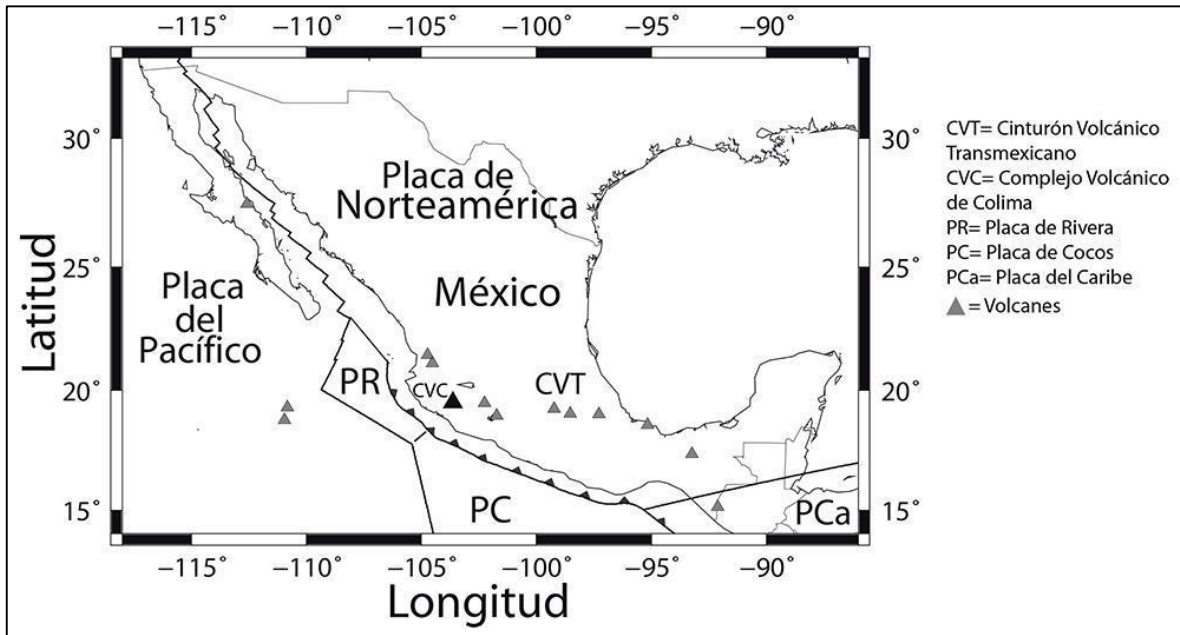


Figura 2: Ubicación geográfica del Complejo Volcánico de Colima (CVC) dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). Universidad de Colima (2019). Recuperado de <https://portal.uco1.mx/cueiv/Volcan-colima.htm#Volcan-colima> el 26 de octubre de 2019.

2.2 Marco tectónico

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es el arco volcánico que se extiende desde el estado de Nayarit hasta Veracruz, como resultado de la subducción de las Placas de Rivera y de Cocos bajo la Placa Norteamericana, constituye uno de los arcos volcánicos más interesantes debido a su complejidad y a la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química. Tiene aproximadamente 1000 km de longitud y está constituida por cerca de 8 000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos (Ferrari, 2000).

De manera breve, Gómez-Tuena, Orozco-Esquivel y Ferrari (2005) dividen la historia geológica de la FVTM en cuatro episodios: 1) la instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno medio y tardío, 2) un episodio máfico del Mioceno tardío, 3) un episodio silíceo de finales de Mioceno, y 4) la reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío.

Para un mejor entendimiento la FVTM se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental (figura 3).

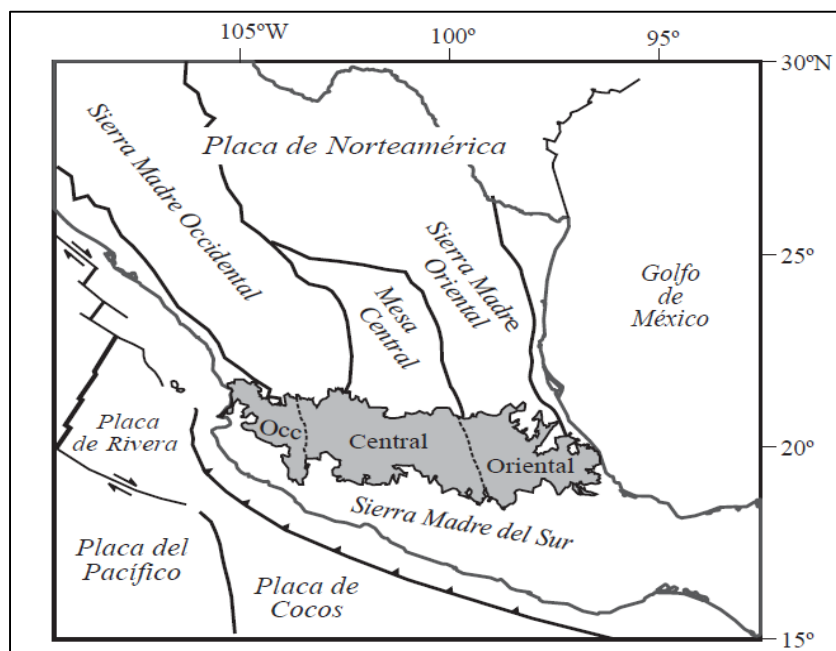


Figura 3: Localización de la FVTM y la división de los tres sectores que la comprenden (Gómez-Tuena, Orozco-Esquivel y Ferrari, 2005).

Al mismo tiempo la FVTM se encuentra sujeta a la presencia de un triple sistema de rift: el rift de Tepic-Zoacalco al noroeste, el rift de Chapala al este y el graben de Colima al sur (figura 4), (Luhr, Nelson, Allan y Carmichael, 1985; Garduño y Tibaldi, 1991, citados en Gómez-Tuena, Orozco-Esquivel y Ferrari, 2005).

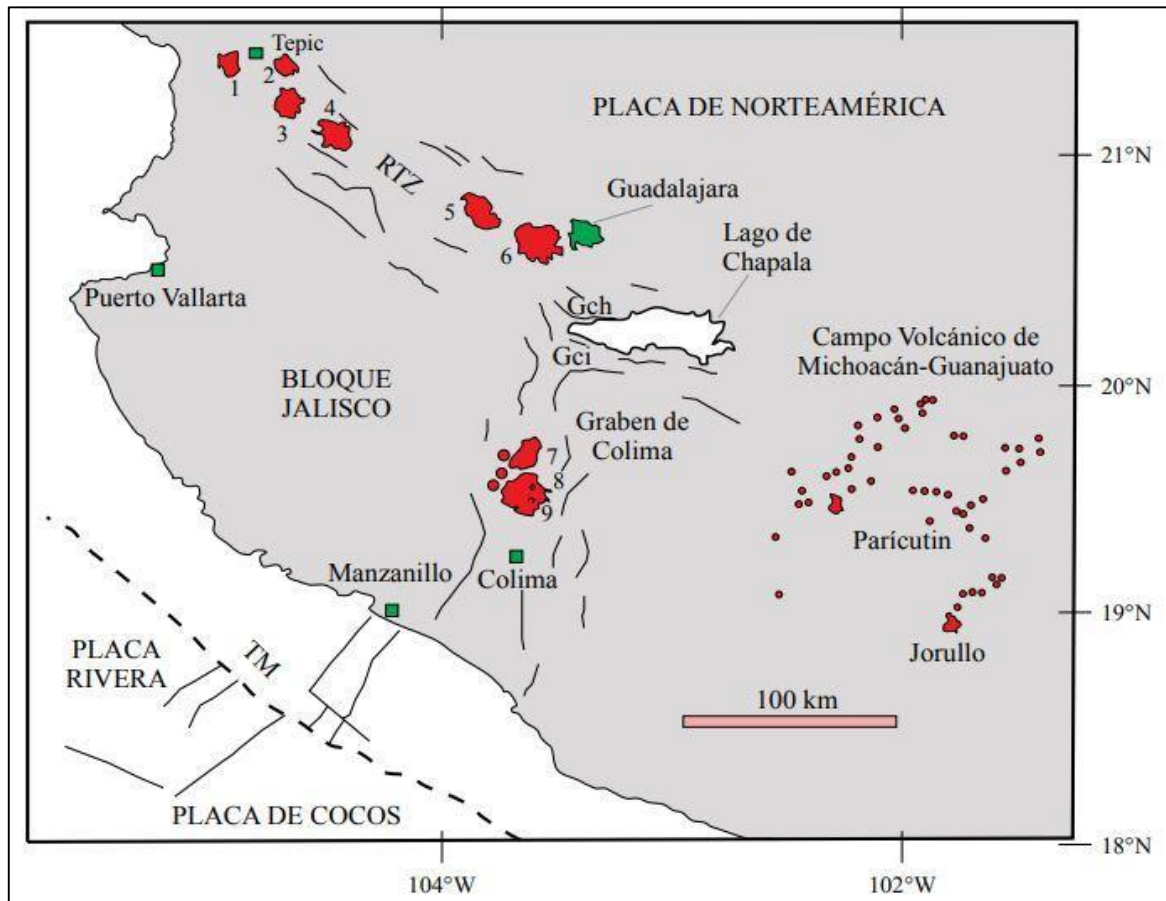


Figura 4: Esquema de la porción oeste de la FVTM. Las estructuras volcánicas son: 1) San Juan, 2) Sangangüey, 3) Tepetitlic, 4) Ceboruco, 5) Tequila, 6) Caldera de la Primavera. Complejo volcánico de Colima: 7) Cántaro, 8) Nevado de Colima y 9) volcán de Colima. Las abreviaciones son: RTZ- rift Tepic-Zacoalco, GCh- graben de Chapala, Gci graben de Citla, y TM- Trincheras Mesoamericanas (línea discontinua). Las líneas delgadas representan fracturas (modificado de DeMets y Stein, 1991; Lange y Carmichael, 1991 y Luhr et al., 1989, citados en Macías, 2005).

2.3 Marco Geológico

El Complejo Volcánico de Colima (CVC) se localiza en el extremo occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, dentro del rift de Colima, está compuesto por tres grandes estratovolcanes de composición principalmente andesítica, alineados de norte a sur (figura 5): El Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima (López-Loera, Urrutia-Fucugauchi y Alva-Valdivia, 2011).

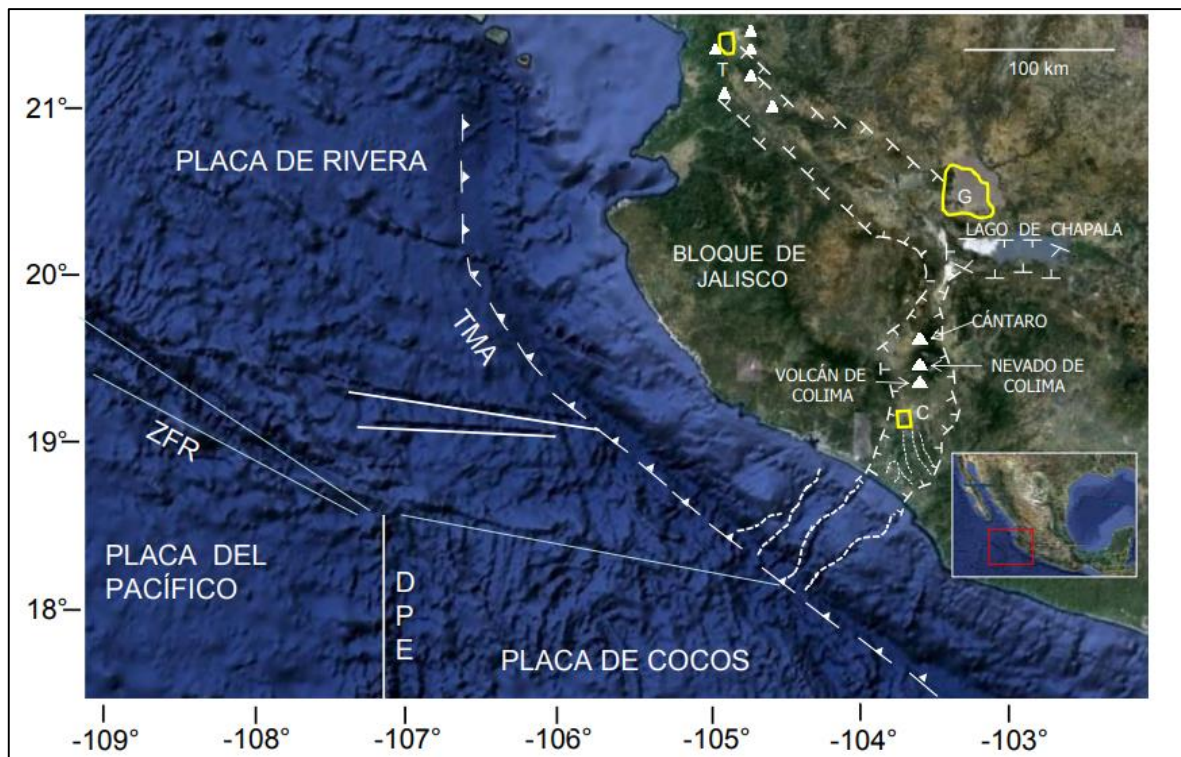


Figura 5: Imagen de satélite del occidente de México. Los triángulos blancos representan los centros volcánicos más importantes del área. En la porción central del rift o graben de Colima se pueden observar los volcanes que constituyen el complejo volcánico de Colima; Cántaro, Nevado y Colima. G: Guadalajara; T: Tepic; C: Colima; TMA: Trinchera Mesoamericana; DPE: Dorsal del Este del Pacífico; ZFR: zona de fractura de Rivera. (Tomado de López-Loera, Urrutia-Fucugauchi y Alva-Valdivia, 2011)

El CVC se encuentra sobre un basamento de andesitas y rocas volcánicas del Cretácico Inferior, areniscas y lutitas de la Formación Encino, calizas masivas de la Formación Tepames, lechos rojos del Cretácico Superior, intrusivos cretácicos y una secuencia volcánica del Terciario, constituida por derrames de basaltos, andesitas, brechas volcánicas dacíticas e ignimbritas (Cortés et al, 2005).

2.4 Complejo Volcánico de Colima

El Complejo Volcánico de Colima se localiza entre los límites de los estados de Jalisco y Colima, tiene una forma más o menos circular con aproximadamente 12 km de radio (Luhr y Carmichael, 1980).

Su origen se remonta al cuaternario, con el inicio de la actividad volcánica en el graben de Colima, dando origen al volcán El Cántaro. La actividad volcánica siguió desarrollándose siguiendo un patrón norte-sur continuando con la construcción del Nevado de Colima a finales del Pleistoceno (Allan, 1986).

La actividad volcánica siguió migrando hacia el sur, originando al antecesor del Volcán de Colima: el Volcán Paleofuego, hoy en día sus remanentes están representados por una caldera de 5 km de diámetro, resultado del último colapso hace aproximadamente 2500 años.

La actividad volcánica se instauró dentro de la caldera del Paleofuego, dando origen al volcán más joven del CVC, el Volcán de Colima, un estratovolcán compuesto por una alternancia de derrames andesíticos y flujos piroclásticos y de caída (Macías, 2005).

Actualmente, la Universidad de Colima, Red Sismológica de Colima (RESCO), Protección Civil de Jalisco (PCJ) y la Universidad Nacional Autónoma de México (Centro de Geociencias, Juriquilla) realizan monitoreo volcánico con diversas estaciones sísmicas, visuales y meteorológicas, a través de las cuales se genera un registro detallado de la actividad volcánica y monitoreo con fines de mitigación (Martínez, 2019).

2.5 Barranca Montegrande

La Barranca Montegrande (figura 6) es una de las más activas en la formación de lahares, se localiza en la porción SW del volcán y en sus proximidades se sitúa la localidad de Quesería, perteneciente al municipio de Cuauhtémoc con más de 8000 habitantes (INEGI, 2010).

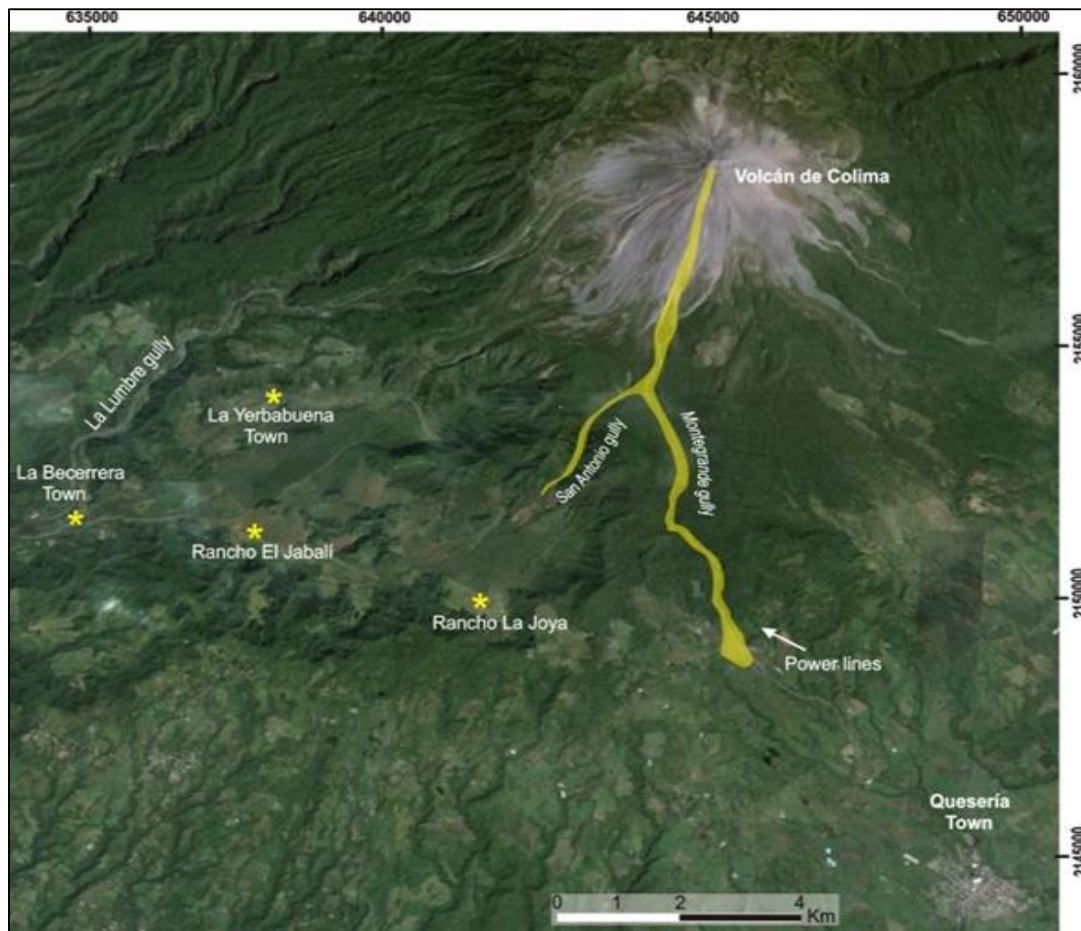


Figura 6: Localización de la barranca Montegrande y sus alrededores (Reyes-Dávila, et al., 2016).

Capítulo 3: Lahares

Los lahares son uno de los fenómenos más destructivos asociados a volcanes, el término se originó en Indonesia, haciendo referencia a las coladas de lava, fue Scrivenor, quien lo mencionó por primera vez en 1929 en un reporte geológico para referirse a la mezcla de agua y material no consolidado que bajaba por el volcán Kelut, esa definición se usó para cualquier flujo de arroyada hasta 1988, cuando en una conferencia internacional se propuso su uso únicamente para referirse al proceso de generación de flujos rápidos de agua y material inestables, diferentes a los normales (no saturados) en zonas volcánicas (Rodolfo y Arguden, 1991).

Por tanto los lahares son eventos complejos constituidos por agua y clastos, que fluyen pendiente abajo, desplazándose por los barrancos y cauces de los ríos que tienen su cabecera en las laderas del volcán, provocando la inundación y destrucción de lo que encuentran a su paso (Calvo, 2015).

Existen cuatro factores importantes para que se desarrolle un lahar (Vallance, 2005):

- 1) Una fuente abundante de agua
- 2) Abundante material no consolidado
- 3) Pendientes pronunciadas
- 4) Un mecanismo de disparo

En muchos volcanes se ha demostrado que las precipitaciones intensas son el factor principal para la generación de lahares (Lavigne, Thouret, Voight, Young, Hausen, Marso, Suwa, Sumaryono, Sayudi y Dejean, 2000).

En el caso de esta tesis, las intensas lluvias a las que se encuentra expuesto el Volcán de Colima fueron las responsables de los lahares ocurridos en el año de estudio (2007), pues el único aporte de agua que promueve la formación de lahares en el Volcán de Colima es la precipitación.

Una vez iniciado el transporte de estos flujos, se pueden formar uno o más pulsos sucesivos dentro del flujo, u oleadas con menor concentración de sedimentos (Vázquez, 2016).

3.1 Clasificación

3.1.1 Según la causa que lo origina

Los lahares pueden ser primarios o secundarios según su origen. Los lahares primarios o sin-eruptivos son aquellos que se generan durante la erupción y pueden ser disparados por las siguientes causas:

1. Liberación de agua embalsada en el cráter debido a explosiones volcánicas, esta forma es relativamente rara. Un ejemplo ocurrió en 1969 en el volcán Ruapehu en Nueva Zelanda en 1969 (figura 7), cuando ocurrió una erupción y en consecuencia el cráter que contenía un lago se rompió (Barnés, 2016).



Figura 7: Embalse de agua en el cráter del volcán Ruapehu. Copyright 2013 por Astronoo.com
Recuperado de <http://www.astronoo.com/es/articulos/volcanes-nueva-zelanda.html> el 26 de septiembre de 2019.

2. Emisión de flujos piroclásticos y gases calientes que asimilan agua durante su recorrido. Este caso ocurrió en 1986 en el volcán Nevado del Ruíz, en Colombia (figura 8), cuando entró en erupción, generando flujos piroclásticos que derritieron alrededor del 10% de hielo y nieve en los glaciares de la cumbre. El agua fluyó y se mezcló con escombros piroclásticos que arrastraron y derritieron nieve adicional, desencadenando lahares que acabaron con al menos 22,000 vidas (Major y Newhall, 1989).



Figura 8: Volcán Nevado del Ruíz, Colombia 1985. El pueblo de Armero en la desembocadura del río Lagunillas, luego del impacto del lahar generado por la erupción del 13 de noviembre de 1985 (Tomado del Servicio Geológico de los Estados Unidos, citada en Voight, Calvache, Hall, y Monsalve, 2013).

3. Deshielo de nieve al contacto con flujos de lava superficiales o con piroclastos de caída. La transferencia de calor por conducción entre el flujo de lava y la nieve y el hielo generalmente es demasiado lenta para formar lahares o inundaciones a menos que el agua de deshielo se acumule y se libere repentinamente. Comúnmente, la nieve y el hielo derretidos por las lavas superficiales se convierten en vapor. Este es el caso del volcán Llaima, en Chile en 1989 (figura 9), cuando flujos de lava cruzaron glaciares, provocando lahares que fluyeron por las laderas de los volcanes (Major y Newhall, 1989).



Figura 9: Lahar ocasionado por el deshielo del glaciar a causa del flujo de lava en Llaima, Chile (fuente: <http://volcano.si.edu>, citada en Bárnés, 2016).

4. Expulsión de agua caliente de un lago de cráter en un volcán que se encuentre cubierto de nieve y hielo, derritiéndolos y además mezclándose con el agua del lago. Un ejemplo de esto ocurrió en 1918 en el volcán Katla (figura 10), cuando los glaciares que cubrían el volcán se derritieron parcialmente como consecuencia del calor emitido por el volcán. El agua de deshielo rompió el hielo suprayacente y dio lugar a lahares que se conocen como jökulhlaup (Major y Newhall, 1989).



Figura 10: Lahar en el cráter del Volcán Katla (tomado de Barnés, 2016).

Los lahares secundarios o post-eruptivos se originan de forma posterior a la actividad volcánica y pueden producirse por los motivos siguientes:

1. Intensas precipitaciones que arrastran material volcánico (Lavigne et al., 2000). Ejemplo de ello es el lahar ocurrido en el volcán de Colima en octubre de 2015 después de intensas precipitaciones debidas a paso del huracán Patricia (figura 11). En el Volcán de Colima la ocurrencia de lahares esta frecuentemente relacionada con la temporada de lluvias.



Figura 11: Daños ocasionados en octubre de 2015 por un lahar desencadenado por intensas precipitaciones en el Volcán de Colima (fotografía tomada de <http://www.manzanillo.tv/1015/25/patricia-comala.html> citada en Martínez, 2019).

2. Alteración hidrotermal del volcán, este proceso se genera cuando el agua se infiltra en las paredes del volcán y el calor geotérmico del mismo provoca una alteración de los materiales, los cuales provocan inestabilidades en las laderas, dando lugar a un deslizamiento del material, que mezclado con agua, desencadena lahares (Lavigne et al., 2000).
3. Transformación de un flujo no saturado, ocurre cuando una corriente fluvial incorpora sedimentos y por este motivo aumenta su porcentaje de material hasta convertirse en un lahar (Pierson y Costa, citados en Barnés, 2016).

3.1.2 Según su composición

Dependiendo el tipo de flujo, existen dos tipos de lahares, distinguiéndose entre ellos según la concentración de sedimentos:

1) Flujo hiperconcentrado, en estos, la concentración de sedimentos es de 20 a 60% por volumen (Lavigne y Suwa, 2004), el proceso deposicional en estos flujos viene determinado por la velocidad y peso de las partículas, las partículas más finas se encuentran en la parte distal y las más gruesas en la parte inicial (Calvo, 2015).

2) Flujos de escombros, se caracterizan por ser oleadas masivas, en este tipo de flujos la concentración de sedimentos es igual o mayor al 60% por volumen, pudiendo sufrir transformaciones entre uno u otro durante su transporte (Vallance, 2005; Calvo, 2015).

Los flujos de escombros se dividen a su vez en cohesivos o no cohesivos, dependiendo del porcentaje de partículas finas presentes en la mezcla.

- Cohesivos: Los flujos presentan una cantidad de arcilla entre el 3% y 5% del volumen total provocando una viscosidad muy alta, haciendo que las partículas de la fase sólida floten.

- No cohesivos: Se caracterizan por tener arcillas en cantidades mínimas. La fase líquida no alcanza lograr la viscosidad necesaria por lo que las partículas sólidas no flotan y colisionan entre sí.

3.1.3 Según el tipo de Flujo

Vázquez (2016) identifica y clasifica los principales tipos de flujos desarrollados en la Barranca Montegrande, considerando tres aspectos fundamentales: 1) La duración el evento de lluvia que dispara el lahar; 2) El tipo de flujo desarrollado por el lahar, de acuerdo a un reconocimiento visual por medio del registro de video; y 3) La forma de la señal sísmica registrada por el evento. Además, al procesar la señal sísmica, definieron el contenido frecuencial de las diferentes porciones de los lahares: de 2-20 Hz para el frente, y entre 10-40 Hz para el cuerpo. Considerando éstos aspectos, se pudo comenzar a definir el tipo de evento desarrollado, y clasificarlo como un evento unipulso, con una duración promedio de 1.5 horas y caracterizados por un solo frente enriquecido en bloques, seguido por oleadas diluidas, o bien como uno multipulso, con una duración promedio de tres horas y caracterizados por presentar más de un frente enriquecido en bloques con sus respectivas oleadas diluidas.

3.2 Estructura de un lahar

Los lahares fluyen pendiente abajo en forma de pulso o pulsos continuos, estos pueden variar en cuanto a la concentración de sedimento. El evento puede durar varias horas, dependiendo de la cantidad de material no consolidado, del volumen de agua aportado y de la duración del evento hidrometeorológico.

Cada pulso está compuesto por un frente, un cuerpo y una cola (Figura 12). El frente del flujo se caracteriza por ser la parte con mayor acumulación de fragmentos líticos, que durante el transporte son reciclados hacia el cuerpo y superficie del flujo y mantiene una dinámica principalmente erosiva, los fragmentos en la superficie del flujo son desviados hacia los bordes en donde gradualmente comienza la deposición. El cuerpo se caracteriza por ser una mezcla entre la fase fluida y los

fragmentos sólidos. Finalmente, la cola la cual es la porción del flujo más diluida y pobre en sedimentos. La velocidad de un lahar no es uniforme, el frente del flujo viaja generalmente a menor velocidad que el cuerpo, alcanzando velocidades máximas de 150 km/h, siendo en promedio entre 40 y 70 km/h (Pierson y Costa, 1987; Del Pozzo et al., 2016).

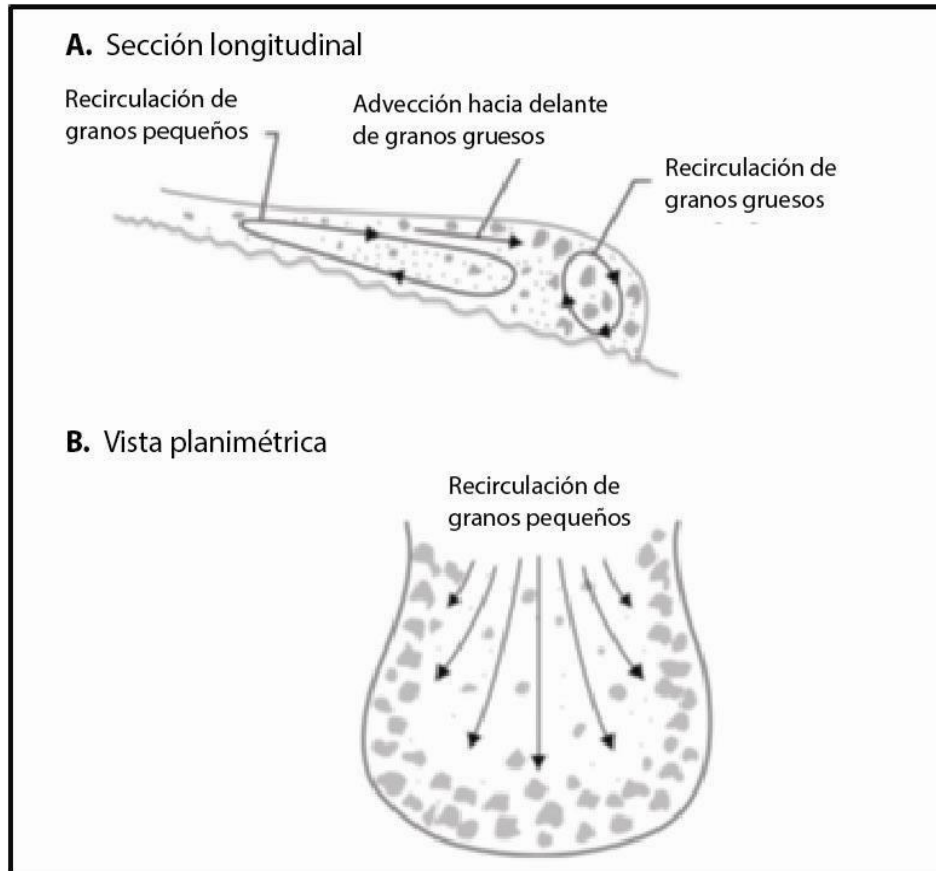


Figura 12: Esquema de la estructura de un lahar (Tomado de Iverson, citado en Capra, Martin del Pozzo y Bonasia, 2016).

3.4 Recurrencia de lahares en el Volcán de Colima

Históricamente el Volcán de Colima ha sido considerado el más activo en México, por tal motivo es uno de los volcanes más estudiados y con mayores registros. Macías (2005) menciona que los primeros estudios geológicos sobre el Volcán de Colima, fueron realizados en 1906, 1915 y 1935 por Waitz, estos consistieron en observaciones generales, describiendo la formación de flujos piroclásticos durante una erupción en 1913.

La primera erupción reportada fue en 1576, desde entonces el Volcán de Colima ha evolucionado a través de tres ciclos de actividad, cada ciclo terminó con una gran erupción y posteriormente se detuvo la actividad durante 50 años o más (Luhr y Carmichael, 1980).

La última gran erupción ocurrió en 1913, como resultado de esta explosión, la morfología de la cima del volcán cambió drásticamente, perdiendo 100 metros de altura y formando un cráter de aproximadamente 400 metros. Seguido a esto, el volcán permaneció en una etapa de relativa quietud, etapa que en 1961 se vio interrumpida por erupciones de lava de bloques, lo mismo en 1962, 1975 y 1976, marcando el inicio de la actividad en un cuarto ciclo histórico que podría terminar con una gran erupción durante este siglo (Luhr y Carmichael, 1980, Macías, 2005).

Algunos autores como: Macías (2005) y Saucedo et al. (2010), describen algunas fases eruptivas recientes. En 2001 hubo un periodo explosivo-efusivo; en 2002, considerable actividad sísmica; durante 2003 y 2004 un periodo explosivo y uno efusivo respectivamente; de 2005-2010 se registró una etapa explosiva, 12 explosiones vulcanianas, destrucción del domo y emplazamiento de flujos piroclásticos, lo cual dio origen a material no consolidado que posteriormente fue removilizado en forma de lahar debido a las lluvias de temporada, tal es el caso de estudio (año 2007).

El Volcán de Colima es un lugar ideal para el estudio y monitoreo de lahares, ya que ocurren al menos 15 eventos por año durante la temporada de lluvias (Capra et al., 2018).

Al tratarse de eventos de alta peligrosidad y debido a la impredecibilidad de su ocurrencia, el número de observaciones de campo es bastante limitado, no obstante, gracias a las diversas estaciones sísmicas, visuales y meteorológicas que existen en el Volcán de Colima, se realiza un constante monitoreo, generando un registro de la actividad volcánica.

La actividad constante en el Volcán de Colima es un factor relevante en la generación de lahares, pues la probabilidad de que ocurra un lahar aumentará al existir material no consolidado en las barrancas; la misma importancia recibe ubicación, pues el Volcán de Colima se encuentra en una zona latitudinal con una estacionalidad marcada, donde las lluvias se concentran en apenas unos meses (junio-octubre) generando procesos volcánicos secundarios, como los lahares (Calvo, 2015).

Pérez (2011) elabora una lista de los principales lahares registrados en el Volcán de Colima en donde el mecanismo de disparo fue la intensa precipitación, se resumen a continuación:

- 1975-1976: Los depósitos de flujo piroclástico fueron removilizados y se formaron lahares en las barrancas La Arena y Beltran. El material depositado fue removilizado en 1988 como lahares secundarios que se produjeron por las lluvias intensas que generó el fenómeno El Niño (Thorpe, Gibson y Vizcaino, citados en Pérez, 2011).
- 1991: El ascenso de magma perforó la superficie del domo y formó un lóbulo de lava que al alcanzar el cráter colapsó, produciendo un flujo piroclástico, el derrame de lava continuó 2.6 km en dirección SE y 4 km por la barranca El Cordobán en dirección SW. El flujo de bloques y ceniza generó un depósito

que durante la temporada de lluvias se removilizó el 50% en forma de lahares que alcanzaron las comunidades de la Becerra y San Antonio. El 3 de julio el depósito fue erosionado y formó un nuevo lahar que afectó el rancho El Jabalí. El 25 de junio se registraron dos horas de intensa precipitación y al día siguiente se formó un lahar en la barranca El Cordobán que la rellenó, mató 20 cabezas de ganado y arrastró troncos de árboles (González, Martín del Pozo, Panohaya y Gante, citados en Pérez, 2011).

- 1993: Se presentaron lahares en las barrancas La Lumbre, El Cordobán y San Antonio (Saucedo, citado en Pérez, 2011)
- 18 de julio de 1999: Debido a un colapso en el flanco sur del domo, se generó un flujo de 2 km por las barrancas Montegrande, San Antonio y El Cordobán. Durante las mismas fechas se presentaron intensas lluvias que ocasionaron lahares que alcanzaron 4 km a partir del cráter por las Barrancas Montegrande, San Antonio y El Cordobán (Navarro, Gavilanes y Cortés, citados en Pérez, 2011).
- Junio de 2000: se formaron lahares por las barrancas El Zarco, El Cordobán y La Lumbre. Las mayores afectaciones se presentaron en la comunidad La Becerra (12 km del cráter), donde una vivienda y un auto quedaron sepultados por un lahar que bajó por la Barranca El Zarco. En la Barranca Montegrande otro lahar destruyó la torre de conducción eléctrica a 7.8 km del cráter (Gavilanes, citado en Pérez, 2011).
- 25 de junio de 2005: En la estación sísmica EZV 4 operada por la Red Sismológica de Colima (RESCO) se registró una señal de lahar en la ladera sur del volcán. Otros lahares se formaron la madrugada del 30 de junio por las barrancas La Lumbre con alcances de 10 km y en Montegrande con alcance entre 7 y 8 km; se reportaron daños en el puente de La Lumbre que comunica a Colima con Jalisco (Universidad de Colima, citado en Pérez 2011).

3.3 Experimento CODEX

3.3.1 Sistemas de monitoreo del experimento CODEX

En enero de 2006, el Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima y la Universidad de Alaska Fairbanks, como parte del experimento CODEX (Colima Volcano Deep Seismic Experiment), colocaron veinte sismómetros de banda ancha, distribuidos alrededor del Volcán de Colima y programados para estar en campo durante veinticuatro meses (figura 13).

Durante este periodo, en conjunto con la Red Sismológica de Colima RESCO, se registraron en tiempo real todas las señales sísmicas asociadas a eventos locales, regionales y telesísmicos, esto con el fin de caracterizar la sismicidad del Volcán de Colima, así como explorar su estructura profunda.

3.3.2 Especificaciones de las estaciones

La red CODEX se compuso por 20 estaciones equipadas con sensores Güralp CMG40T/ Quanterra Q330 DAS de PASSCAL.

El Güralp 40T es un sismómetro que consta de tres sensores en una caja sellada, que puede medir los componentes norte/sur, este/oeste y verticales del movimiento del suelo simultáneamente.

Las estaciones fueron colocadas en enero de 2006; el tiempo de despliegue programado fue de 24 meses, en el caso de la estación estudiada en este trabajo (EBMG), se instaló en enero del 2007 y fue programada para estar en campo durante un año.

El espaciado entre estaciones fue de 5-10 km, esto es más grande que la mayoría de los experimentos de imágenes volcánicas, lo que permitió un registro óptimo de eventos locales, regionales y telesísmicos.

Los datos se registraron a 100 Hz y se almacenaron localmente en emparadoras; los datos se descargaron aproximadamente cada 4 meses.

3.3.3 Ubicación de las estaciones

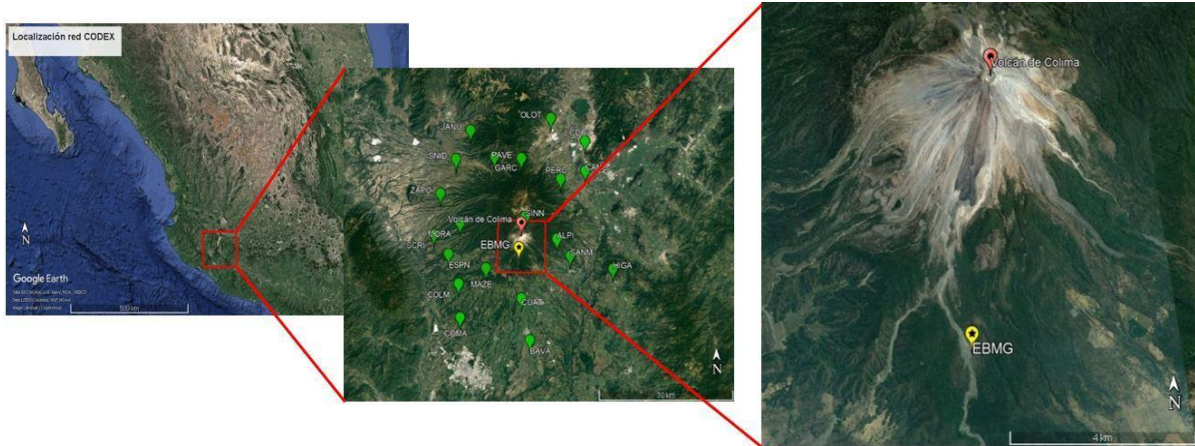


Figura 13: Localización de las estaciones que conformaron el experimento CODEX, se muestra en ícono amarillo la estación estudiada (EBMG), ubicada en barranca Montegrando (elaboración propia con datos obtenidos del experimento CODEX, usando la herramienta Google Earth 2020).

A pesar de que el objetivo del experimento no es el estudio de lahares, los registros se encuentran de manera libre en la plataforma IRIS, una organización conformada por más de 120 universidades estadounidenses que se dedican a la operación de instalaciones científicas para la adquisición, gestión y distribución de datos sísmológicos, estos se pueden descargar y tratar según el tipo de evento geológico que se estudia, tal es el caso de esta tesis, en el que se utilizan los datos sísmicos de la estación EBMG para analizar señales sísmicas correspondientes a lahares (West, M., 2006).

Aunque desde el 2007 se cuenta con sistemas de monitoreo sísmico de lahares en el Volcán de Colima (Dávila, 2007), fue hasta el 2011 que se implementaron dos estaciones de monitoreo visual en las barrancas La Lumbre y Montegrando. Ambas estaciones consisten de una torre de 12 m de altura con una antena direccional que transmite datos en tiempo real a las instalaciones de la RESCO, una videocámara que toma imágenes cada 2-4 segundos con una resolución de 70h74 x 480 pixeles,

un pluviómetro (HOBORG3) que toma registro cada 0.2 mm de lluvia, un sensor de humedad del suelo y un geófono de 10 Hz (Sercel) (Vázquez et al., 2016; Martínez, 2019).

Capítulo 4: Análisis sísmico

4.1 Análisis de señales sísmicas

En la actualidad, el conocimiento que se tiene sobre la estructura interna de la Tierra y en específico, sobre los procesos volcánicos, se ha adquirido mediante métodos geofísicos, puesto que una incursión dentro de un volcán es prácticamente imposible.

Uno de estos métodos consiste en el estudio de las ondas sísmicas, actividad de la que se encarga la sismología, al recopilar, caracterizar y estudiar los eventos volcánicos y sísmicos, utilizando las señales sísmicas adquiridas por instrumentos de medida especiales conocidos como sismógrafos.

Es de particular interés dentro de la sismología y la vulcanología, pues mediante el estudio de estas señales se pueden inferir conclusiones sobre los procesos que las originan, las técnicas a las que se recurren con el objetivo de realizar este estudio son denominadas procesamiento de señales o análisis de series temporales (Londoño, 2002).

4.2 Muestreo de señales y frecuencia de Nyquist

Para poder obtener una serie temporal a partir de una señal sísmica continua, ésta deberá ser discretizada, es decir, se toman muestras de la señal en intervalos regulares de tiempo, la frecuencia de estos intervalos se denomina frecuencia de muestreo. La frecuencia de muestreo (f_s) es de gran importancia, pues de ésta depende que la señal digitalizada pueda ser reconstruida posteriormente. El teorema de muestreo de Nyquist establece que, para que la reconstrucción de una

señal sea posible a través de sus muestras, esta señal debe de ser muestreada por lo menos al doble de la frecuencia más alta que contenga (Escobar, 2008).

Denotando la máxima frecuencia de la señal analógica a digitalizar como f_m , el teorema de muestreo requiere que:

$$f_s \geq 2f_m$$

4.3 Análisis de Fourier

El análisis de Fourier es una herramienta fundamental para la representación de una señal. La forma digital de una traza sísmica es una serie temporal que puede ser descrita mediante series de Fourier, que es una suma discreta de un número de sinusoides, cada uno con una única amplitud máxima, frecuencia y un desfase, las cuales al sumarse, van reconstruyendo la señal (Arias, 2016).

De forma más general, las funciones pueden ser representadas como una integral sobre un rango continuo de frecuencias angulares, a esta función se le conoce como transformada de Fourier.

En el mundo de la sismología, usamos la transformada de Fourier para, como su nombre lo dice, transformar una señal que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de la función (1). Eso significa que dividimos la señal y separamos el contenido de cada frecuencia entre sí. Al hacerlo, podemos analizar nuestra señal según el contenido de energía por frecuencia.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

donde t es el tiempo, i es la unidad imaginaria y ω es la frecuencia angular (Arias, 2016).

Sin embargo, la Transformada de Fourier se utiliza para señales que se asumen estacionarias, es decir, aquellas que permanecen constantes en sus parámetros

sobre tiempo, por lo que en este caso no podría ser utilizada, pues los procesos geológicos y en este caso, la señal sísmica que genera un lahar no es estacionaria.

Como en el procesamiento de señales sísmicas se trabaja con datos que contienen un número finito de muestras, únicamente se podría aplicar la TFTD (Transformada de Fourier en Tiempo Discreto) o la TFD (Transformada de Fourier Discreta), pero hay que considerar que para sintetizar una señal aperiódica se necesitaría un número infinito de sinusoides, lo que hace imposible el cálculo de la Transformada de Fourier en Tiempo Discreto para un algoritmo computacional, esto quiere decir que la herramienta usada en el análisis de señales digitales es la DFT, cuyo principio básico es el análisis de un segmento de datos que se extiende periódicamente.

Para una señal $x(n)$ la transformada discreta de Fourier cuya longitud es N puntos, la DFT está definida por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}$$

(Arias, 2016)

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, corresponde al índice del espectro discreto
 $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, el índice del tiempo discreto

4.4 Análisis Espectral

La recuperación de frecuencias de una señal es una técnica importante para la caracterización de la misma. En una zona volcánica se producen muchos tipos de señales, estas pueden ser reconocidas a través de la descomposición en sus frecuencias constitutivas mediante la transformada de Fourier.

Para visualizar la evolución temporal del contenido de frecuencias de una señal y determinar sus características principales, se utilizan representaciones en el

dominio del tiempo y la frecuencia, como son los espectrogramas y periodogramas (Arias, 2016).

Los espectrogramas son representaciones gráficas que permiten observar la evolución temporal del contenido de frecuencias de una señal.

Los periodogramas son funciones que nos permiten identificar las frecuencias dominantes de una serie temporal, también es un método que sirve para estimar densidades espectrales de potencia.

El procedimiento para obtener estas representaciones gráficas se realiza a través del cálculo del espectro de las señales mediante la Transformada Rápida de Fourier FFT (Fast Fourier Transform), que es un algoritmo que calcula la DFT, reduciendo el número de operaciones aritméticas.

4.5 Método de Welch

Las señales sísmicas asociadas a lahares representan un proceso estocástico, por lo que parte de su contenido corresponde a ruido, para deshacernos del ruido (tanto como sea posible) tenemos que hacer algún tipo de promediado y esto es precisamente lo que el método de Welch hace (Cohen, 2019), se describe en los siguientes párrafos.

El periodograma de Welch, es un método que nos permite identificar las frecuencias dominantes de una señal y estimar densidades espectrales de potencia.

Sobre dos segmentos de datos sucesivos se toma un desplazamiento de D puntos. Cada segmento consta de N puntos de longitud, en donde la i -ésima secuencia viene dada por la expresión:

$$x_i(n) = x(n + iD); n = 0, 1, \dots, N - 1$$

El traslapamiento entre dos segmentos consecutivos $x_i(n)$ y $x_{i+1}(n)$ es de $N - D$ puntos. Si se permite un traslape del 50%, como es el propuesto por Welch, el número de secciones K de longitud L es:

$$x_i(n)K = 2N/L - 1$$

De esta forma se mantiene la resolución comparado con el método sin traslape ya que la longitud de la secuencia no varía. Además al doblar el número de periodogramas que van a promediarse se reduce la varianza. El espectro final se toma del promedio de los diferentes espectros obtenidos sobre los segmentos. Al tomar un segmento pequeño (es decir, reducir N) se aumenta el número de segmentos para promediar y por tanto se aumenta el suavizado en el espectro estimado (Echeverry, D., Guarnizo, C., Orozco, A. 2007).

4.6 Señales sísmicas de lahares

A lo largo de la historia numerosas catástrofes naturales han sido responsables de grandes pérdidas económicas y vidas humanas, los eventos volcánicos se incluyen dentro de estas catástrofes siendo de gran relevancia pues la amenaza volcánica no se limita únicamente a los fenómenos generados directamente de esta actividad, como los flujos de lava, sino también a los procesos secundarios derivados, como los lahares.

Los lahares han sido catalogados como eventos de alta peligrosidad, pues se consideran responsables del 15% de la mortalidad humana ocasionada por catástrofes naturales entre los siglos XVII Y XIX, llegando incluso a aumentar a un 40% (Lavigne, F., et al. 2000). Por lo tanto, el reconocimiento de estos en tiempo real es importante para la reducción del riesgo volcánico.

Una de las técnicas para el monitoreo de volcanes es el seguimiento de la actividad sísmica, por lo que el estudio de señales sísmicas cerca de un volcán resulta relevante para este tipo de supervisión.

Los flujos piroclásticos y los desprendimientos de rocas son comunes tanto para eventos explosivos como para actividad efusiva en volcanes andesíticos y dacíticos, estos eventos generan señales sísmicas (Zobin et al, 2002) que contienen frecuencias de entre 1 y 10 Hz y difieren entre ellos solo en su duraciones y / o amplitudes (Vázquez et al, 2016).

De la misma forma, cuando un lahar ocurre genera señales sísmicas, en ocasiones éstas son visualmente similares a las producidas por tremores volcánicos con la diferencia de que la señal que proviene de un lahar es más fuerte cerca del canal de flujo, mientras que la señal del tremor es más fuerte cerca del respiradero volcánico (fisura en la corteza terrestre por donde gases, rocas fundidas y lava emergen, en general sin actividad explosiva, puede encontrarse en la cima y en los flancos del volcán) (Mcnutt, 2005).

La señal sísmica producida por un lahar, puede diferenciarse de la señal sísmica producida por otros eventos superficiales como flujos piroclásticos, por su duración, que va de decenas de minutos hasta horas y por sus velocidades más bajas (figura 14), además, en el análisis espectral muestra un contenido de frecuencias más altas (6-10Hz, hasta 100 Hz en algunos casos) (Thompson, 2015).

Vázquez et al. (2016) analizaron tres lahares en la barranca Montegrande disparados al inicio de la temporada de lluvias, en estos se observa que el rango de frecuencias característico del frente y cuerpo de los flujos de escombros es de 10-30 Hz y para las partes diluidas o cola (flujo hiperconcentrado), de 30-50 Hz.

Capra et al (2018) caracterizaron flujos hiperconcentrados en la barranca la Lumbre. Se observó que la energía sísmica se encuentra distribuida en el rango de 10-110 Hz donde resaltan picos en ~40 y ~70 Hz, conforme el flujo evoluciona a un régimen más diluido, la amplitud se reduce.

Observaron también, una relación directa entre la amplitud de la señal y la concentración de sedimentos. Un rango de frecuencia de 70 Hz asociado al

transporte por arrastre del sedimento en la base del canal y frecuencias entre 30-40 Hz para la porción más turbulenta y diluida del flujo.

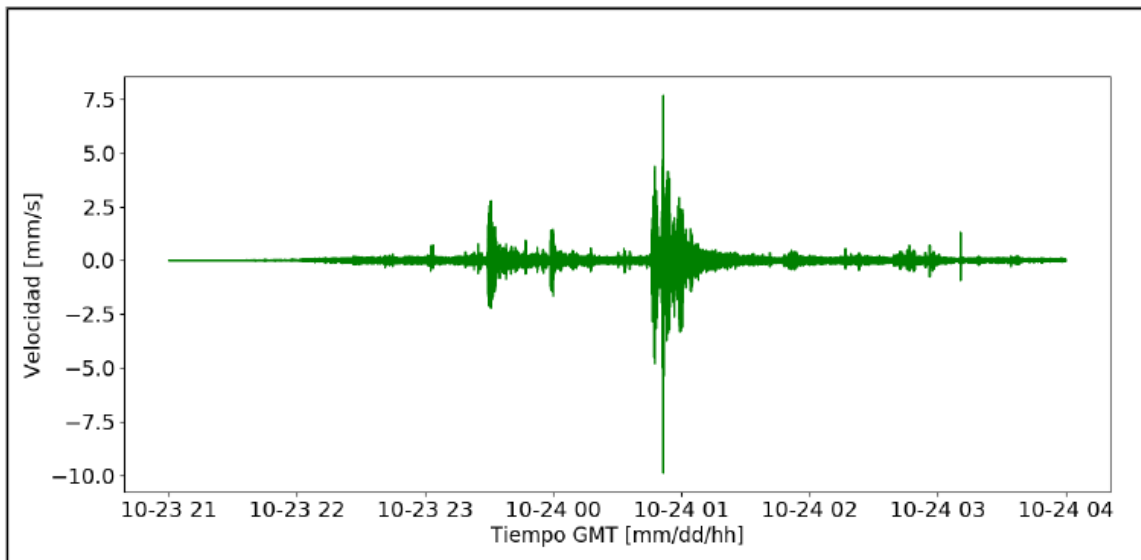


Figura 14: Forma de onda de lahar registrado en octubre del 2015, destaca su larga duración (Tomado de Martínez, 2019).

Capítulo 5. Metodología

5.1 Lahares en el Volcán de Colima en 2007 en la barranca Montegrande.

A partir de trabajos previos (Gavilanes, 2004; Dávila, 2007; Vázquez et al, 2016; Capra et al., 2018), se sabe que la Barranca Montegrande es uno de los canales más activos en cuanto a la generación de lahares en el Volcán de Colima, otras barrancas igualmente activas son La Lumbre, Montegrande-San Antonio, Zarco y Arena, en estas barrancas se ha identificado la ocurrencia de lahares durante la temporada de lluvias, los cuales llegan a recorrer distancias de hasta 15 km, provocando daños a la infraestructura civil, como puentes y torres de electricidad.

Como se ha mencionado en el capítulo tres, es común que durante la temporada de lluvias se presente la mayor cantidad de eventos, siguiendo esta idea, se revisaron los datos de precipitación recabados por CONAGUA en el estado de Colima en el año 2007 (figura 15) y se seleccionaron los meses en donde se presenta la mayor cantidad de lluvia. Los meses con mayor precipitación, fueron de junio a octubre, por lo tanto la búsqueda de señales de lahares se concentró en estos meses.

2007 PRECIPITACIÓN A NIVEL NACIONAL Y POR ENTIDAD FEDERATIVA													
ENTIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
AGUASCALIENTES	17.2	16.2	0.0	1.3	9.3	247.5	161.7	57.6	56.6	11.5	2.9	0.4	582.2
BAJA CALIFORNIA	12.8	28.6	3.4	5.6	0.6	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2	31.2	21.6	105.5
BAJA CALIFORNIA SUR	6.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	82.2	49.4	122.3	48.0	0.0	1.4	310.0
CAMPECHE	76.3	88.3	9.6	16.9	23.9	112.9	119.7	325.1	221.5	276.4	26.9	9.6	1,307.1
COAHUILA	47.1	1.2	28.9	21.8	97.7	85.5	132.4	25.9	60.0	4.2	16.8	0.8	522.3
COLIMA	14.1	0.3	0.0	0.0	0.0	69.9	273.7	329.8	203.8	121.7	3.2	12.6	1,029.1
CHIAPAS	104.0	31.6	33.4	58.5	148.0	256.6	279.3	459.1	368.3	503.2	41.4	19.2	2,302.6
CHIHUAHUA	58.4	0.2	3.4	0.5	11.8	47.3	117.2	120.5	75.0	14.0	15.6	32.6	496.5
DISTRITO FEDERAL	5.2	21.9	18.9	22.8	58.5	98.8	191.0	196.9	193.7	50.9	6.6	1.3	866.5
DURANGO	10.3	0.0	0.0	0.2	2.8	107.5	138.5	67.6	83.8	12.7	4.0	2.2	429.6
GUANAJUATO	11.5	22.8	2.4	8.8	22.4	180.9	258.2	137.6	120.9	21.0	10.0	2.2	798.7
GUERRERO	1.0	0.9	0.2	16.4	41.9	132.6	242.4	416.3	194.9	140.3	2.0	4.3	1,193.2
HIDALGO	9.4	48.8	20.1	33.5	44.8	94.1	127.5	241.1	137.7	94.4	30.3	9.5	891.2
JALISCO	17.5	7.9	0.1	1.9	2.6	191.9	242.5	171.5	153.5	37.0	6.9	3.2	836.5
ESTADO DE MÉXICO	5.0	13.3	17.0	28.5	55.7	125.0	206.8	184.3	163.9	65.9	8.8	2.1	876.3
MICHOACÁN	11.5	12.4	3.8	7.4	19.6	136.0	188.5	235.1	151.5	40.8	9.0	8.4	824.0
MORELOS	2.6	2.4	1.5	5.3	37.5	190.2	188.3	175.5	119.8	48.9	0.9	0.7	773.6
NAYARIT	21.0	1.4	0.0	0.0	0.1	121.3	296.3	370.1	192.5	48.9	3.4	0.0	1,055.0
NUEVO LEÓN	28.1	16.0	7.6	43.9	130.3	103.3	114.6	122.1	105.2	15.8	10.8	0.8	698.5
OAXACA	9.0	26.6	8.1	29.4	52.3	125.0	267.6	306.1	190.0	115.3	17.5	8.3	1,155.2
PUEBLA	18.9	44.4	21.9	49.6	75.0	130.8	190.5	365.2	310.4	131.5	46.4	25.5	1,410.1
QUERÉTARO	1.6	20.5	7.2	39.9	25.8	127.8	187.4	100.9	86.5	29.9	10.7	1.0	639.2
QUINTANA ROO	64.4	102.8	24.1	13.7	117.0	94.8	39.1	198.9	107.0	189.5	99.3	42.7	1,093.3
SAN LUIS POTOSÍ	15.3	61.9	16.1	50.6	70.3	163.1	182.3	336.9	233.1	66.7	22.1	4.3	1,222.7
SINALOA	22.5	0.3	0.1	0.0	0.0	39.2	146.8	192.5	171.3	16.0	18.2	31.7	638.6
SONORA	26.6	0.2	5.0	0.3	0.5	12.4	103.8	88.9	157.0	1.1	28.2	20.5	444.5
TABASCO	363.9	127.3	55.8	31.3	29.0	87.5	105.5	469.2	313.7	802.5	109.0	59.4	2,554.1
TAMAULIPAS	38.3	37.1	21.9	32.2	71.0	135.9	236.2	219.3	149.3	35.1	22.8	3.3	1,002.4
TLAXCALA	9.6	18.1	6.9	38.7	76.9	112.1	135.3	139.9	102.7	23.8	7.6	5.6	677.2
VERACRUZ	53.8	73.9	18.5	41.7	40.3	105.5	131.6	346.1	304.2	226.2	105.9	54.9	1,502.6
YUCATÁN	28.4	73.9	26.2	12.2	88.0	76.7	102.3	208.9	211.0	136.8	20.4	6.6	991.4
ZACATECAS	19.0	3.4	0.2	2.2	3.1	175.7	102.3	60.1	55.5	12.1	5.3	1.2	440.1
NACIONAL	36.0	21.2	10.2	16.0	38.8	96.4	149.7	179.4	146.2	79.3	23.9	15.1	812.2

Figura 15: Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa durante el año 2007, resalta Colima en amarillo, presentando las mayores precipitaciones de junio a diciembre (valores en mm). Recuperado de <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2007.pdf> el 12 de julio de 2019.

5.2 Análisis de señales sísmicas de lahares en el Volcán de Colima

El procesamiento de datos se llevó a cabo en el lenguaje de Python, usando *Jupyter Notebooks*, una aplicación web de código abierto para crear y compartir documentos con código, ecuaciones, gráficos y texto, el código se muestra en el apéndice B.

Como primer paso, se descargaron los datos sísmológicos correspondientes al año 2007 y a la estación *EBMG*, puesto que ya se tenían identificados los meses en los que ocurrió la mayor precipitación (junio-octubre), se analizaron día a día los registros sísmicos (figura 16) en busca de la señal típica de un lahar.

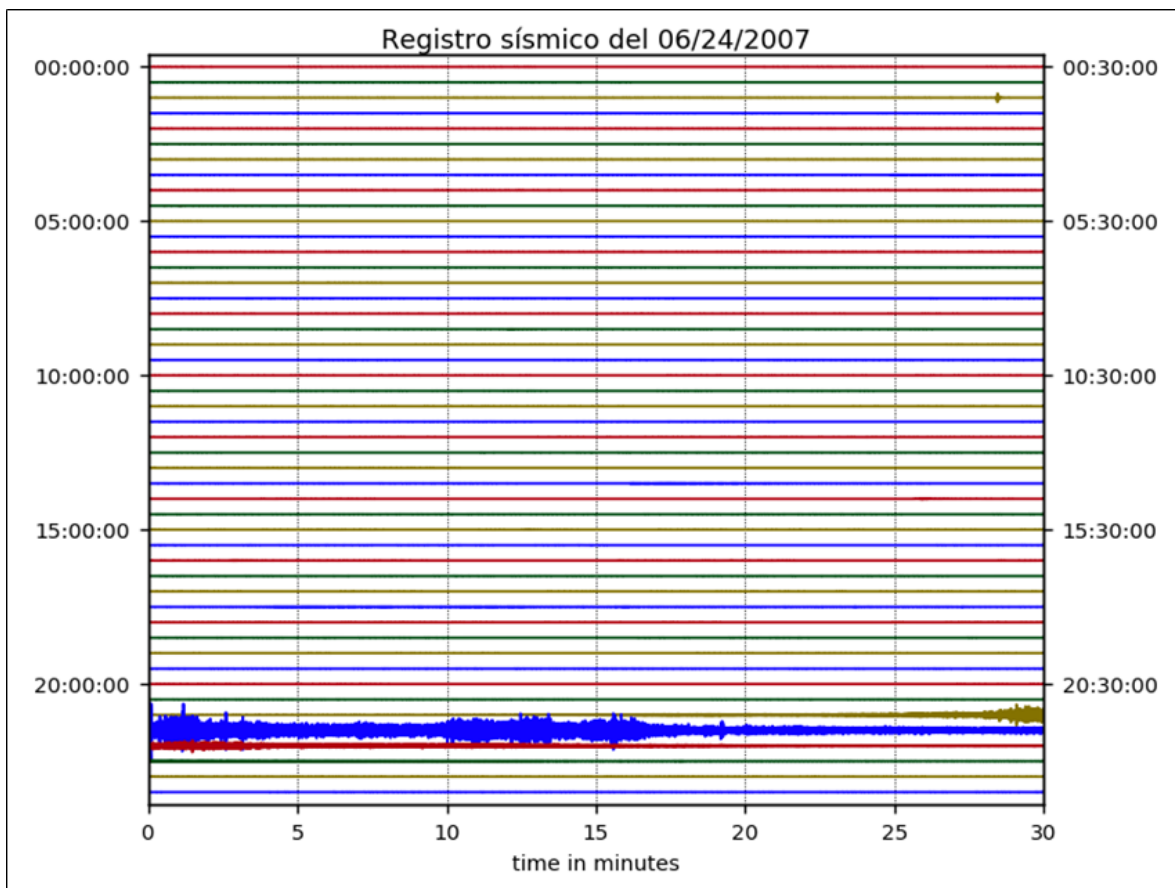


Figura 16: Registro sísmico del 24 de junio de 2007, estación EBMG, se observa una señal proveniente de un lahar entre las 21:00 horas y las 22:30 horas.

Se encontraron siete posibles eventos. Para una óptima visualización de la señal, se aplicó en el código la remoción del promedio y posible tendencia de la señal utilizando las funciones *rmean* y *rtrend*, respectivamente.

Posteriormente, se obtuvo la forma de onda del lahar de cada evento encontrado, así como el espectrograma de cada uno, se graficaron dentro de una misma figura (figura 17) con el objetivo de correlacionar los datos.

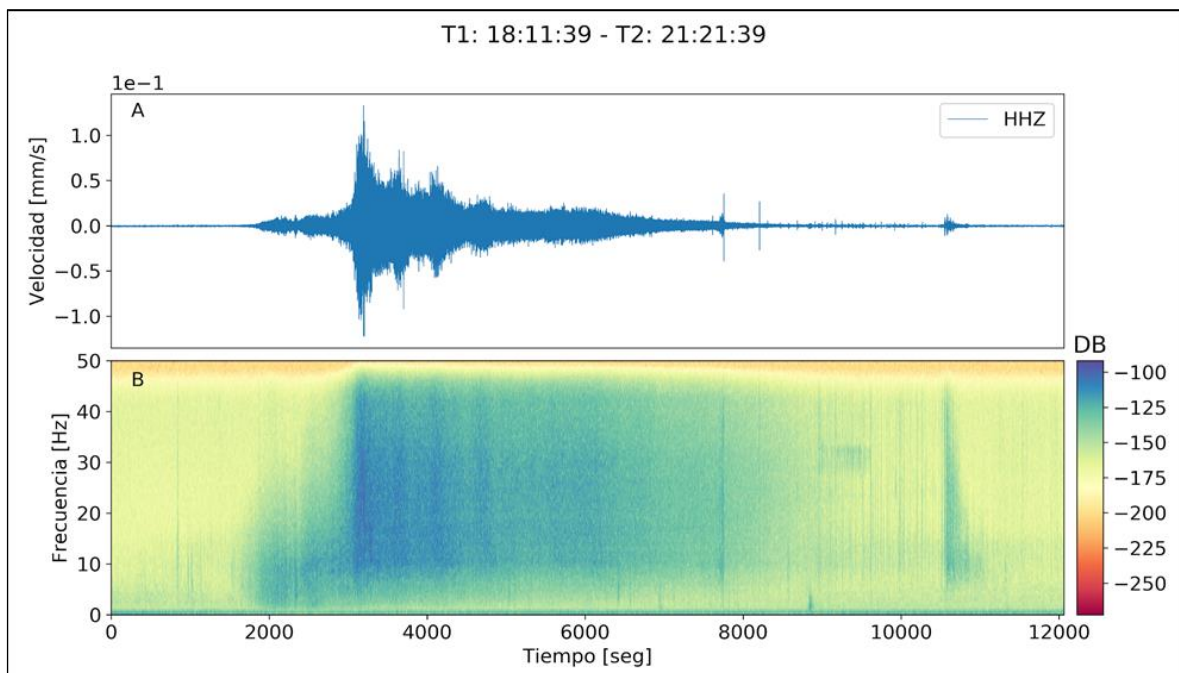


Figura 17: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 22 de junio de 2007.

Finalmente, como complemento al análisis sísmico y para observar el contenido frecuencial, se aplicó el método de superposición de Welch (figura 18), se utilizó un traslape del 50%, muestreo original de 100 mps y ventanas de 256 puntos.

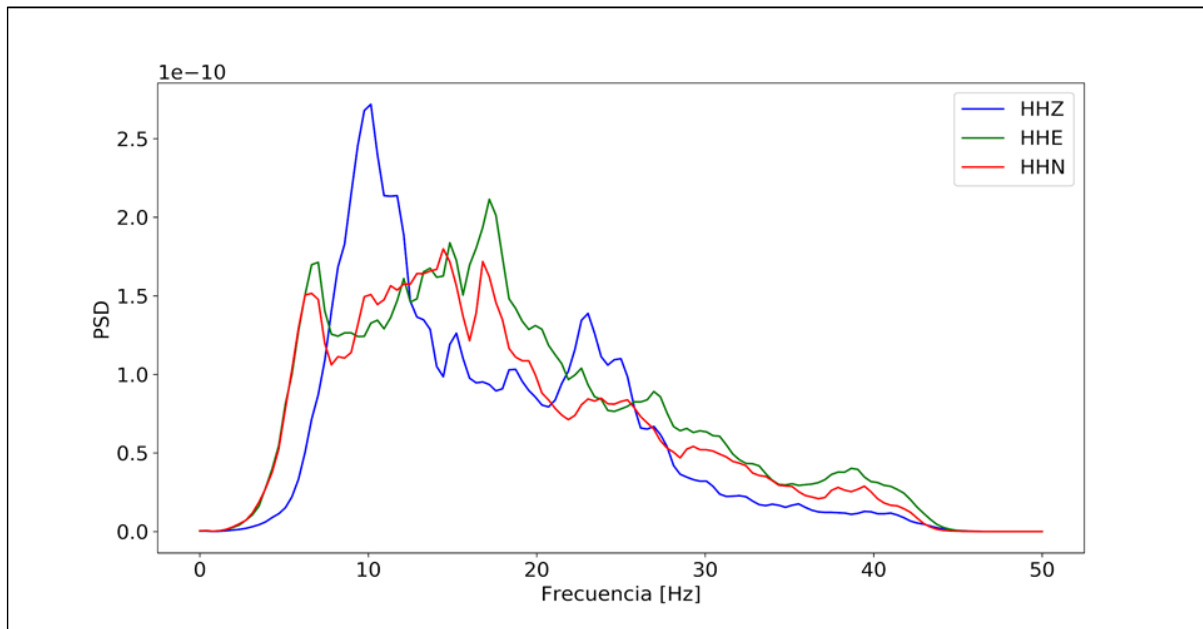


Figura 18: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch para el lahar registrado el 22 de junio de 2007.

Capítulo 6. Resultados

Durante el año 2007 se encontraron siete lahares registrados en la estación EBMG en el Volcán de Colima, estos ocurrieron entre junio y agosto, tres de los meses con mayor precipitación en el año, se muestra una tabla que reúne las características principales de cada uno, como frecuencia, amplitud máxima, duración, etc... (tabla 1).

Así mismo, se muestran las imágenes de la forma de onda, el espectrograma y el periodograma de Welch de dos de los eventos, correspondientes al 22 de junio (figuras 19 y 20) y al 26 de julio de 2007 (figuras 21 y 22), las imágenes de los eventos restantes se podrán consultar en el apéndice A.

Evento 1

El evento ocurrido el 22 de junio de 2007 tuvo una duración de 3:10 horas, la larga duración de éste, fue la principal característica que ayudó a determinar que se trataba de un lahar.

En la gráfica de la forma de onda de la figura 19 (gráfica A) se aprecian tres picos de amplitudes mayores, correspondientes a frentes enriquecidos en bloques.

La figura B, representa el espectrograma calculado, escala energética en dB/Hz.

Al correlacionar la gráfica A con la B (figura 19), es claro que los picos de la gráfica A, correspondientes a las mayores amplitudes, coinciden con las tonalidades azules del espectrograma, las cuales representan los intervalos más energéticos conforme se desarrolla el evento. Se observa que el rango de frecuencias característico va de ~10-50 Hz.

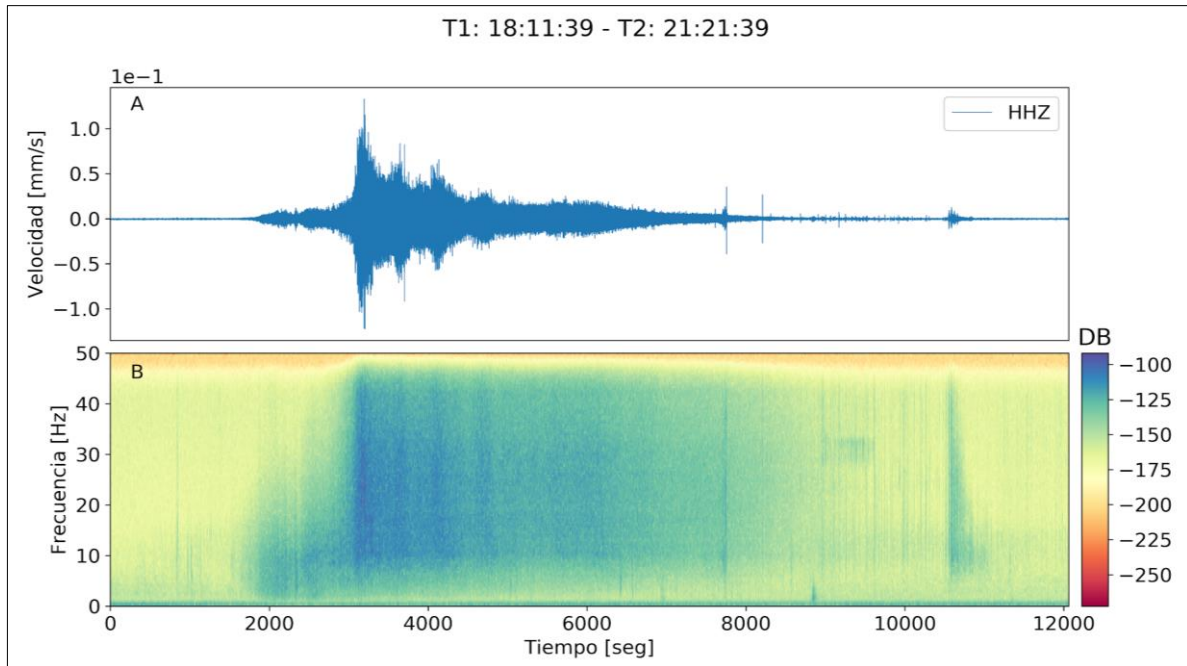


Figura 19: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 22 de junio de 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Destacan tres picos de amplitudes mayores (0.1 mm/s, 0.07 mm/s 0.05 mm/s), correspondientes a frentes enriquecidos en bloques.

Densidad Espectral de Potencia

En la figura 20, se observa cómo la potencia de la señal se distribuye con la frecuencia, la banda característica de frecuencias para el primer evento se encuentra entre ~10 y 30 Hz.

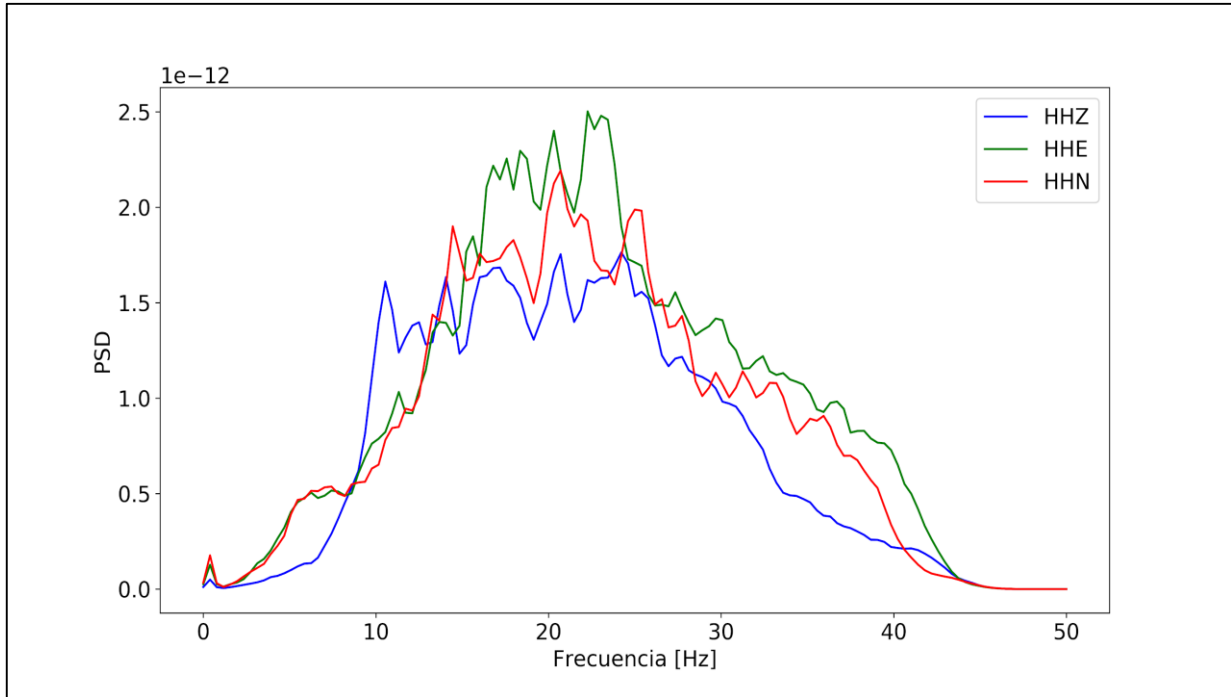


Figura 20: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch.

Evento 2

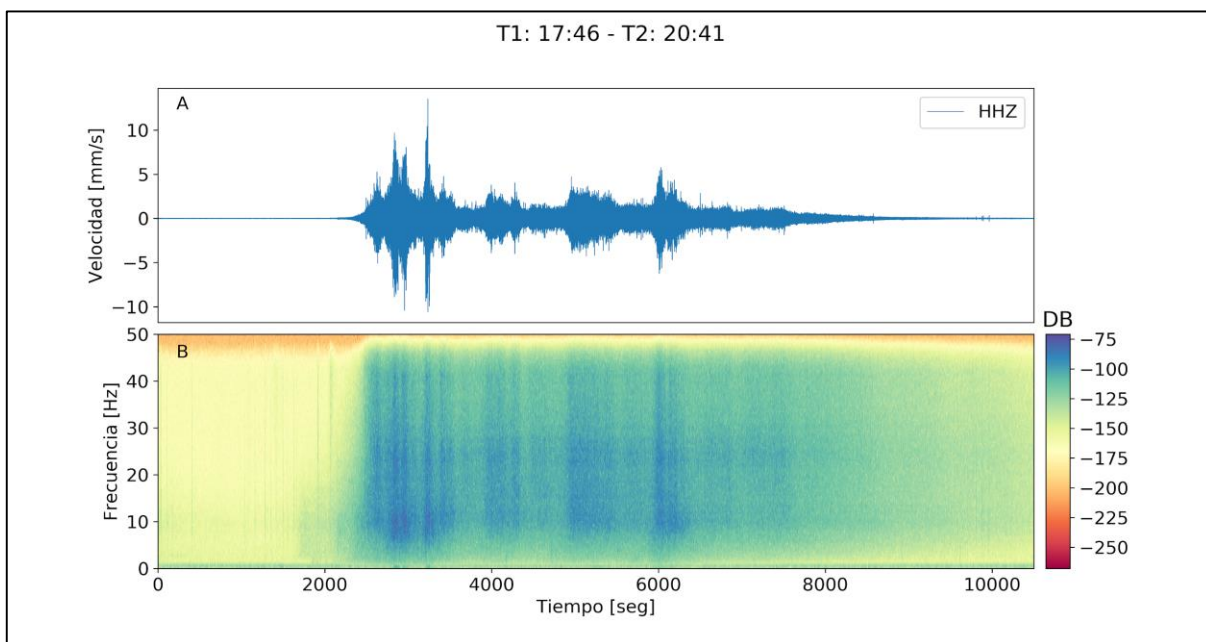


Figura 21: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 26 de julio de 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración de 2:55 horas. Destacan 5 picos de amplitudes mayores, correspondientes a frentes enriquecidos en bloques, los picos secundarios corresponden a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos.

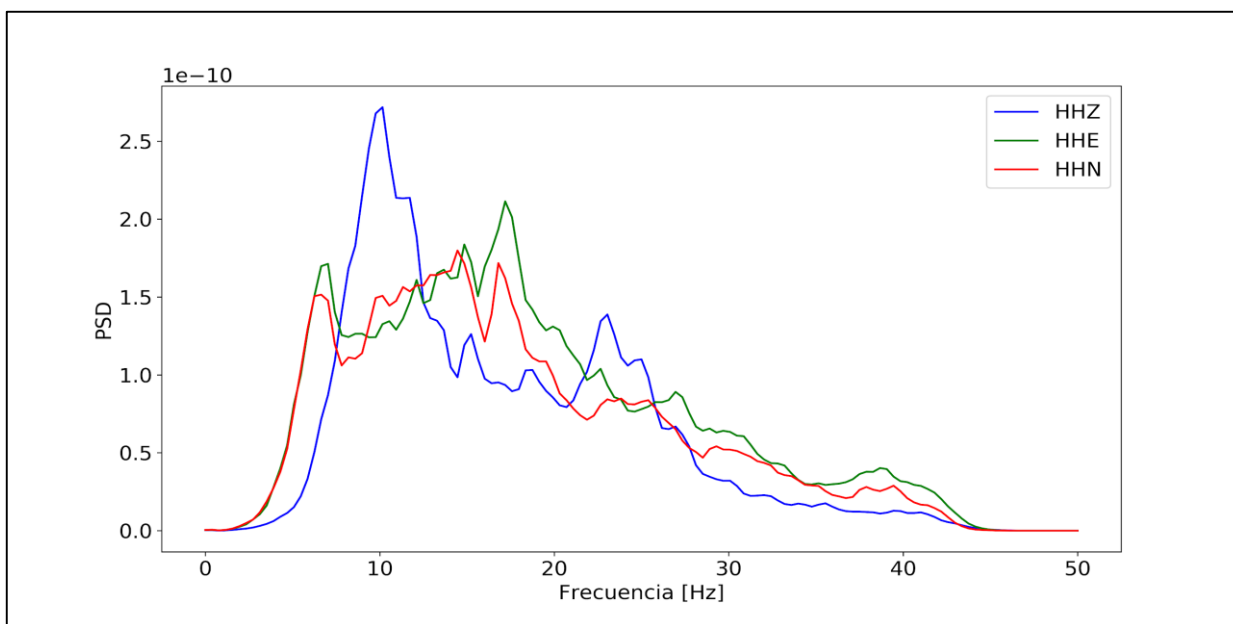


Figura 22: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch, para el lahar ocurrido el 26 de julio de 2007, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~ 5 y 25 Hz.

Tabla 1. Tabla de resultados

Evento (fecha)	Amplitud máxima (mm/s)	Hora de inicio y duración (horas)	Rango de frecuencia (Hz)	Precipitación media durante el mes de ocurrencia (mm)	Número de pulsos
22/06/2007	0.01	Hora inicial:18:11 Duración: 3:10	10-30	69.9	3
24/06/2007	10.0	Hora inicial: 20:58 Duración: 1:37	10-25	69.9	4
07/07/2007	0.20	Hora inicial: 00:16 Duración: 2:11	10-35	273.7	2
18/07/2007	1.0	Hora inicial: 8:51 Duración: 3:13	10-40	273.7	1
26/07/2007	10.0	Hora inicial:17:46 Duración:2:55	5-25	273.7	5
05/08/2007	0.4	Hora inicial: 21:05 Duración: 2:13	18-40	329.8	1
21/08/2007	3.0	Hora inicial:18:13 Duración:2:33	10-25	329.8	6

Capítulo 7: Conclusiones

A partir del trabajo de investigación descrito en esta tesis, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Durante el año 2007 en el Volcán de Colima, específicamente en la Barranca Montegrande, se encontraron siete eventos correspondientes a lahares, estos ocurrieron durante la temporada de lluvia, dos de ellos al inicio de la temporada, en junio, tres eventos en julio y los dos últimos en agosto, el mes con mayor precipitación del año.
 - Mediante el análisis de la forma de onda en el registro y a través del análisis espectral se definieron ciertas características para cada evento, se describen a continuación:
 - Duración: la duración promedio de estos eventos es de 2:33 horas, siendo el evento correspondiente al 22 de junio el de menor duración con 1:37 horas, y el de mayor duración corresponde al evento del 18 de junio, con 3:13 horas.
 - Frecuencia dominante: El rango de frecuencias característico para los diferentes eventos va desde 5 Hz y hasta 40 Hz, coincidiendo con lo reportado por Vázquez et. al, en 2016 para tres eventos registrados en la Barranca Montegrande.
 - Amplitud máxima: A lo largo de la forma de onda en el registro sísmico para cada evento, se observan picos máximos, estos pueden ser correlacionados con los frentes de flujo principales, las variaciones secundarias de amplitud corresponden a cambios en la descarga del flujo.
- Basándonos en la metodología que implementan Vázquez et al. (2016) para la clasificación de lahares en el Volcán de Colima, se realizó una clasificación para los eventos encontrados en esta tesis, se analizó la forma de onda para determinar si se trataba de eventos unipulso o multipulso:
- Cinco de los lahares ocurridos se clasificaron como eventos multipulso, pues la forma de onda de cada uno contiene más de un pico máximo, asociado a frentes enriquecidos en bloques, estos eventos corresponden al lahar del 22 de junio con tres picos máximos (0.1 mm/s, 0.05 mm/s y 0.03 mm/s, figura 18), al del 24 de junio con cuatro picos máximos (9 mm/s, 4 mm/s, 5 mm/s y 4 mm/s, figura 1 del apéndice A), al del 7 de julio con 2 picos máximos (ambos con 1 mm/s, figura 5, apéndice A), al de 26 de julio con 5 picos máximos (5 mm/s,

7 mm/s, 6 mm/s, 11 mm/s y 5 mm/s, figura 22) y al del 21 de agosto, con 6 picos máximos (figura 13, apéndice A).

- Los dos lahares restantes se clasificaron como unipulso, pues en la forma de onda se aprecia únicamente un frente enriquecido en bloques. En el evento del 18 de julio, la amplitud máxima del frente es de 1mm/s (figura 9, Apéndice A). El otro evento es el ocurrido el 5 de agosto, el pico máximo es de 0.4 mm/s (figura 9, apéndice A).
- Es importante mencionar que si bien la forma de onda y la frecuencia característica de cada evento nos proporcionan información relevante que nos ayuda a identificar si se trata de un evento multipulso o unipulso, para tener mayor certeza en cuanto a la clasificación, sería ideal contar con datos de lluvia diaria y registro visual.
- Se encontraron características similares entre ellos, por ejemplo: el rango de frecuencias dominantes en la mayoría de los eventos permaneció entre 10 y 40 Hz, de igual forma, la duración siempre fue mayor a 1:30 horas.
- Tomar similitudes entre cada evento como referencia, ayudará a definir umbrales que determinen cuando una señal sísmica se trate de un lahar para la detección temprana de lahares en el Volcán de Colima, esto se lograría mediante la implementación de un software que a través de un sismómetro permita recibir una alerta al registrar señales sísmicas con características definidas para un lahar.
- Sería importante realizar el mismo análisis para lahares ocurridos en otras barrancas del Volcán de Colima y en otros años, con el fin de determinar de manera más precisa las características de los lahares que ocurren ahí (pues aunque los lahares presentan similitudes, no son idénticos) y en consecuencia, una alerta igual de precisa. La misma idea se aplica para otros volcanes, sobre todo para aquellos que son activos y en los que existen poblaciones muy cercanas a ellos.

Apéndice A: Imágenes de señales sísmicas de lahares, espectrogramas y método de Welch.

Evento tres

Hora inicial: 20:58 horas.

Hora final: 22:41 horas.

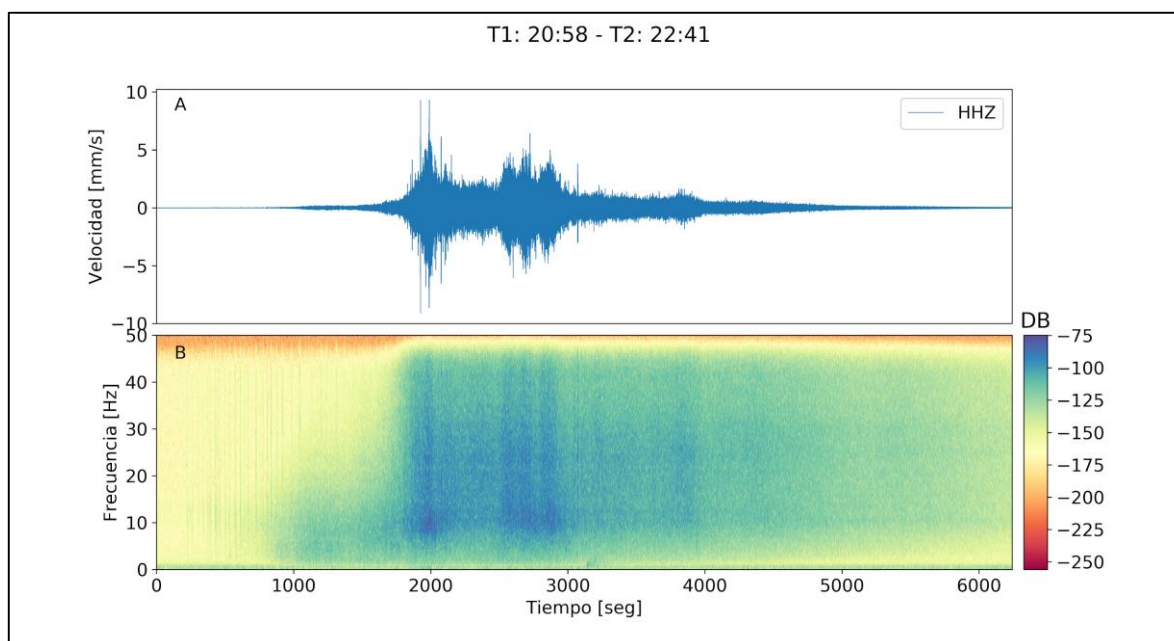


Figura A1: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 24 de junio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración 1:37 horas. Destacan 4 picos de amplitudes mayores, correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos. Componente Z.

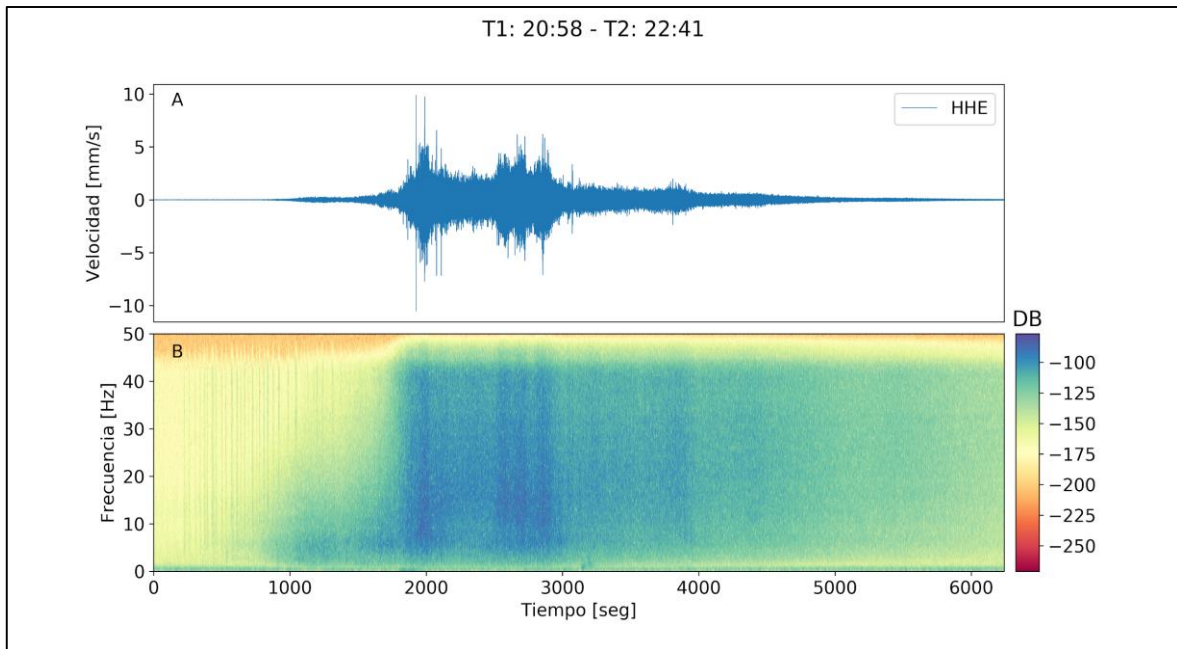


Figura A2: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 24 de junio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

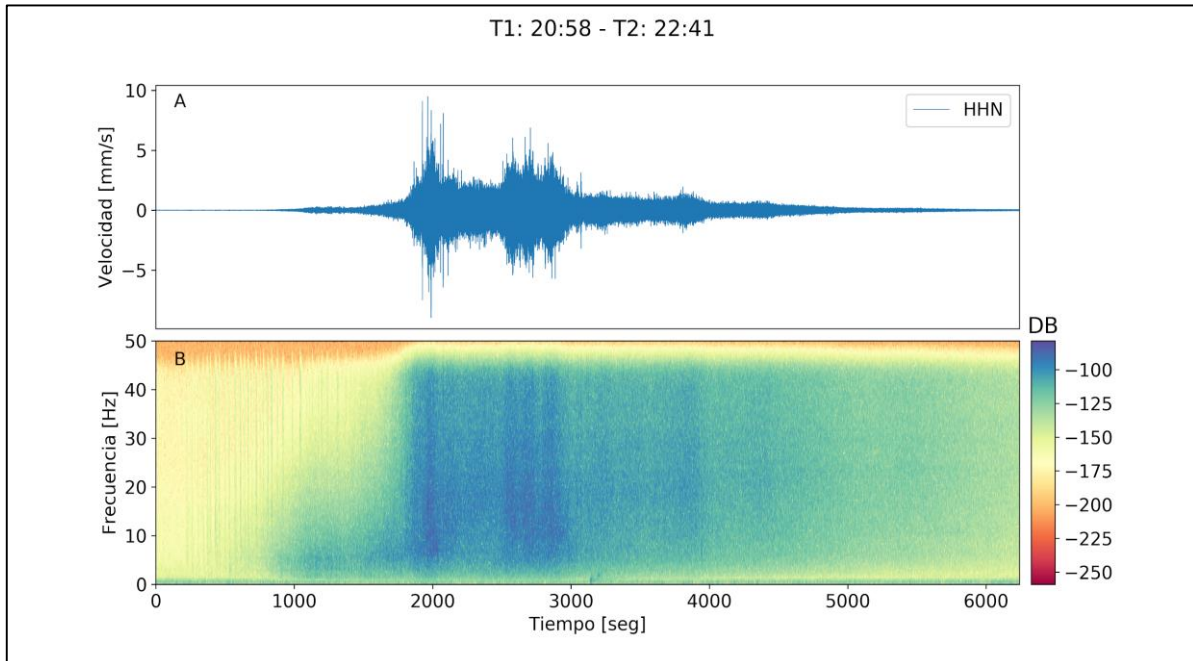


Figura A3: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 24 de junio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente N-S.

Método de Welch

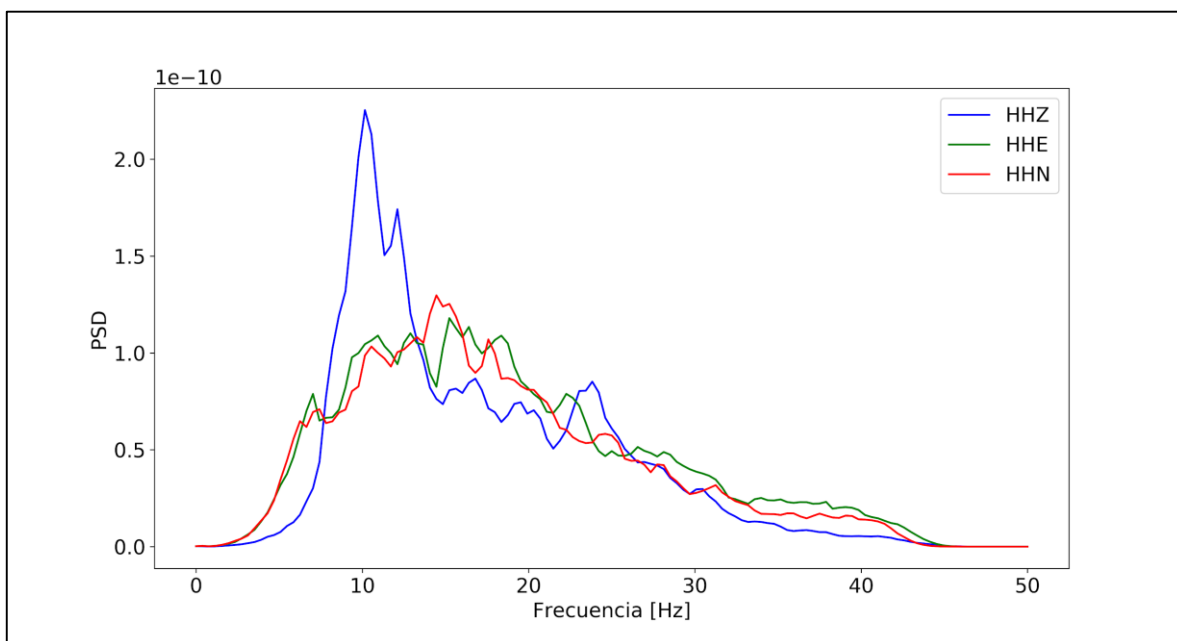


Figura A4: Densidad espectral de potencia calculada para el evento del 24 de junio de 2007 mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~ 10 y 25 Hz.

Evento cuatro

Hora inicial: 00:16 horas

Hora final: 02:27 horas

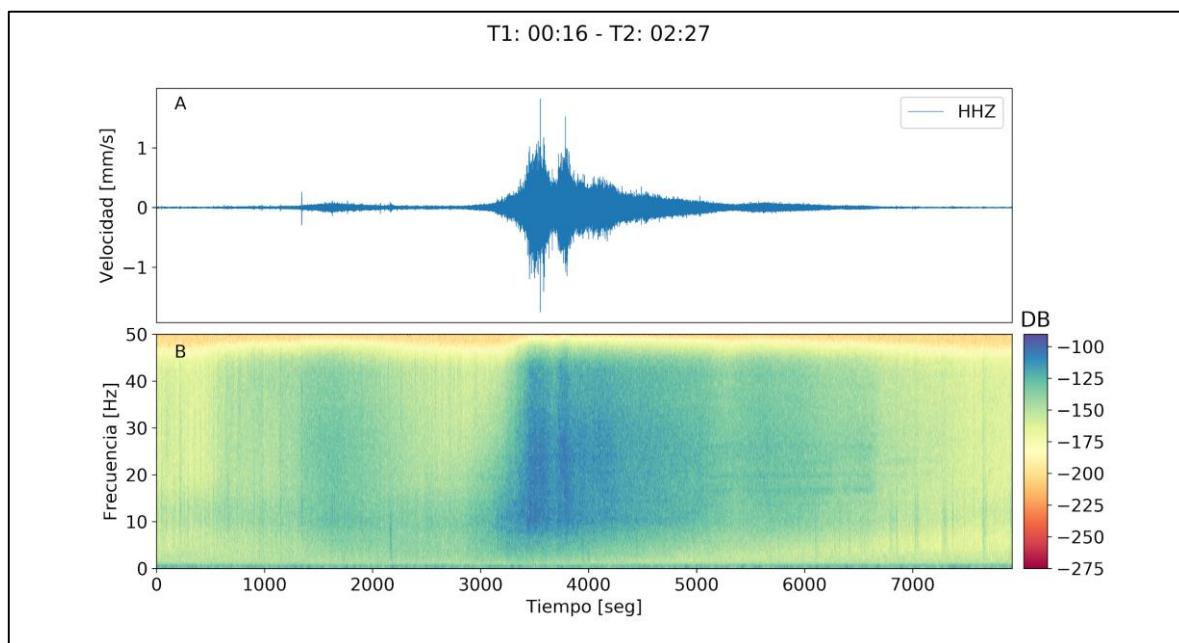


Figura A5: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 07 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración 2:11 horas. Destacan 2 picos de amplitudes mayores, correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos. Componente Z.

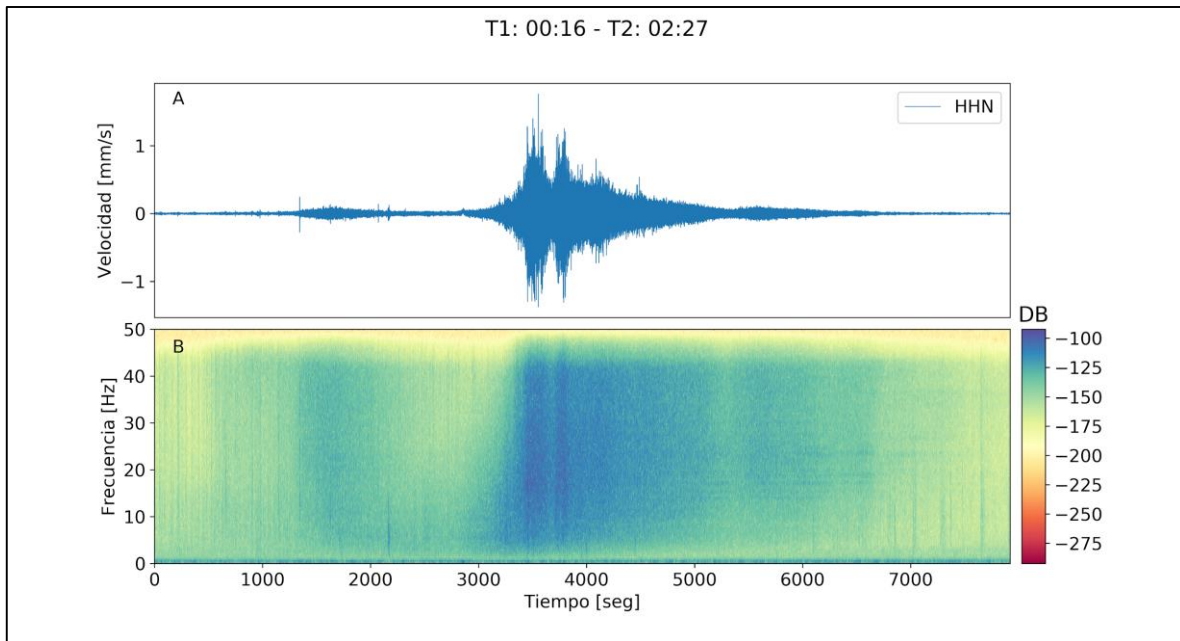


Figura A6: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 7 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente N-S.

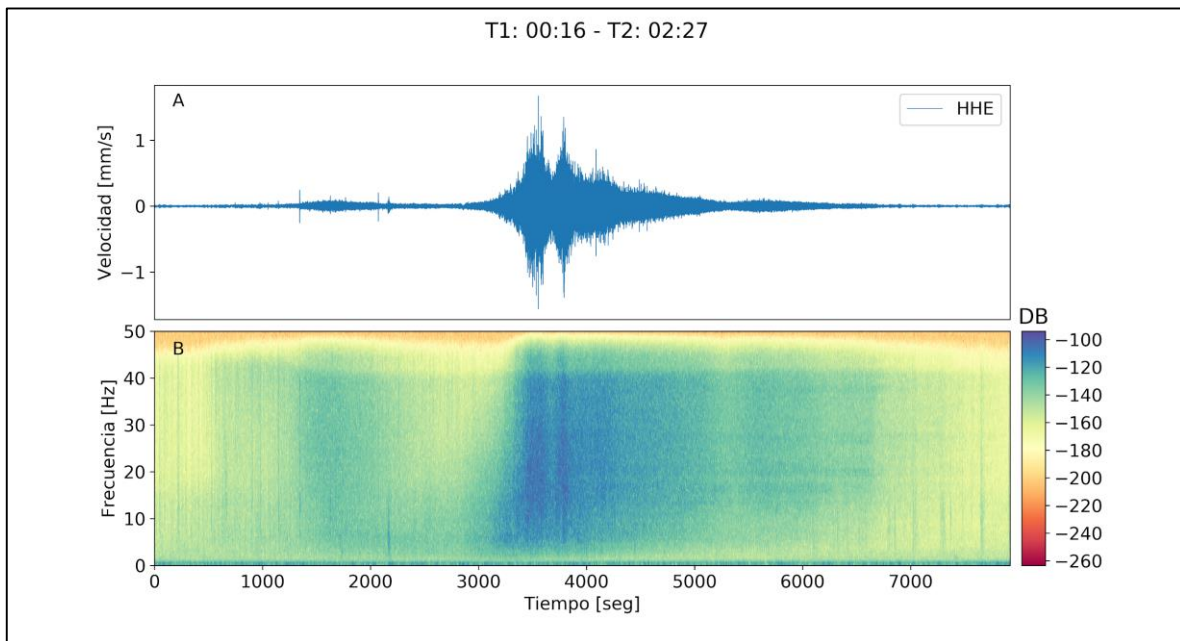


Figura A7: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 7 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

Método de Welch

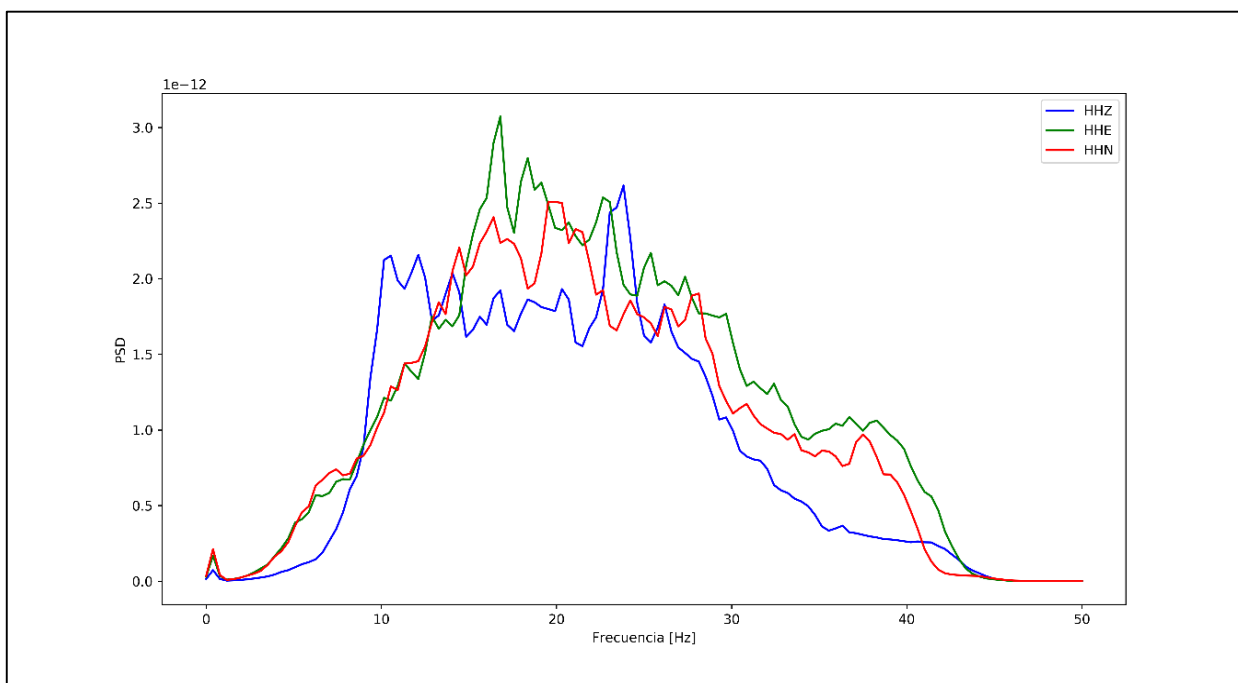


Figura A8: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~10 y 35 Hz.

Evento 5

Hora inicial: 08:51 horas

Hora final: 12:04 horas

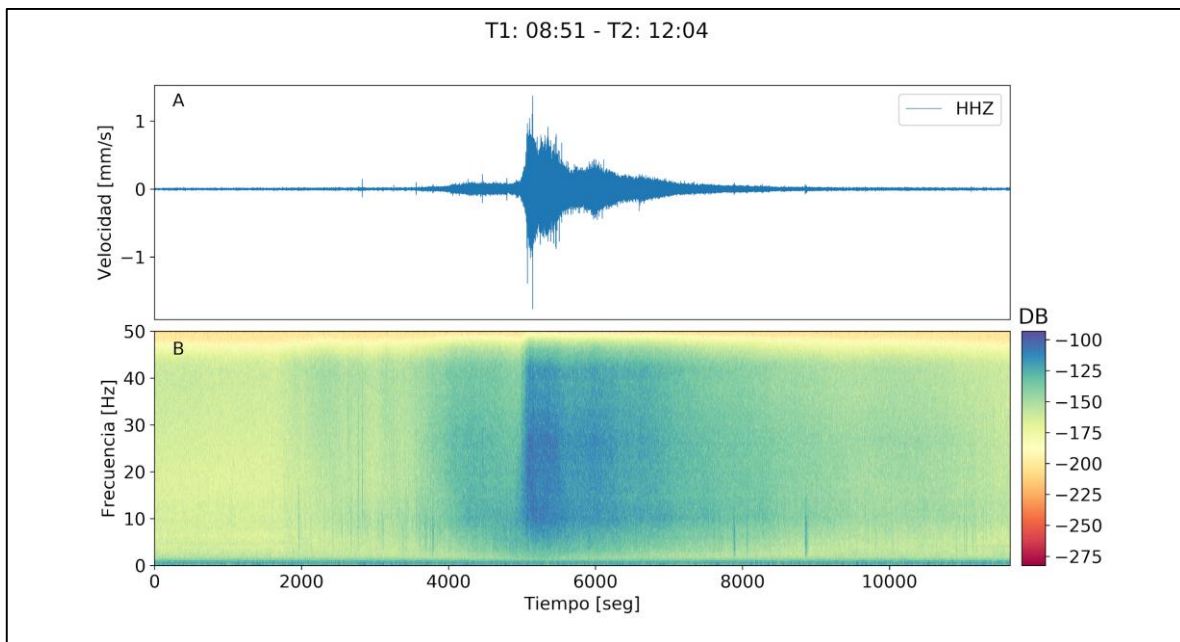


Figura A9: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 18 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración 3:13 horas. Destaca un pico de amplitud mayor, correspondiente al frente, seguido por oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos. Componente Z.

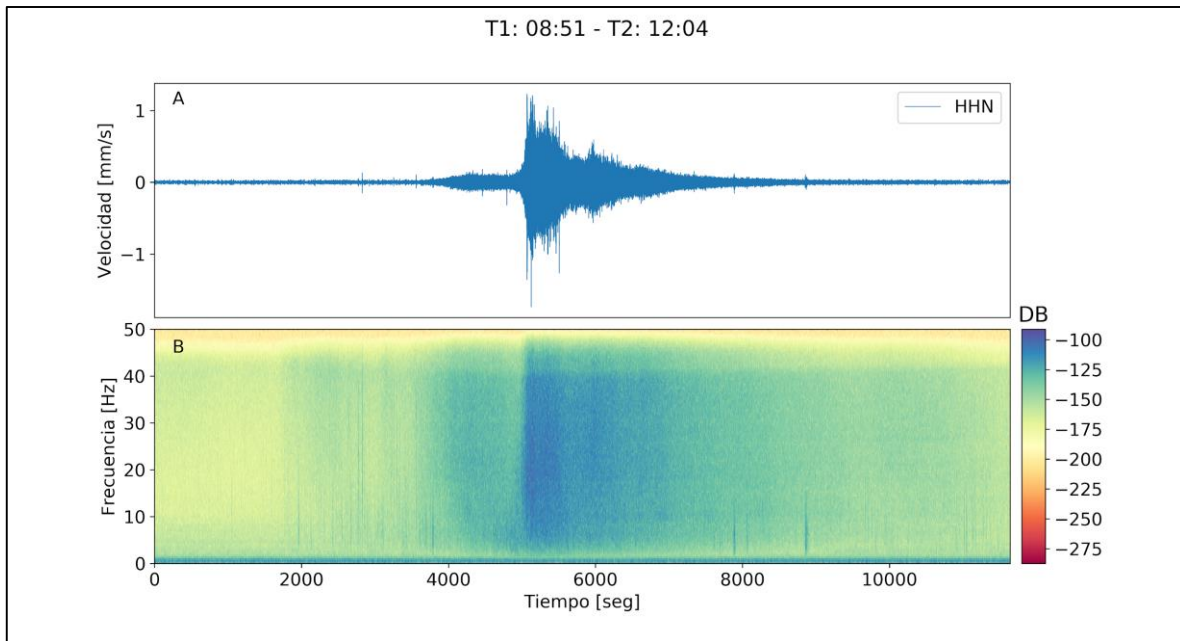


Figura A10: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 18 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente N-S.

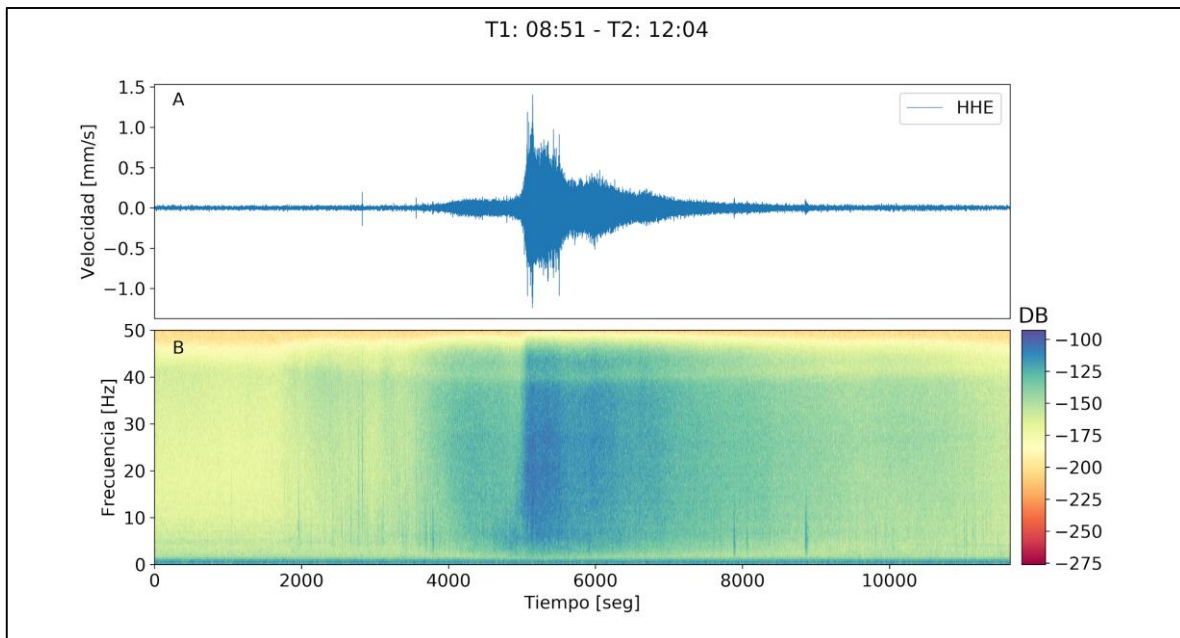


Figura A11: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 18 de julio del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

Método de Welch

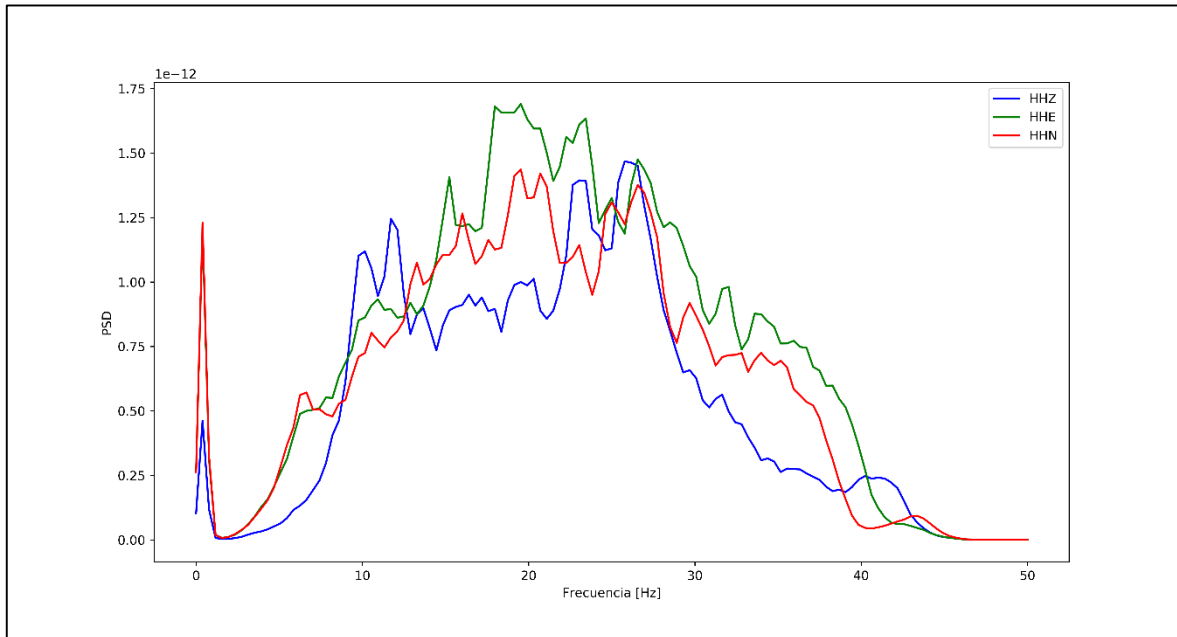


Figura A12: Densidad espectral de potencia calculada para el evento del 18 de julio de 2007 mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~ 10 Y 40 Hz.

Evento 6

Hora de inicio: 21:05 horas

Hora final: 23:18

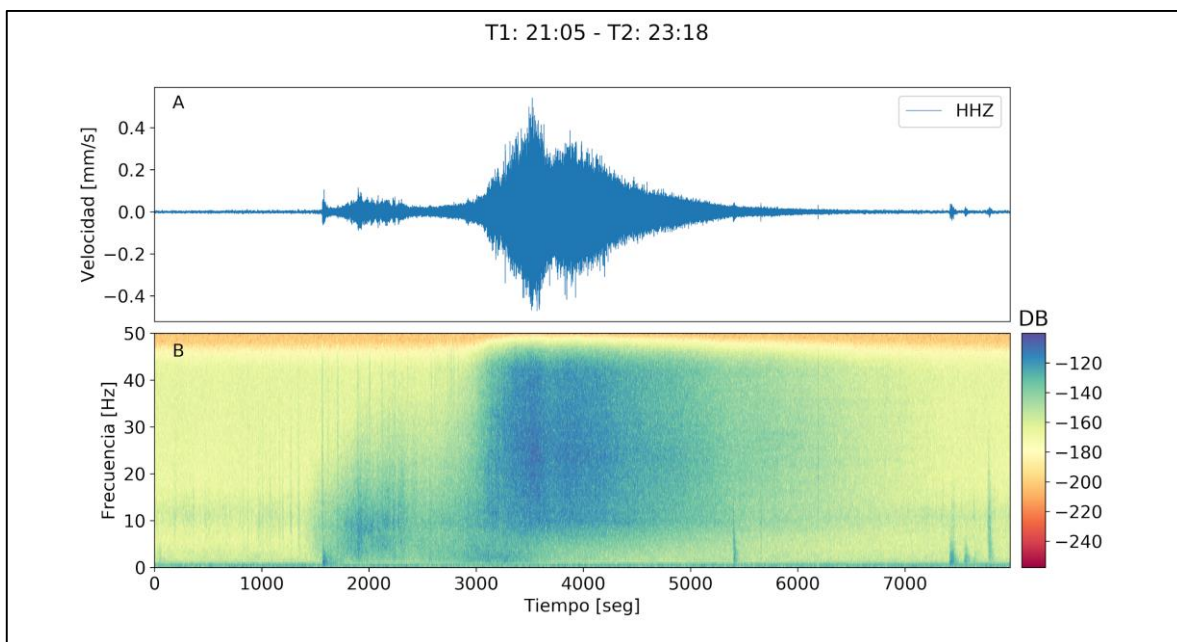


Figura A13: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 5 de agosto, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración 2:13 horas. Destaca un pico de amplitudes mayores, correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos. Componente Z.

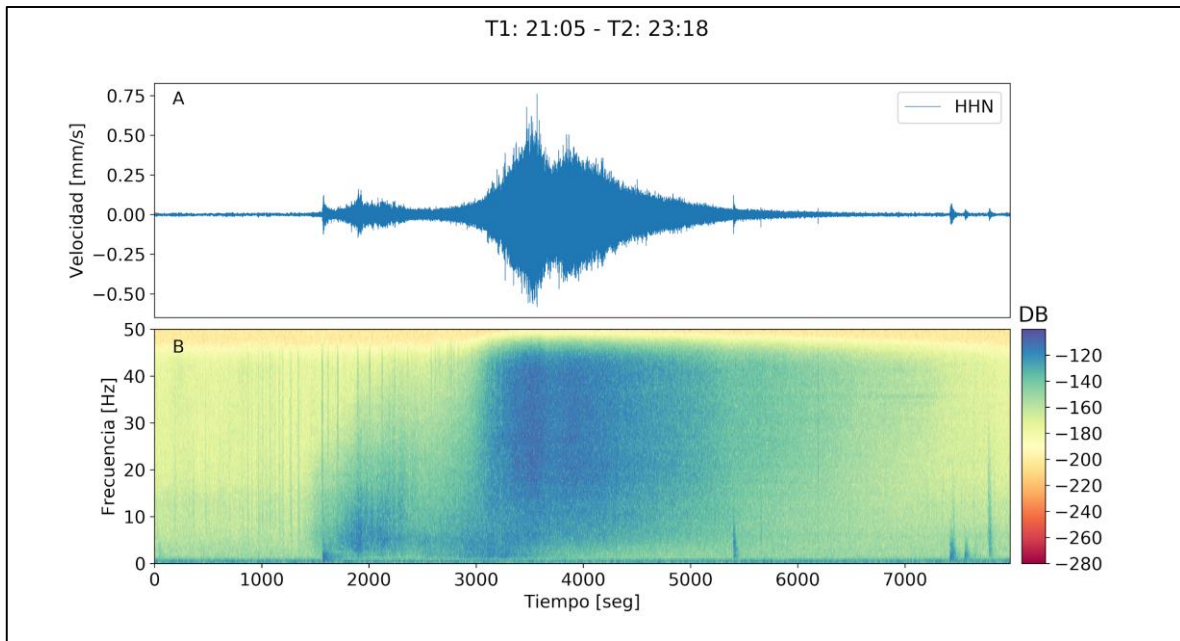


Figura A14: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 5 de agosto 18 del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente N-S.

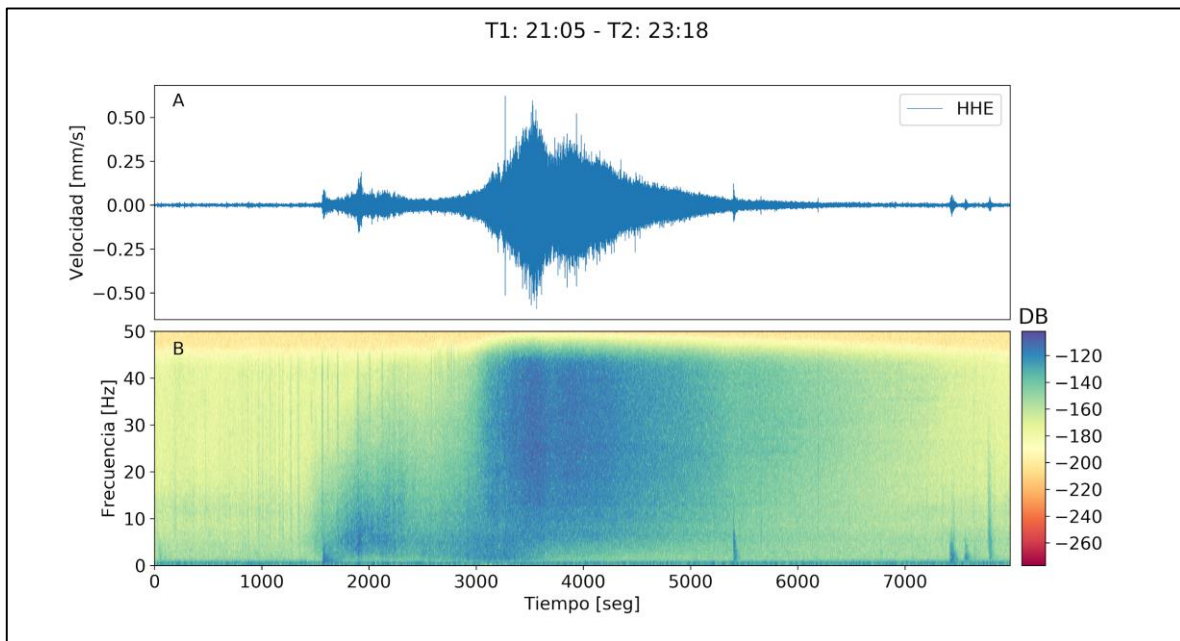


Figura A15: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 5 de agosto 18 del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

Método de Welch

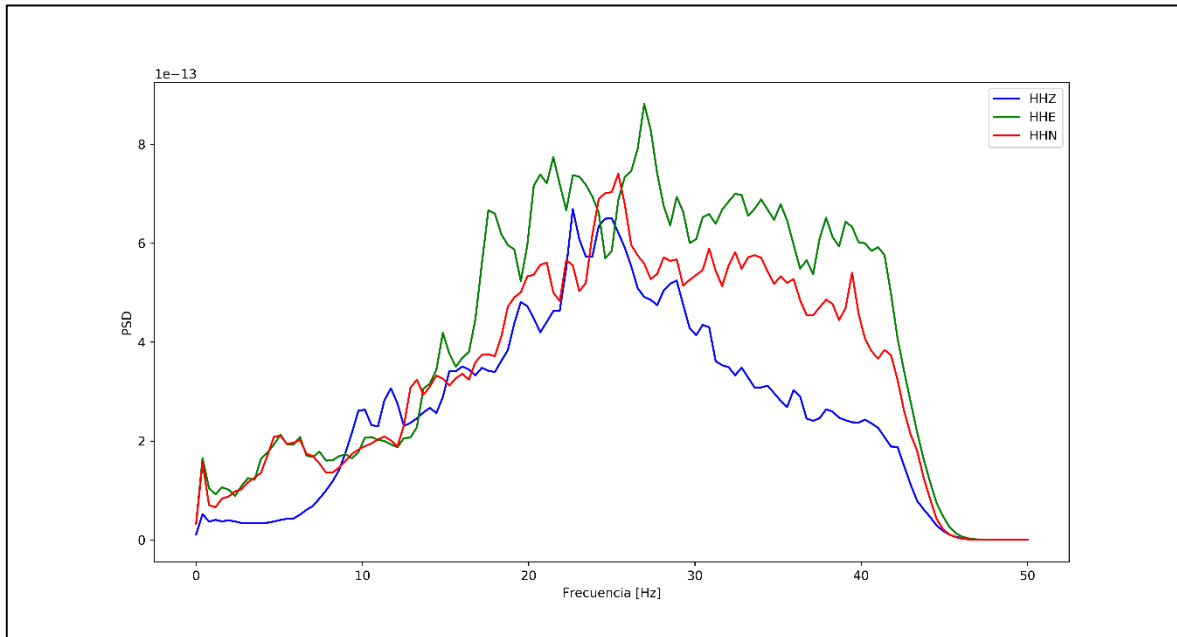


Figura A16: Densidad espectral de potencia calculada para el evento del 5 de agosto del 2007 mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~ 18 Y 40 Hz.

Evento 7

Hora inicial: 18:13 horas

Hora final: 20:46 horas

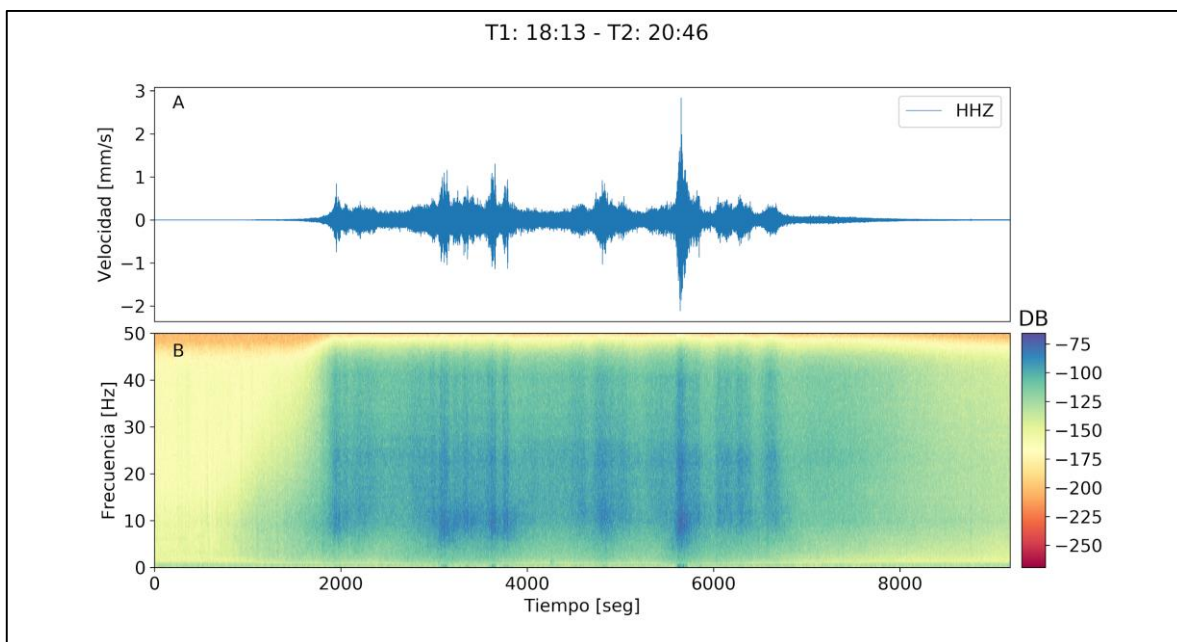


Figura A17: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 21 de agosto, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Evento con duración 2:13 horas. Destacan 6 picos de amplitudes mayores, correspondientes a oleadas, comportamiento típico de este tipo de flujos. Componente Z.

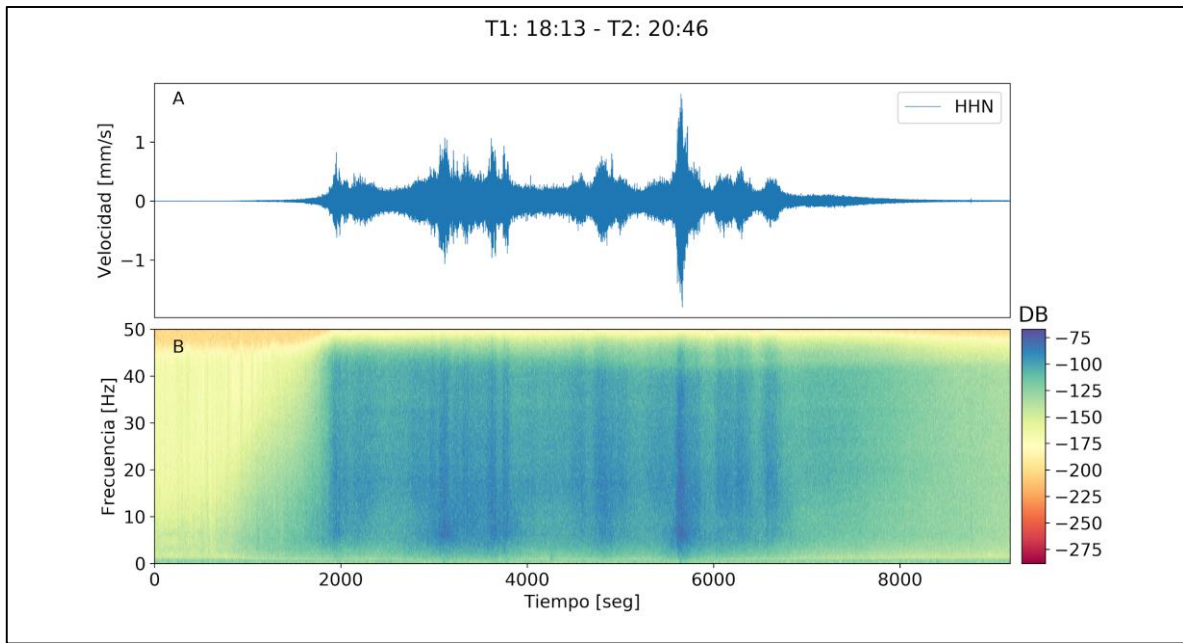


Figura A18: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 5 de agosto18 del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

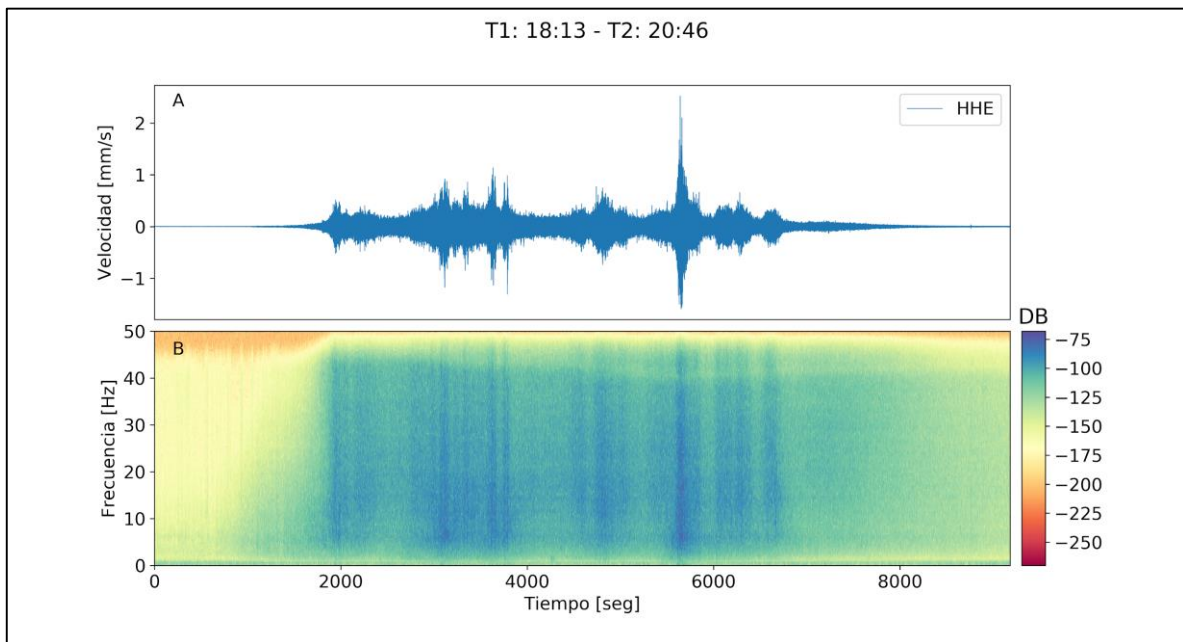


Figura A19: Forma de onda (A) y espectrograma (B) del lahar ocurrido el 5 de agosto18 del 2007, la amplitud en velocidad se presenta en milímetros sobre segundo. Componente E-O.

Método de Welch

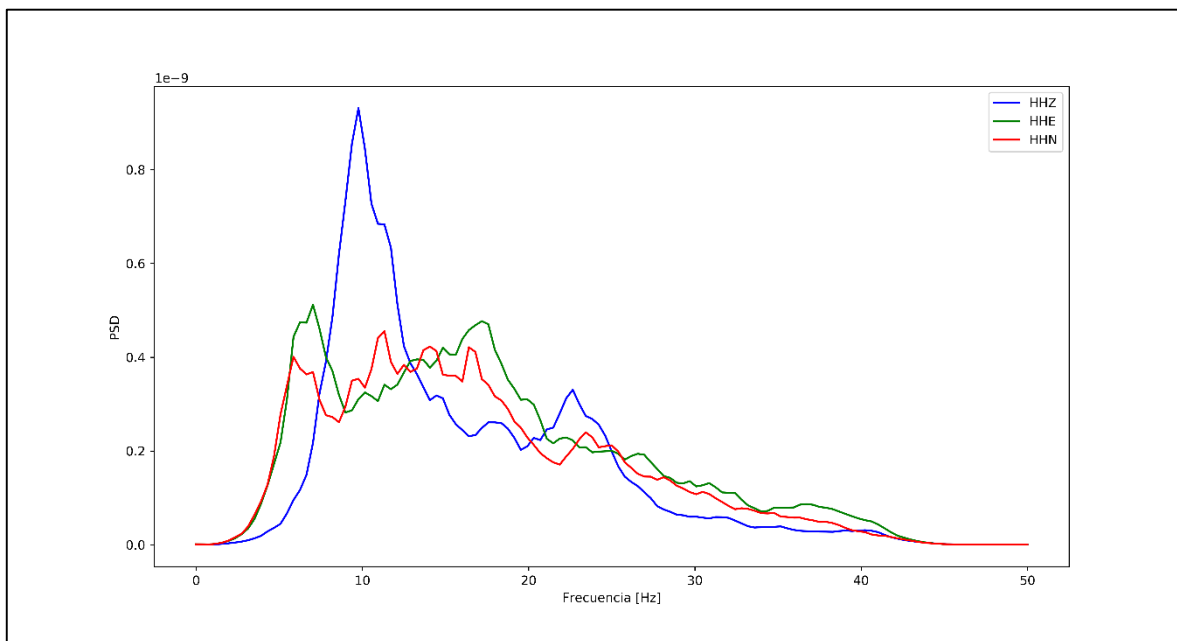


Figura A20: Densidad espectral de potencia calculada mediante el método de Welch, la banda característica de frecuencias se encuentra entre ~10 Y 25 Hz.

Apéndice B: Código Python

Procesamiento

Código Python

Código del procesamiento sísmico de los datos utilizados para la tesis titulada "Análisis sísmico de lahares ocurridos en 2007, Barranca Montegrande, Volcán de Colima"

In [18]:

```
#IMPORTAMOS
from obspy import read, UTCDateTime, read_inventory
from matplotlib import rcParams
import numpy as np
import scipy as sci
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Rectangle
plt.rcParams['figure.figsize'] = 13,7
plt.rcParams["figure.subplot.hspace"] = (0.2)
plt.rcParams['font.size']=16
```

In [19]:

```
inven = read_inventory("C:/Users/Alexa/Documents/Julia/respuesta.xml")
```

In [20]:

```
st1 = read("C:/Users/Alexa/Documents/Julia/ZA.EBMG-20070821.mseed")
```

In [21]:

```
#REMOCIÓN DE PROMEDIO Y POSIBLE TENDENCIA
st1.detrend('linear');
st1.detrend('demean');
```

In [22]:

```
#REMOCIÓN DE SENSIBILIDAD DEL INSTRUMENTO
stl.remove_sensitivity(inven);
```

In [23]:

```
#FORMA DE ONDA Y ESPECTROGRAMA

tr = stl.select(channel="HHZ")[0]
NFFT = 256
noverlap = 50
fig,axs =plt.subplots(ncols=1, nrows=2 )

#Serie en tiempo
axs[0].plot(tr.times(), tr.data*1000, linewidth=0.5,label=tr.stats.channel);
axs[0].set_xlim(tr.times()[0],tr.times()[-1])
axs[0].set_xticks([])
axs[0].set_ylabel('Velocidad [mm/s]')
axs[0].ticklabel_format(style='plain', axis='y', scilimits=(0,0))
axs[0].legend()

#Espectrograma
spectrum, freqs, t, im = axs[1].specgram(
    tr.data, NFFT=NFFT, Fs=tr.stats.sampling_rate,
    noverlap=50,cmap=plt.cm.Spectral);

axs[1].set_xlim(tr.times()[0],tr.times()[-1])
axs[1].set_ylabel('Frecuencia [Hz]')
axs[1].set_xlabel('Tiempo [seg]')

fig.subplots_adjust(right=0.85,hspace=0.05)
[[x10,y10],[x11,y11]] = axs[1].get_position().get_points()
pad = 0.01; width = 0.02
cbar_ax = fig.add_axes([x11+pad, y10, width, y11-y10])
axcb = fig.colorbar(im, cax=cbar_ax)
axcb.ax.set_title("DB")
fig.suptitle("T1: 18:13 - T2: 20:46")
```

```
plt.text(-36, 1.96, 'A')
plt.text(-36, .90, 'B')
#fig.savefig("20070821Ejem.png",dpi=450)
```

In [24]:

```
#MÉTODO DE WELCH
```

In [25]:

```
stlSpec = stl.copy()
```

In [26]:

```
stlSpec.taper(0.1);
```

```
C:\Users\Alexa\Anaconda3\lib\site-packages\obsapy\core\trace.py:2111:
FutureWarning: Conversion of the second argument of issubdtype from `float` to
`np.floating` is deprecated. In future, it will be treated as `np.float64 ==
np.dtype(float).type`.
```

```
if not np.issubdtype(self.data.dtype, float):
```

In [27]:

```
trZTap = stlSpec.select(channel="HHZ")[0]
trNTap = stlSpec.select(channel="HHN")[0]
trETap = stlSpec.select(channel="HHE")[0]
```

In [28]:

```
f1Z, PxxHHZ = sci.signal.welch(trZTap.data,trZTap.stats.sampling_rate)
f1N, PxxHHN = sci.signal.welch(trNTap.data,trNTap.stats.sampling_rate)
f1E, PxxHHE = sci.signal.welch(trETap.data,trETap.stats.sampling_rate)
```

In [31]:

```
plt.plot(f1Z, PxxHHZ,label=trZTap.stats.channel,color='b', linewidth=1.5)
plt.plot(f1N, PxxHHN,label=trETap.stats.channel,color='g', linewidth=1.5)
plt.plot(f1E, PxxHHE,label=trNTap.stats.channel,color='r', linewidth=1.5)
plt.legend()
plt.rcParams['figure.figsize'] = 13,7
```

```
plt.xlabel('Frecuencia [Hz]')  
plt.ylabel('PSD')  
plt.savefig("Welch0821I2.png",dpi=450)  
#plt.show()
```

Fuentes consultadas

- Allan, J.F. (1986). *Geology of the Northern Colima and Zacoalco grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt*. Geological Society of America Bulletin, 97, 473-485.
- Arias, G. (2016). *Estudio de las señales sísmicas de muy largo periodo en el volcán Cotopaxi* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13739>
- Barnés, B. (2016). *Modelización de lahares y diseño de estructuras de contención en el volcán Popocatepetl, México* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/44253/1/Tesis_master_Bego%C3%B1a_Barnes_Portillo.pdf
- Calvo, L. (2015). *Riesgos hidrovulcánicos en el Volcán de Fuego de Colima, México* (tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid.
- Capra, L., Velio Coviello, V., Lorenzo Borselli, L., Márquez-Ramírez, V., Arámbula-Mendoza, R. (2018). *Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall-runoff modeling, seismic and video monitoring*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 781–794, 2018. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-781-2018>
- Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional. (2007). *Precipitación mensual del estado de Colima 2007*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2007.pdf>
- Cohen, M. [Mike X Cohen]. (2019, 12, 20). Welch's method for smooth spectral decomposition. [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=YK1F0-3VvQI>
- Cortés, A., Garduño-Monroy, V.H., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J.C., Saucedo, R., Macías, J.L., Gavilanes, J.C. (2005) *Carta Geológica del Complejo Volcánico de Colima, con Geología del Complejo Volcánico de Colima*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dávila, A. (2007). *Análisis espacial y espectral de lahares en el Volcán de Colima, México* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos/analisis-espacial-y-espectral-de-lahares-en-el-volcan-de-colima-mexico-457896?c=B0LAJZ&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0
- Del Pozzo, A., Alatorre-Ibargüengoitia, M., Arana-Salinas, L., Bonasia, R., Capra-Pedol, L., Cassata, W., Cordoba, G., Cortes-Ramos, J., Delgado-Granados, H., Ferrés-López, M., Fonseca-Álvarez, R., García-Reynoso, J., Gisbert, G., Guerrero-López, D.A., Jaimes-Viera, M.C., Macías-Vázquez, J.L., Nieto-Obregón, J., Nieto-Torres, A., Paredes-Ruíz, P., Portocarrero-Martínez, J., Renne, P., Rodríguez-Espinosa, D., Salinas-Sánchez, S., Siebe-Grabach, C., Tellez-Ugalde, E. (2016) *Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl: Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatepetl*. Monografías Instituto de Geofísica.
- Echeverry, D., Guarnizo, C., Orozco, A. (2007). *Analysis of power spectral density in MER signals*. Scientia et Technica Año XIII. No. 35. ISSN 0122-1701
- Escobar, Larry. (2008) *Conceptos Básicos de Procesamiento Digital de Señales* (tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ferrari, L. (2000). *Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 53(1):84-92. doi: 10.18268/BSGM2000v53n1a5

Gavilanes, J. (2004) *Simulación de Escenarios Eruptivos del Volcán de Colima y Aportaciones al Plan de Contingencias del Estado de Colima* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Tuena, A., Orozco- Esquivel, M., Ferrari, L. (2005) *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 57(3). doi: 10.18268/BSGM2005v57n3a2

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER)*. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/censo-de-poblacion-y-vivienda-2010principales-resultados-por-localidad-iter/resource/a85a7e5e-8c38-4c49-a5ea-253c7d2e4c59>

Lavigne, F., Thouret, J., Voight, B., Young, K., LaHusen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D., Dejean, M. (2000) *Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 100, 457–478

Lavigne F. & Suwa H. (2004). *Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia*. Geomorphology, 61: 41–58

Londoño, J. M. (2002). Manual de Sismología y Volcánica Básica. Observatorio Vulcanológico de Manizales.

López-Loera, H., Jaime Urrutia-Fucugauchi, J., Alva-Valdivia, L. (2011) *Estudio aeromagnético del Complejo Volcánico de Colima, occidente de México –implicaciones tectónicas y estructurales*. Revista Mexicana de Ciencia Geológicas v. 28, núm. 3, p. 349-370

Luhr, J., Carmichael, I. (1980) *The Colima Volcanic Complex, Mexico*. Contributions to Mineralogy and Petrology. University of California. 71, 343-372

Luhr, J., Nelson, S., Allan, J., Carmichael, I., (1985) *Active rifting in southwestern Mexico: manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump*. Geology, 13, 54-57.

Macías, J. (2005) *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. núm. 3.

Mcnutt, S., (2005) Volcanic Seismology. Ar Reviews in Advance. Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, Alaska. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459

Major, J., Newhall, C. (1989) Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. Bull Volcanol 52:1-27

Martínez, J. (2019). Análisis sísmico y modelado numérico del lahar Patricia, octubre 2015, barranca La Lumbre, Volcán de Colima (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Pérez, A. (2011). *Evaluación de peligro por lahares en la ladera SW del Volcán de Colima* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Pierson, T., Costa, J. (1987) *A rheologic classification of subaerial sediment-water flows*. En Costa, J., Wieczorek, G. (Eds.), Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation. Geological Society of America. Review Engineering Geology, USA, 1-12.

Rodolfo, K., Arguden, T., (1991) *Rain lahar generation and sediment delivery systems at Mayon Volcano Philippines*. Society for Sedimentary Geology. doi: 10.2110/pec.91.45.0071

Reyes-Dávila, G., Arámbula-Mendoza, R., Espinasa-Pereña, R., J. Pankhurst, M., Navarro-Ochoa, C., Savov, I., Vargas-Bracamontes, D., Cortés-Cortés, A., Gutiérrez-Martínez, C., Valdés-González, C., Domínguez-Reyes, T., González-Amezcu, M., Martínez-Fierros, A., Ramírez-Vázquez, C., Cárdenas-

González, L., Castañeda-Bastida, E., Vázquez Espinoza de los Monteros, D., Nieto-Torres, A., Campion, R., Courtois, L., Lee, P. (2016) *Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 320. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.015>

Saucedo, R., Macías, J., Gavilanes, J., Arce, J., Komorowski, J., Gardner, J., Valdez-Moreno, G. (2010) *Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 191, pp. 149-166. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.01.011

Thompson, G. (2015) *Seismic Monitoring of Volcanoes*. Encyclopedia of Earthquake Engineering. School of Geosciences, University of South Florida, Tampa, FL, USA.

Vallance, J. (2005) *Volcanic Debris Flows* M. Jakob and O. Hungr (eds) Debris flow Hazard and Related Phenomena.

Vázquez, R. (2016). *Estudio de la dinámica de lahares con base en el monitoreo de eventos en el Volcán de Colima: Estimación de parámetros para el desarrollo de un sistema de alerta temprana* (tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Vázquez, R., Suriñach, E., Capra, L., Arámbula-Mendoza, R. and Reyes-Dávila, G. (2016). *Seismic characterisation of lahars at Volcán de Colima, México*. *Bulletin of Volcanology*. 78 (8) doi: 10.1007/s00445-016-1004-9.

Voight B., Calvache M.L., Hall M.L., Monsalve M.L. (2013) *Nevado del Ruiz Volcano, Colombia 1985*. Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_253

West, M. (2006). *The Colima Deep Seismic Experiment: Imaging the Magmatic Root of Colima Volcano*. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/ZA_2006

Zobin, V.M., Luhr, J.F., Taran, Y., Bretón, M., Cortés, A., De-la Cruz Reyna, S., Domínguez, T., Galindo, I., Gavilanes, J.C., Muñiz, J.J., 2002, *Overview of the 1997–2000 activity of Volcán de Colima, México*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117(1–2), 1-19.