



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

ESTUDIO DE EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN LAS
PROXIMIDADES A CENTROS MINEROS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JORGE ABRAHAM LAGUNAS MUÑOZ

TUTORES PRINCIPALES:
DR. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN
DR. HIRÁM BADILLO ALMARÁZ
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, JULIO DE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Pérez Gavilán Escalante Juan J.

Secretario: Dr. Díaz López Orlando Javier

1 er. Vocal: Dr. Ayala Milián A. Gustavo

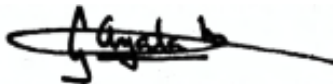
2 do. Vocal: Dr. Rivera Vargas Darío

3 er. Vocal: Dr. Badillo Almaraz Hiram

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN



FIRMA

RESUMEN

Recientemente se ha observado un incremento de actividad sísmica en zonas consideradas de baja sismicidad. Tal es el caso del estado de Zacatecas, México, en donde en los últimos años se ha registrado un incremento importante de eventos sísmicos. Del año 2015 a 2019 se registraron en el estado 16 sismos mientras que tan solo en el año 2020, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó 116 eventos sísmicos.

El objetivo principal de esta investigación es determinar si este incremento de sismicidad se debe a los trabajos de explosiones de las minas que operan en la zona, por lo que los registros correspondientes a estos sismos obtenidos de la estación ZAIG del SSN, ubicada en la ciudad de Zacatecas, son revisados de acuerdo con distintos criterios encontrados en la literatura para diferenciar un sismo de una explosión. A su vez, estos registros son analizados y comparados con los registros obtenidos de una campaña de monitoreo de vibración realizada en una mina. De acuerdo con la revisión de los resultados se determinó que un gran número de estos sismos son producto de la actividad minera, siendo esto la principal causa del aumento de actividad sísmica en la región.

Por otro lado, las investigaciones sobre los efectos de vibraciones patógenas sobre las estructuras y las personas, particularmente las producidas por explosiones son relativamente insuficientes. Estas deficiencias se reflejan en la variabilidad de los índices de tolerancia presentes en normas internacionales vigentes, para ser empleados en la evaluación de estos efectos.

En cuanto a los niveles de vibración de los registros relacionados a explosiones mineras definidos en esta investigación, estos son comparados con la norma internacional ISO (International Organization for Standardization), que define distintos niveles permisibles de acuerdo con varios tipos de estructuras. Los resultados obtenidos muestran una potencial amenaza, principalmente hacia los monumentos históricos considerados patrimonio mundial por la UNESCO que se encuentran en el estado de Zacatecas.

ABSTRACT

In recent years, an increase in seismic has been observed in areas considered to be of low seismicity. Such is the case of the state of Zacatecas, Mexico, where in recent years there has been a significant increase in seismic events. From 2015 to 2019, 16 earthquakes were registered in the state, while only in 2020, the National Seismological Service (SSN) reported 116 seismic events.

The main objective of this research is to determine if this increase in seismicity is due to the explosions of mines that operate in the area, therefore, the records corresponding to these earthquakes obtained from the ZAIG station of the SSN, located in the city of Zacatecas, are reviewed according to different criteria found in the literature to differentiate an earthquake from an explosion, the same time, these records are analyzed and compared with the records obtained from a vibration monitoring campaign carried out in a mine. According to the review of the results, it was determined that many of these earthquakes are the product of mining activity, this being the main cause of the increase in seismic activity in the region.

On the other hand, research on the effects of pathogenic vibrations on structures and people, particularly those produced by explosions, is relatively insufficient. These deficiencies are reflected in the variability of the tolerance indices present in current international standards, to be used in the evaluation of these effects.

Regarding the vibration levels of the records related to mining explosions defined in this research, these are compared with the ISO standard (International Organization for Standardization), which defines different permissible levels according to various types of structures. The results obtained show a potential threat, mainly towards the historical monuments considered world heritage by UNESCO that are in the state of Zacatecas.

CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Justificación y alcances.....	11
1.2 Objetivo y metas.....	11
1.3 Organización de la Tesis.....	12
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1 Sismicidad inducida por minería.....	14
2.2 Vibraciones inducidas por voladuras.....	16
2.3 Estándares Internacionales	18
2.3.1 USBM 8507.....	19
2.3.2 Norma DIN 4150-3	20
2.3.3 Norma BS 6472	21
2.3.4 Norma ISO 10137	23
3. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS EN MINA.....	25
3.1 Resultados del análisis	27
3.1.1 Bandas	34
3.1.2 Caseta.....	37
3.1.3 Cribas.....	40
3.1.4 Pueblo.....	43
3.1.5 Taller.....	46
3.2 Comparativa con los estándares internacionales	49
3.2.1 USBM 8507.....	50
3.2.2 DIN 4150-3	50
3.2.3 BS 6472	51
3.2.4 ISO 10137	52
4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS DE LA ESTACIÓN ZAIG (CIUDAD DE ZACATECAS)	55
4.1 Análisis de los registros sísmicos	66
4.1.1 Determinación el hipocentro	66

4.1.2	Tiempo de llegada de las ondas P y S	67
4.1.3	Diferencia entre magnitudes de ondas superficiales (Ms) y de cuerpo (Mb)	72
4.1.4	Duración del evento	73
4.1.5	Mecanismos focales (pelota de playa)	74
4.1.6	Análisis de espectrogramas (frecuencia-tiempo)	78
4.1.7	Comparativa con los estándares internacionales.....	101
5	CONCLUSIONES.....	106
6	REFERENCIAS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Modelos para estimar la Velocidad de Partícula Pico (Kumar et al., 2016).....	17
Tabla 2.2 Criterio de daño provocado (USBM, 1980)	19
Tabla 2.3 Valores límite de VPP (mm/s) Norma DIN 4150-3 "Structural Vibration Buildings. Effects of Vibration on Structures" (1999)	20
Tabla 2.4 Factores usados para establecer magnitudes satisfactorias de vibración en edificios respecto a la respuesta humana	23
Tabla 3.1 Registros obtenidos en mina (Lagunas, 2019)	25
Tabla 3.2 Resultados de vibración.....	49
Tabla 3.3 Registros que superan los límites permisibles.....	53
Tabla 4.1 Catálogo de sismos en el estado de Zacatecas (SSN, 2020)	61
Tabla 4.2 Registros comparados con la norma ISO 10137	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático de seis posibles formas en las que pueden ocurrir los sismos inducidos por la mina: (A) colapso de la cavidad; (B) explosión del pilar; (C) falla por tensión; (D) falla normal; (E) falla de empuje; y (F) fallas de empuje poco profundas (casi horizontales). Las flechas sólidas indican la dirección de la fuerza inducida por la mina sobre el manto de roca durante los eventos inducidos. Las flechas punteadas indican tensión tectónica ambiental (Hasegawa et al., 1989).....	16
Figura 2.2 Modelos para estimar la Velocidad de Partícula Pico (Kumar et al., 2016).....	17
Figura 2.3 USBM 8507 (1980)	20
Figura 2.4 Norma DIN 4150 (1999)	21
Figura 2.5 Sistema de coordenadas para la medición de vibraciones sobre las personas	21
Figura 2.6 Norma BS 6472 (1992) ejes X y Y	22
Figura 2.7 Norma BS 6472 (1992) eje Z.....	22
Figura 2.8 Norma ISO 10137 (1992) eje Z	24
Figura 2.9 Norma BS 6472 (1992) ejes X y Y	24
Figura 3.1 Puntos de Monitoreo	27
Figura 3.2 Señal del registro 31/01/2019 Bandas en términos de velocidad	28
Figura 3.3 Señal del registro 31/01/2019 Bandas en términos de aceleración	29
Figura 3.4 Espectros de respuesta eje longitudinal	30
Figura 3.5 Espectros de respuesta eje transversal.....	31
Figura 3.6 Espectros de respuesta eje vertical	32
Figura 3.7 Espectros de Fourier del registro 31/01/2019 Bandas.....	33
Figura 3.8 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje longitudinal.....	34
Figura 3.9 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje transversal	35
Figura 3.10 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje vertical	36
Figura 3.11 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje longitudinal.....	37
Figura 3.12 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje transversal	38
Figura 3.13 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje vertical.....	39

Figura 3.14 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje longitudinal.....	40
Figura 3.15 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje transversal	41
Figura 3.16 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje vertical.....	42
Figura 3.17 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Puebla, eje longitudinal.....	43
Figura 3.18 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Puebla, eje transversal	44
Figura 3.19 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Puebla, eje vertical	45
Figura 3.20 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje longitudinal.....	46
Figura 3.21 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje transversal	47
Figura 3.22 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje vertical	48
Figura 3.23 Revisión USBM 8507	50
Figura 3.24 Revisión DIN 4150	50
Figura 3.25 Revisión BS 6472 ejes X y Y.....	51
Figura 3.26 Revisión BS 6472 eje Z	51
Figura 3.27 Revisión ISO 10137 eje Z	52
Figura 3.28 Revisión ISO10137 ejes X y Y.....	52
Figura 4.1 Zonificación sísmica CFE (2015)	55
Figura 4.2 Ventana rota en una vivienda.....	56
Figura 4.3 Grietas verticales que atraviesan muros interiores	57
Figura 4.4 Grietas en fachada.....	58
Figura 4.5 Grietas en interior de vivienda.....	59
Figura 4.6 Grietas diagonales en los muros	60
Figura 4.7 Epicentros de los sismos registrados por el SSN en la ciudad de zacatecas en el año 2020.....	65
Figura 4.8 Relación de profundidades y horario de mina de los registros.....	66
Figura 4.9 Registro sísmico de un temblor que ocurrió el día 1 de diciembre de 2014 de magnitud 3.4 (SSN, 2014).	67
Figura 4.10 Explosión Natural del volcán Popocatepetl, 25 de mayo de 2013 (SSN, 2014).....	68
Figura 4.11 Explosión inducida registrada en la estación sismológica de Banda Ancha ubicada en Nacozeni, Sonora (SSN, 2014).	68
Figura 4.12 Registro de voladura en la mina, 18/01/2019	69
Figura 4.13 Registro 16/07/2020 02:09:45 M=2.8 Prof=2 km	70
Figura 4.14 Registro 14/08/2020 06:19:07 M=2.6 Prof=2 km	71
Figura 4.15 Registro 28/08/2020 18:32:22 M=2.6 Prof=2 km	72
Figura 4.16 Total de sismos en Zacatecas en el año 2020	73
Figura 4.17 Construcción del mecanismo focal de falla (Departamento de Geofísica, 2014).	74
Figura 4.18 Construcción del mecanismo focal de falla (Departamento de Geofísica, 2014).	75
Figura 4.19 Tipo de mecanismos focales (SSN, 2014).	76
Figura 4.20 Registro de voladura en la mina, 21/01/2019	77
Figura 4.21 Registros con movimiento ascendente en el eje vertical Z	78
Figura 4.22 Registro de un sismo (superior) y una explosión (inferior) (Manual SEISAN, 2020)	79
Figura 4.23 Espectrograma de dos señales de la estación OSL, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Manual SEISAN, 2002).	79
Figura 4.24 Espectrograma de la estación SKAR, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Manual SEISAN, 2002)	80
Figura 4.25 Espectrogramas registro de voladura 21/01/2019 distancia 48.5 m.....	81
Figura 4.26 Espectrogramas registro de voladura 23/01/2019 distancia 24.8 m.....	82

Figura 4.27 Espectrogramas registro de voladura 24/01/2019 distancia 86.9 m.....	83
Figura 4.28 Espectrogramas registro de voladura 26/01/2019 distancia 16.6 m.....	84
Figura 4.29 Espectrogramas registro de voladura 28/01/2019 distancia 11.3 m.....	85
Figura 4.30 Espectrogramas registro 14/09/2020 14:13:08 M=3.7.....	86
Figura 4.31 Espectrogramas registro 19/09/2020 08:15:34 M=4.0.....	87
Figura 4.32 Espectrogramas registro 20/09/2020 02:45:34 M=3.9.....	88
Figura 4.33 Espectrogramas registro 02/10/2020 12:47:57 M=3.8.....	89
Figura 4.34 Espectrogramas registro 04/10/2020 02:47:49 M=3.7.....	90
Figura 4.35 Espectrogramas registro 16/07/2020 02:09:44 M=2.8.....	91
Figura 4.36 Espectrogramas registro 14/08/2020 06:19:06 M=2.6.....	92
Figura 4.37 Espectrogramas registro 28/08/2020 18:32:22 M=2.6.....	93
Figura 4.38 Espectrogramas registro 12/11/2020 19:55:06 M=2.5.....	94
Figura 4.39 Espectrogramas registro 25/12/2020 05:42:00 M=2.6.....	95
Figura 4.40 Espectrogramas registro 25/10/2020 06:28:30 M=3.7 Duración 7:10 min	96
Figura 4.41 Espectros de Fourier para los registros de mina.....	98
Figura 4.42 Espectros de Fourier para los registros con magnitud mayor a 3.5	99
Figura 4.43 Espectros de Fourier para los registros de magnitudes de entre 2.5 a 2.8	100
Figura 4.44 Revisión ante la norma ISO 10137 ejes X y Y.....	104
Figura 4.45 Revisión ante la norma ISO 10137 eje Z	105

1.INTRODUCCIÓN

En los últimos años el monitoreo de la salud estructural de construcciones existentes ha sido aceptado como una actividad de gran utilidad en la ingeniería actual. Esta aceptación ha ocurrido gracias a la disponibilidad de sensores de costo relativamente bajo y al desarrollo de herramientas computacionales más refinadas que permiten interpretar eficazmente las señales registradas y proporcionar resultados más detallados. Particularmente con el monitoreo y análisis de la vibración de una estructura es posible identificar sus características dinámicas, información de gran relevancia en la determinación de la respuesta y el desempeño que esta podría tener ante demandas dinámicas naturales como lo sismos y el viento o producidas por la actividad humana como es el caso de las explosiones dentro en la actividad minera.

En México las investigaciones sobre los efectos de vibraciones producidas por explosiones sobre las estructuras son escasas, por lo que se tiene poca información al respecto. Esta deficiencia se refleja en el poco conocimiento del uso de los índices de tolerancia en normas internacionales vigentes para la evaluación de estos efectos. Las actividades humanas que usan explosivos suelen asociarse principalmente al campo de la minería, aunque también suelen utilizarse explosivos durante la construcción de carreteras, presas y excavaciones en general, entre otras obras civiles. Si bien en ocasiones es necesario utilizar explosivos para cierto tipo de trabajos específicos, se requiere realizar una correcta manipulación de estos para evitar efectos adversos que pudieran llegar a perjudicar a las personas y las estructuras que se encuentran en los alrededores.

Las campañas de monitoreo de vibraciones que se llevan a cabo en una mina generalmente consisten en colocar varios sismógrafos a diferentes distancias de las plantillas de barrenación de las voladuras para registrar las vibraciones producidas para cada explosión. Los registros así obtenidos corresponden a explosiones controladas con diferentes cantidades de cargas de explosivo y condiciones de confinamiento de las voladuras.

En diversas localidades con presencia de actividad minera, como es el caso de la ciudad de Zacatecas, además de las vibraciones producidas por las explosiones que se llevan a cabo dentro de las minas, recientemente se han observado incrementos de la actividad sísmica en zonas consideradas de baja sismicidad. Particularmente, en Zacatecas, tan sólo en el año 2020, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de la UNAM reportó 116 sismos ubicados dentro del estado, mientras que en los 5 años anteriores se reportaron 16. El registro de estos sismos se realiza en la estación ZAIG del SSN localizada en la ciudad de Zacatecas.

El análisis de estos registros hace posible determinar su origen a través de la determinación del hipocentro, tiempo de llegada de las ondas P y S, duración del evento, mecanismos focales y análisis por medio de espectrogramas; así como también de realizar la comparación de los resultados obtenidos durante el monitoreo de vibraciones realizadas en minas.

1.1 Justificación y alcances

Dentro de los procesos de producción industrial existen actividades que requieren el uso de explosivos, tal es el caso de la extracción de minerales mediante explosiones en minas, o los trabajos de excavaciones para construcción de caminos, presas etc. En muchas ocasiones hay estructuras que se encuentran cercanas a estas explosiones y comienzan a presentar algunos daños, por ello se debe dar mayor importancia a revisar los efectos que causan las vibraciones producidas por estas actividades que involucran el uso de explosivos para evitar efectos negativos que pudieran suscitarse hacia las estructuras y la salud de las personas.

En los últimos años se ha originado una controversia sobre el gran incremento de la actividad sísmica reportada en la cercanía de la ciudad de zacatecas por parte del SSN. Algunas personas asocian este incremento a la actividad minera que se manifiesta en los alrededores, derivado de ello se ha originado una incertidumbre sobre el alcance y los daños que son provocados por las explosiones dentro de la actividad minera hacia las viviendas e infraestructura cercanas a ellas.

El estudio incluye diferentes ámbitos relacionados con la ingeniería sísmica con el fin de determinar si el incremento antes mencionado en la actividad sísmica, en la periferia de la ciudad de zacatecas, se debe a la actividad minera o si es debido a causas naturales.

El estudio incluye un análisis de señales obtenidas de una campaña de monitoreo de vibraciones producidas por explosiones controladas en una mina a cielo abierto con fines de estudiar el nivel de incertidumbre en términos de daños hacia las estructuras, basado en los límites internacionales con los que se cuenta en la actualidad. También se estudió el tipo de onda y señal que es emitida debido a explosiones controladas. Una vez referenciada esta información, se analizaron los registros de los sismos registrados por el SSN en la estación ZAIG del año 2020 y se compararon con los resultados obtenidos en campo para poder determinar si el origen de estos sismos pudiese tener alguna influencia debido a la actividad minera.

1.2 Objetivo y metas

El objetivo principal de esta investigación es determinar si el incremento de sismicidad en Zacatecas es producto de la actividad minera que se encuentra en los alrededores, así como también determinar los efectos de estos sismos sobre las estructuras, para ello se definen las metas siguientes:

Revisión de los límites de vibración permisibles producidos por explosiones controladas para determinar los criterios en que se basan las normas que los proponen.

Analizar los registros de velocidad obtenidos en mina y compararlos ante los estándares internacionales, para establecer el grado de seguridad de los límites que se proponen y los posibles efectos que pudieran presentarse hacia las estructuras.

Identificar, obtener y analizar los registros sísmicos del año 2020 reportados por el SSN en la estación ZAIG, ubicada en la ciudad de Zacatecas.

Comparar los registros de la estación ZAIG con los obtenidos de la campaña de monitoreo realizada en mina.

Aplicando los criterios encontrados en la literatura determinar si los sismos reportados por el SSN corresponden a explosiones o son de causas naturales.

Analizar y discutir los resultados con base a la comparación de estos registros ante los límites de vibración permisibles definidos por las normas.

1.3 Organización de la Tesis

En el capítulo dos se presentan los antecedentes sobre los efectos de las explosiones dentro de las actividades mineras. Este capítulo se divide en tres partes, primero se presentan los antecedentes en cuanto a la sismicidad inducida por minería, en el cual se habla sobre los sismos más grandes registrados en el mundo causados por la actividad minera a lo largo de la historia. En la segunda parte se habla sobre algunos modelos matemáticos que se han propuesto para estimar los niveles de vibración producidos por explosiones controladas, con los cuales se obtienen niveles de vibración estimados en términos de velocidad, estos modelos están en función de la relación de la distancia y la carga de explosivo principalmente. En la tercera parte se presentan los límites de vibración permisibles que establecen los estándares de las normas USBM 8507, DIN 4250-3, BS 6472 y la norma ISO 10137; estas normas resultan ser frecuentemente las de mayor referencia.

El capítulo tres trata sobre la campaña de monitoreo de vibración que se realizó en una mina a cielo abierto, en donde se establecieron distintos puntos de monitoreo a través de la colocación de sismógrafos para obtener los registros en términos de velocidad de las voladuras realizadas dentro de los trabajos de la mina. Se registró la distancia del sismógrafo hacia la voladura, la carga máxima de explosivo y la velocidad de partícula máxima registrada y su frecuencia asociada para cada detonación. Los registros correspondientes a estas explosiones fueron analizados y procesados para obtener espectros de respuesta, así como también las frecuencias características que se obtienen por medio de los espectros de Fourier. Además, se comparan los niveles de vibración obtenidos con los límites permisibles que se indican en las normas que se mencionan anteriormente para determinar los posibles efectos.

En el capítulo cuatro se analizan los registros obtenidos de la estación ZAIG para los sismos reportados por el SSN del año 2020 para el estado de Zacatecas. Se realizó una revisión de acuerdo con distintos criterios encontrados en la literatura para determinar si los sismos son de origen natural o si más bien son explosiones, además estos registros son comparados a su vez con los obtenidos de la campaña de monitoreo en mina. Los criterios que se tomaron para este análisis son la determinación del hipocentro, tiempo de llegada de las ondas P y S, duración del evento, mecanismos focales y análisis por medio de espectrogramas. También se comparan los niveles de vibración para las explosiones

registradas por la estación ZAIG de acuerdo con la norma ISO10137, en donde se observa que en algunas ocasiones los niveles de vibración correspondientes a estos eventos superan los límites permisibles definidos por la norma, representando un gran riesgo.

Por último, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones de esta investigación de acuerdo con los resultados obtenidos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Sismicidad inducida por minería

La sismicidad inducida por la minería es comúnmente descrita como la ocurrencia de sismos causados por fallas de rocas, como resultado de cambios de esfuerzos en el manto de roca cercano a las excavaciones de la mina. Estos eventos son causados por aumentos en el esfuerzo cortante o disminuciones en el esfuerzo normal que actúa sobre los planos de falla. Por lo tanto, los eventos sísmicos se inducen solo en aquellas regiones donde el entorno de esfuerzos ha sido modificado sustancialmente por las excavaciones de la mina. No se han encontrado diferencias sistemáticas entre los temblores de las minas y los terremotos naturales, y los métodos y técnicas empleados en las minas para el monitoreo sísmico son los directamente transferidos de la sismología de terremotos (Gibowicz y Kijko, 2013).

Se ha observado un aumento de la sismicidad en áreas sísmicas y la generación de sismicidad en áreas asísmicas como resultado de la minería subterránea profunda y la extracción de canteras de superficie a gran escala, este tipo de sismicidad es llamado generalmente sismicidad inducida. El problema se agrava progresivamente a medida que aumenta la profundidad promedio y el alcance de las operaciones mineras (Kisslinger, 1976).

El temblor de mina más grande jamás observado ocurrió el 13 de marzo de 1989 en el distrito minero de potasa a lo largo del río Werra, en el sur de Alemania, con magnitud $M_L=5.6$ y $m_b=5.5$. Otro evento destacado de similar tamaño ocurrió en el mismo distrito el 23 de junio de 1975, con magnitud $M_L=5.2$ y $m_b=5.4$. El temblor de mina más grande en Sudáfrica ocurrió en el distrito minero de oro de Klerksdorp el 7 de abril de 1977, con magnitud $M_L=5.2$ y $m_b=5.5$. El distrito minero de cobre de Lubin en Polonia es otra zona donde se generan grandes eventos sísmicos, con magnitud M_L de hasta 4.5, como la del 24 de marzo de 1977 (Gibowicz y Kijko, 2013).

En los campos de carbón de North Staffordshire, subyacente al área densamente poblada de Stoke-on-Trent en Inglaterra, las operaciones mineras están asociadas con eventos sísmicos que, desde mediados de la década de 1970, han alcanzado magnitudes de hasta 3.5. La sismicidad se atribuye directamente a la minería y se cree que no está asociada con movimientos sísmicos en fallas (Kuznir et al. 1980). Los sismos inducidos por la minería de carbón se ven a menudo en las estaciones sísmicas ampliamente espaciadas operadas por el Servicio Geológico Británico. Estos eventos representan alrededor del 25% de los sismos registrados por la red. Muchos de estos eventos se registran sólo de manea instrumental, pero un número significativo se siente y algunos, con magnitudes cercanas a $M_L=3$, supuestamente causaron daños (Redmayne, 1988).

Los trabajos de minería en Khibiny en la península de Kola, Rusia, iniciaron en 1929. El primer evento sísmico de magnitud 4 se sintió en 1948. En la actualidad, está en funcionamiento una red regional, compuesta por cuatro estaciones. Desde 1986 se

registraron alrededor de 100 eventos con una magnitud de entre 2.2 a 4.2. El temblor más fuerte con magnitud 4.2 ocurrió el 16 de abril de 1989 a una profundidad de aproximadamente 1 km, causando grandes daños en la mina Kirovsk y daños menores en la ciudad de Kirovsk. El desplazamiento máximo medido fue de entre 15 y 20 cm, se trazó en la superficie por 1200 m y se observó a una profundidad de al menos 220 m. El temblor principal fue seguido por varios cientos de réplicas durante los siguientes 2 meses. El evento ocurrió simultáneamente con una explosión de 240 toneladas en una de las minas de Kirovsk, lo que implica que la explosión provocó el temblor (Kremetskaya, 1991).

Cercano a la ciudad de Cerro de Pasco en Perú se registraron alrededor de 50 microsismos antes y después de voladuras de cantera caliza en octubre de 1973 con un acelerómetro colocado a una distancia menor a 100 m desde el foco de la detonación. Los sismos fueron muy pequeños, con magnitudes de entre -2 a 0. La cantera en sí tenía 1200 m de largo, 750 m de ancho y 60 m de profundidad en ese momento (Deza and Jaén, 1979).

La cuenca de la Alta Silesia en Polonia, con unas 50 minas de carbón subterráneas en funcionamiento, es una de las zonas mineras con mayor actividad sísmica del mundo. Las observaciones sísmicas se remontan a la década de 1950. Casi 56.000 eventos sísmicos con una magnitud local superior a 1.5 ocurrieron durante el período de 1974 a 2005 (Gibowicz, et al, 1982).

La aparición más espectacular de sismicidad inducida por la minería de superficie se observa en el área de Belchatow en Polonia. El primer sismo en la mina a cielo abierto fue registrado por la red sísmica polaca en agosto de 1979, y el primer sismo se sintió en febrero de 1980. En marzo, abril y mayo de 1980 se sintieron más temblores con magnitudes locales que iban de 2.8 a 3.6. El 29 de noviembre de 1980 ocurrió un evento sísmico de magnitud 4.6 en el área, hasta ahora la manifestación más fuerte de sismicidad inducida por la minería a cielo abierto. El terremoto de Belchatow se sintió ampliamente, incluso a una distancia de más de 100 km en sitios individuales. La solución del plano de falla más probable corresponde al movimiento de deslizamiento oblicuo en una falla invertida, y el esfuerzo de compresión es casi horizontal (Gibowicz et al, 1982).

En el distrito minero de Kelerksdrop en Sudáfrica se registró un sismo de magnitud 5.3 el 9 de marzo del 2005, este evento sacudió la cercana ciudad de Stilfontein, causando graves daños a varios edificios y dejando a 58 personas heridas levemente (Durrheim et al., 2006).

En general, la sismicidad en minas subterráneas se ve influenciada por varios factores como la profundidad, la geometría de la mina, estructura y las discontinuidades geológicas. En la cuenca de carbón de la Alta Silesia en Polonia se encontró que la energía de los eventos sísmicos aumenta proporcionalmente al cuadrado de la tasa de excavación, y que la liberación de energía sísmica es mucho mayor para la minería de tajo largo con derrumbe que para el relleno (Gibowicz y Kijko, 2013).

Richardson y Jordan define dos tipos de eventos sísmicos inducidos por la minería, los del tipo A denominados como eventos de ruptura, dominados por fracturas; y los del tipo B como eventos de deslizamiento, dominados por fricción. Horner y Hasegawa (1978) han

propuesto seis modelos de sismicidad inducida en minas subterráneas en Canadá y son lo suficientemente generales como para ser considerados para analizar la sismicidad de minas en otros países también (Figura 2.1). Tres modelos de temblores de minas corresponden a un mecanismo focal sin doble par (A, B y C), mientras que los otros son del tipo de deslizamiento por cortante (D, E y F) (Hasegawa, 1989).

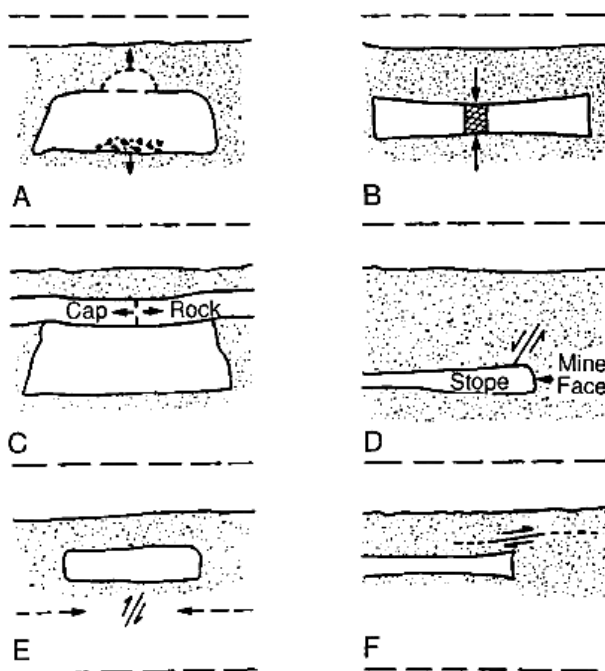


Figura 2.1 Diagrama esquemático de seis posibles formas en las que pueden ocurrir los sismos inducidos por la mina: (A) colapso de la cavidad; (B) explosión del pilar; (C) falla por tensión; (D) falla normal; (E) falla de empuje; y (F) fallas de empuje poco profundas (casi horizontales). Las flechas sólidas indican la dirección de la fuerza inducida por la mina sobre el manto de roca durante los eventos inducidos. Las flechas punteadas indican tensión tectónica ambiental (Hasegawa et al., 1989).

2.2 Vibraciones inducidas por voladuras

Para el estudio de los fenómenos producidos por voladuras en las estructuras civiles se ha encontrado que considerar el parámetro de la velocidad de partícula (VP) es el más adecuado para cuantificar las vibraciones de una voladura y poder estimar los niveles de daño y de molestia hacia las personas, esto debido a que la velocidad de partícula es menos sensible a cambios en las condiciones geológicas que la aceleración o el desplazamiento, por lo que es más consistente y predecible (Kumar et al., 2016). Debido a ello es que la velocidad de partícula pico (VPP) y su frecuencia asociada es la medida más común para cuantificar las vibraciones de una voladura (Lagunas, 2019).

Varios investigadores han propuesto expresiones que sirven para estimar la VPP en función, principalmente, de la distancia de medición hacia el foco de la explosión y la carga

máxima de explosivo por tiempo de retardo (Kumar et al., 2016). Se define la distancia escalada como el cociente entre la distancia y la raíz cuadrada de la carga de explosivo. Con los modelos propuestos es posible controlar las vibraciones y evitar efectos negativos hacia los alrededores. Algunos de estos modelos se presentan en la figura 2.2 y en la tabla 2.1.

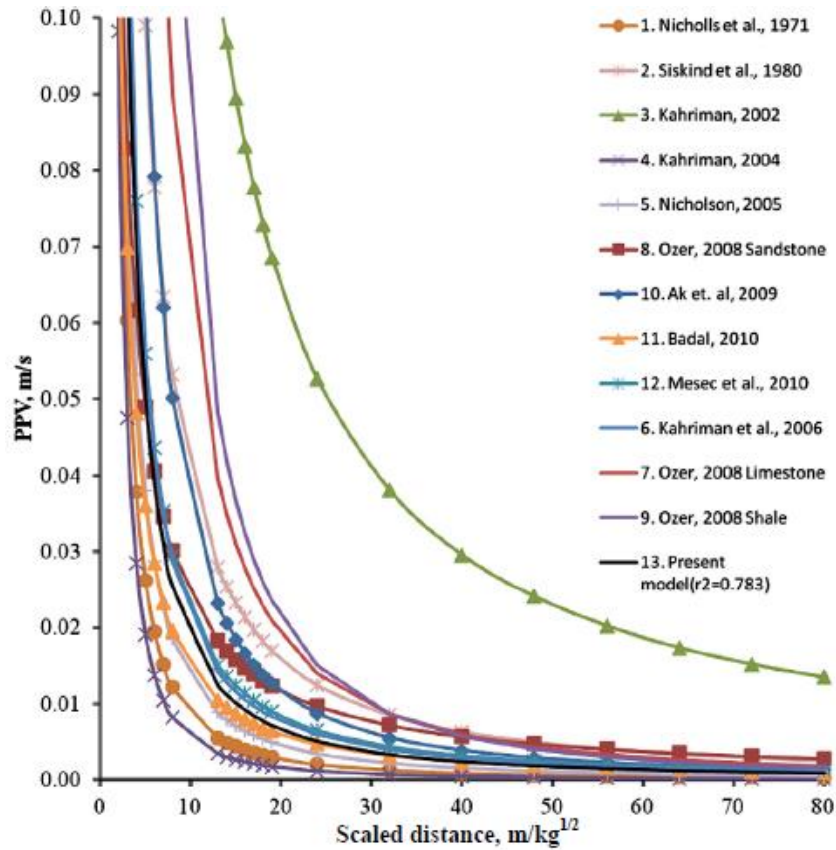


Figura 2.2 Modelos para estimar la Velocidad de Partícula Pico (Kumar et al., 2016)

Tabla 2.1 Modelos para estimar la Velocidad de Partícula Pico (Kumar et al., 2016)

No.	Investigador	Modelo Empírico
1	Duvall y Petkof (1959)	$v = k(R/Q^{1/2})^{-b}$
2	Langefors y Kihlstrom (1963)	$v = k(Q/R^{2/3})^{b/2}$
3	Ambraseys y Hendron (1968)	$v = k(R/Q^{1/3})^{-b}$
4	Nicholls et al. (1971)	$v = 0.362D^{-1.63}$
5	IS 6922 (1973)	$v = k(Q^{2/3}/R)^{1.25}$
6	Siskind et al. (1980)	$v = 0.828D^{-1.32}$

7	Ghosh y Daemen (1983)	$v = k(R/Q^{1/2})^{-b} e^{-\alpha R}$
8	Ghosh y Daemen (1983)	$v = k(R/Q^{1/3})^{-b} e^{-\alpha R}$
9	Pal Roy (1991)	$v = n + k(R/Q^{1/2})^{-1}$
10	Pal Roy (1991)	$v = n + k(R/Q^{1/3})^{-1}$
11	CMRI (1993)	$v = n + k(R/Q^{1/2})^{-1}$
12	Kahriman (2002)	$v = 1.91D^{-1.13}$
13	Kahriman (2004)	$v = 0.34D^{-1.79}$
14	Kahriman et al. (2006)	$v = 0.561D^{-1.432}$
15	Rai y Singh (2004)	$v = kR^{-b} Q_{max} e^{-\alpha}$
16	Nicholson (2005)	$v = 0.438D^{-1.52}$
17	Rai et al. (2005)	$Q_{max} = k(vD^2)^b$
18	Ozer (2008)	$v = 0.257D^{-1.03}$
19	Ozer (2008)	$v = 6.31D^{-1.9}$
20	Ozer (2008)	$v = 3.02D^{-1.69}$
21	Ak et al. (2009)	$v = 1.367D^{-1.59}$
22	Badal (2010)	$v = 0.29D^{-1.296}$
23	Mesec et al. (2010)	$v = 0.508D^{-1.37}$

El cuerpo humano percibe vibraciones a niveles de velocidad muy por debajo de los necesarios para causar daños, normalmente, el cuerpo humano puede detectar VPP del orden de 0.2 mm/s con niveles claramente perceptibles de 1.0 mm/s. (Gad et. al., 2005).

Los niveles de vibración detectables por el humano, considerando la velocidad de vibración y sus respectivas frecuencias, pueden clasificarse en tres niveles: perceptibles, objetables (incómodos) y peligrosos (intolerables). Éstas últimas son capaces de provocar daños en estructuras y constituyen una gama de valores para los cuales fueron pensados la mayoría de los estándares vigentes en diversos países (Pampacata, 2015).

Los daños en edificios se pueden clasificar en dos tipos: cosméticos y estructurales. El daño cosmético se refiere a la formación de pequeñas grietas en las superficies de los paneles de yeso. Por el contrario, el daño estructural implica el agrietamiento o falla de los elementos estructurales más importantes (Gad et. al., 2005).

2.3 Estándares Internacionales

Distintos países han realizado un gran número de investigaciones relacionadas a los efectos de las vibraciones sobre las estructuras, y con ello han creado sus propios estándares, en los que se especifican los límites permisibles de vibración. Para el caso de vibraciones

producidas por explosiones, en su mayoría, los límites se especifican en términos de VPP y frecuencia, no se considera la duración de la vibración ni la forma de onda.

Entre los estándares más importantes y de mayor referencia se encuentran el USBM 8507 (1980), la norma DIN 4501 (1999), la norma BS 6472 (1992) y la ISO 10137 (1992).

2.3.1 USBM 8507

El departamento de minas de los Estados Unidos (U.S. Bureau of Mines) es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen. En la tabla 2.2 se encuentran algunos efectos observados a distintos niveles de vibración.

Tabla 2.2 Criterio de daño provocado (USBM, 1980)

VELOCIDAD DE PARTÍCULA	EFEECTO PROVOCADO
12.7 mm/s	Pautas recomendadas por el Buró de Minería para evitar alcanzar el umbral de daños en construcciones con acabados de yeso, cerca de minas de superficie (operaciones de voladura a gran escala, de largo plazo)
19.05 mm/s	Pautas recomendadas por el Buró de Minería para evitar alcanzar el umbral de daños en construcciones a base de tabiques cerca de minas de superficie
25.4 mm/s	Límite regulatorio de la OSM para viviendas cercanas a operaciones de minería de superficie a distancias de 300-500 pies (operaciones de voladura a gran escala, de largo plazo)
50.8 mm/s y menor	Límite ampliamente aceptado para viviendas cerca a voladuras de construcción y cantera (Boletín del buró de Minería 656, RI 8507, códigos, especificaciones y varios reglamentos). La OSM también lo permite para frecuencias por arriba de los 30 Hz.
De 51.05 hasta 83.82 mm/s	Umbral de daño por voladuras cercanas. Comienzan a aparecer grietas en los muros de las paredes de las casas
De 84.07 hasta 137.16 mm/s	50% de probabilidad de daño menor en el ensayado.
De 137.41 hasta 193.04 mm/s	50% de probabilidad de daño mayor en el ensayado. Daños menores a una vivienda promedio sujeta a las vibraciones de las voladuras de una cantera (Boletín del Buró de Minería 656)
228.6 mm/s	Aproximadamente 90% de probabilidades de daños menores provenientes de voladuras de construcción o de cantera. Daños estructurales en algunas casas, depende de la fuente de vibración, el carácter de las vibraciones y la vivienda.
Mayor a 304.8 mm/s	Se cae roca en túneles sin revestimiento
508.0 mm/s	Para voladuras de construcción cercana, daños menores en casi todas las casas y estructurales en algunas. Para vibraciones de baja frecuencia los daños estructurales se dan en la mayoría de las viviendas

En el reporte USBM 8507 (1980) se establecen los límites de VPP dependientes de la frecuencia (Figura 2.3). Debido a la fragilidad del yeso se presenta una curva adicional en la que los límites son menores que en estructuras hechas con muros de block o tabique. Se establece un límite máximo de 50 mm/s para frecuencias mayores de 40 Hz.

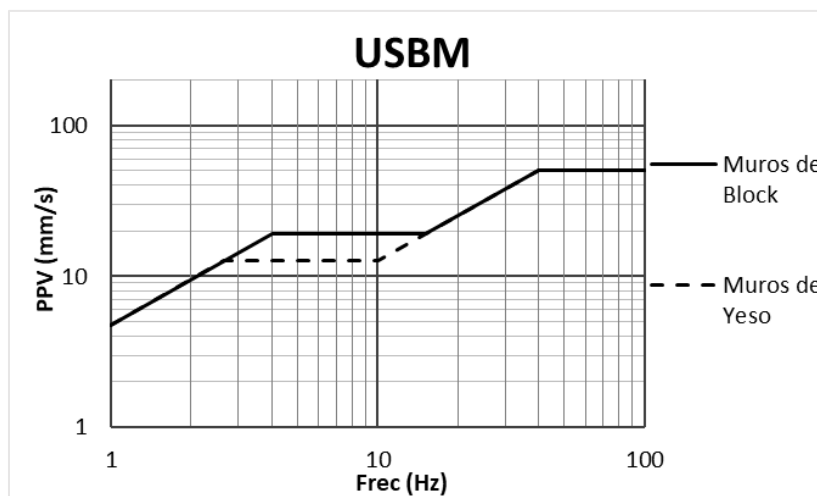


Figura 2.3 USBM 8507 (1980)

2.3.2 Norma DIN 4150-3

La norma alemana DIN 4150 (1999) establece valores de VPP en función de la frecuencia. En la Tabla 2.3 se presentan los valores máximos permisibles de velocidad de partícula, en mm/s, con sus diferentes frecuencias asociadas para distintos tipos de edificaciones. En la Figura 2.4 se muestran estos límites de manera gráfica.

Tabla 2.3 Valores límite de VPP (mm/s) Norma DIN 4150-3 "Structural Vibration Buildings. Effects of Vibration on Structures" (1999)

TIPO DE EDIFICACIÓN	FRECUENCIA		
	< 10 Hz	10 – 15 Hz	50 – 100 Hz
Estructuras delicadas muy sensibles a la vibración	3	3 - 8	8 – 10
Viviendas y edificios similares o de uso similar	5	3 - 15	15 – 20
Edificios comerciales, industriales y edificios de diseño similares	20	20 - 40	40 – 50

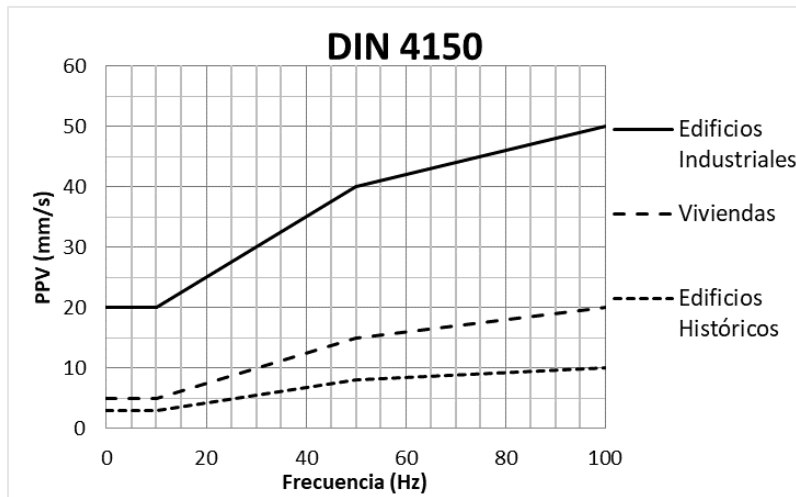


Figura 2.4 Norma DIN 4150 (1999)

2.3.3 Norma BS 6472

El apéndice C de la norma británica BS 6472 (1992) se enfoca en la evaluación de vibración inducida por explosiones. Debe considerarse el periodo de tiempo y el número de explosiones, de ello se derivan una serie de curvas que dependen del tipo de estructura y si la explosión ocurre en el día o por la noche. Además, estas curvas varían dependiendo de la posición de la persona (Figura 2.5). En las Figuras 2.6 y 2.7 se presentan las curvas de límites de vibración en función de la VPP y Frecuencia para los ejes horizontales y el eje vertical respectivamente.

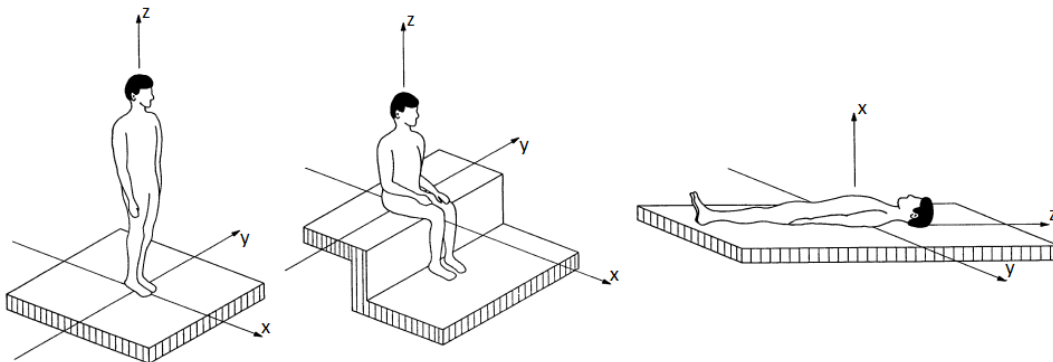


Figura 2.5 Sistema de coordenadas para la medición de vibraciones sobre las personas

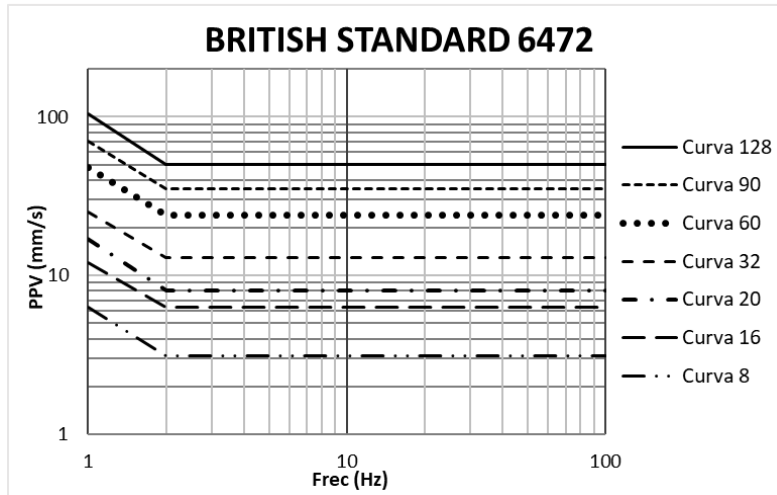


Figura 2.6 Norma BS 6472 (1992) ejes X y Y

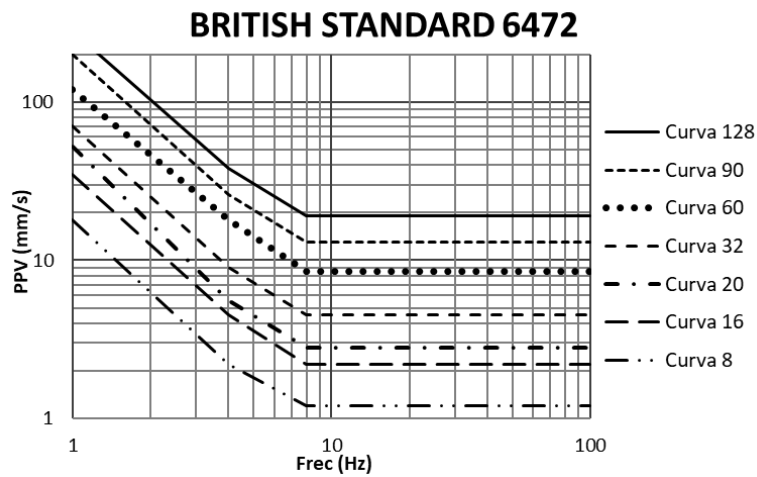


Figura 2.7 Norma BS 6472 (1992) eje Z

En la tabla 2.4 se presentan las curvas que corresponden a los límites de vibración de acuerdo con el tipo de estructura que se esté monitoreando.

Tabla 2.4 Factores usados para establecer magnitudes satisfactorias de vibración en edificios respecto a la respuesta humana

TIPO DE ESTRUCTURA	TIEMPO	EXPOSICIÓN A VIBRACIÓN CONTÍNUA (16 Hrs DÍA, 8 Hrs NOCHE)	EXCITACIÓN POR VIBRACIÓN DE IMPULSO, HASTA 3 EVENTOS POR DÍA
Áreas de trabajo crítico (p.ej. quirófanos de hospitales, laboratorios de precisión)	DIA	1	1
	NOCHE	1	1
Viviendas	DIA	2 a 4	60 a 90
	NOCHE	1.4	20
Oficinas	DIA	4	128
	NOCHE	4	128
Talleres de trabajo	DIA	8	128
	NOCHE	8	128

Además, la norma indica que las magnitudes de vibración no deben excederse en más del 10%, y ninguna explosión deberá generar vibraciones que excedan la magnitud satisfactoria en más del 50%.

2.3.4 Norma ISO 10137

La Organización Internacional de Normalización (ISO) clasifica las vibraciones que pueden afectar a los humanos en cinco categorías:

- a- Por debajo del umbral de percepción humana.
- b- Efectos de umbral básico.
- c- Causantes de alarma y miedo, pueden estar asociados con una variedad de comentarios adversos.
- d- Interferencia con actividades.
- e- Posibilidad de lesiones o riesgo para la salud.

En cuanto a los daños sobre las estructuras presenta tres definiciones.

Cosmético - Formación de pequeñas grietas en muros o el crecimiento de estas sobre el yeso.

Menor – Formación de grietas mayores o pérdida y caída de yeso o recubrimiento, grietas que atraviesan las piezas de mampostería.

Mayor – Daño en elementos estructurales, grietas sobre columnas, pérdida de material en juntas o piezas de mampostería.

Los límites de vibración para eventos de corta duración, como son las explosiones, se definen en función del valor cuadrático medio de la aceleración (r.m.s.) en donde se consideran distintos tipos de estructuras. Área de trabajo crítico (como quirófanos de

hospitales, laboratorios de precisión, etc.), residenciales, oficinas y centros comerciales. Los límites se presentan en las figuras 2.8 y 2.9 para los ejes vertical y horizontales.

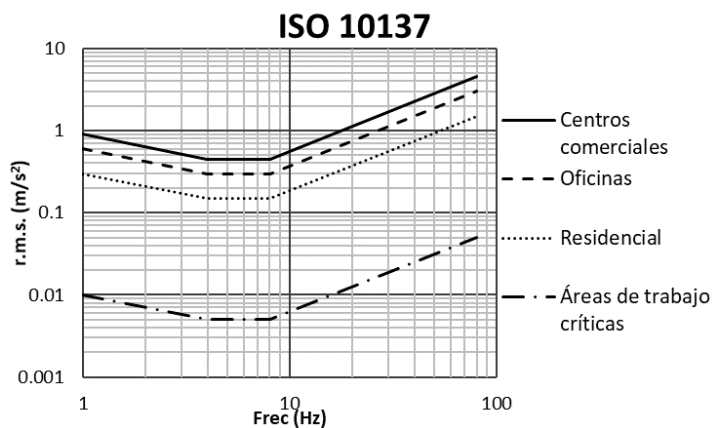


Figura 2.8 Norma ISO 10137 (1992) eje Z

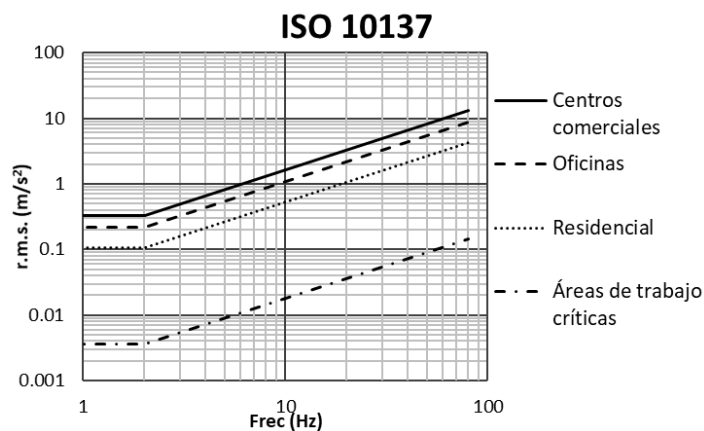


Figura 2.9 Norma BS 6472 (1992) ejes X y Y

La medición de la velocidad de partícula es un método indirecto para determinar las deformaciones dinámicas. Por lo tanto, siempre existe una posibilidad pequeña de que se produzca agrietamiento incluso para niveles muy pequeños de carga dinámica, es decir, niveles que son más bajos que los especificados en varios criterios.

3. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS EN MINA

Se realizó una campaña de monitoreo que consistió en colocar varios sismógrafos a diferentes distancias de la plantilla de barrenación de la voladura, se registraron las vibraciones producidas para cada explosión en términos de velocidad. Los registros obtenidos correspondieron a 30 explosiones controladas con diferentes cantidades de cargas de explosivo y condiciones de confinamiento de la voladura (Lagunas, 2019).

Los resultados de estos registros se resumen en la tabla 3.1, donde se especifica el banco donde se realizó la voladura, la ubicación del sismógrafo, así como la fecha de la voladura, la distancia medida desde el sismógrafo hacia la plantilla de barrenación de la voladura, la carga máxima de explosivo por tiempo de retado (Q_{\max}) y los resultados del registro en velocidad de partícula máxima (PPV) y su frecuencia asociada en Hz.

La ubicación de los puntos de monitoreo y los bancos donde se realizaron trabajos de voladura se muestran en la figura 3.1.

Tabla 3.1 Registros obtenidos en mina (Lagunas, 2019)

Banco	Ubicación	Fecha	Distancia (mts)	PPV (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Q_{\max} (Kg)
2028	Caseta	14/01/2019	246.41	7.1399	30.1	260
2112	CCM	15/01/2019	149.42	167.8430	36.6	50
2112	Cribas	15/01/2019	72.57	35.6972	19.0	50
1980	Taller	16/01/2019	439.19	2.9489	18.3	600
2028	Caseta	16/01/2019	279.4	16.4262	26.9	165
1980	Caseta	16/01/2019	1257.9	1.2611	32.0	600
2028	Limites	18/01/2019	527.57	1.0084	21.3	180
2124	Cribas	18/01/2019	48.4	49.1973	25.6	25
1980	Pueblo	19/01/2019	430.5	2.5705	6.5	550
2064	Pueblo	19/01/2019	192.6	14.8641	19.0	180
1980	Taller	20/01/2019	452.83	1.6078	39.4	350
2064	Taller	20/01/2019	580.1	0.6858	12.5	195
1980	Cribas	21/01/2019	789.9	0.6706	32.0	470
2124	Cribas	21/01/2019	48.5	7.5590	36.6	50
1980	Pueblo	22/01/2019	543.7	2.4206	16.5	600
2064	Pueblo	22/01/2019	268.8	5.2654	6.9	210
1980	Taller	23/01/2019	449.00	3.2004	10.9	600
2124	Bandas	23/01/2019	24.80	81.6356	46.5	50
2028	Cribas	24/01/2019	746.00	1.1125	26.9	175
1980	Taller	24/01/2019	466.00	3.4061	4.9	510
2124	Cribas	24/01/2019	86.90	34.4526	16.0	50
2124	Cribas	25/01/2019	23.00	81.9404	56.9	25
1980	Bandas arriba	26/01/2019	815.00	0.9373	13.8	350
1980	Bandas abajo	26/01/2019	810.00	0.8128	10.4	350
2112	Bandas arriba	26/01/2019	27.30	32.3088	7.8	50

2112	Bandas abajo	26/01/2019	16.6	114.7121	N/A	50
2016	CCM	27/01/2019	737.00	2.1666	11.9	210
2016	Cribas	27/01/2019	643.00	0.6706	16.5	210
2112	CCM	27/01/2019	43.88	52.0040	26.9	50
2112	Cribas	27/01/2019	43.00	29.0043	51.2	50
1980	Cribas abajo	28/01/2019	762.00	0.7087	16.0	360
1980	Cribas arriba	28/01/2019	780.00	0.7645	19.7	360
2112	Cribas	28/01/2019	11.30	164.7546	28.4	50
2112	Cribas estructura	28/01/2019	22.00	64.3382	42.7	50
2112	Cribas	29/01/2019	27.54	27.5717	46.5	50
2112	Bandas	29/01/2019	58.13	146.3726	24.4	50
2016	Bandas	30/01/2019	675.30	0.8204	3.0	160
2016	Cribas	30/01/2019	747.70	0.9220	3.3	160
2112	Bandas	30/01/2019	30.00	78.3057	46.5	50
2112	Cribas	30/01/2019	40.00	28.0111	24.4	50
2112	Cribas	31/01/2019	63.00	21.6205	22.3	50
2112	Bandas	31/01/2019	28.00	73.0250	34.1	50
2112	Bandas Sur	03/02/2019	71.00	16.2357	51.2	50
2112	Bandas Norte	03/02/2019	83.40	21.5011	34.1	50
2112 Sur	CCM	05/02/2019	66.00	44.2163	34.8	50
2112 Sur	Bandas	05/02/2019	71.00	42.9006	34.1	50
2112 Norte	Bandas Stockpile	06/02/2019	52.30	61.6585	64	50
2112 Sur	Bandas	06/02/2019	66.92	31.3385	34.1	50
2112 Norte	Límites	06/02/2019	682	1.6510	6.7	50
2112 Norte	Bandas Stockpile	07/02/2019	92.60	8.3388	11.6	50
2112 Sur	Bandas	07/02/2019	74.90	32.4485	5.8	50
1980	Taller	07/02/2019	446.7	0.7620	8.1	200
2112 Sur	Taller	07/02/2019	623	1.0160	5.7	50
1980	Bandas	08/02/2019	807.70	0.6375	30.1	370
1980	Bandas Stockpile	08/02/2019	847.70	1.1024	26.9	370
2112 Sur	Bandas	08/02/2019	79.10	11.7907	34.1	50
2112 Norte	Bandas Stockpile	08/02/2019	38.70	55.0469	64	50
1980	Taller	08/02/2019	459	2.0320	32	370
2112 Sur	Taller	08/02/2019	626.5	0.7620	7.8	50
2112 Sur	CCM	09/02/2019	31.10	59.6011	17.7	50
2112 Norte	Bandas Sockpile	09/02/2019	110.60	8.8443	25.6	50
2112 Sur	Bandas	09/02/2019	53.8	45.4660	37.0	50
2112 Norte	Bandas Stockpile	10/02/2019	35.20	50.7746	28.4	50
2112 Sur	Bandas	10/02/2019	40.70	85.2500	46.5	50
2112 Sur	Cribas	10/02/2019	46.2	55.6260	47.0	50
2112	Bandas	12/02/2019	37.20	69.6671	56.9	50
2112	Cribas	12/02/2019	38.90	77.4319	21.3	50
2016	Bandas	13/02/2019	574.70	1.3310	6.3	135
2016	Stockpile	13/02/2019	359.20	4.5314	26.9	135
2112	Stockpile	13/02/2019	111.50	7.9375	17.1	50
2112	Bandas	13/02/2019	67.90	30.8102	32.0	50
2112	Cribas	13/02/2019	131.9	13.2080	19.0	50
2016	Cribas	13/02/2019	644.7	1.3970	6.2	135

2112	Bandas	14/02/2019	51.3	39.5478	30.0	50
2100	CCM	14/02/2019	90.6	78.4606	13.0	75

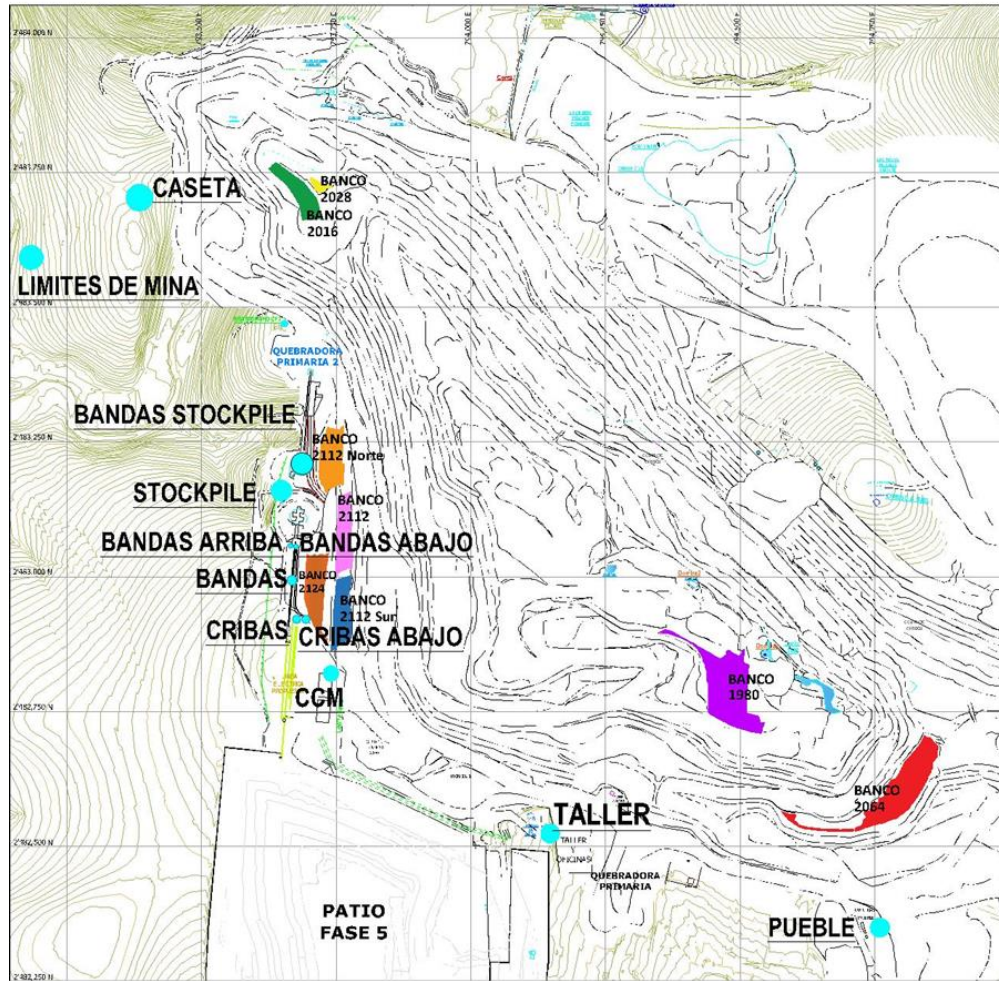


Figura 3.1 Puntos de Monitoreo

3.1 Resultados del análisis

El análisis de los registros consiste en obtener la señal en la historia de tiempo en términos de velocidad (mm/s), y con la ayuda del programa Degtra (Ordáz, 2020) se procesan y analizan dichas señales. El procesamiento de las señales consiste en hacer una corrección de línea base, realizar un filtro de frecuencias y derivar la señal para obtener la aceleración, y con base a ello obtener espectros de respuesta de desplazamientos, velocidad y pseudoaceleración, también se obtuvieron espectros de la transformada de Fourier para obtener las frecuencias dominantes.

Este proceso se hizo para los tres ejes principales en los que se registró la señal (longitudinal, transversal y vertical). A continuación, se presenta un ejemplo del análisis de estos registros, se tomó el evento registrado el día 31/01/2019 con el sismógrafo ubicado en el punto Bandas a 28 m de distancia hacia la plantilla de voladura. En la figura 3.2 se muestra el registro de velocidad obtenidos con el sismógrafo.

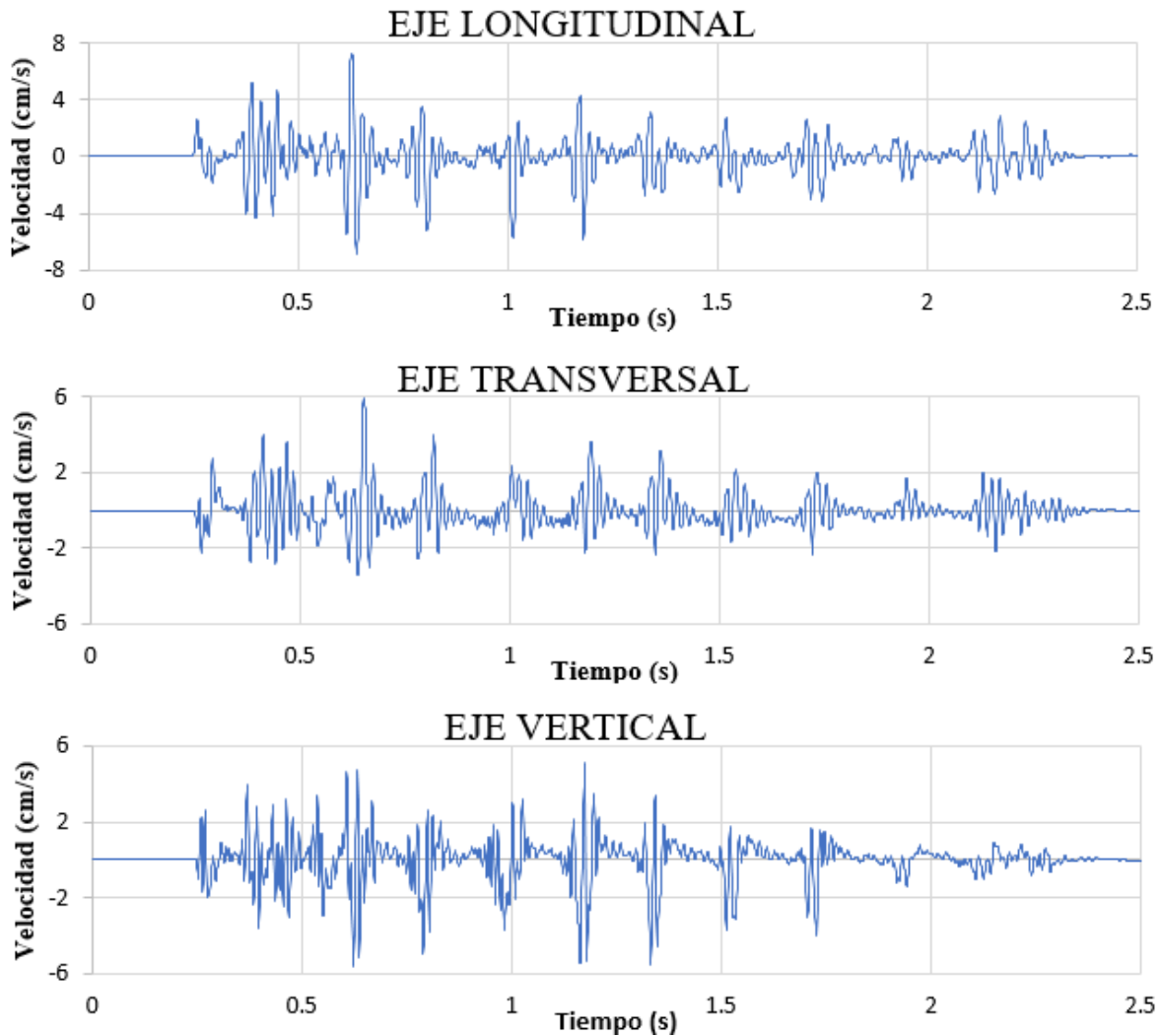


Figura 3.2 Señal del registro 31/01/2019 Bandas en términos de velocidad

El registro en términos de aceleración se puede obtener derivando la velocidad con respecto al tiempo.

$$a_{cel,i} = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Donde a_{cel_i} , v_i y t_i es la aceleración, velocidad y tiempo en el instante de tiempo i , v_{i+1} y t_{i+1} es la velocidad y el tiempo en el instante $i + 1$. En la figura 3.3 se muestra el registro de aceleración obtenido.

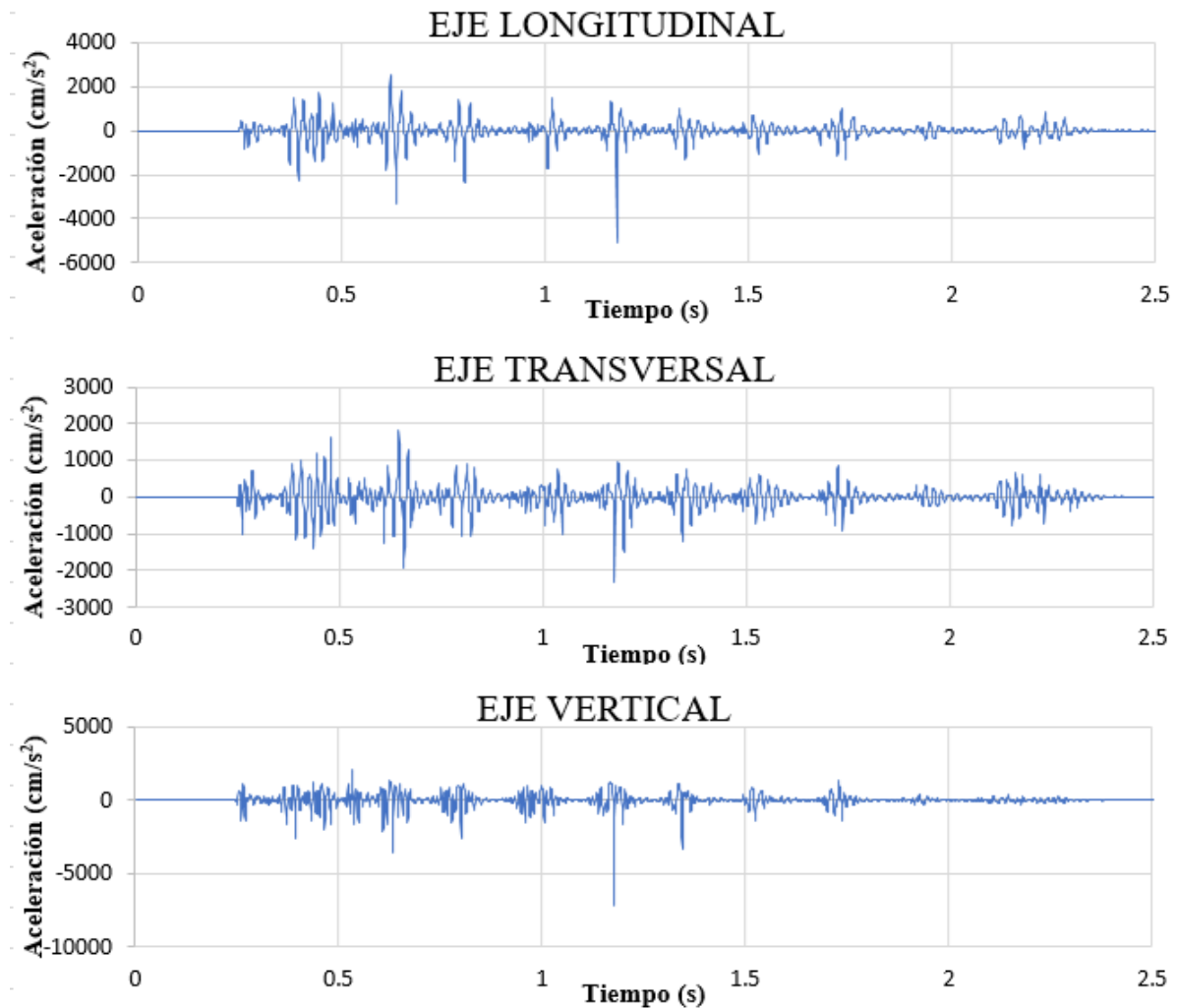


Figura 3.3 Señal del registro 31/01/2019 Bandas en términos de aceleración

Para la obtención de los espectros se consideró un amortiguamiento del 5%. En las siguientes gráficas se muestran los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración obtenidos para cada uno de los ejes.

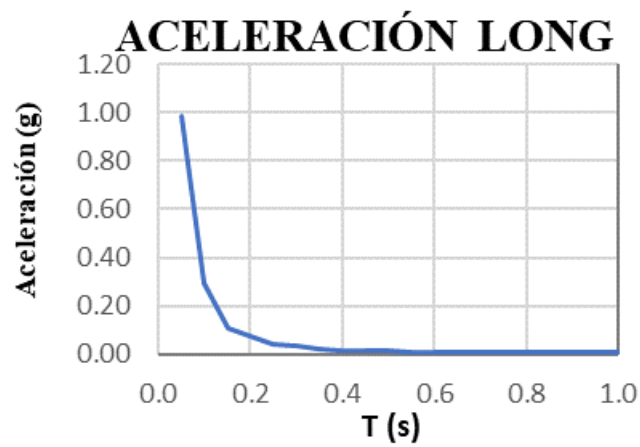
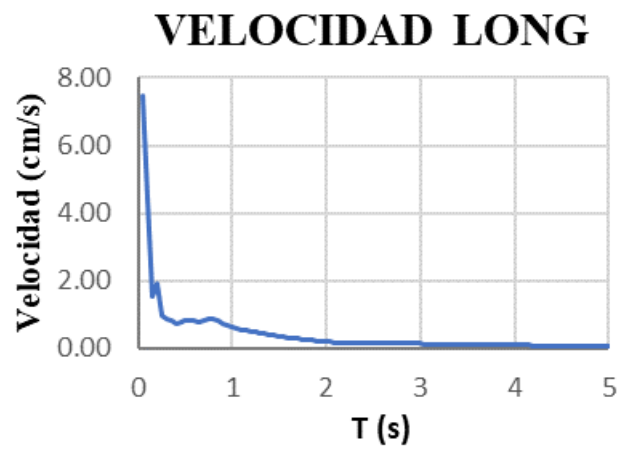


Figura 3.4 Espectros de respuesta eje longitudinal

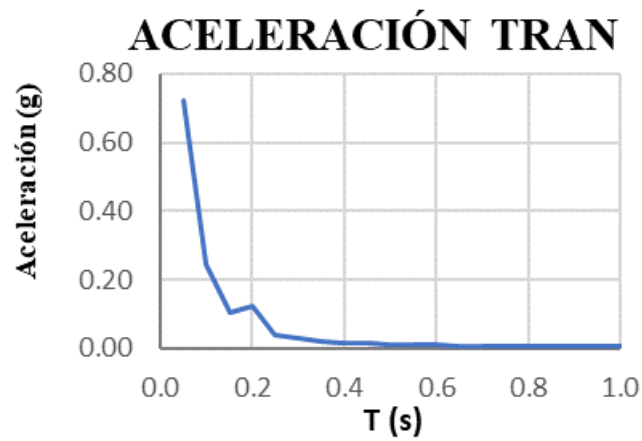
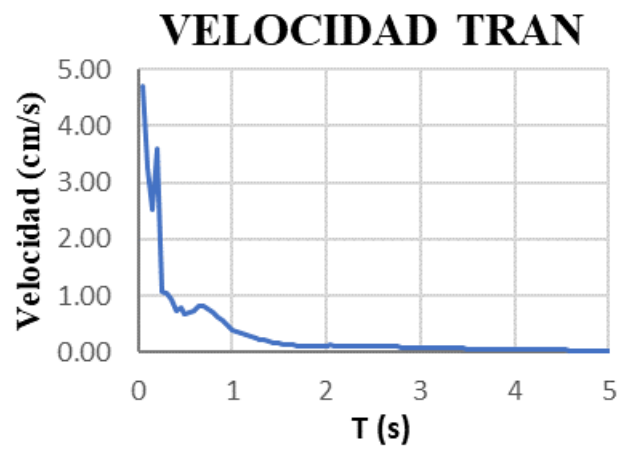
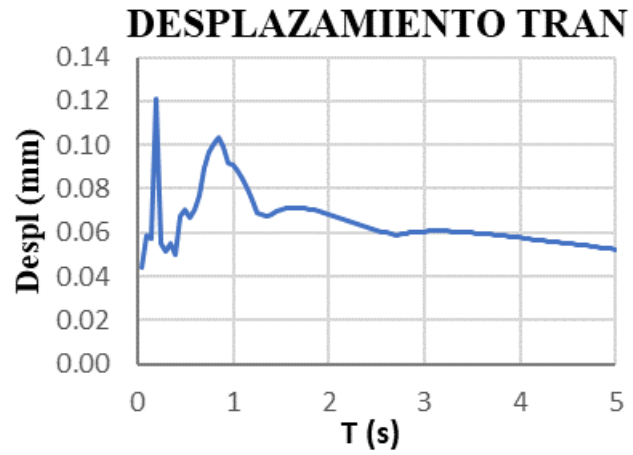


Figura 3.5 Espectros de respuesta eje transversal

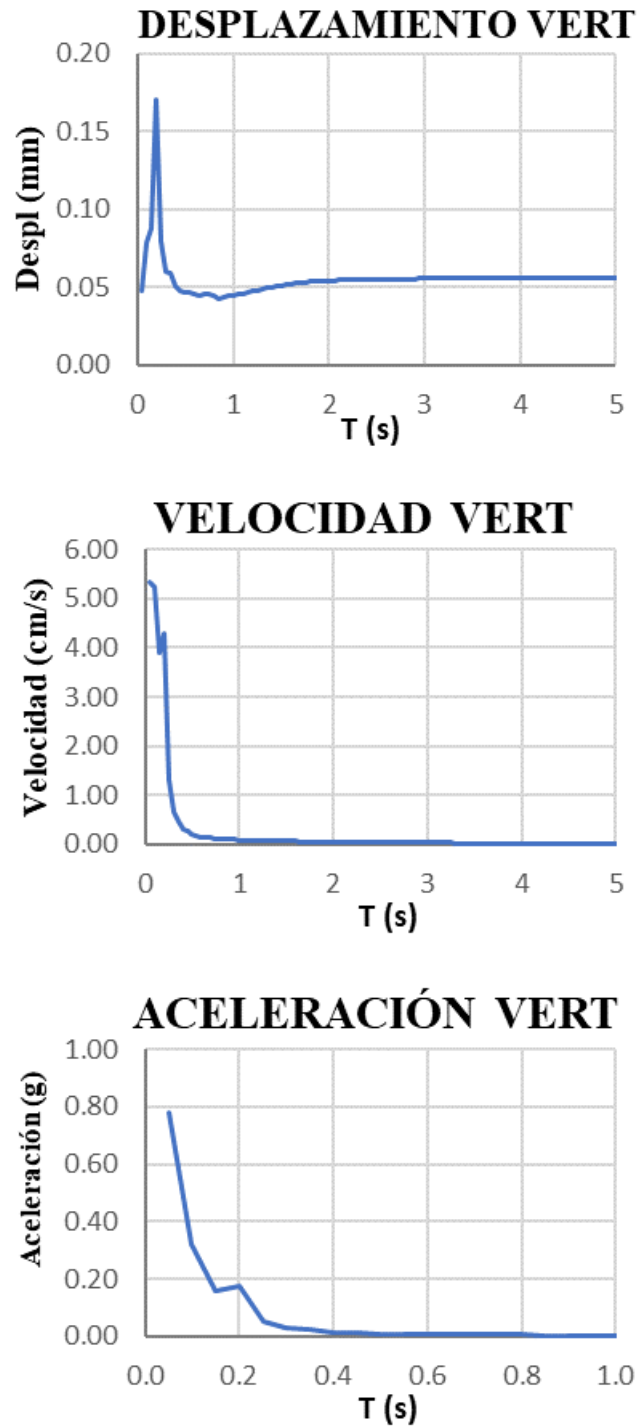


Figura 3.6 Espectros de respuesta eje vertical

Se obtuvieron también los espectros de Fourier para poder determinar las frecuencias predominantes.

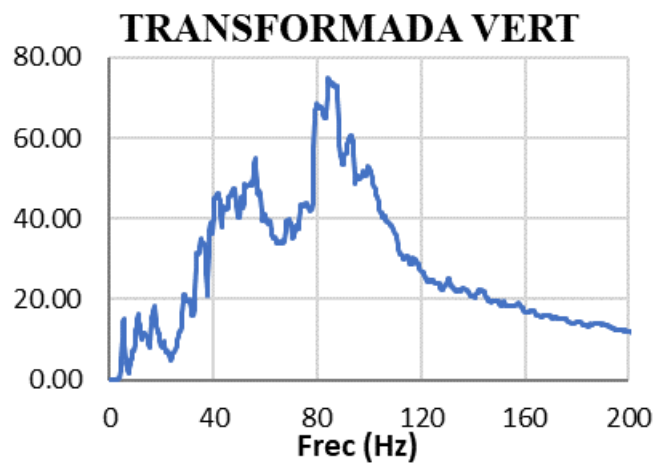
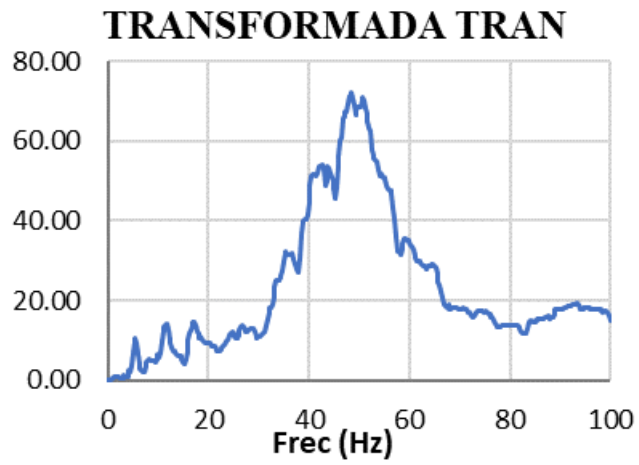
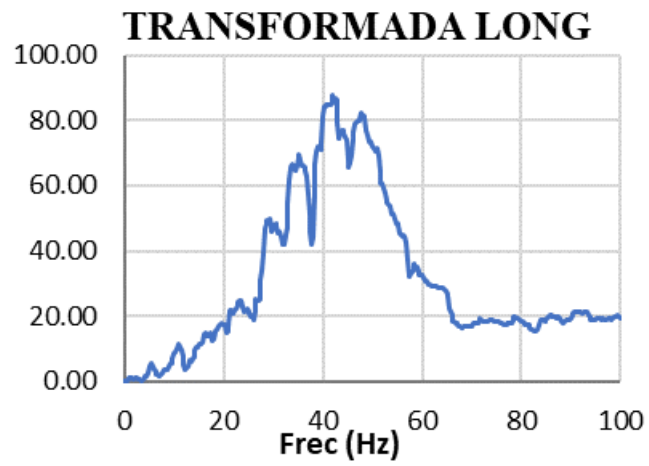


Figura 3.7 Espectros de Fourier del registro 31/01/2019 Bandas

Los espectros obtenidos de los registros se presentan clasificados de acuerdo con el punto de monitoreo. en las siguientes gráficas se presentan los espectros correspondientes al eje longitudinal, transversal y vertical para cada punto de monitoreo.

3.1.1 Bandas

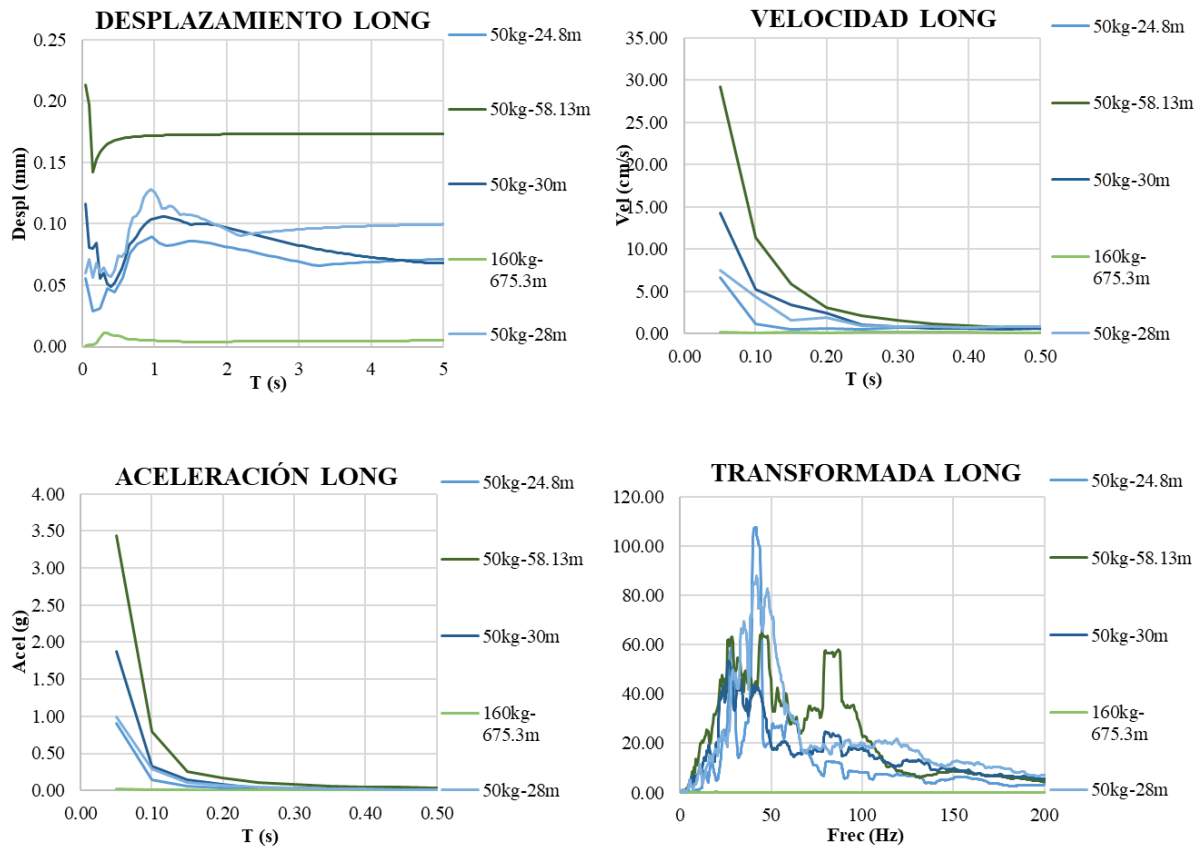


Figura 3.8 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje longitudinal

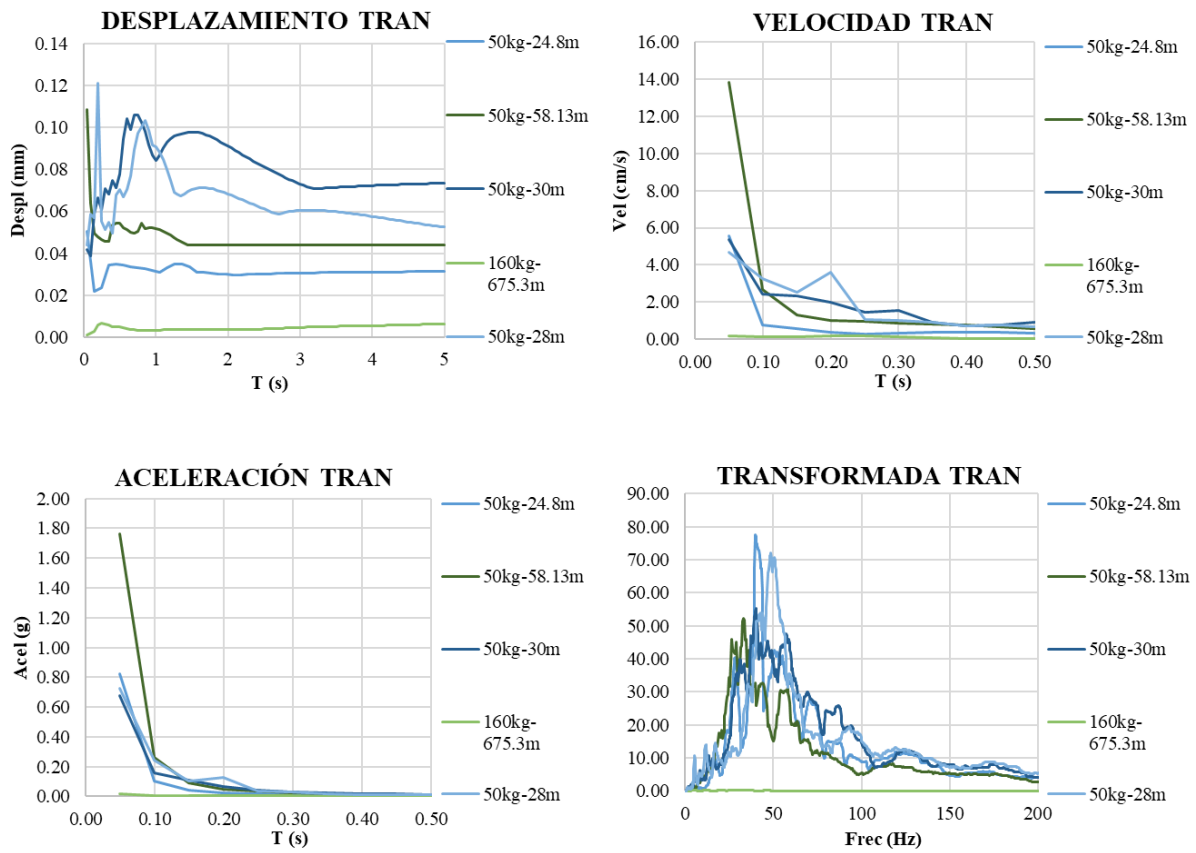


Figura 3.9 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje transversal

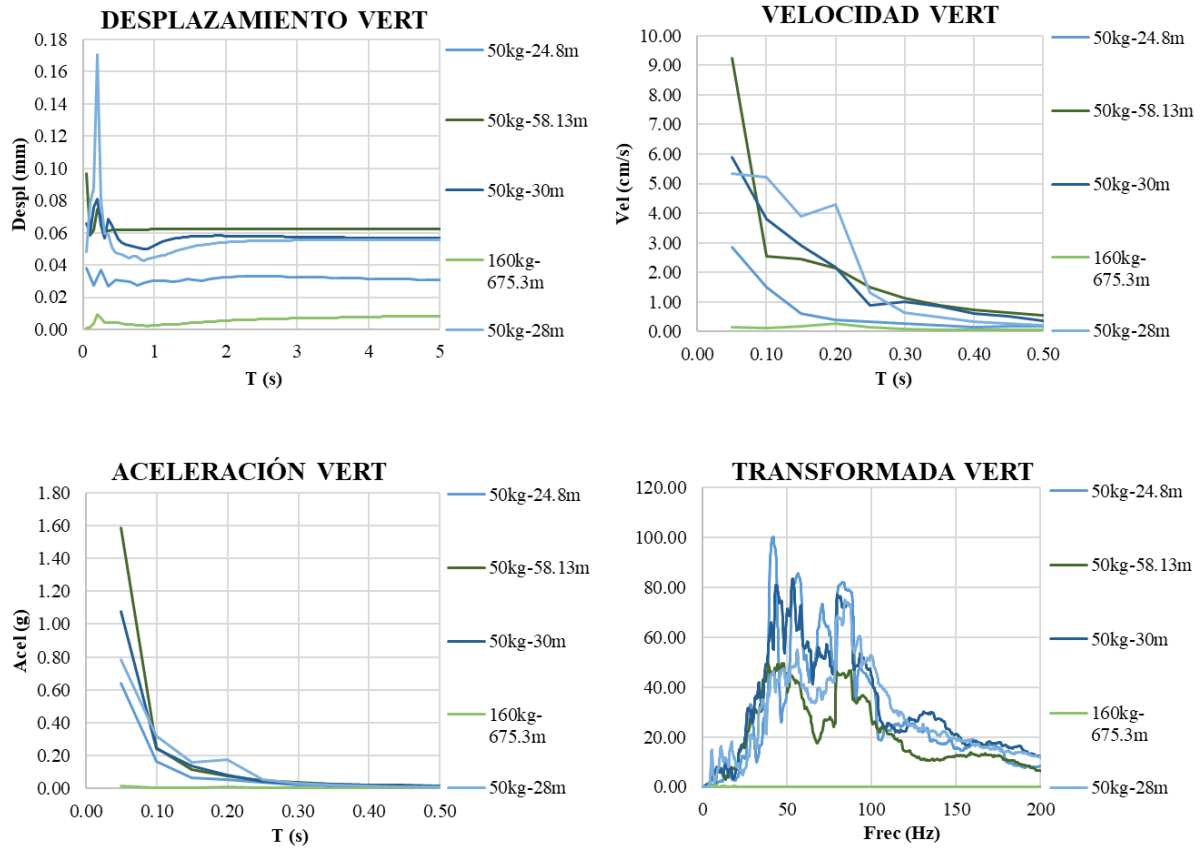


Figura 3.10 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Bandas, eje vertical

3.1.2 Caseta

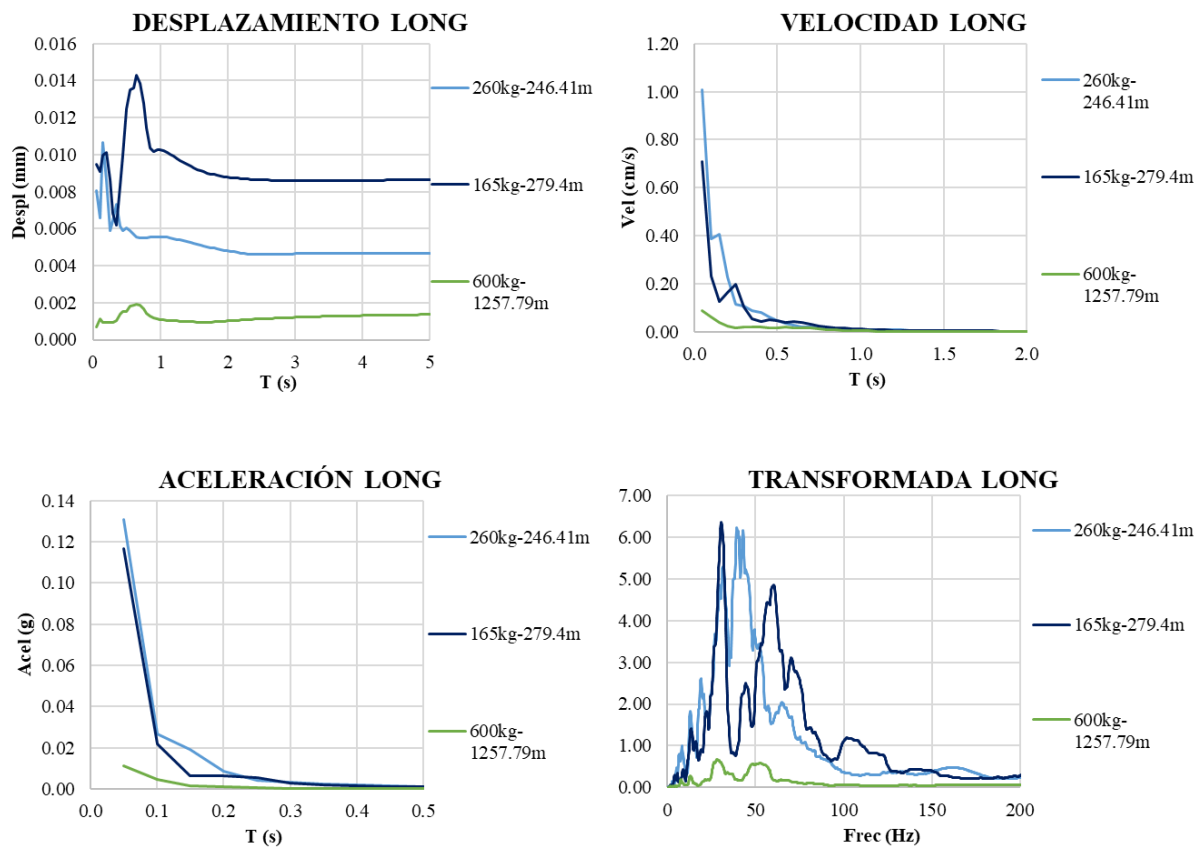


Figura 3.11 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje longitudinal

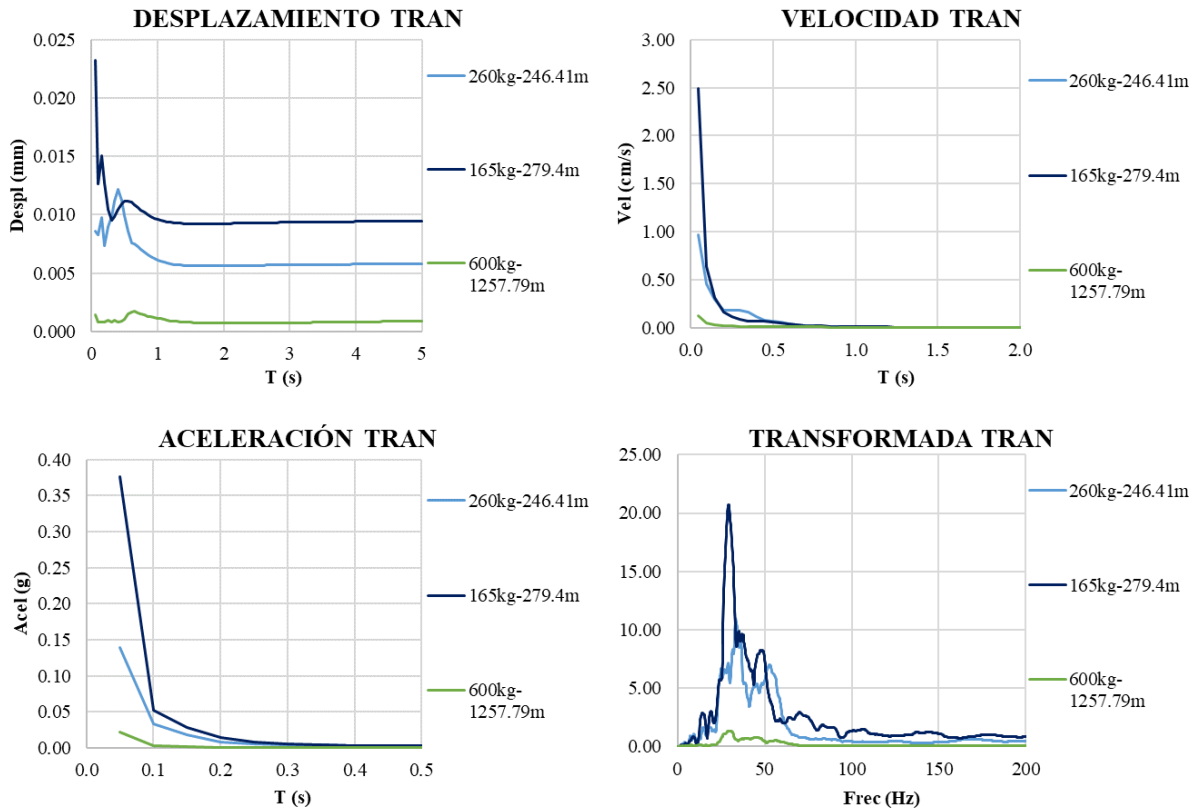


Figura 3.12 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje transversal

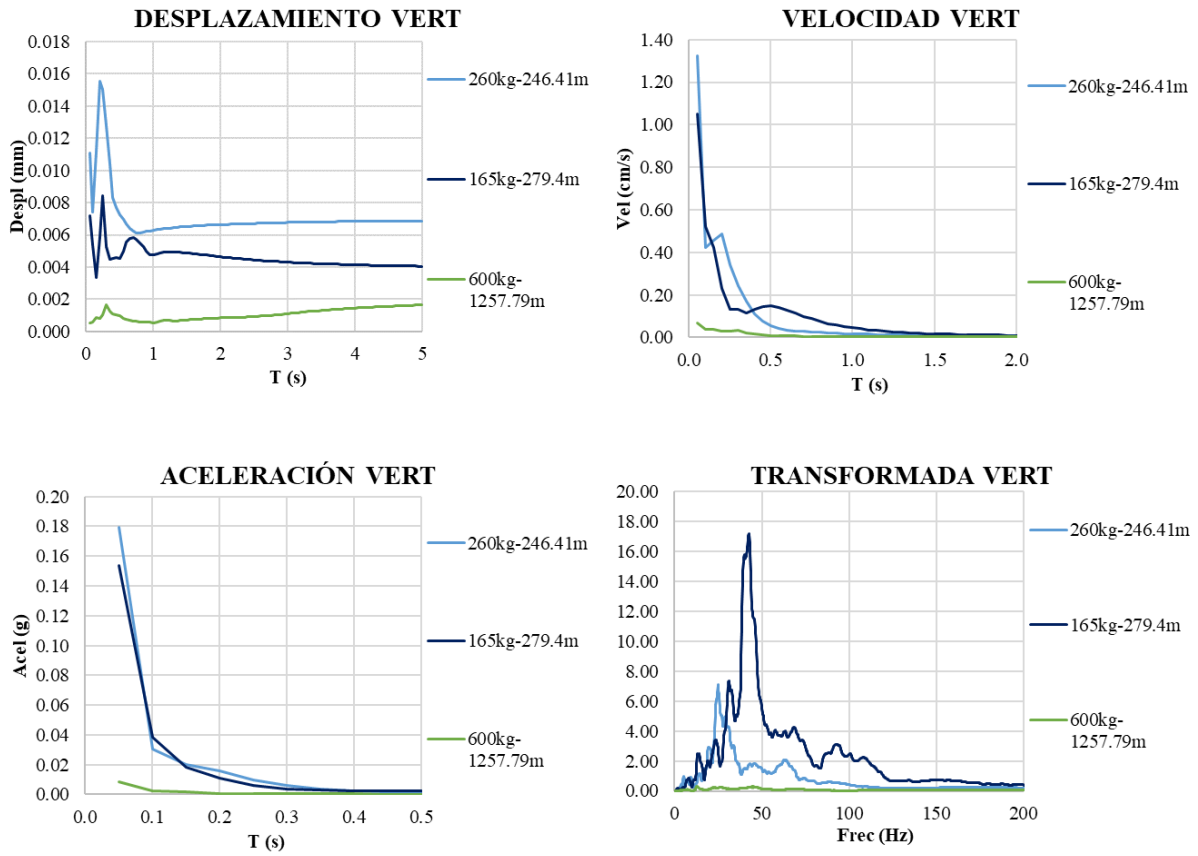


Figura 3.13 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Caseta, eje vertical

3.1.3 Cribas

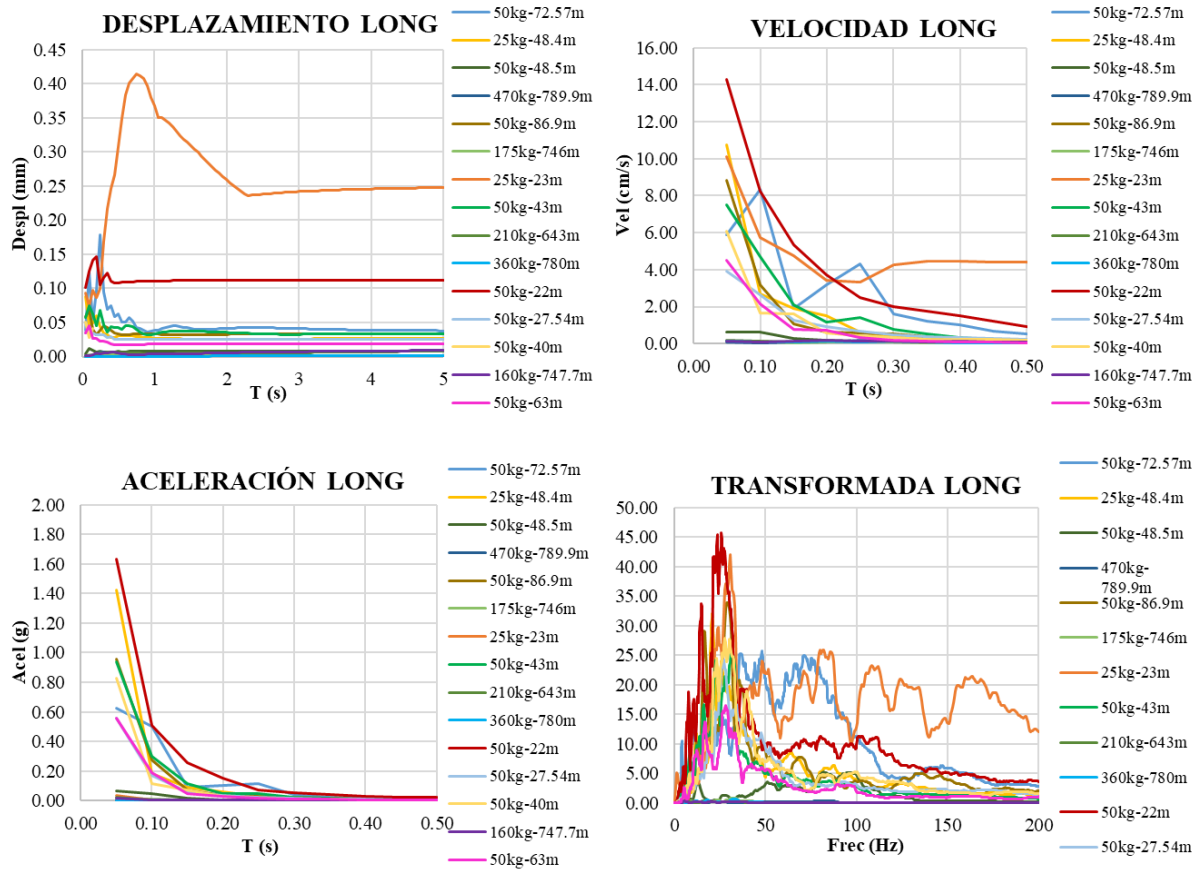


Figura 3.14 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje longitudinal

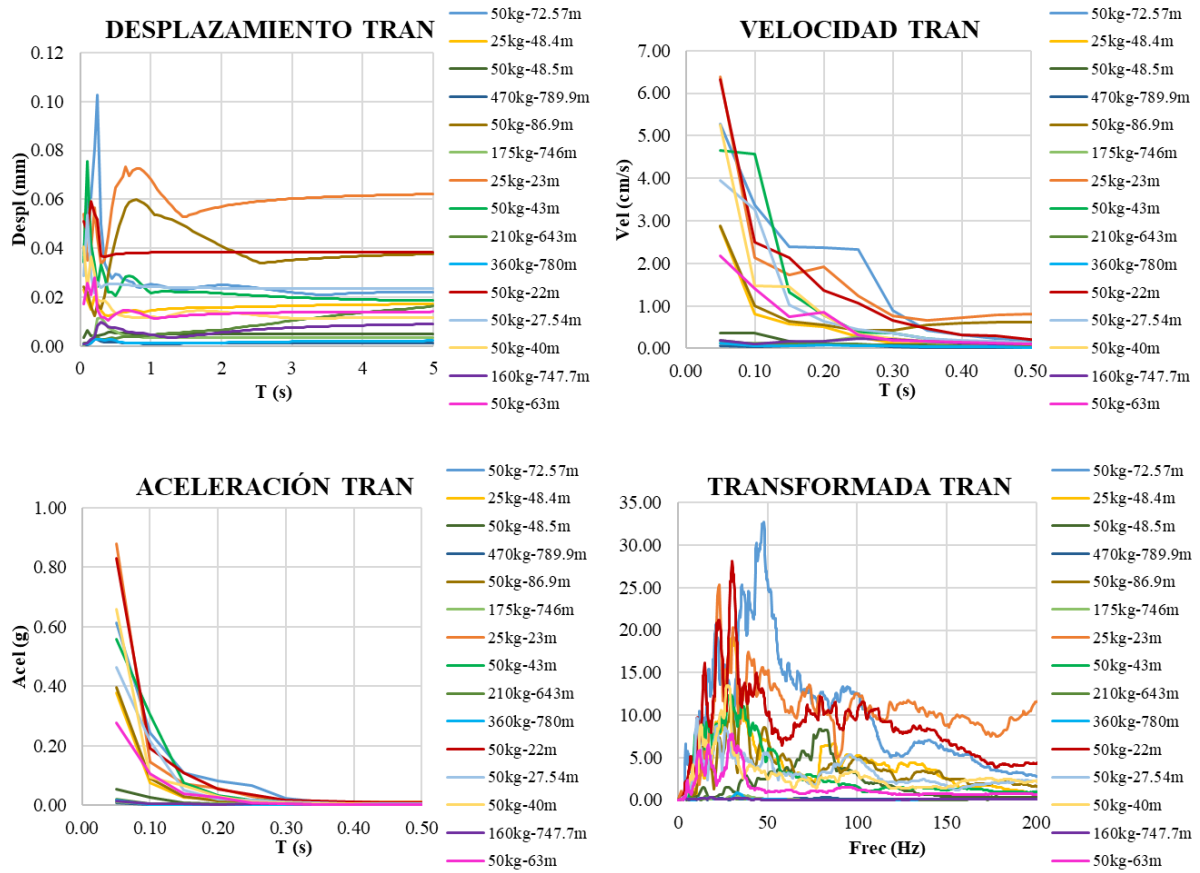


Figura 3.15 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje transversal

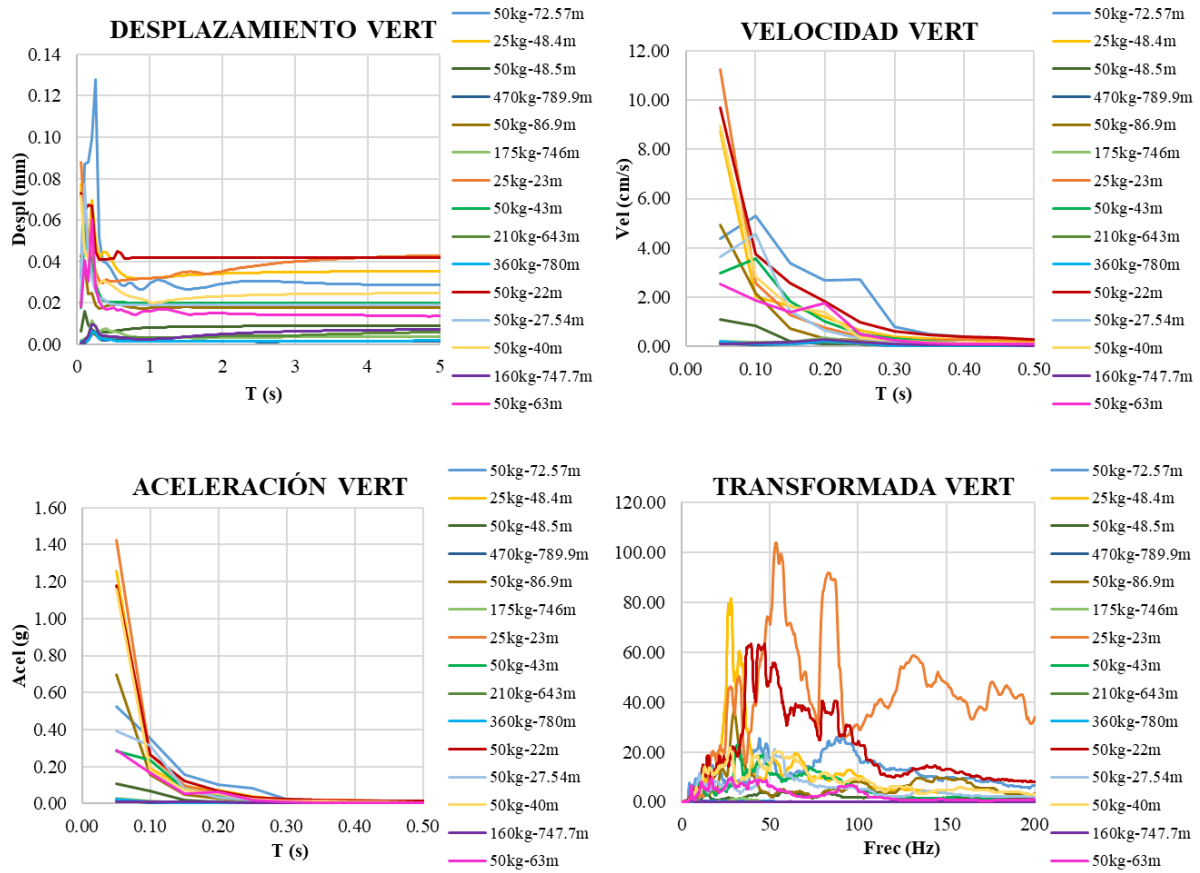


Figura 3.16 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Cribas, eje vertical

3.1.4 Pueble

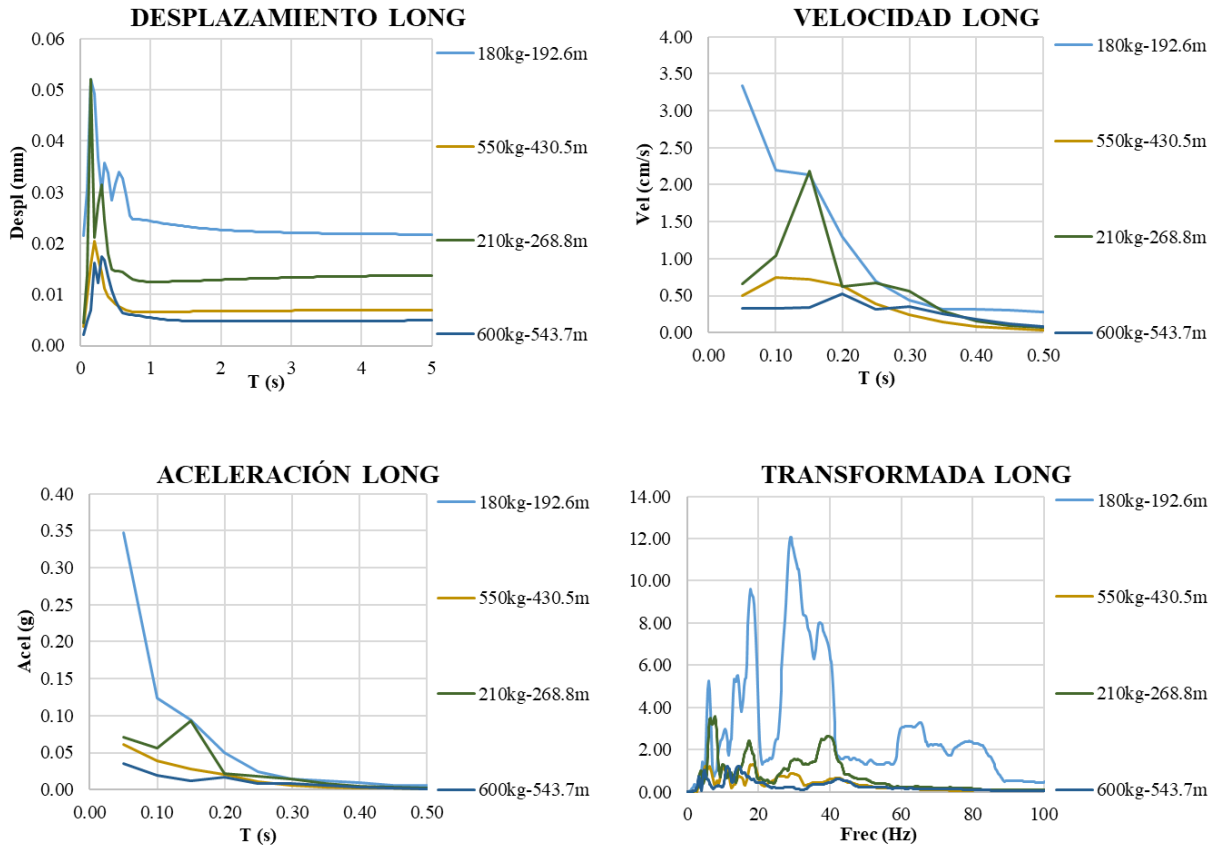


Figura 3.17 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Pueble, eje longitudinal

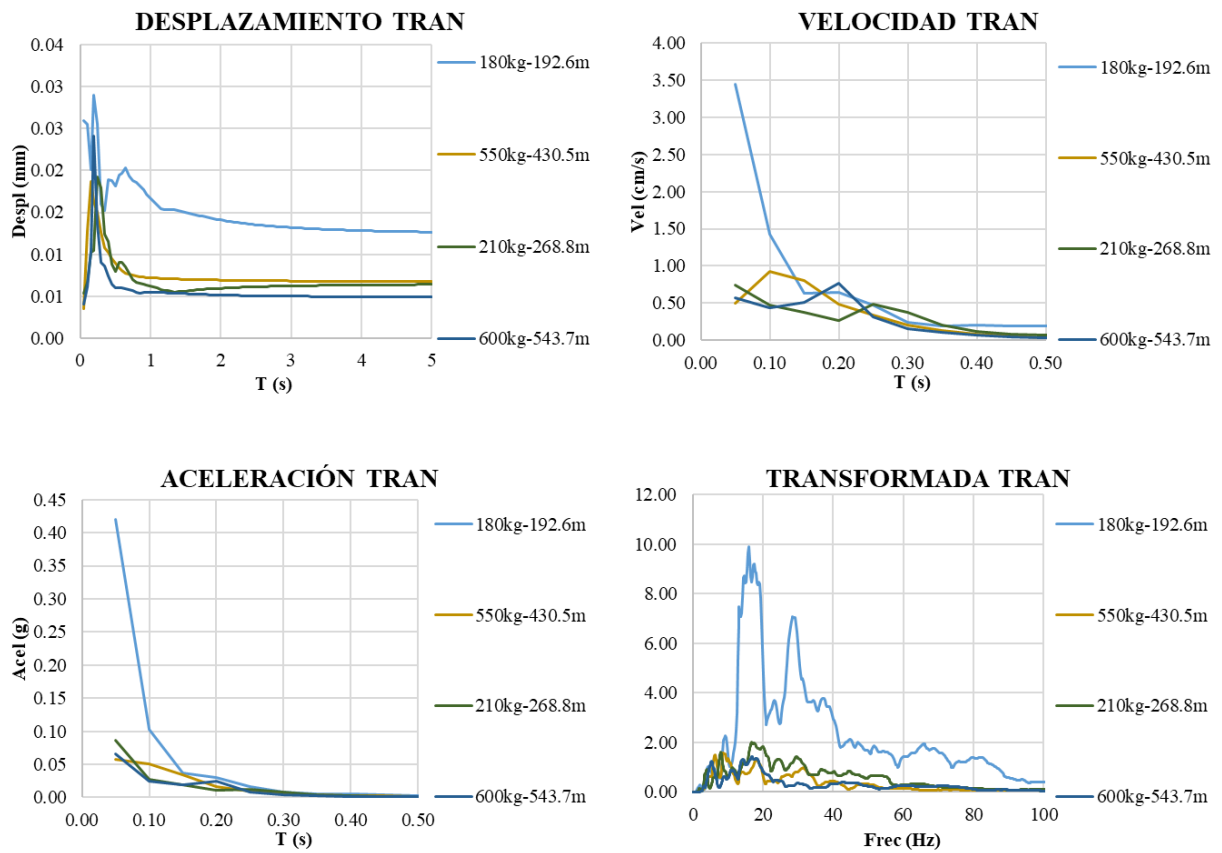


Figura 3.18 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Pueblo, eje transversal

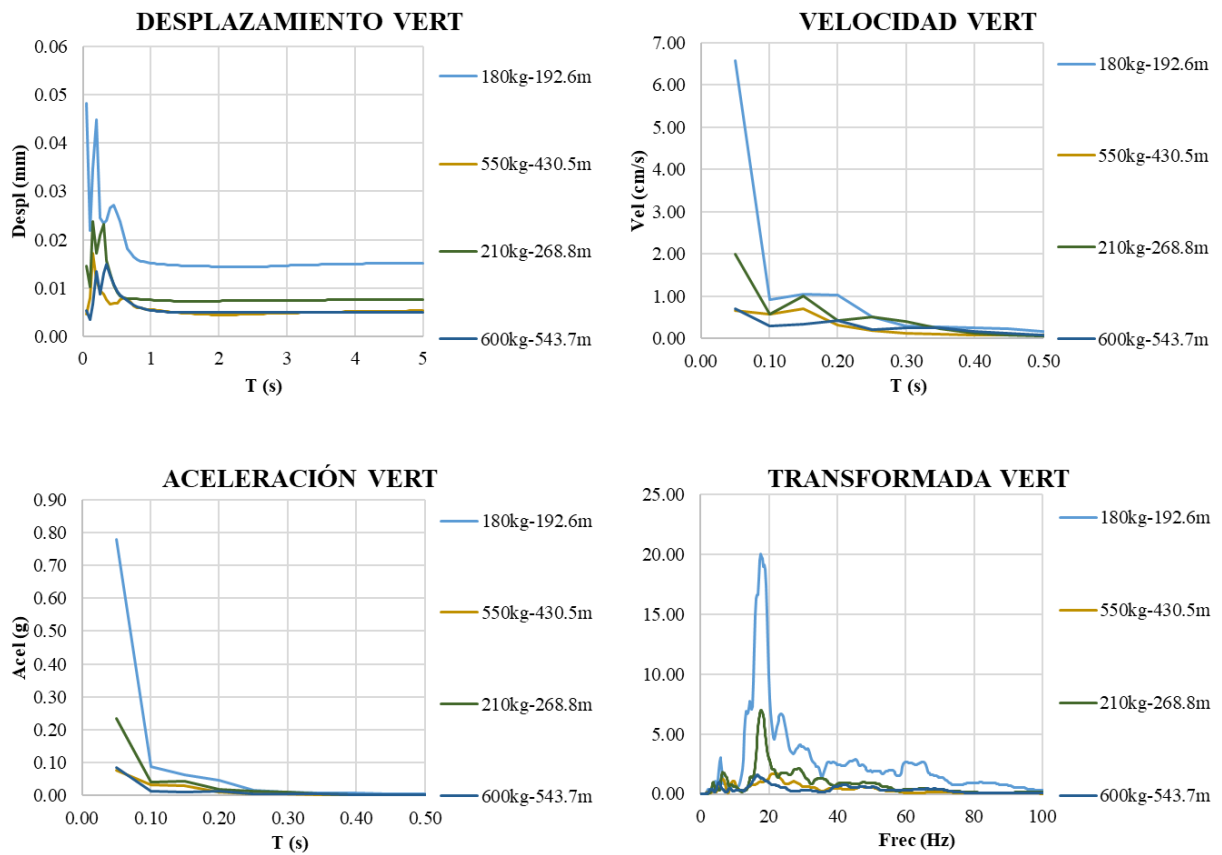


Figura 3.19 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Pueblo, eje vertical

3.1.5 Taller

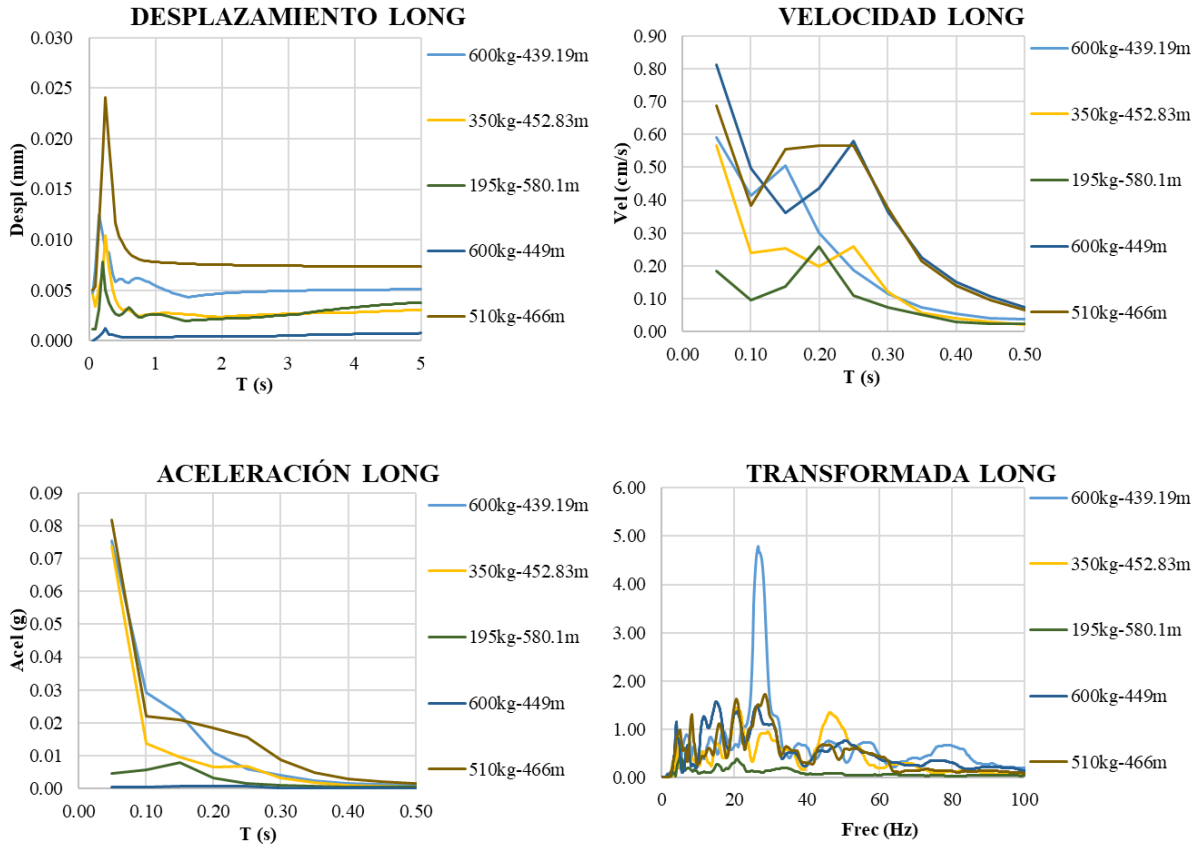


Figura 3.20 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje longitudinal

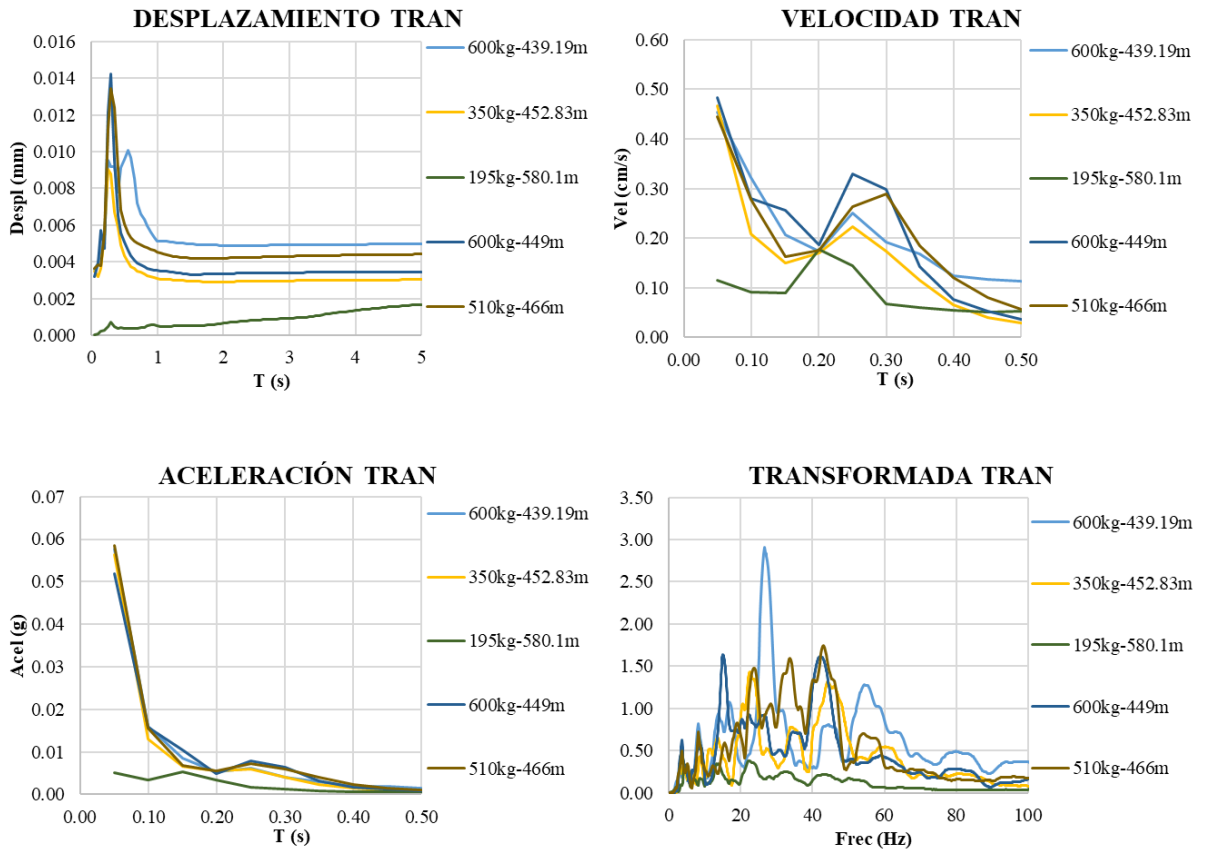


Figura 3.21 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje transversal

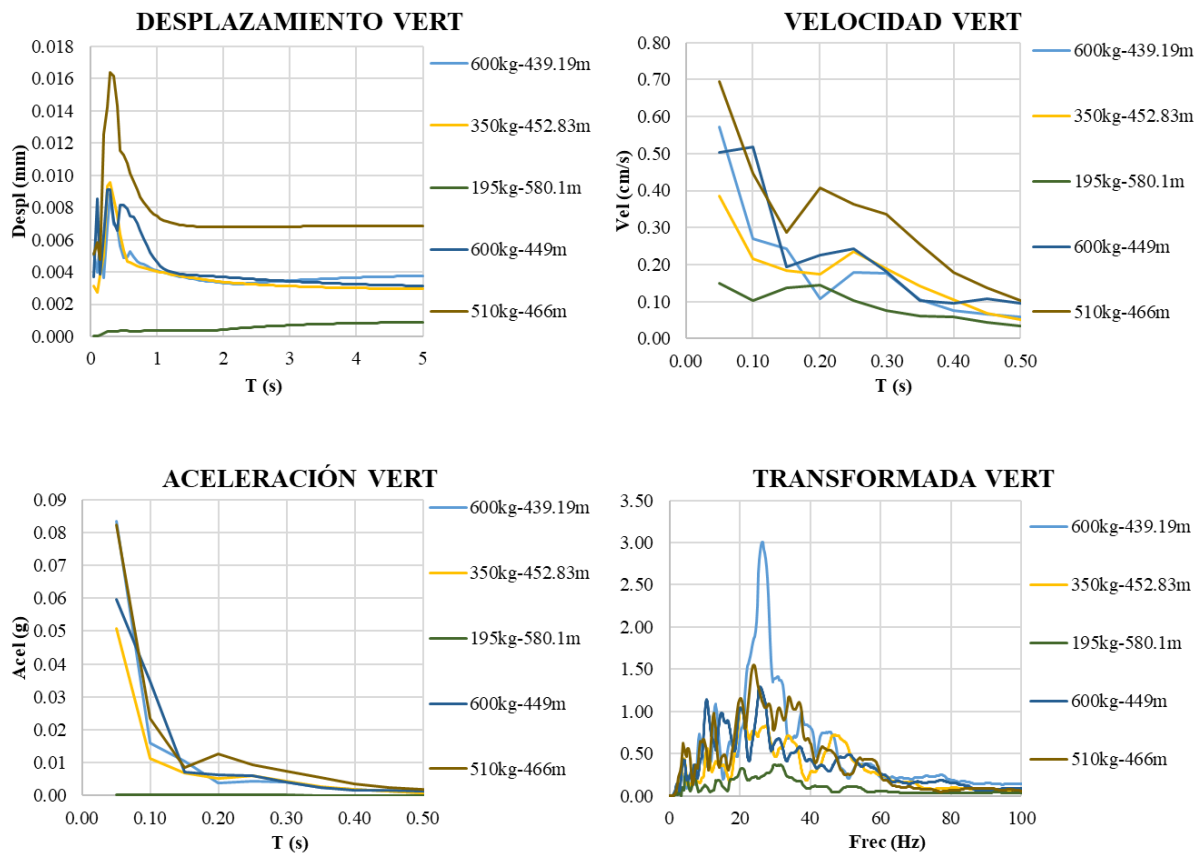


Figura 3.22 Espectros de respuesta del punto de monitoreo Taller, eje vertical

3.2 Comparativa con los estándares internacionales

Los datos necesarios de los registros para ubicar su confiabilidad de acuerdo con las normas internacionales se presentan en la tabla 3.2, en donde se presentan los valores correspondientes que se piden en cada norma para definir los límites, como la velocidad de partícula pico, la frecuencia y el valor cuadrático medio de la aceleración.

Tabla 3.2 Resultados de vibración

Banco	Ubicación	Fecha	Distancia	Frec (Hz)	PPV (mm/s)			r.m.s. (m/s ²)		
					LONG	TRAN	VERT	LONG	TRAN	VERT
2028	Caseta	14/01/2019	246.41	30.1	5.052	7.1410	4.8950	0.266	0.395	0.21
2112	CCM	15/01/2019	149.42	36.6	167.843	71.6690	61.5650	5.594	2.285	2.64
2112	Cribas	15/01/2019	72.57	19.0	35.697	26.5140	33.7180	1.46	1.415	1.63
1980	Taller	16/01/2019	439.19	18.3	2.948	2.4910	2.6560	0.098	0.076	0.07
2028	Caseta	16/01/2019	279.4	26.9	10.089	16.4260	5.8480	0.554	0.636	0.26
1980	Caseta	16/01/2019	1257.9	32.0	0.709	1.2610	0.3000	0.03	0.045	0.02
2028	Limites	18/01/2019	527.57	21.3	0.788	1.0090	0.6460	0.021	0.032	0.02
2124	Cribas	18/01/2019	48.4	25.6	25.884	18.9950	49.1980	0.912	0.673	2.1
1980	Pueblo	19/01/2019	430.5	6.5	2.254	2.5690	2.0100	0.039	0.041	0.05
2064	Pueblo	19/01/2019	192.6	19.0	12.54	8.4890	14.8650	0.366	0.288	0.39
1980	Taller	20/01/2019	452.83	39.4	1.379	1.6080	1.3950	0.042	0.042	0.03
2064	Taller	20/01/2019	580.1	12.5	0.646	0.6860	0.5520	0.016	0.019	0.02
1980	Cribas	21/01/2019	789.9	32.0	0.504	0.3780	0.6700	0.018	0.018	0.02
2124	Cribas	21/01/2019	48.5	36.6	6.014	5.7460	7.5590	0.339	0.438	0.33
1980	Pueblo	22/01/2019	543.7	16.5	1.947	2.2700	2.4200	0.028	0.034	0.04
2064	Pueblo	22/01/2019	268.8	6.9	5.265	2.9950	5.2410	0.067	0.05	0.09
1980	Taller	23/01/2019	449.00	10.9	3.2	1.9700	1.6950	0.047	0.045	0.04
2124	Bandas	23/01/2019	24.80	46.5	54.195	31.5820	81.6400	2.652	2.447	4.69
2028	Cribas	24/01/2019	746.00	26.9	0.67	0.8750	1.1110	0.023	0.02	0.04
1980	Taller	24/01/2019	466.00	4.9	3.405	2.0100	2.5850	0.052	0.06	0.05
2124	Cribas	24/01/2019	86.90	16.0	34.451	16.5360	32.7100	1.281	0.675	1.25
2124	Cribas	25/01/2019	23.00	56.9	56.938	27.8780	81.9390	3.145	2.002	8.06
1980	Bandas A	26/01/2019	815.00	13.8	0.938	0.8990	0.7090	0.024	0.025	0.02
1980	Bandas B	26/01/2019	810.00	10.4	0.615	0.7250	0.8120	0.022	0.027	0.02
2112	Bandas A	26/01/2019	27.30	7.8	32.308	28.2640	24.9070	0.405	0.361	0.39
2112	Bandas B	26/01/2019	16.60	23.3	114.712	96.3550	82.2630	1.286	1.383	1.69
2016	CCM	27/01/2019	737.00	11.9	1.34	1.2850	2.1680	0.028	0.024	0.04
2016	Cribas	27/01/2019	643.00	16.5	0.631	0.6700	0.5990	0.017	0.018	0.02
2112	CCM	27/01/2019	43.88	26.9	52.004	46.3060	26.2940	1.863	1.313	1.04
2112	Cribas	27/01/2019	43.00	51.2	28.532	18.7270	29.0050	0.953	0.649	1.07
1980	Cribas B	28/01/2019	762.00	16.0	0.544	0.4890	0.7090	0.016	0.016	0.02
1980	Cribas A	28/01/2019	780.00	19.7	0.765	0.5830	0.7410	0.019	0.021	0.02
2112	Cribas B	28/01/2019	11.30	28.4	164.754	96.1900	138.8620	7.932	5.582	9.09
2112	Cribas A	28/01/2019	22.00	42.7	51.784	33.1270	64.3390	1.833	1.405	3.64
2112	Cribas	29/01/2019	27.54	46.5	18.459	15.0620	27.5710	0.925	0.555	1.01
2112	Bandas	29/01/2019	58.13	24.4	146.373	86.3370	120.6000	4.485	2.494	3.85
2016	Bandas	30/01/2019	675.30	3.0	0.82	0.8200	0.7010	0.015	0.016	0.02
2016	Cribas	30/01/2019	747.70	3.3	0.701	0.9220	0.7650	0.015	0.015	0.01
2112	Bandas	30/01/2019	30.00	46.5	62.676	65.1430	78.3060	2.698	3.057	5.56
2112	Cribas	30/01/2019	40.00	24.4	23.283	13.3050	28.0120	1.046	0.513	1.34
2112	Cribas	31/01/2019	63.00	22.3	21.62	10.1200	17.6160	0.528	0.256	0.48
2112	Bandas	31/01/2019	28.00	34.1	73.025	59.2080	56.7570	3.765	2.819	4.32

En las figuras 3.23 a 3.28 se muestran de manera gráfica los límites establecidos por cada una de las normas mencionadas anteriormente y los valores correspondientes de los registros obtenidos. Cada punto en rojo corresponde a un registro y su valor máximo

obtenido en términos de velocidad de partícula o aceleración según corresponda, y su frecuencia asociada.

3.2.1 USBM 8507

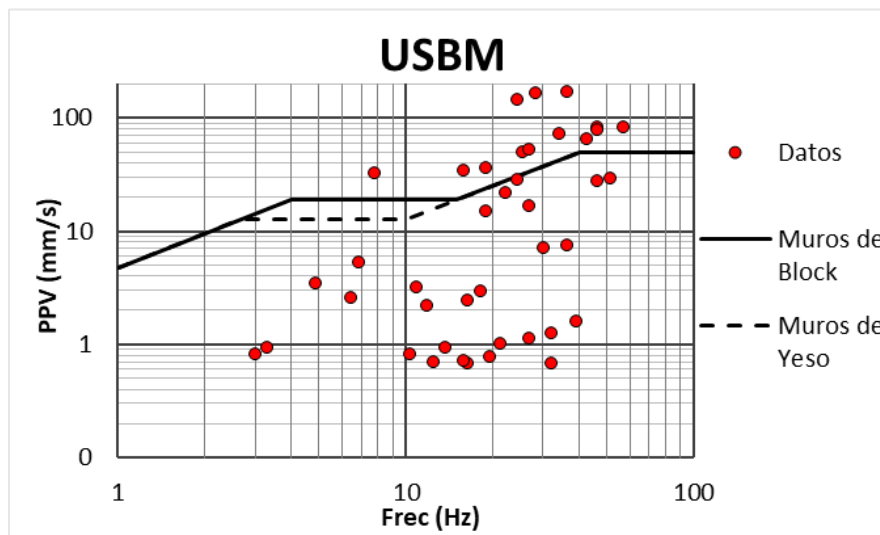


Figura 3.23 Revisión USBM 8507

3.2.2 DIN 4150-3

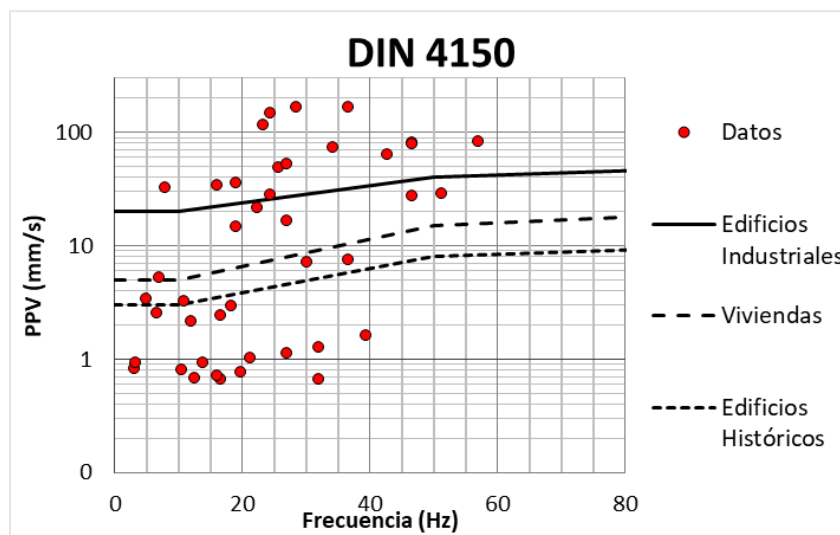


Figura 3.24 Revisión DIN 4150

3.2.3 BS 6472

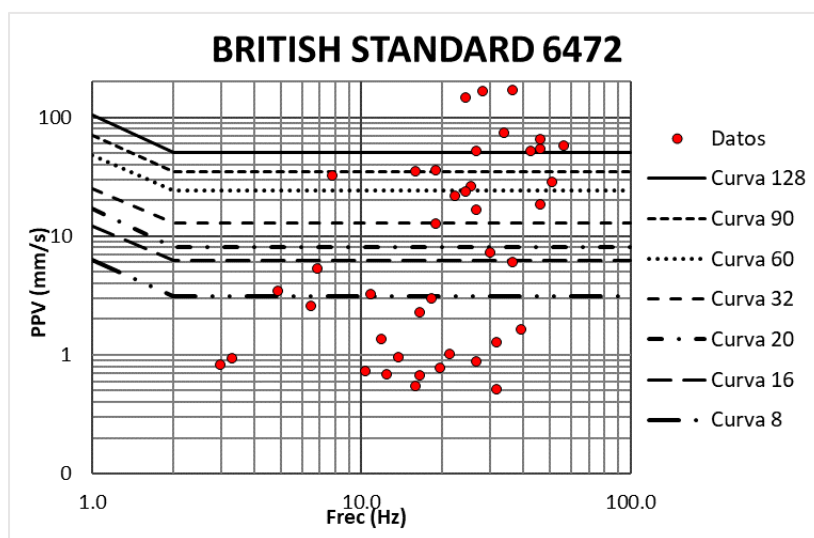


Figura 3.25 Revisión BS 6472 ejes X y Y

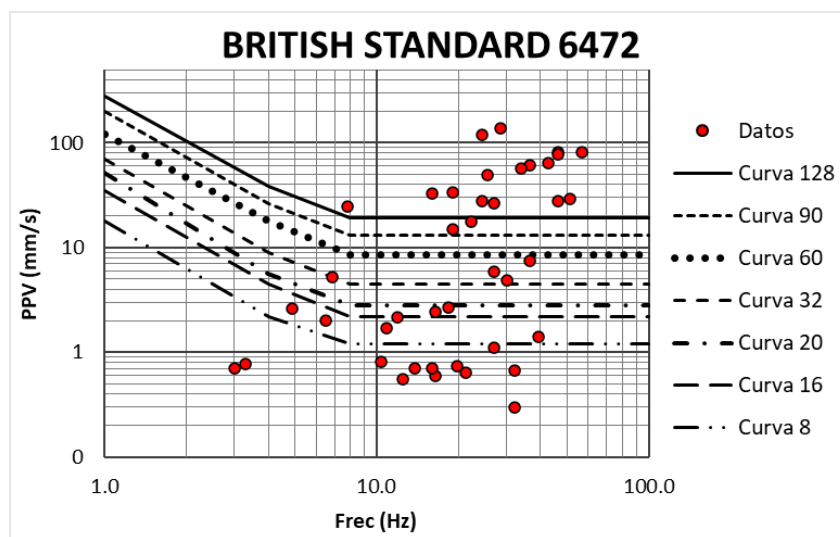


Figura 3.26 Revisión BS 6472 eje Z

3.2.4 ISO 10137

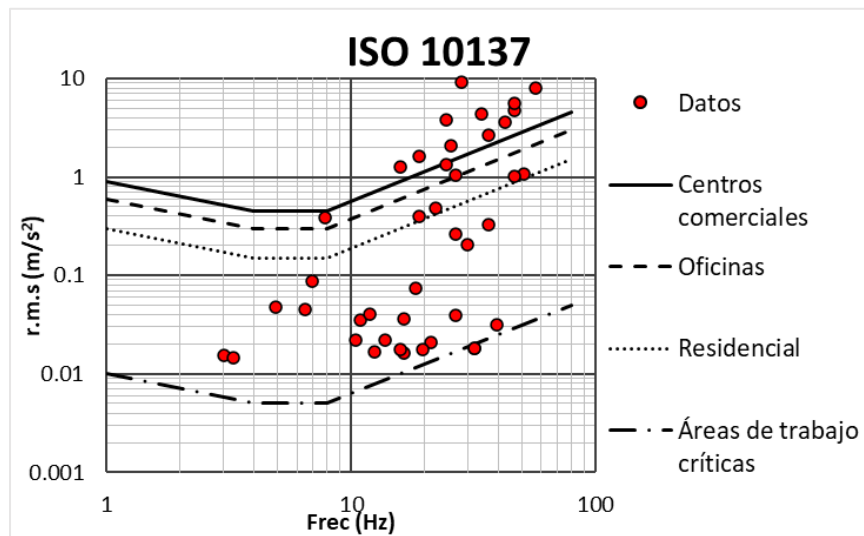


Figura 3.27 Revisión ISO 10137 eje Z

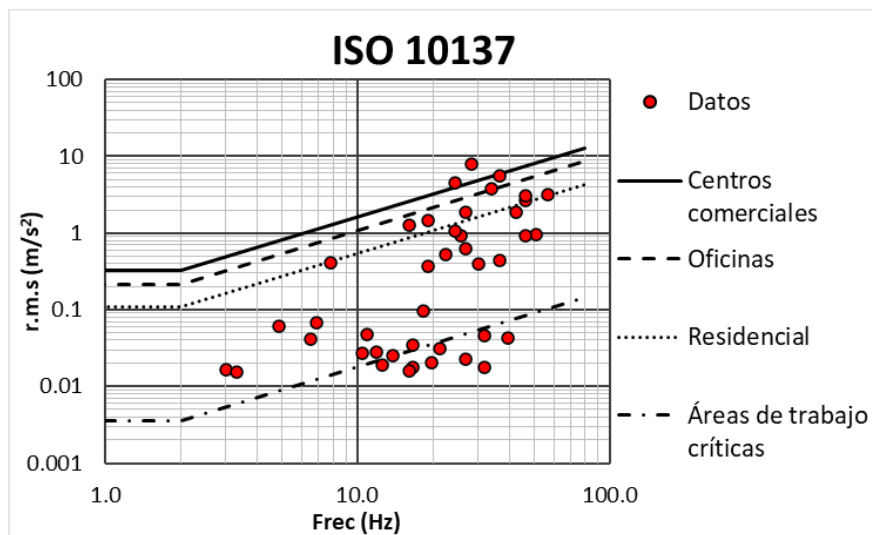


Figura 3.28 Revisión ISO10137 ejes X y Y

Se analizó el número de registros que no cumplen con los límites de vibración permisibles para cada tipo de estructura que se indican en las normas. En el caso de edificios industriales y de oficinas, la norma BS establece la misma curva (128), por lo que estos se consideran por igual. En la tabla 3.3 se presentan por un lado el número de registros que superaron los niveles permisibles correspondientes a lo que indica cada norma para su respectivo tipo de estructura, y entre paréntesis el porcentaje que estos representan sobre el total de registros.

Tabla 3.3 Registros que superan los límites permisibles

ESTRUCTURA	USBM		DIN 4150	
Industriales			15 (35.71 %)	
Viviendas	13 (30.95 %)		21 (50.00%)	
Históricos y zonas de trabajo crítico			25 (59.52%)	

ESTRUCTURA	BS 6472		ISO 10137	
	X y Y	Z	X y Y	Z
Industriales			2 (4.76%)	12 (28.57%)
Oficinas	10 (23.61%)	17 (40.48%)	4 (9.52%)	15 (35.71%)
Viviendas	15 (31.94%)	19 (45.24%)	11 (26.19%)	19 (45.24%)
Históricos y zonas de trabajo crítico	25 (65.28%)	30 (71.43%)	33 (78.57%)	40 (95.24%)

De la tabla 3.3 se observa que los límites que establece la norma USBM son superados en 13 del total de los registros representado un 30.95%. Para el caso de la norma DIN 4150, el límite máximo permisible corresponde para estructuras de tipo industrial, en este sentido el límite permisible fue superado en 15 ocasiones (35.71%), mientras que para viviendas y edificios históricos se superan los límites en 21 y 25 ocasiones, representando el 50 y 59%, respectivamente.

Las normas BS 6472 y ISO 10137 definen límites de vibración permisibles distintos para los ejes horizontales y para el eje vertical. Sobre los registros obtenidos de la tabla 3.2 se puede observar que la componente vertical toma gran importancia para vibraciones producidas por explosiones controladas, ya que en el 37.2% de los casos los valores máximos de VPP se encuentran en la componente vertical y en el 46.5% los valores máximos de r.m.s. La gran relevancia de esta componente se puede observar también en las revisiones de las normas BS 6472 (Figura 3.26) y ISO 10137 (Figura 3.27), ya que los límites permisibles son menores en el eje Z que en los ejes X y Y, por lo que en ambos casos los límites en este sentido son superados en mayor medida, como se observa en la tabla 3.3, donde los porcentajes de excedencia son mayores en el eje Z que en los ejes X y Y.

La norma BS 6472 indica que los límites no pueden ser superados en más de un 10%, de acuerdo con los resultados obtenidos esta condición no se cumple, inclusive para las otras normas, ya que como se observa en la tabla 3.3 los límites son superados en más del 10% para todos los casos. Para las normas BS y ISO se debe revisar que se cumpla este criterio para los ejes horizontales y el eje vertical, por ejemplo, para las estructuras de tipo industrial en la norma ISO se superan los límites en un 4.76 y 28.57% para los ejes horizontales (X y Y) y para el eje vertical (Z) respectivamente, por lo que el criterio es válido para el primer porcentaje, pero no para el segundo, por lo tanto, no se aceptan los niveles de vibración para las estructuras de tipo industrial.

Estos resultados de vibración son muy elevados y se deben principalmente a que la mayoría de las mediciones se realizaron a distancias muy cercanas, menores a cien metros, por lo que no es recomendable realizar trabajos de voladuras cuando se tengan estructuras menores a esta distancia.

4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS DE LA ESTACIÓN ZAIG (CIUDAD DE ZACATECAS)

Zacatecas es un estado con baja actividad sísmica, de acuerdo con la zonificación sísmica de la CFE (2015), la ciudad de zacatecas se encuentra en la zona A, de baja sismicidad (Figura 4.1). Sin embargo, recientemente se ha observado un aumento significativo de la actividad sísmica registrada en la entidad, tan solo en el año 2020 el SSN reportó un total de 116 sismos.

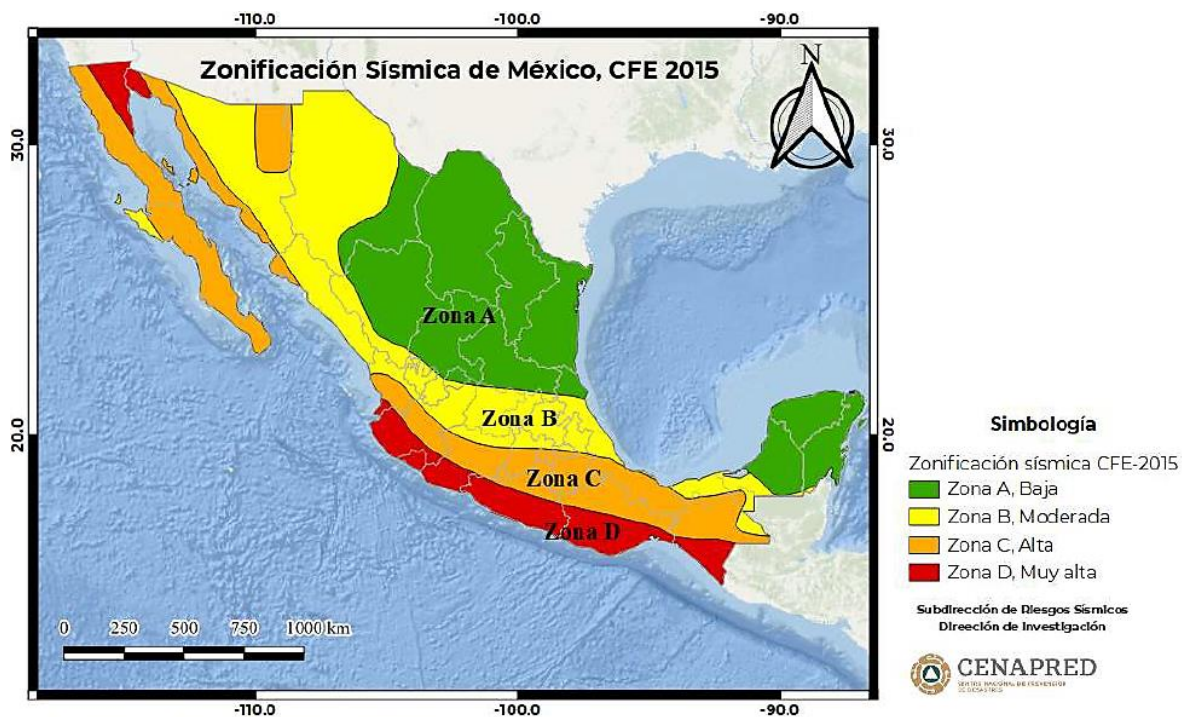


Figura 4.1 Zonificación sísmica CFE (2015)

En el mes de julio se observa un gran incremento en el número de eventos respecto a años anteriores, y es en este mes cuando algunos sectores de la ciudad comenzaron a levantar quejas sobre fuertes vibraciones percibidas en sus viviendas.

El periódico local La Jornada reportó que: “se registró un fuerte temblor del suelo en al menos diez colonias del noreste y centro de la ciudad de Zacatecas, ocasionando la movilización de personal de protección civil del estado, bomberos y del Ejército mexicano, pues el lugar no es considerado zona de sismo. El suceso ocurrió la noche del lunes 13 de julio, alrededor de las 22:00 horas, lo que provocó que centenares de vecinos abandonaran durante varios minutos sus viviendas, ya que, acompañado del fuerte estruendo, las casas se cimbraron por varios segundos. La zona donde el temblor se escuchó más fuerte, y hubo, incluso, tres viviendas con daños menores, como fisuras en un techo y bardas, es en la calle

Sombrerete de la colonia Pedro Ruiz González. Hasta el momento se desconoce el origen de este suceso, aunque vecinos informan que pueden ser ocasionados por las minas que se encuentran cercanas a la ciudad” (La Jornada, 2020).

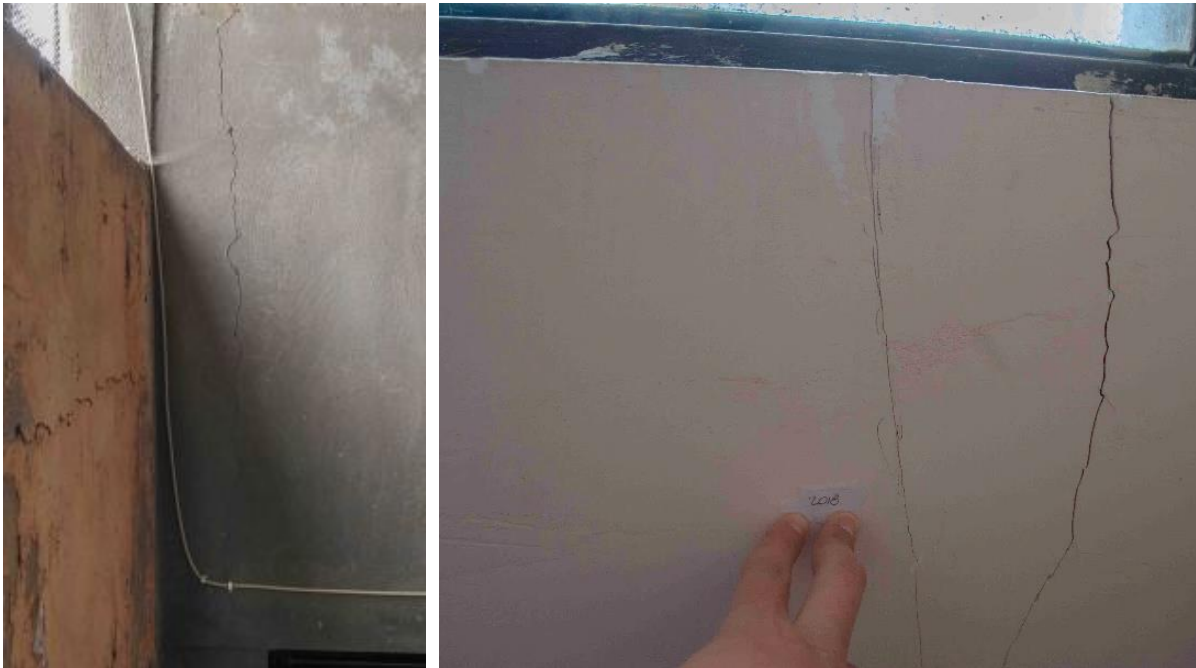
Aunque los sismos son de magnitudes pequeñas, la poca profundidad en la que ocurren puede dar lugar a que la población los perciba y existan posibles daños en estructuras.

Algunos vecinos de las colonias afectadas indican que: “a partir del 2016 comenzaron a sentir vibraciones, y a partir del 2019 han sido más constantes, al grado que diariamente se presentan en un horario de entre 6:00 y 7:00 de la mañana y por la tarde alrededor de las 19:00 hrs. A partir del 2020 ocasionalmente se presentan de entre 4:00 a 5:00 de la mañana, adicional a los horarios mencionados anteriormente. A medida que estas vibraciones se han presentado con mayor frecuencia se ha observado la aparición de algunas grietas en los muros de las casas” (Velázquez, 2020).

Realizando una visita a la zona afectada se obtuvieron algunas fotografías de los daños reportados por los vecinos. En las figuras 4.2 a 4.6 se presentan los daños observados.



Figura 4.2 Ventana rota en una vivienda



a) Muro bajo ventana



b) Muro de carga interior

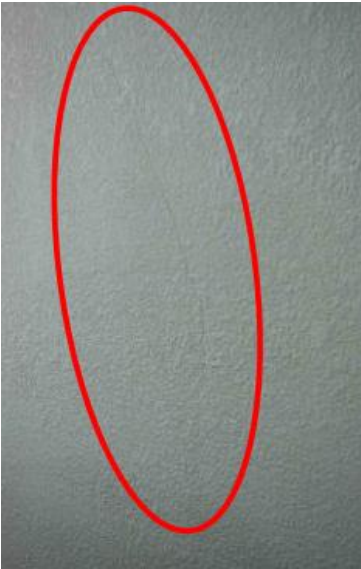
Figura 4.3 Grietas verticales que atraviesan muros interiores



a)



b)



c)



d)

Figura 4.4 Grietas en fachada



a)



b)



c)



d)

Figura 4.5 Grietas en interior de vivienda

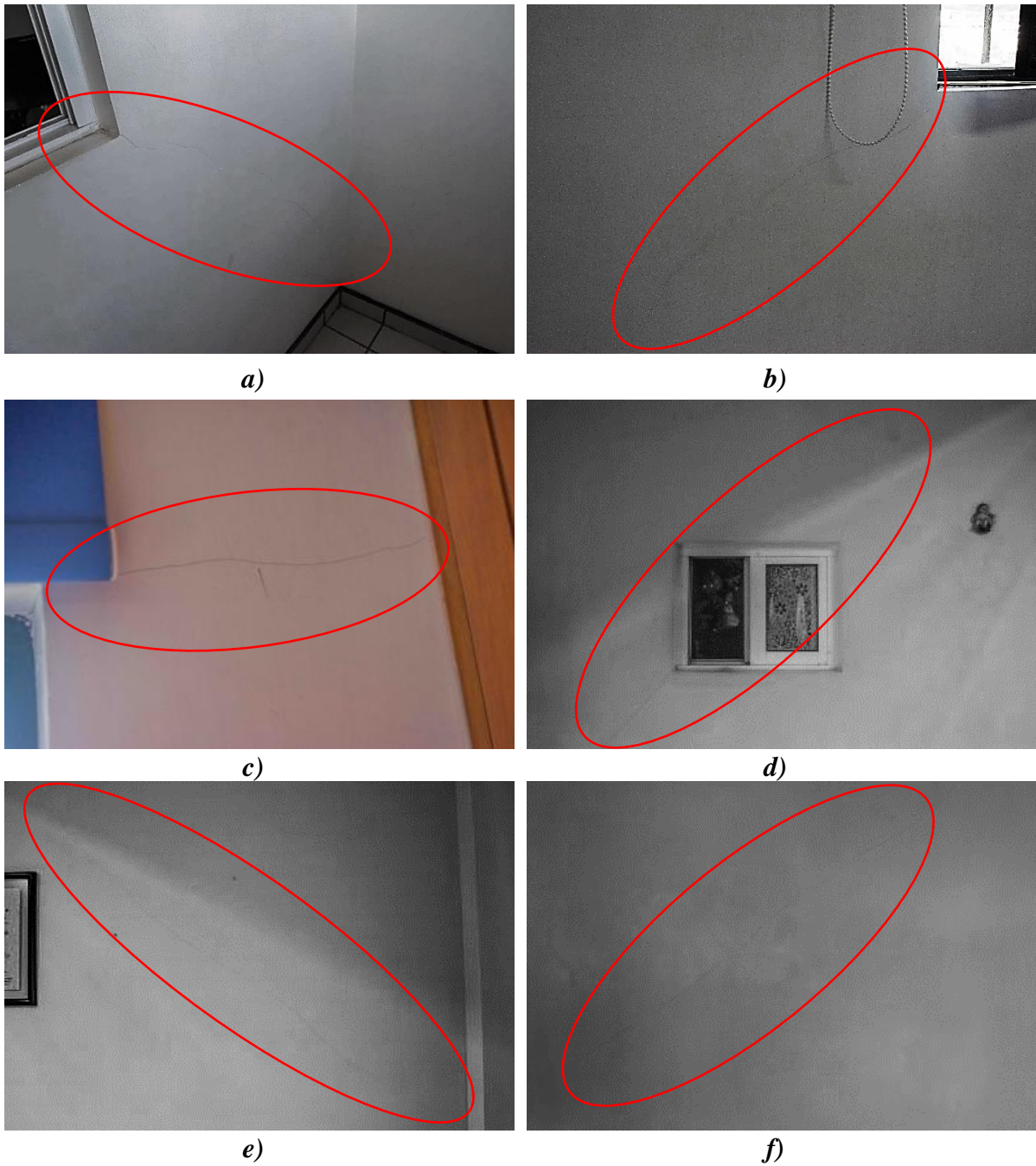


Figura 4.6 Grietas diagonales en los muros

Las minas que operan actualmente cercanas a la ciudad son la mina Cozamin, del grupo Capstone Gold, al norte de la ciudad, y la mina El Compas, del grupo Gold Silver, en el sur. En el caso de ambas minas, el periódico la Jornada reporta que las detonaciones dentro de sus actividades están programadas a ser realizadas en un horario de 6:00 a 7:00 y de 18:00 a 19:00 (La Jornada, 2020).

En la Tabla 4.1 se presenta el catálogo de sismos que reporta el Servicio Sismológico Nacional (SSN) para el estado de Zacatecas en el año 2020, donde se reporta la fecha, hora, Magnitud, Ubicación (latitud y longitud del epicentro) y profundidad de los sismos registrados. Adicionalmente se incluyó un comentario para los eventos ocurridos dentro del horario de voladura de las minas que reporta el periódico la Jornada. Se observa que 85 de los 116 sismos reportados se presentaron dentro del horario de mina, representando un 73% del total. Además, se observa que los sismos con profundidades menores a 1 km cumplen igualmente con esta condición.

Debido al desconocimiento del desarrollo subterráneo de las minas no es posible tener certeza del origen de estos sismos. En la Figura 4.7 se pueden observar los epicentros de los sismos registrados dentro de la zona urbana de la ciudad de Zacatecas, así como los eventos reportados a profundidades menores a 1 km en color azul. Se observa una gran cantidad de registros cercano a la mina Cozamin.

Tabla 4.1 Catálogo de sismos en el estado de Zacatecas (SSN, 2020)

Fecha	Hora	Magnitud	Latitud	Longitud	Prof. (km)	
13/06/2020	06:03:40	2.3	22.7308	-102.579	5	*Horario de Mina
20/06/2020	06:40:13	1.5	22.7487	-102.616	1	*Horario de Mina
13/07/2020	22:08:40	2.2	22.8017	-102.586	4	
16/07/2020	02:09:45	2.8	22.7957	-102.597	2	
16/07/2020	06:01:08	1.7	22.7283	-102.584	2	*Horario de Mina
18/07/2020	12:30:22	3.0	22.657	-102.65	2	
20/07/2020	18:21:10	2.0	22.716	-102.554	2	*Horario de Mina
20/07/2020	18:39:11	1.5	22.7237	-102.551	2	*Horario de Mina
21/07/2020	06:10:13	1.5	22.8097	-102.57	2	*Horario de Mina
21/07/2020	06:15:51	1.2	22.8087	-102.572	2	*Horario de Mina
21/07/2020	19:09:32	1.4	22.8133	-102.575	2	
27/07/2020	18:25:19	1.7	22.8123	-102.565	2	*Horario de Mina
27/07/2020	18:30:28	1.7	22.8023	-102.59	2	*Horario de Mina
27/07/2020	19:14:23	1.8	22.734	-102.522	2	
28/07/2020	06:18:48	1.4	22.8023	-102.596	1	*Horario de Mina
28/07/2020	06:31:08	1.2	22.8065	-102.59	1	*Horario de Mina
28/07/2020	13:21:03	1.4	22.799	-102.591	1	
28/07/2020	18:26:21	1.5	22.7385	-102.557	1	*Horario de Mina
28/07/2020	18:29:13	1.5	22.8038	-102.594	1	*Horario de Mina
28/07/2020	18:37:28	1.2	22.809	-102.598	1	*Horario de Mina
29/07/2020	06:50:31	1.5	22.8072	-102.584	1	*Horario de Mina
29/07/2020	18:27:20	1.8	22.8042	-102.541	1	*Horario de Mina
30/07/2020	06:18:18	1.2	22.7367	-102.551	1	*Horario de Mina
30/07/2020	18:24:55	1.7	22.7878	-102.607	1	*Horario de Mina
02/08/2020	06:54:58	1.9	22.728	-102.564	2	*Horario de Mina

02/08/2020	09:37:23	2.0	22.7712	-102.599	2	
03/08/2020	18:25:19	2.0	22.7532	-102.604	2	*Horario de Mina
04/08/2020	18:43:47	1.8	22.8057	-102.591	2	*Horario de Mina
07/08/2020	18:23:56	1.2	22.7277	-102.557	2	*Horario de Mina
08/08/2020	06:01:03	2.0	22.809	-102.564	2	*Horario de Mina
08/08/2020	06:08:48	1.2	22.7537	-102.606	2	*Horario de Mina
08/08/2020	06:08:50	1.2	22.7527	-102.609	2	*Horario de Mina
08/08/2020	06:52:58	1.8	22.8155	-102.558	2	*Horario de Mina
08/08/2020	18:30:06	1.9	22.734	-102.617	2	*Horario de Mina
08/08/2020	18:50:48	1.5	22.729	-102.55	2	*Horario de Mina
09/08/2020	06:23:04	1.9	22.8087	-102.589	2	*Horario de Mina
09/08/2020	06:39:25	1.9	22.7962	-102.529	2	*Horario de Mina
14/08/2020	06:19:07	2.6	22.724	-102.584	2	*Horario de Mina
15/08/2020	18:01:03	1.4	22.7947	-102.526	2	*Horario de Mina
15/08/2020	18:25:07	1.7	22.8037	-102.571	2	*Horario de Mina
16/08/2020	06:09:37	1.7	22.724	-102.561	2	*Horario de Mina
16/08/2020	06:40:31	1.7	22.7368	-102.528	2	*Horario de Mina
17/08/2020	06:16:05	1.7	22.806	-102.58	2	*Horario de Mina
17/08/2020	06:19:12	1.9	22.8085	-102.579	2	*Horario de Mina
21/08/2020	18:16:30	2.2	22.8018	-102.567	2	*Horario de Mina
28/08/2020	18:04:29	1.7	22.816	-102.584	2	*Horario de Mina
28/08/2020	18:32:22	2.6	22.8157	-102.576	2	*Horario de Mina
28/08/2020	20:49:34	1.7	22.8118	-102.589	2	
29/08/2020	06:04:51	1.9	22.7767	-102.613	2	*Horario de Mina
05/09/2020	06:36:19	1.2	22.8005	-102.597	1	*Horario de Mina
06/09/2020	06:22:40	1.2	22.81	-102.552	menos de 1	*Horario de Mina
11/09/2020	18:09:16	1.2	22.7997	-102.589	menos de 1	*Horario de Mina
11/09/2020	18:09:56	1.0	22.8048	-102.587	2	*Horario de Mina
12/09/2020	05:58:15	1.2	22.7498	-102.606	menos de 1	
12/09/2020	22:45:47	1.5	22.7835	-102.607	2	
13/09/2020	08:49:01	1.2	22.7912	-102.602	2	
14/09/2020	06:15:46	1.0	22.7835	-102.615	menos de 1	*Horario de Mina
14/09/2020	14:13:08	3.7	23.3527	-103.013	15	
14/09/2020	18:12:43	1.0	22.803	-102.564	2	*Horario de Mina
19/09/2020	08:15:34	4.0	23.3185	-102.943	5	
20/09/2020	02:45:03	3.9	23.2517	-102.753	6.9	
21/09/2020	18:14:03	0.6	22.804	-102.59	menos de 1	*Horario de Mina
21/09/2020	19:20:12	1.2	22.7767	-102.522	menos de 1	
22/09/2020	07:22:34	0.6	22.776	-102.525	menos de 1	
23/09/2020	13:32:35	3.7	23.4322	-102.501	8.7	
23/09/2020	15:41:02	3.7	23.3307	-102.275	4.8	

27/09/2020	06:15:44	1.2	22.795	-102.541	menos de 1	*Horario de Mina
27/09/2020	06:39:21	1.5	22.7808	-102.607	menos de 1	*Horario de Mina
02/10/2020	12:47:57	3.8	22.8847	-103.166	5	
02/10/2020	18:32:35	1.2	22.8058	-102.549	menos de 1	*Horario de Mina
02/10/2020	18:36:42	1.0	22.7255	-102.559	menos de 1	*Horario de Mina
03/10/2020	19:44:05	1.4	22.7967	-102.602	2	
04/10/2020	02:47:49	3.7	23.3808	-102.393	5.4	
04/10/2020	06:06:16	1.0	22.7597	-102.604	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	06:12:33	1.2	22.7333	-102.548	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	06:13:36	1.2	22.7777	-102.626	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	06:15:48	1.0	22.7387	-102.534	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	06:21:41	1.0	22.8005	-102.592	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	18:13:29	1.2	22.802	-102.598	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	18:15:16	0.6	22.7758	-102.612	menos de 1	*Horario de Mina
04/10/2020	18:20:06	1.2	22.8063	-102.579	menos de 1	*Horario de Mina
11/10/2020	18:14:46	1.0	22.7668	-102.609	menos de 1	*Horario de Mina
12/10/2020	08:25:42	1.2	22.8138	-102.574	2	
12/10/2020	08:37:18	1.2	22.7268	-102.592	2	
16/10/2020	06:13:22	1.4	22.7567	-102.617	menos de 1	*Horario de Mina
18/10/2020	06:13:43	1.2	22.77	-102.61	menos de 1	*Horario de Mina
22/10/2020	18:04:21	0.6	22.8008	-102.576	menos de 1	*Horario de Mina
22/10/2020	18:22:50	1.2	22.8023	-102.548	menos de 1	*Horario de Mina
23/10/2020	06:01:11	1.2	22.8112	-102.56	menos de 1	*Horario de Mina
25/10/2020	05:25:49	2.4	22.8122	-102.577	2	
25/10/2020	06:28:30	3.7	23.355	-102.653	3	*Horario de Mina
29/10/2020	18:32:34	2.0	22.7807	-102.616	2	*Horario de Mina
29/10/2020	18:36:40	2.2	22.7318	-102.564	2	*Horario de Mina
01/11/2020	16:24:54	1.4	22.8077	-102.578	2	
04/11/2020	06:01:15	2.3	22.811	-102.575	2	*Horario de Mina
12/11/2020	18:07:28	1.4	22.7972	-102.532	menos de 1	*Horario de Mina
12/11/2020	19:55:06	2.5	22.7997	-102.597	2	
14/11/2020	18:12:42	0.6	22.727	-102.538	2	*Horario de Mina
28/11/2020	07:04:37	1.2	22.8087	-102.578	menos de 1	
28/11/2020	07:10:09	1.2	22.7802	-102.61	2	
29/11/2020	18:19:21	1.0	22.7445	-102.606	2	*Horario de Mina
30/11/2020	06:09:47	1.0	22.7215	-102.557	menos de 1	*Horario de Mina
30/11/2020	06:16:54	1.2	22.8153	-102.56	2	*Horario de Mina
30/11/2020	06:25:22	1.2	22.8043	-102.598	2	*Horario de Mina
08/12/2020	06:00:44	1.2	22.8038	-102.582	menos de 1	*Horario de Mina
08/12/2020	06:33:13	1.2	22.8087	-102.547	menos de 1	*Horario de Mina
11/12/2020	06:04:50	1.2	22.7325	-102.549	menos de 1	*Horario de Mina

12/12/2020	06:14:32	0.6	22.7622	-102.604	menos de 1	*Horario de Mina
15/12/2020	18:26:34	1.7	22.7702	-102.612	2	
17/12/2020	18:50:04	1.2	22.8027	-102.593	2	
18/12/2020	06:54:30	1.2	22.8088	-102.602	2	*Horario de Mina
21/12/2020	06:01:15	2.3	22.7395	-102.606	2	*Horario de Mina
21/12/2020	06:12:31	2.2	22.7215	-102.55	2	*Horario de Mina
25/12/2020	05:42:00	2.6	22.7928	-102.6	3	*Horario de Mina
27/12/2020	14:07:07	2.4	22.8042	-102.587	2	*Horario de Mina
27/12/2020	14:08:25	1.0	22.8028	-102.584	2	

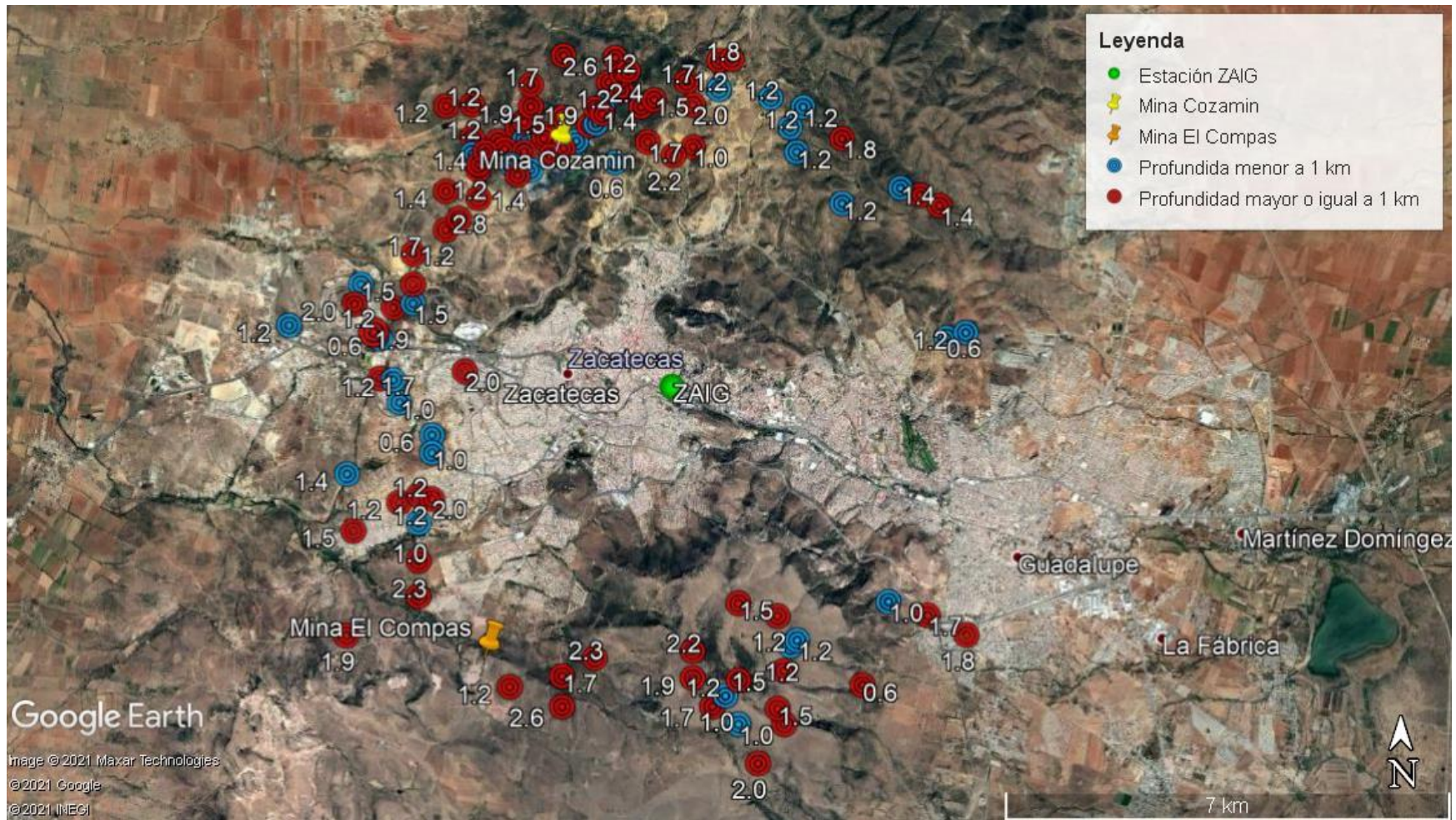


Figura 4.7 Epicentros de los sismos registrados por el SSN en la ciudad de zacatecas en el año 2020

4.1 Análisis de los registros sísmicos

De acuerdo a diferentes autores, existen distintos criterios que se pueden considerar al momento de determinar si un evento captado en un sismograma es un sismo o una explosión; dentro de los más utilizados se encuentran los siguientes: 1) Determinación del hipocentro (SSN, 2014); 2) Tiempo de la llegada de las ondas P y S (SSN, 2014); 3) Diferencia entre Magnitudes de Ondas Superficiales (Ms) y de Cuerpo (Mb) (Serrano M, 2018); 4) Duración del evento (BBC Mundo, 2016); 5) Mecanismos focales (beach-ball) (SSN, 2014); 6) Análisis de espectrogramas (Manual SEISAN, 2020).

4.1.1 Determinación el hipocentro

Este criterio se basa principalmente en definir la profundidad del hipocentro, ya que los sismos pueden ocurrir a profundidades desde un par de kilómetros hasta aproximadamente 700 km, por otro lado, la profundidad máxima de una explosión puede ser de casi 3 km, para ello se requiere perforar un pozo (SSN, 2014).

Además de analizar la profundidad, en este caso es conveniente observar la ubicación del epicentro y las zonas de actividad minera. De acuerdo con la tabla 4.1 se reporta un total de 32 sismos con profundidades menores a 1 km, representando el 27.6% del total de los registros. Además, como se observa en la Figura 4.7, muchos de estos sismos se ubican cercanos a las minas.

En la Figura 4.8 se muestra una relación de la profundidad y la fecha en que se presentaron los registros. Se observa que en la mayoría de las profundidades iguales o menores a 1 km los eventos ocurren dentro del horario de actividad de las minas, incluso la mayoría de los sismos reportados con profundidad de 2 km.

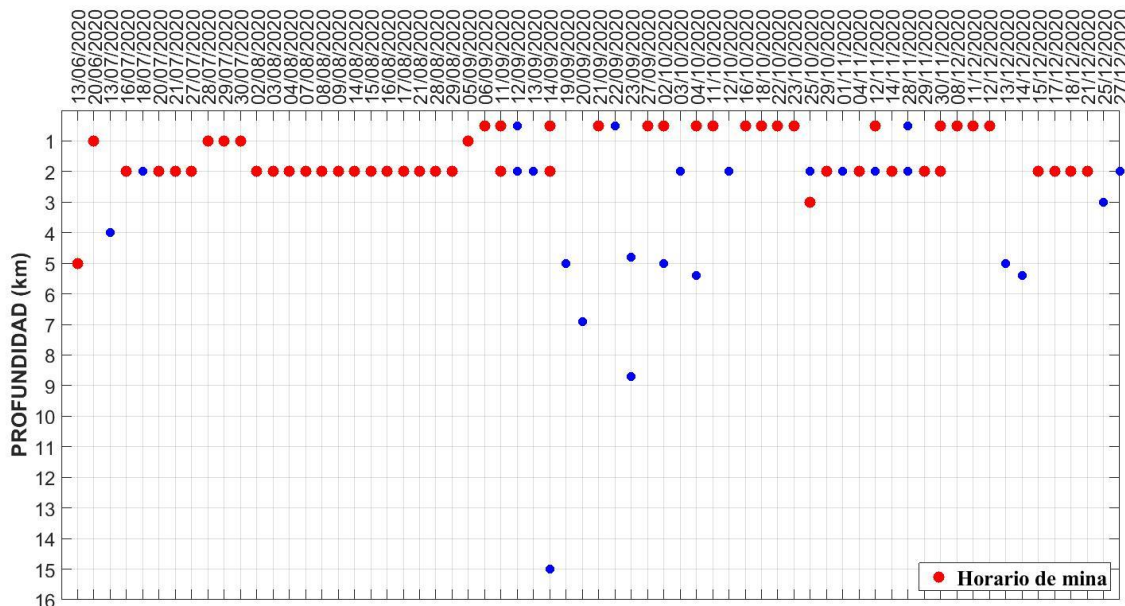


Figura 4.8 Relación de profundidades y horario de mina de los registros

4.1.2 Tiempo de llegada de las ondas P y S

En registros de explosiones, ya sea de volcanes o por detonación de explosivos, es difícil diferenciar el arribo de las ondas de compresión (P) y las ondas de corte (S), debido a que una explosión (o implosión) implica un aumento (o disminución) del volumen que rodea al sitio de detonación, por lo que no habrá desplazamiento de bloques como en un sismo causado por una falla. Por esta razón, las ondas que se generarán serán fundamentalmente P (SSN, 2014).

Como se muestra en un estudio realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, sobre una explosión natural del volcán Popocatepetl ocurrida el 25 de mayo de 2013 y una explosión inducida registrada en la estación sismológica de Banda Ancha que se encuentra en Nacozari, Sonora. En los registros sísmicos se observa claramente el arribo de las ondas P y S (Figura 4.9), mientras que en los registros de explosiones las ondas S no son apreciables (Figura 4.10 y 4.11), de hecho, los registros de las tres componentes son muy parecidas tanto en forma como en amplitud.

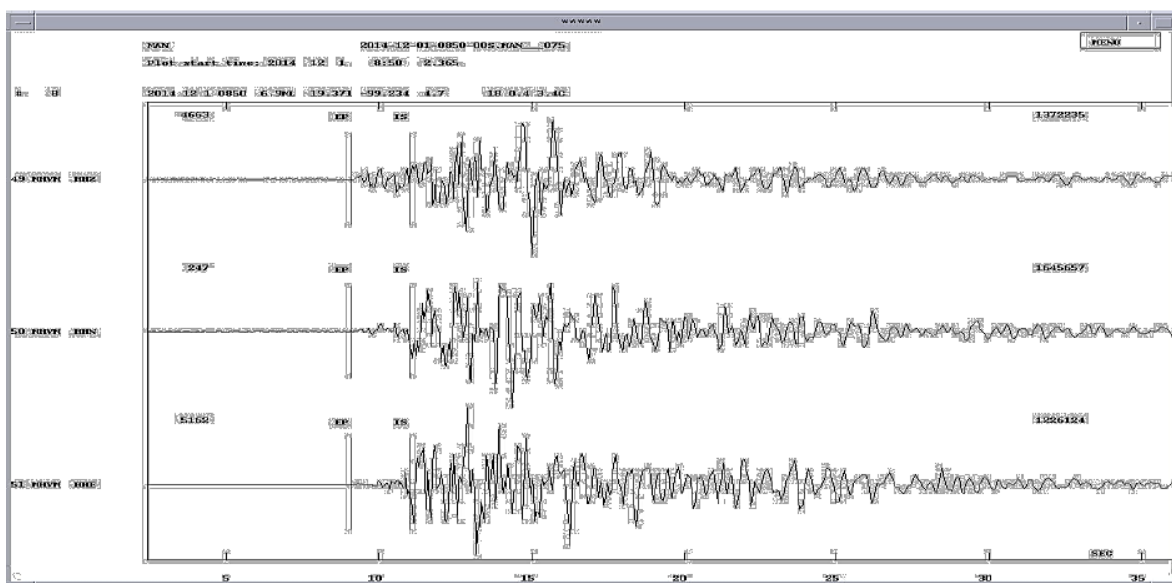


Figura 4.9 Registro sísmico de un temblor que ocurrió el día 1 de diciembre de 2014 de magnitud 3.4 (SSN, 2014).

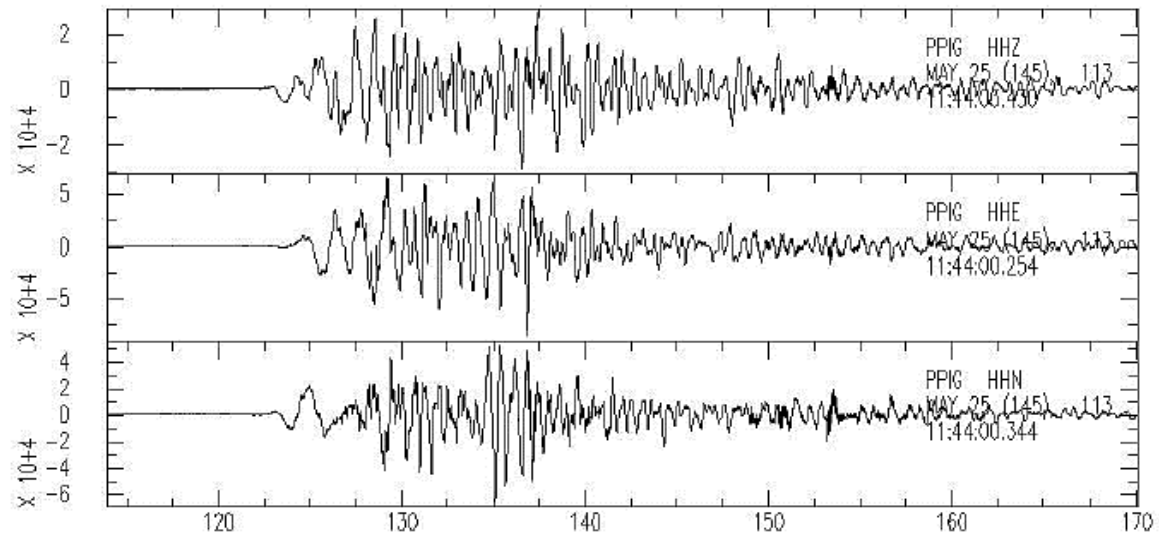


Figura 4.10 Explosión Natural del volcán Popocatepetl, 25 de mayo de 2013 (SSN, 2014).

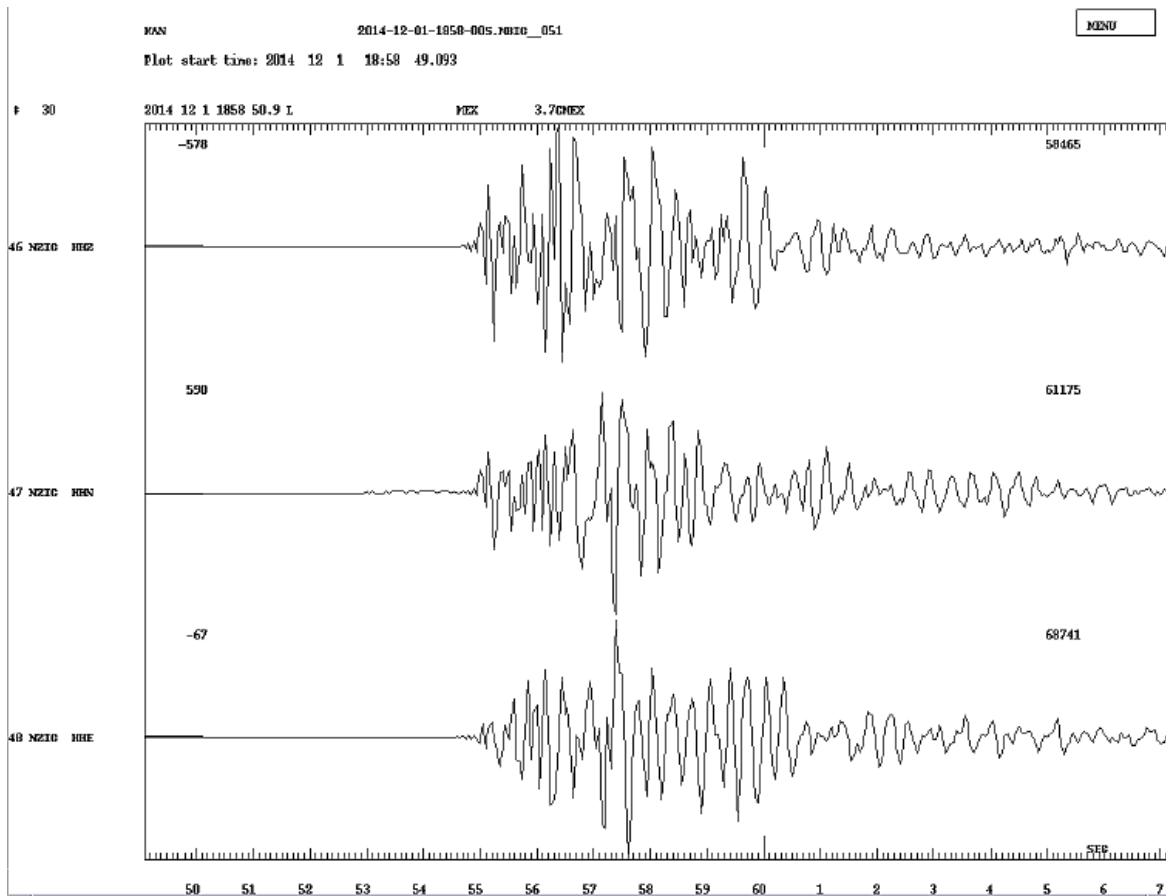


Figura 4.11 Explosión inducida registrada en la estación sismológica de Banda Ancha ubicada en Nacozari, Sonora (SSN, 2014).

Esta observación se cumple para los registros obtenidos del monitoreo de vibración en la mina. En la figura 4.12 se muestra uno de los registros de la campaña de monitoreo de la mina, el registro corresponde a una voladura realizada el día 18 de enero de 2019, en este registro se puede observar el arribo de las ondas P, pero no es fácil apreciar el arribo de las ondas S.

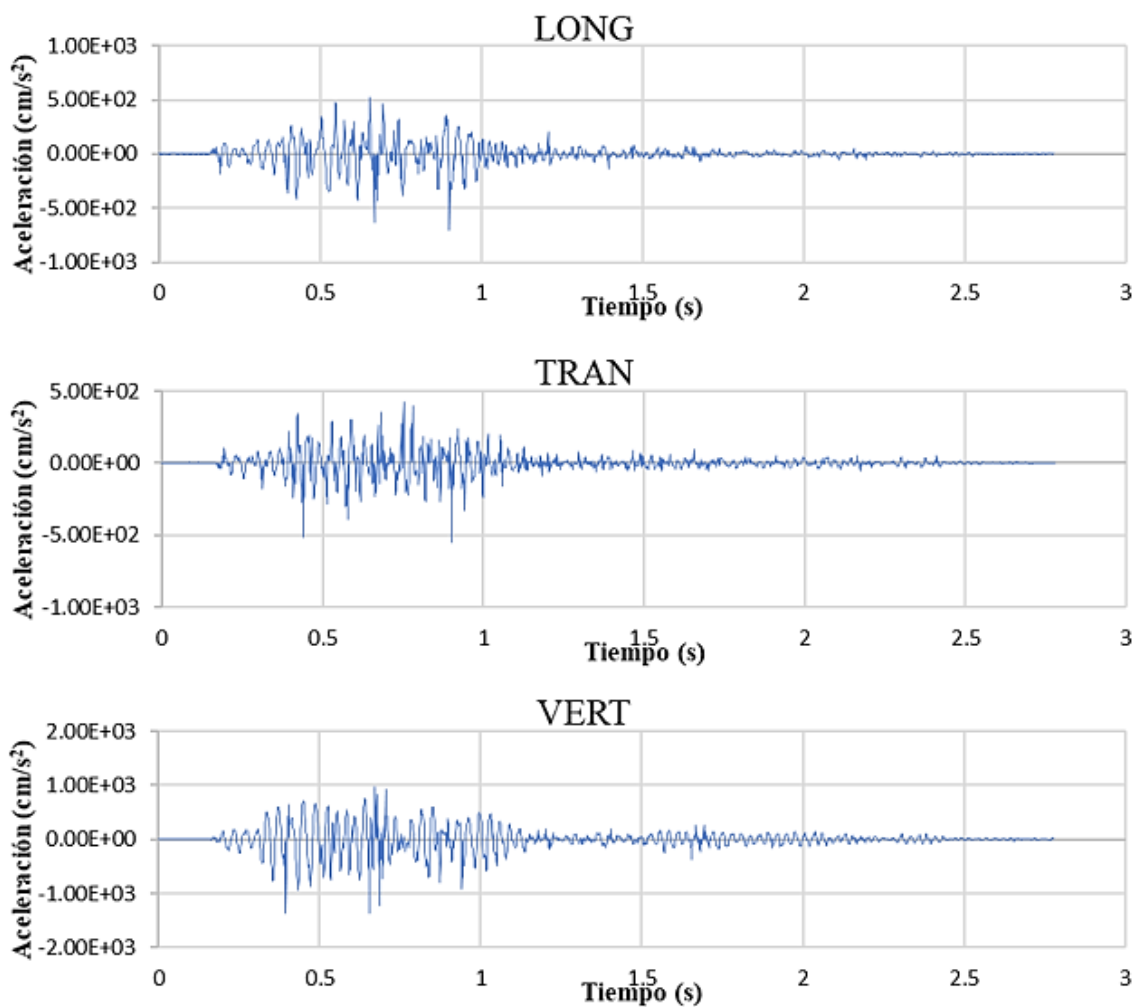


Figura 4.12 Registro de voladura en la mina, 18/01/2019

Dentro de los registros obtenidos de la estación ZAIG por el SSN en el año 2020, se observa un gran número de eventos que cumplen con esta característica, es decir, que no se distingue el arribo de las ondas S. Algunos de ellos se muestran en las figuras 4.13 a 4.15.

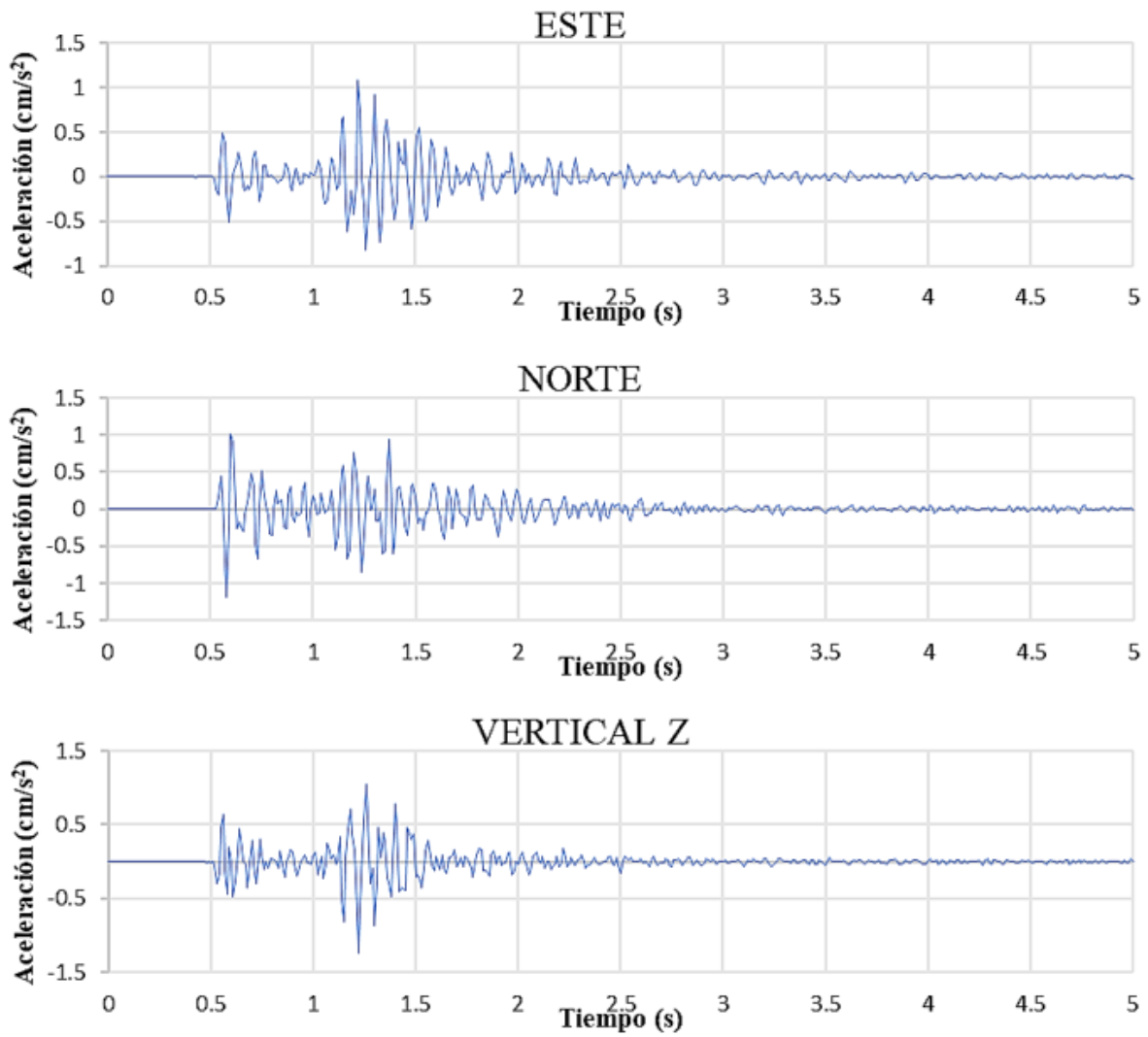


Figura 4.13 Registro 16/07/2020 02:09:45 M=2.8 Prof=2 km

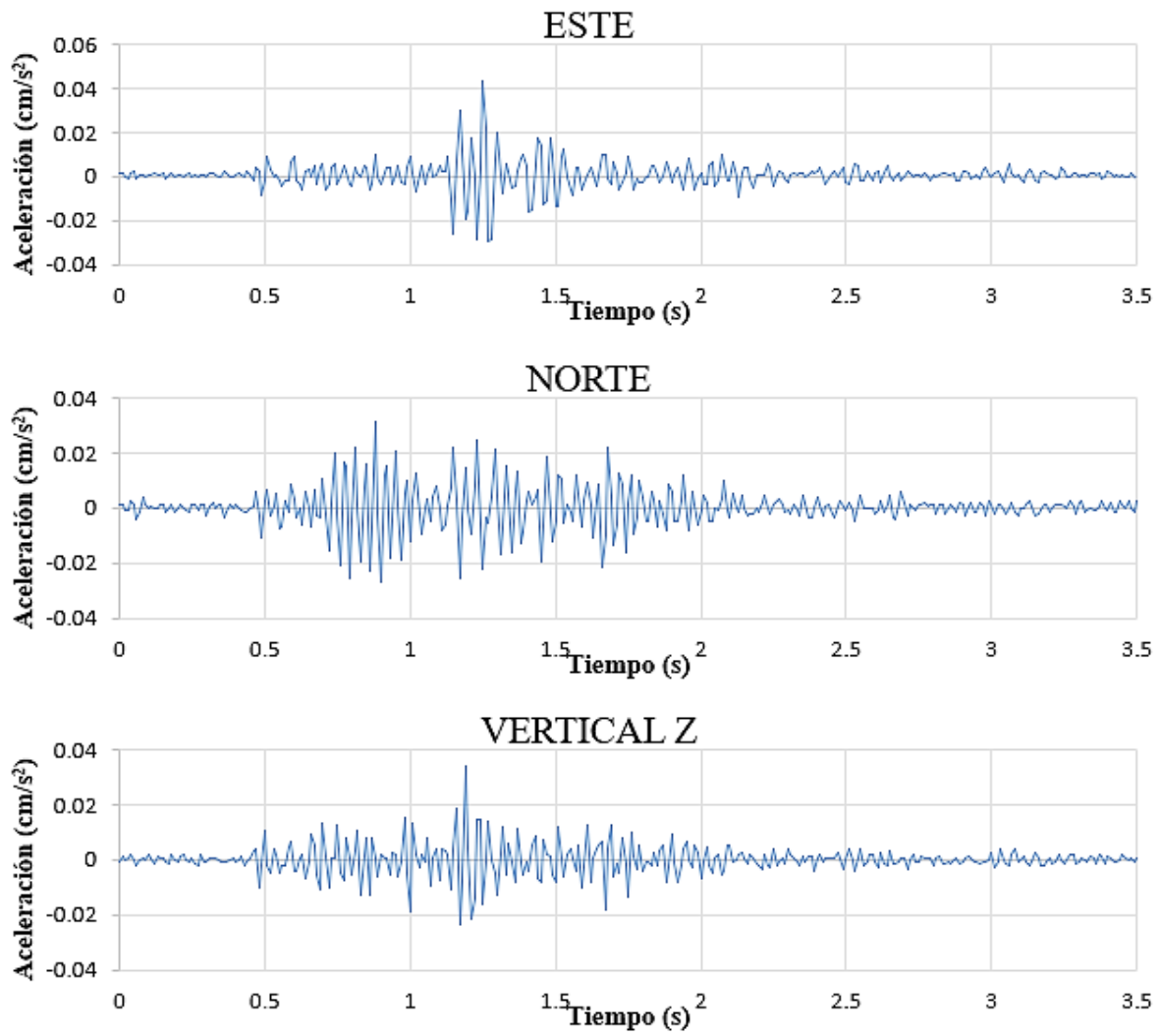


Figura 4.14 Registro 14/08/2020 06:19:07 M=2.6 Prof=2 km

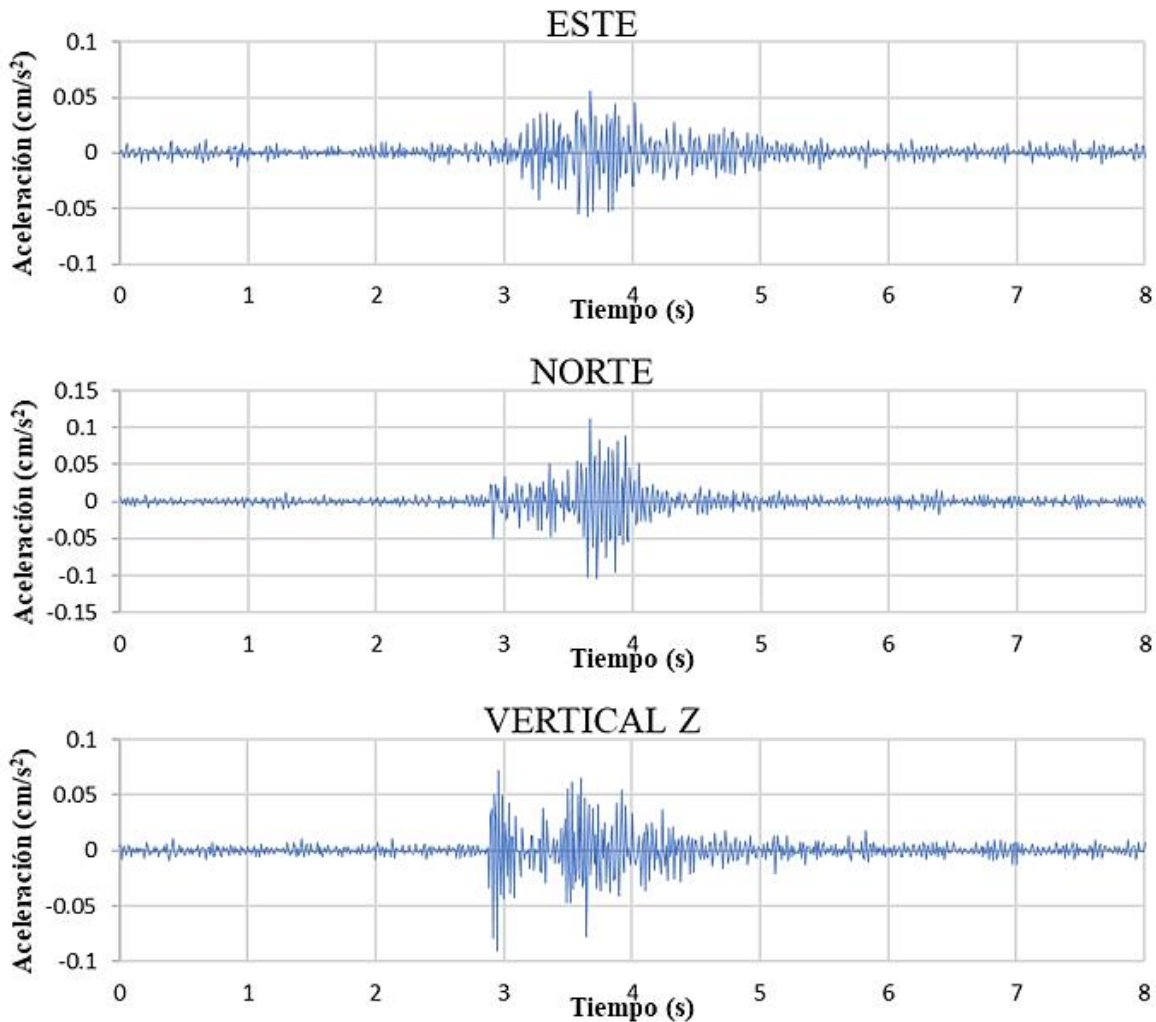


Figura 4.15 Registro 28/08/2020 18:32:22 M=2.6 Prof=2 km

4.1.3 Diferencia entre magnitudes de ondas superficiales (Ms) y de cuerpo (Mb)

Se pueden obtener distintos tipos de magnitudes dependiendo del tipo de instrumento que se está utilizando, para el caso de diferenciar el origen entre un sismo y una explosión es de interés la magnitud de las ondas de cuerpo (mb) que detectamos con sismómetros de periodo corto y la magnitud de las ondas superficiales (ms) que detectamos con instrumentos de periodo largo (Serrano M., 2018).

Debido a la naturaleza de las explosiones, y el hecho que tienen un patrón de radiación igual en todas direcciones, la magnitud de ondas de cuerpo es notablemente mayor que la magnitud de ondas superficiales.

Este método es muy eficiente pero desafortunadamente no siempre es aplicable ya que es necesario tener buenas señales para poder determinar bien la magnitud. Además, necesitamos captar la señal en ambos tipos de instrumentos para poder aplicarlo. Por esta razón no es posible aplicar este criterio para estos registros.

4.1.4 Duración del evento

Se ha observado que las explosiones tienen poca duración, aproximadamente 5 segundos como máximo, dependiendo de la dimensión de la plantilla de voladura, mientras que un sismo puede durar varios segundos, incluso minutos. La fuente sísmica en una explosión es muy corta mientras que en los terremotos es larga, proporcionalmente (BBC Mundo, 2016).

De acuerdo con la campaña de monitoreo en la mina, los registros obtenidos de las voladuras son de entre 1 y 5 segundos, con lo que queda documentado la duración aproximada de una explosión.

En su mayoría los registros de la estación ZAIG son de entre 3.5 a 5 segundos, y los registros más largos son de entre 40 y 50 segundos, habiendo un caso incluso de 7 minutos. De acuerdo con este criterio solamente seis de los registros pueden ser catalogados como sismos, siendo el 5.17%, ya que la duración es de más de 40 segundos.

Cabe mencionar que estos eventos de mayor duración son de magnitudes de 3.7 a 4.0, y además se encuentran fuera de zona de actividad minera y a profundidades mayores a 3 km, como se observa en la figura 4.16.

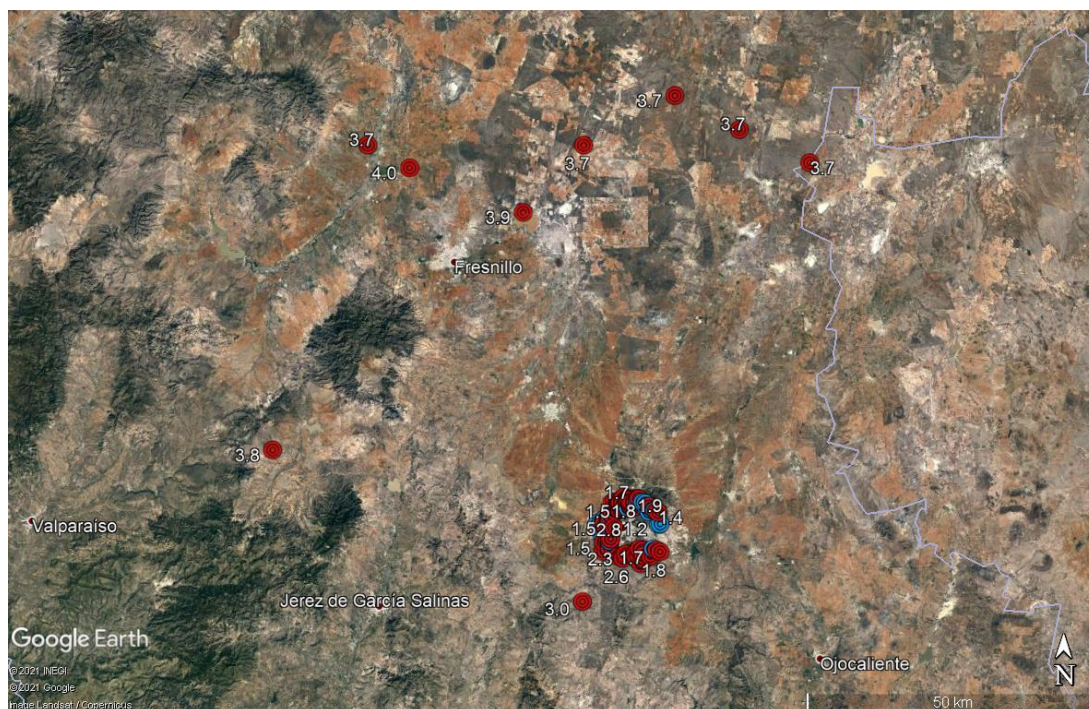


Figura 4.16 Total de sismos en Zacatecas en el año 2020

4.1.5 Mecanismos focales (pelota de playa)

Los mecanismos focales son muy empleados por los sismólogos para estudiar el tipo de falla que se presenta en los sismos, representándolos gráficamente en esferas parecidas a pelotas de playa. Para generar estas gráficas por lo general se toman al menos 10 registros de distintos sismómetros que deben estar bien distribuidos geográficamente alrededor del epicentro (Departamento de Geofísica, 2014).

Los diagramas de pelotas de playas (beach-ball diagrams) son proyecciones estereográficas que muestran dos cuadrantes negros y dos blancos, separados por un arco de un gran círculo orientado a 90° uno del otro. Los cuadrantes en color negro indican la zona que se encuentra en compresión, y los cuadrantes blancos en tensión. En la figura 4.17 se muestra los campos de tensión y compresión que se forman al ocurrir un sismo, se observa que el movimiento de las ondas P a través del medio alrededor del foco causa que las partículas en el cuadrante negro se alejan del foco, mientras que en el cuadrante blanco se acercan. Las figuras (c) y (d) son los dos posibles planos de falla, para definir cuál de estos es el correcto es necesario conocer las características geológicas del sitio para definir la orientación de la falla.

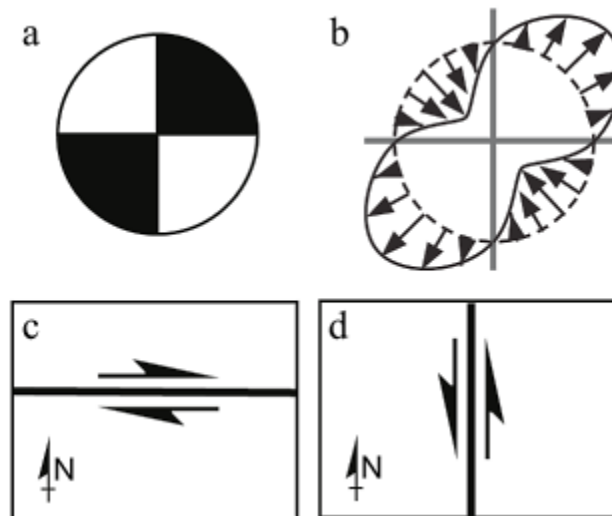


Figura 4.17 Construcción del mecanismo focal de falla (Departamento de Geofísica, 2014).

Para definir los cuadrantes de compresión y tensión esto se debe analizar las formas de onda de los registros de los sismómetros, si el primer movimiento en el arribo de las ondas P es hacia arriba indica que el campo es de compresión, y si es hacia abajo indica una extensión. Como se mencionó anteriormente es necesario contar con por lo menos 10 estaciones de monitoreo para formar estos mecanismos, ya que al analizar los registros y el

movimiento ascendente o descendente en el arribo de las primeras ondas se pueden ir graficando y posteriormente trazar los posibles planos de falla.

En la figura 4.18 se muestra un ejemplo de la caracterización de un mecanismo focal en donde se cuenta con 14 estaciones, numeradas con letras; en la figura a) se observa la ubicación y clasificación del movimiento de las primeras ondas representando con un círculo en blanco un movimiento descendente, con un círculo negro un movimiento ascendente, o con una x si el movimiento es muy débil para diferenciarlo; posteriormente se dibujan los posibles planos de falla representados por dos círculos ortogonales (b); y finalmente se rellenan los cuadrantes y se obtiene la representación gráfica del mecanismo focal de falla (c).

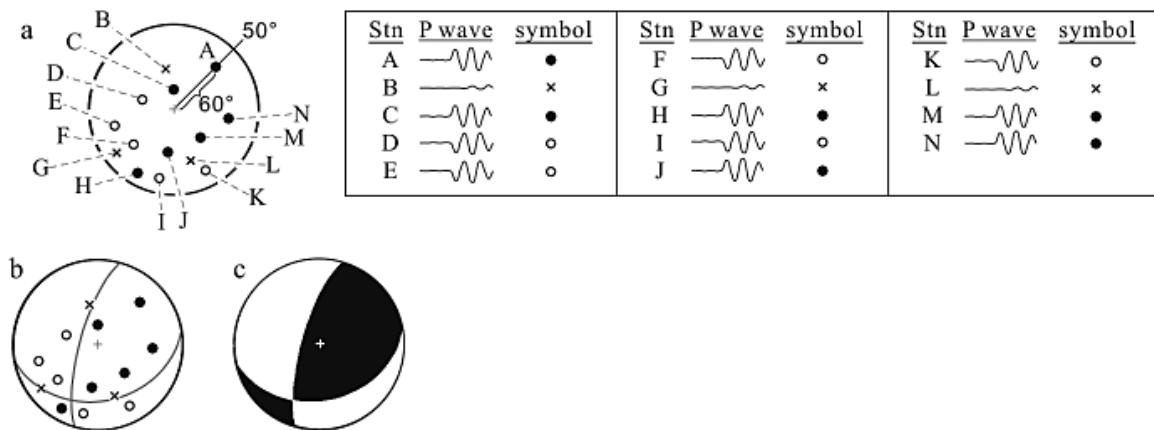


Figura 4.18 Construcción del mecanismo focal de falla (Departamento de Geofísica, 2014).

En la figura 4.19 se muestran distintos tipos de mecanismos focales, incluyendo explosiones e implosiones, cabe mencionar que para estos casos la esfera se colorea totalmente en negro o blanco para explosión e implosión respectivamente, debido a que como estos se refieren a un evento muy puntual la dispersión de las ondas es igual en todas direcciones.



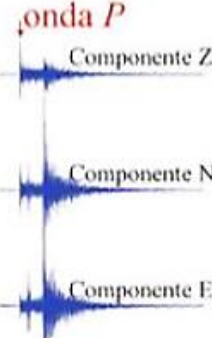


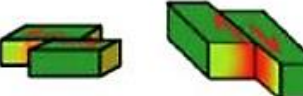

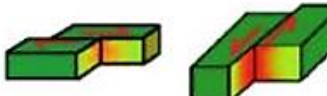

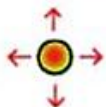

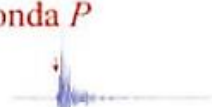
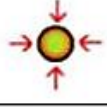

Bloques	Tipo de movimiento	"Pelotas de playa" ○ Cuadrante de extensión ● Cuadrante de compresión	Sismogramas
	Fallas normales. Ambientes tectónicos de esfuerzos extensionales.		
	Fallas inversas. Ambientes tectónicos sujetos a esfuerzos compresionales.		
	Fallas transformantes. Desplazamiento lateral.		
	Fallas transformantes. Desplazamiento lateral.		
	Explosiones		
	Implosiones.		

Figura 4.19 Tipo de mecanismos focales (SSN, 2014).

Debido a que solo se tienen los registros de una estación, no es posible construir los mecanismos focales. Analizando los registros de la mina se puede observar un movimiento descendente inicial en la componente longitudinal y ascendente inicial en la componente vertical (Figura 4.20), esto se debe principalmente a que el geófono del sismógrafo fue orientado hacia el punto de la voladura. Respecto a los registros sísmicos de Zacatecas se puede observar un movimiento ascendente en algunos registros, en particular se analizó la componente vertical Z, ya que para las otras componentes este criterio puede variar dependiendo de la ubicación del sismo respecto a la estación sísmica ZAIG, además en su mayoría, en este mismo eje, el punto máximo se encuentra en el lado positivo (Figura 4.21).

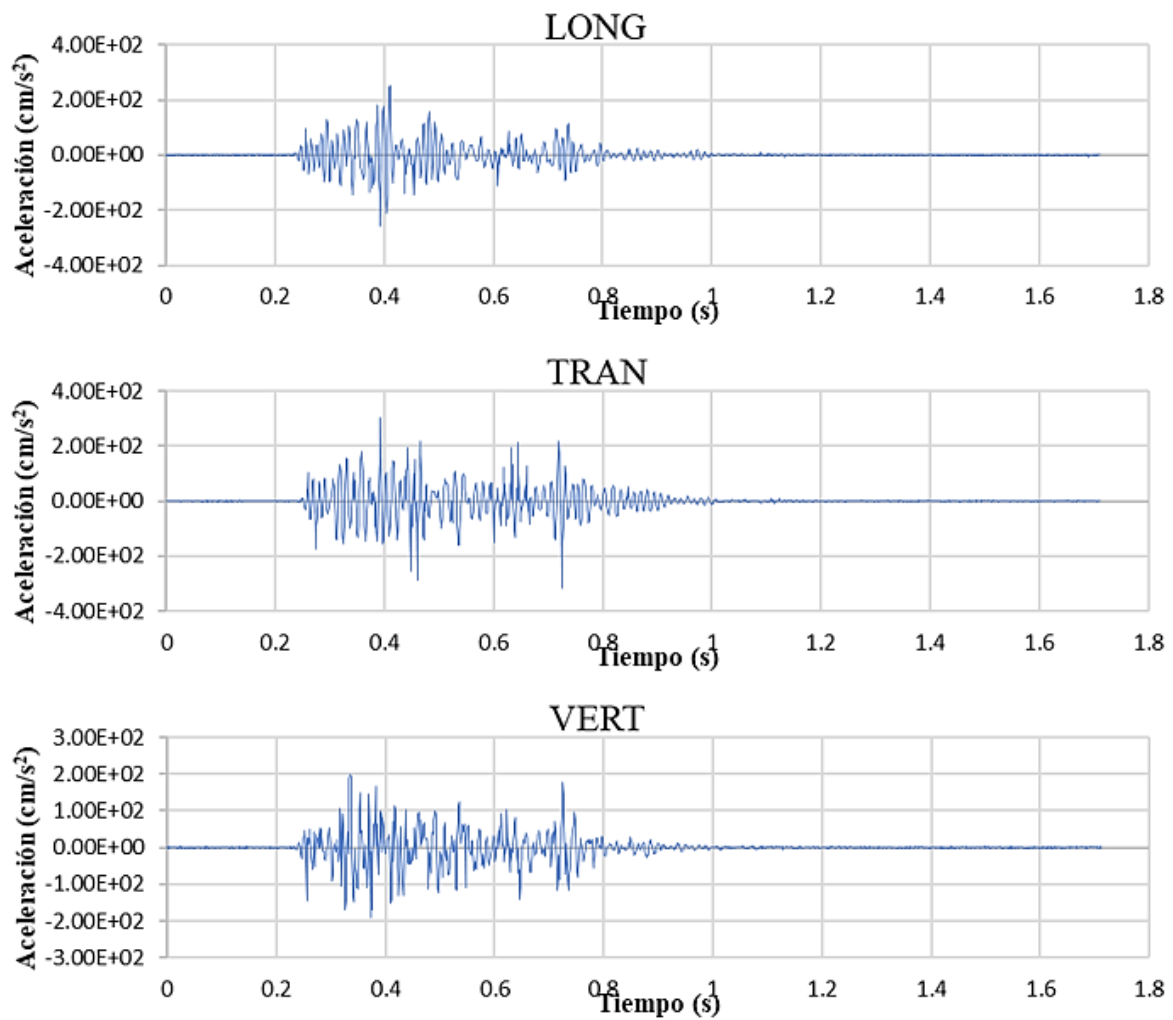


Figura 4.20 Registro de voladura en la mina, 21/01/2019

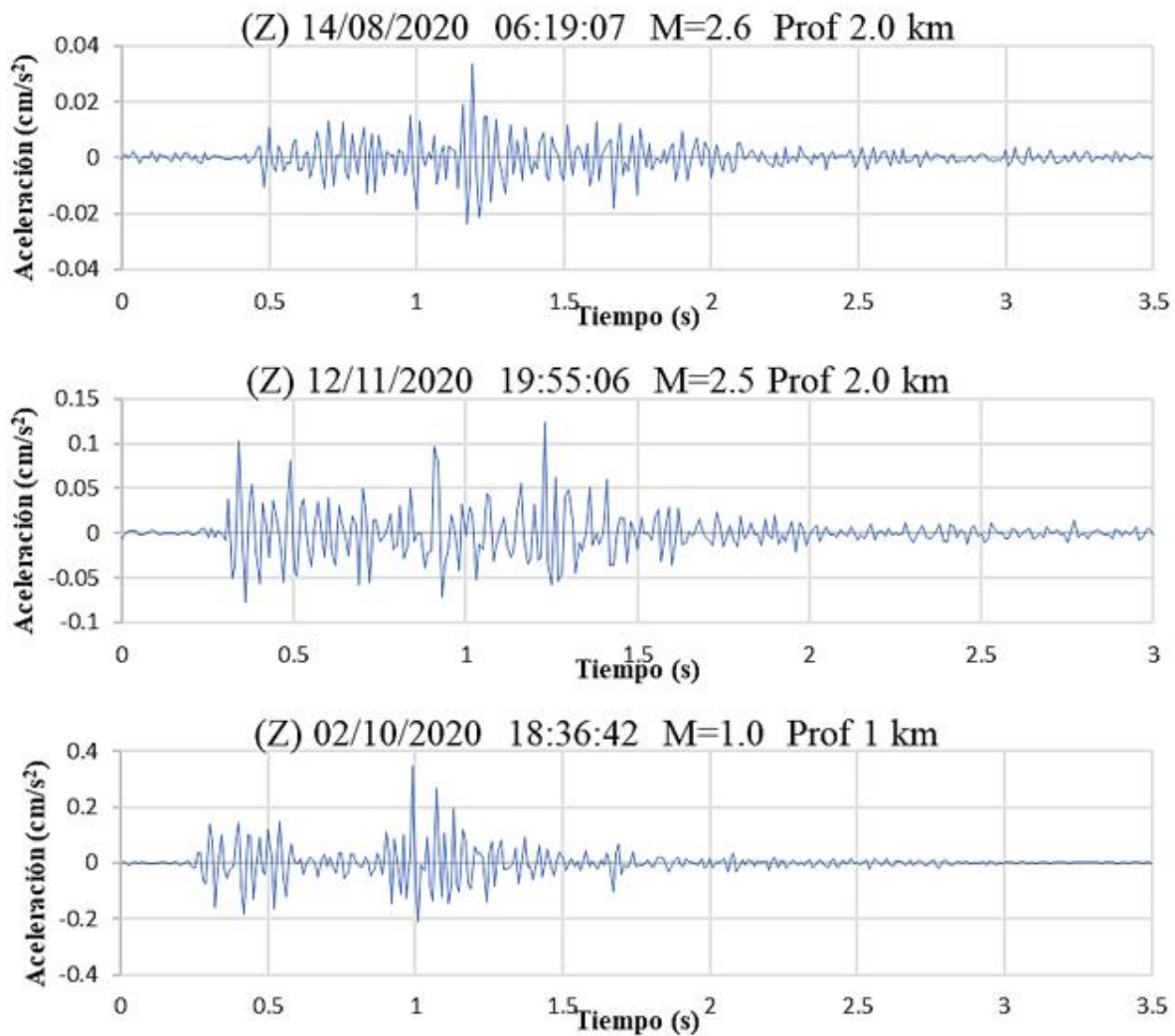


Figura 4.21 Registros con movimiento ascendente en el eje vertical Z

4.1.6 Análisis de espectrogramas (frecuencia-tiempo)

De acuerdo con varios estudios en un análisis de frecuencia y tiempo puede diferenciarse entre un sismo y una explosión, esto se logra mediante la obtención de espectrogramas, que nos muestran una relación entre las frecuencias del registro a través del tiempo.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de una explosión y un sismo registrados aproximadamente a la misma distancia de una estación. En la figura 4.22 se muestran el registro de un sismo en la parte superior y el registro de una explosión en la parte inferior. En los espectrogramas de las figuras 4.23 y 4.24 para la explosión (parte izquierda) se observa un contenido mayormente concentrado de las frecuencias, contrario a lo que se observa para el sismo (parte derecha). La estación OSL (Figura 4.23) está más cercana al sismo y la explosión a unas distancias epicentrales de 10-20 km, respectivamente. Se observa algo parecido en la estación SKAR (Figura 4.24) que se encuentra a 157-159 km de

distancia respecto al sismo y la explosión respectivamente. Este es un ejemplo ilustrativo, pero no todas las explosiones y sismos son fácil de diferenciar (Manual SEISAN, 2020).

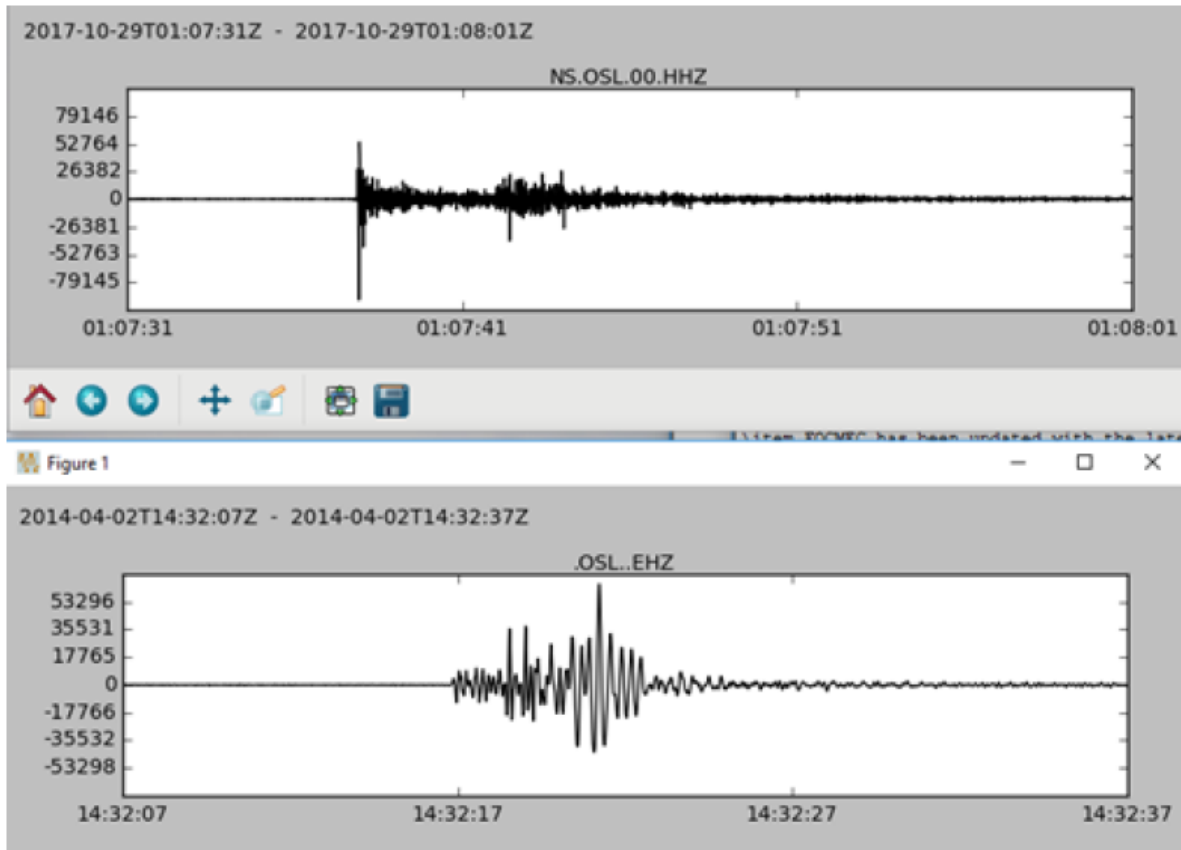


Figura 4.22 Registro de un sismo (superior) y una explosión (inferior) (Manual SEISAN, 2020)

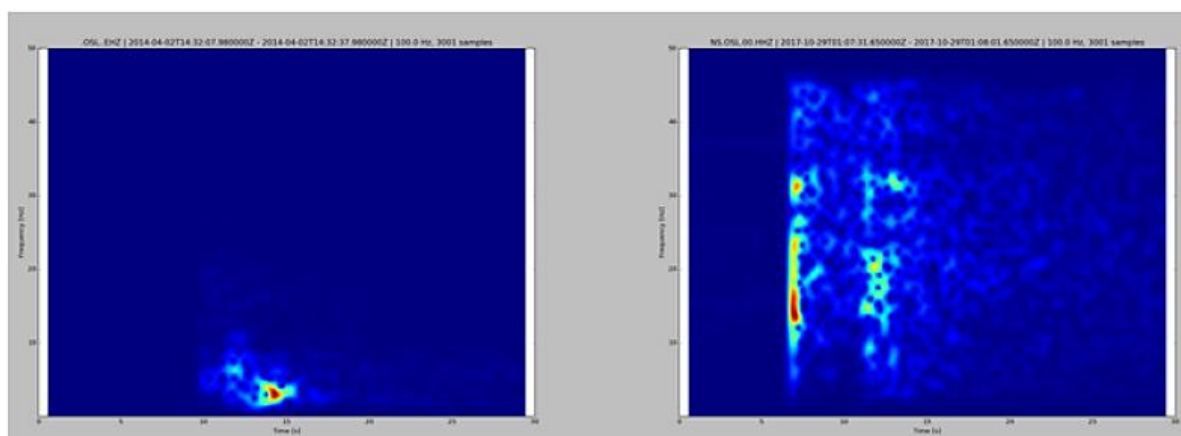


Figura 4.23 Espectrograma de dos señales de la estación OSL, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Manual SEISAN, 2020)

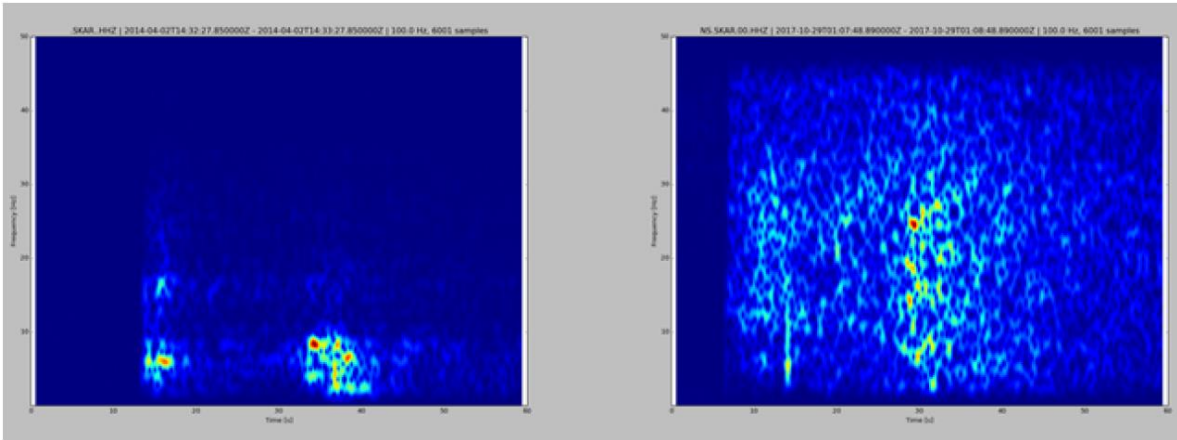


Figura 4.24 Espectrograma de la estación SKAR, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Manual SEISAN, 2002)

Se realizó un análisis espectral de los registros obtenidos en la mina y de los registros sísmicos de la estación ZAIG de Zacatecas, en las figuras 4.25 a 4.29 se presentan los espectrogramas de los registros de voladura de la mina; los registros sísmicos de Zacatecas se presentan, por una parte los registros de magnitudes mayores a 3.5 en las figuras 4.30 a 4.34, y después los de magnitudes de entre 2.5 a 2.8 en las figuras 4.35 a 4.39, para estos registros se ajustó la misma escala de tiempo a 1 min para poder ser comparados. En estas figuras se vuelven más evidente los eventos que tienen mayor duración a 5 segundos como se comentó en uno de los criterios anteriores.

En la figura 4.40 se presenta el registro y los espectrogramas del evento de mayor duración (7:10 minutos).

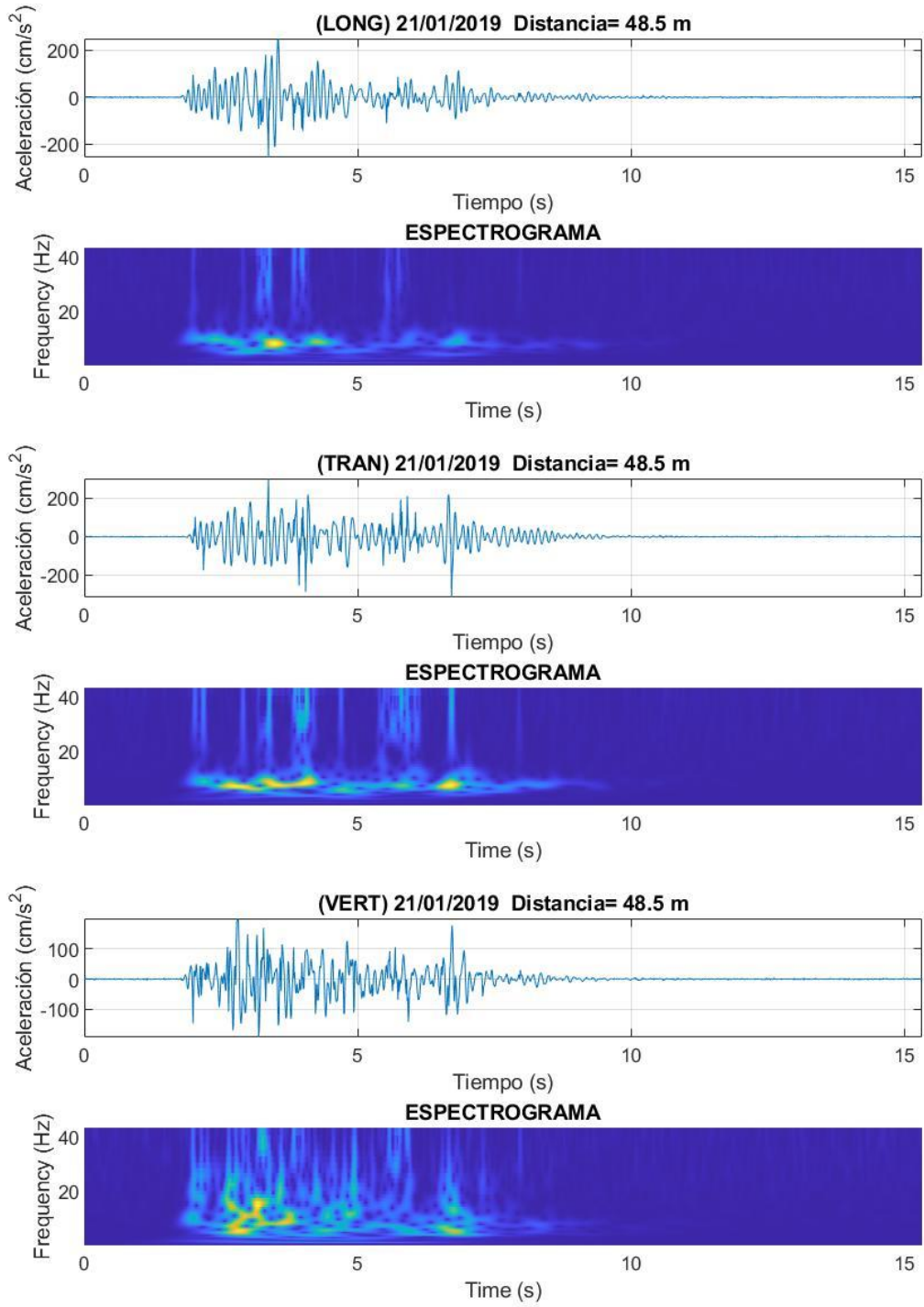


Figura 4.25 Espectrogramas registro de voladura 21/01/2019 distancia 48.5 m

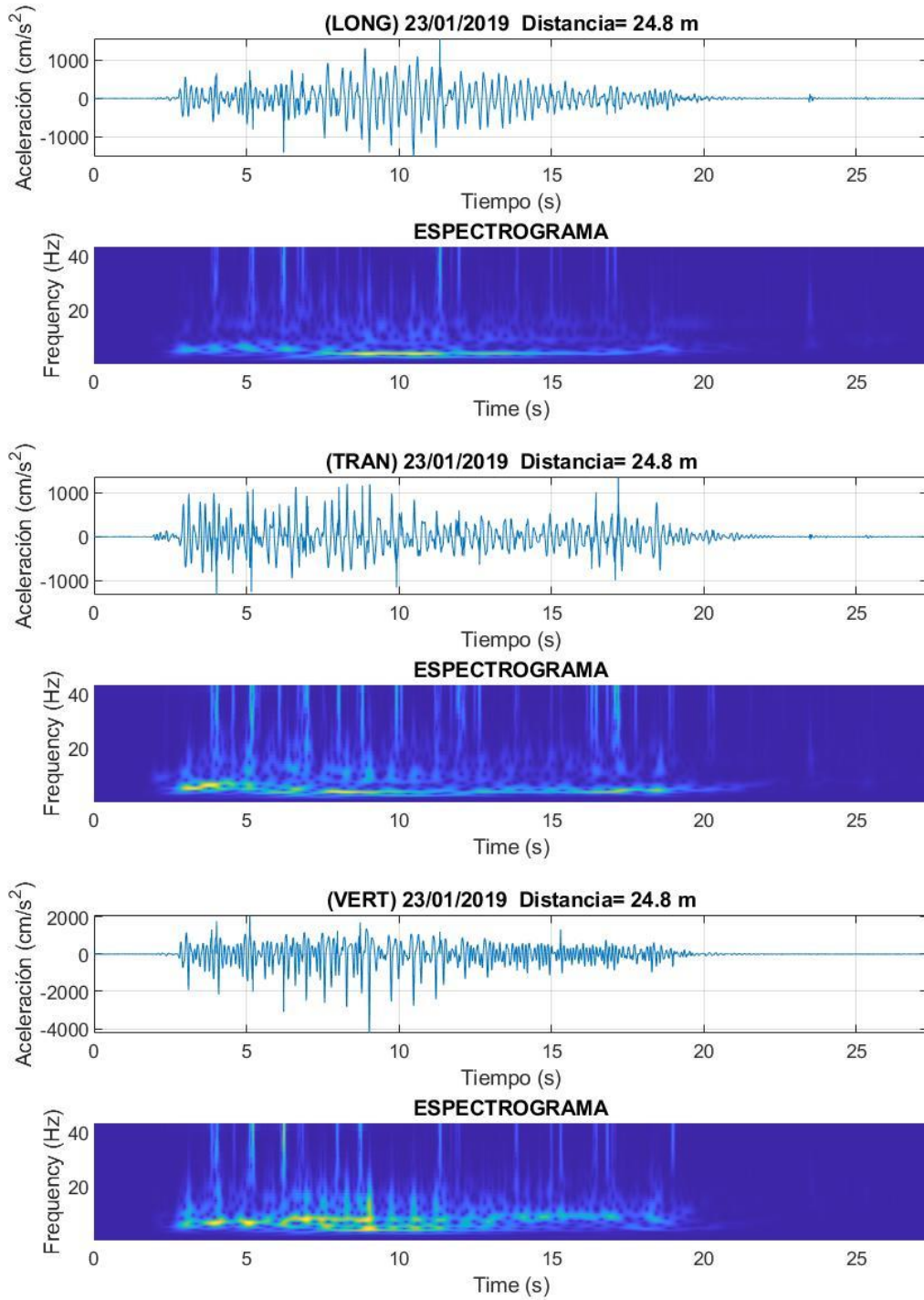


Figura 4.26 Espectrogramas registro de voladura 23/01/2019 distancia 24.8 m

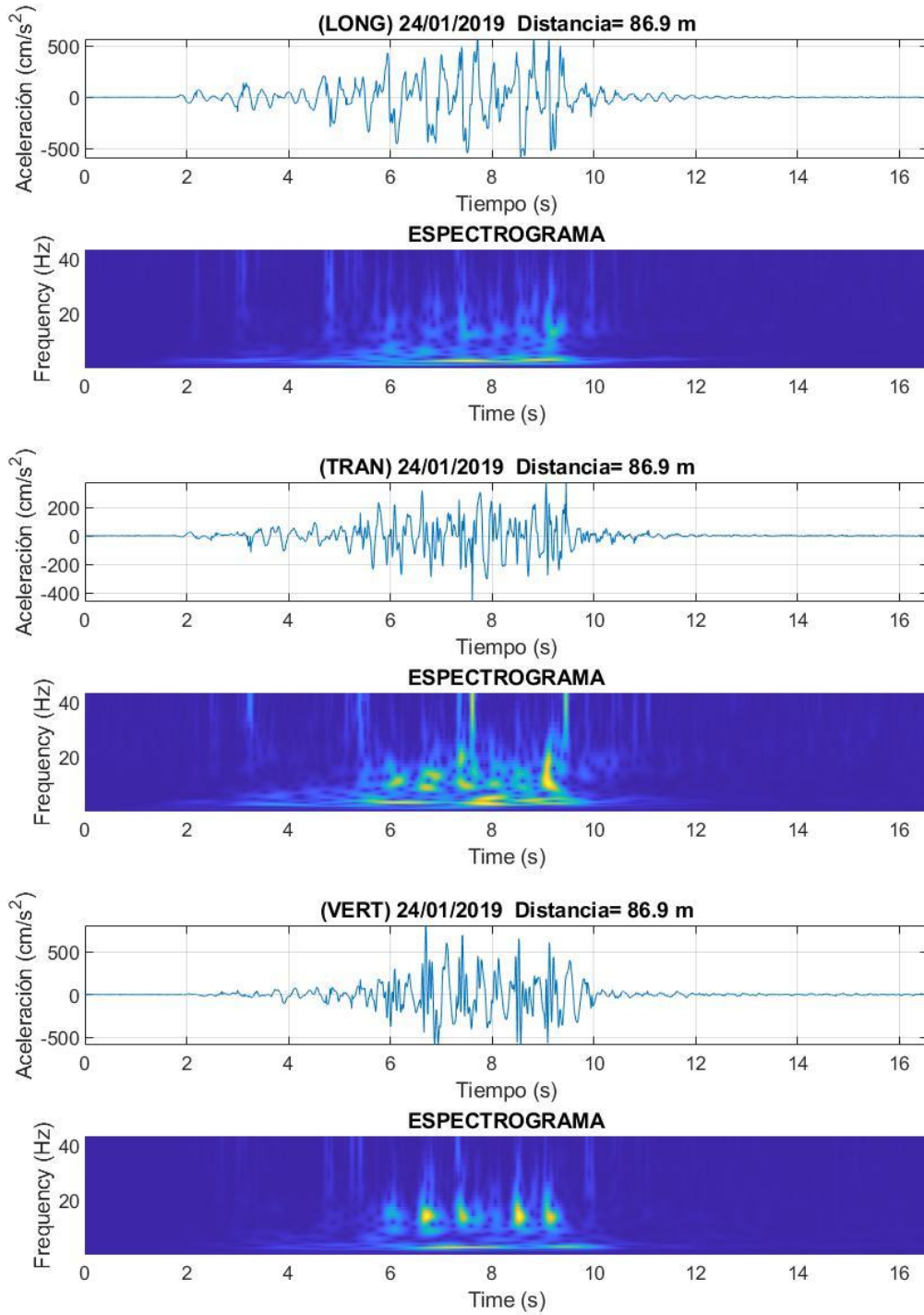


Figura 4.27 Espectrogramas registro de voladura 24/01/2019 distancia 86.9 m

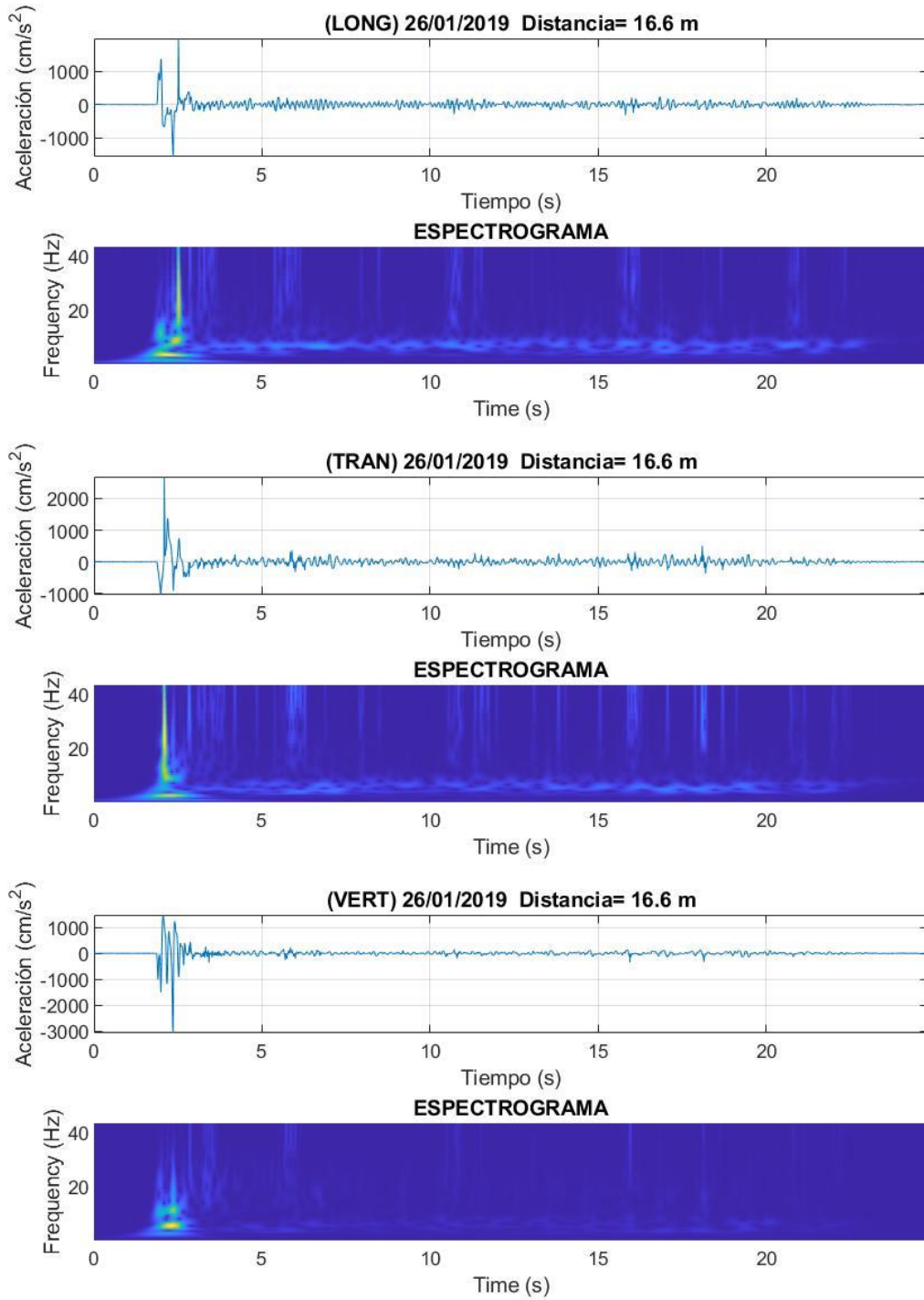


Figura 4.28 Espectrogramas registro de voladura 26/01/2019 distancia 16.6 m

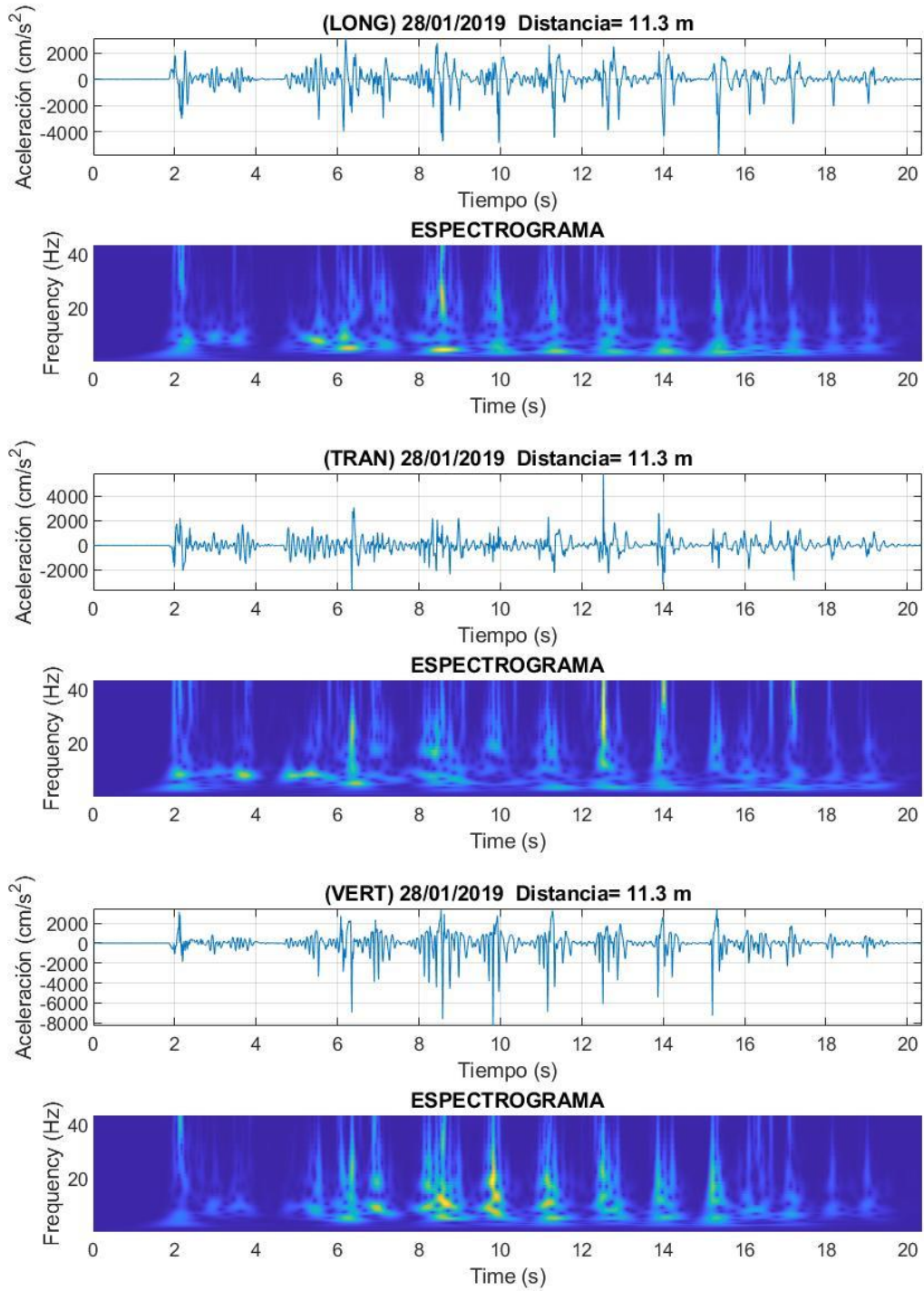


Figura 4.29 Espectrogramas registro de voladura 28/01/2019 distancia 11.3 m

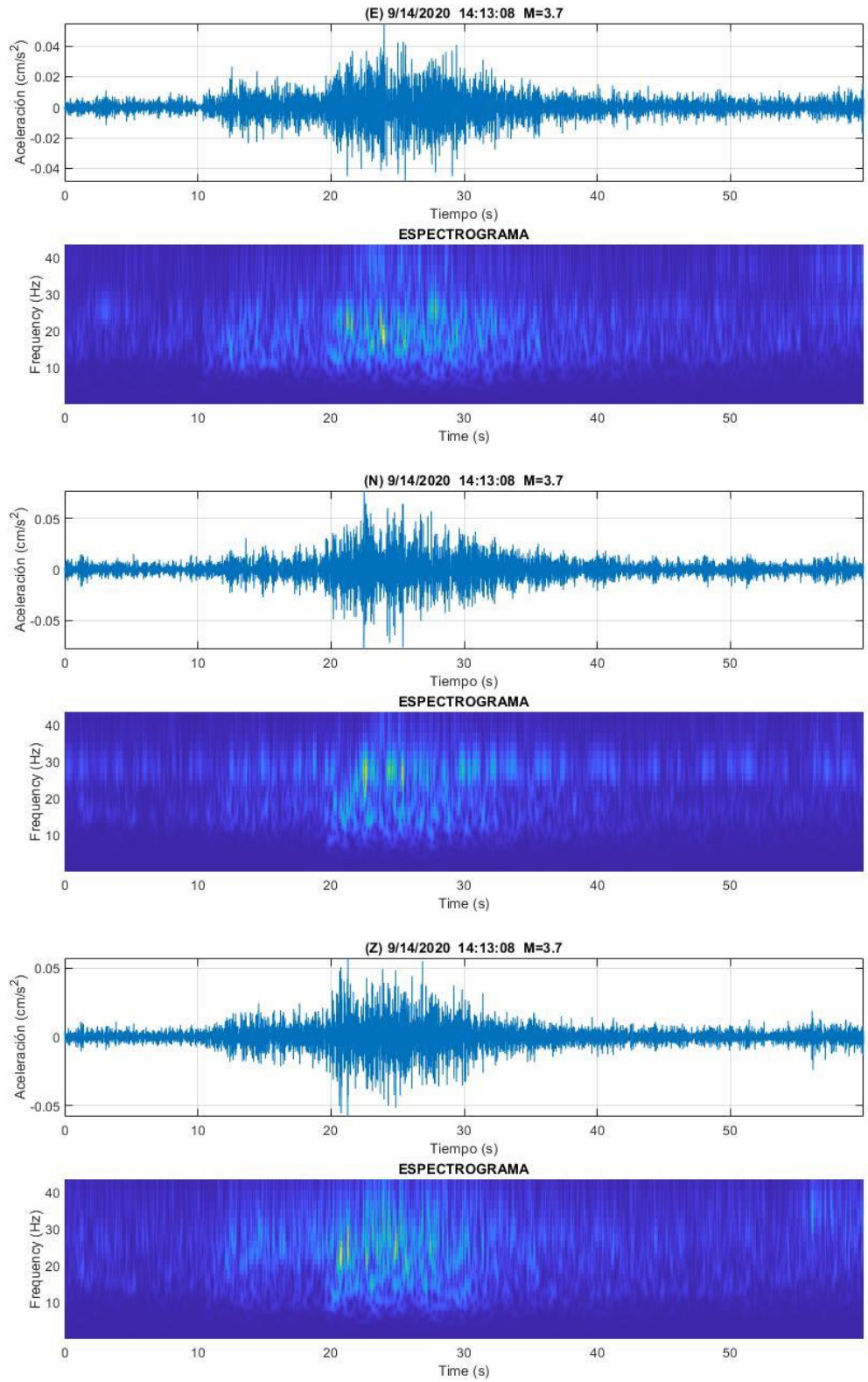


Figura 4.30 Espectrogramas registro 14/09/2020 14:13:08 M=3.7

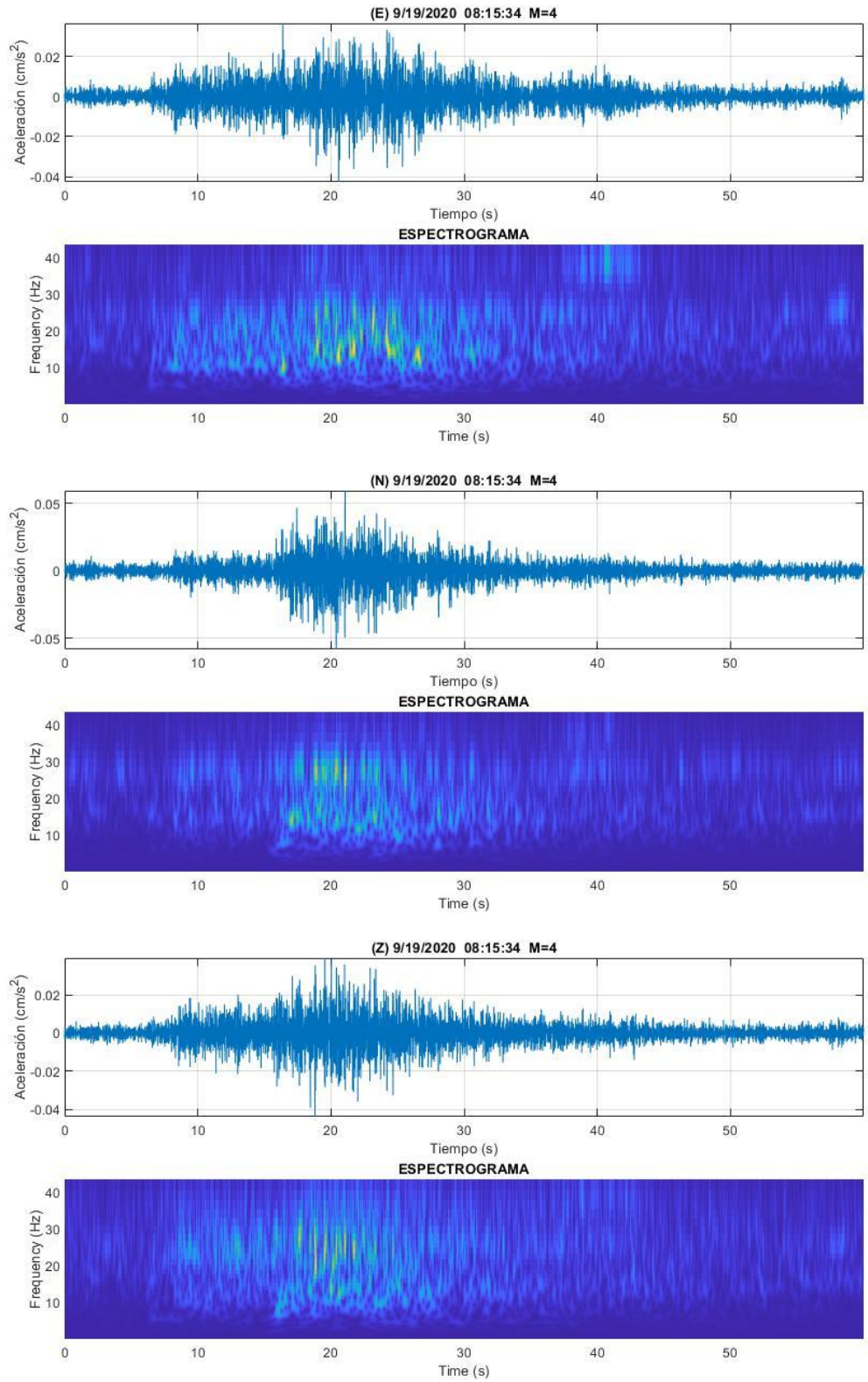


Figura 4.31 Espectrogramas registro 19/09/2020 08:15:34 M=4.0

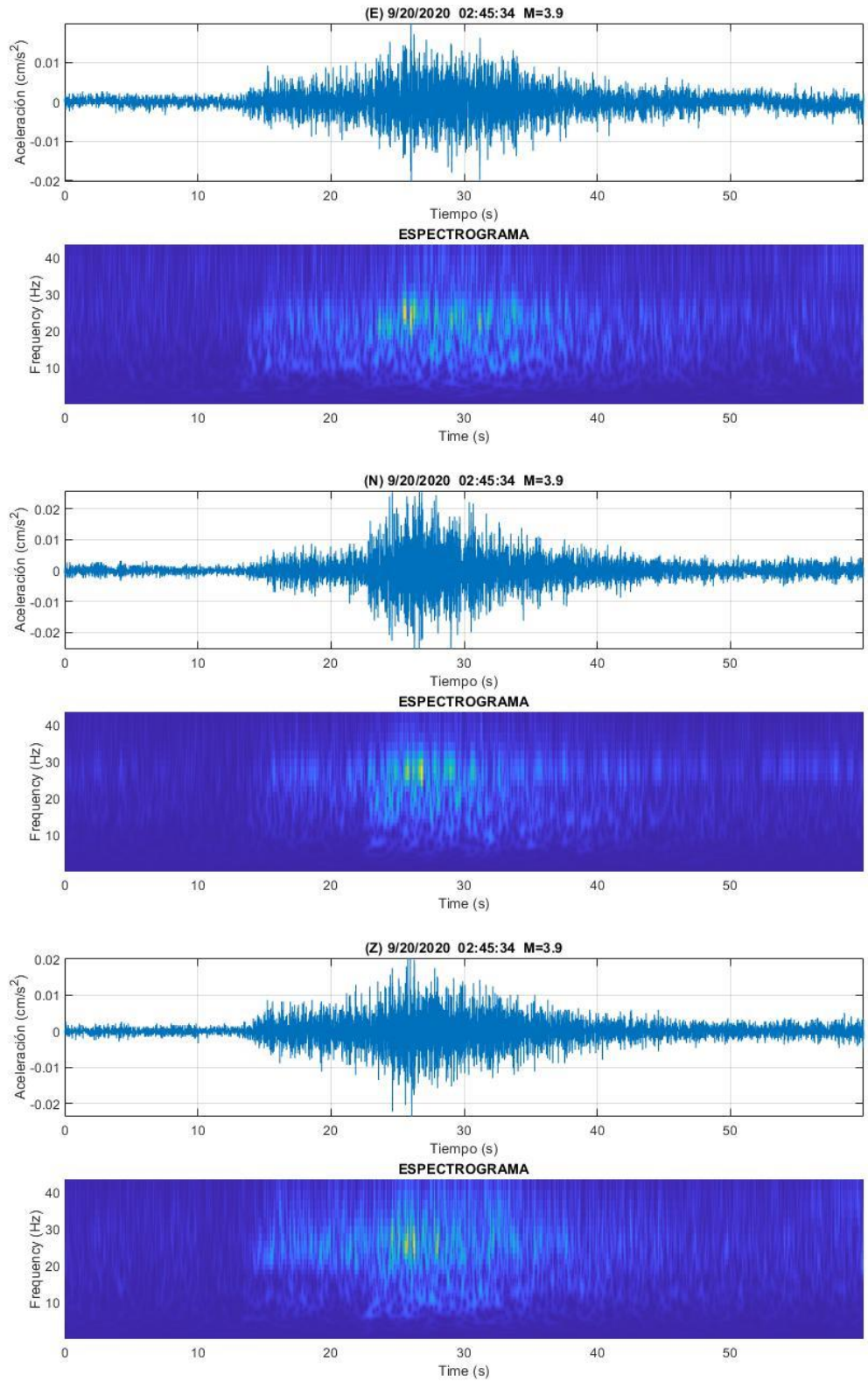


Figura 4.32 Espectrogramas registro 20/09/2020 02:45:34 M=3.9

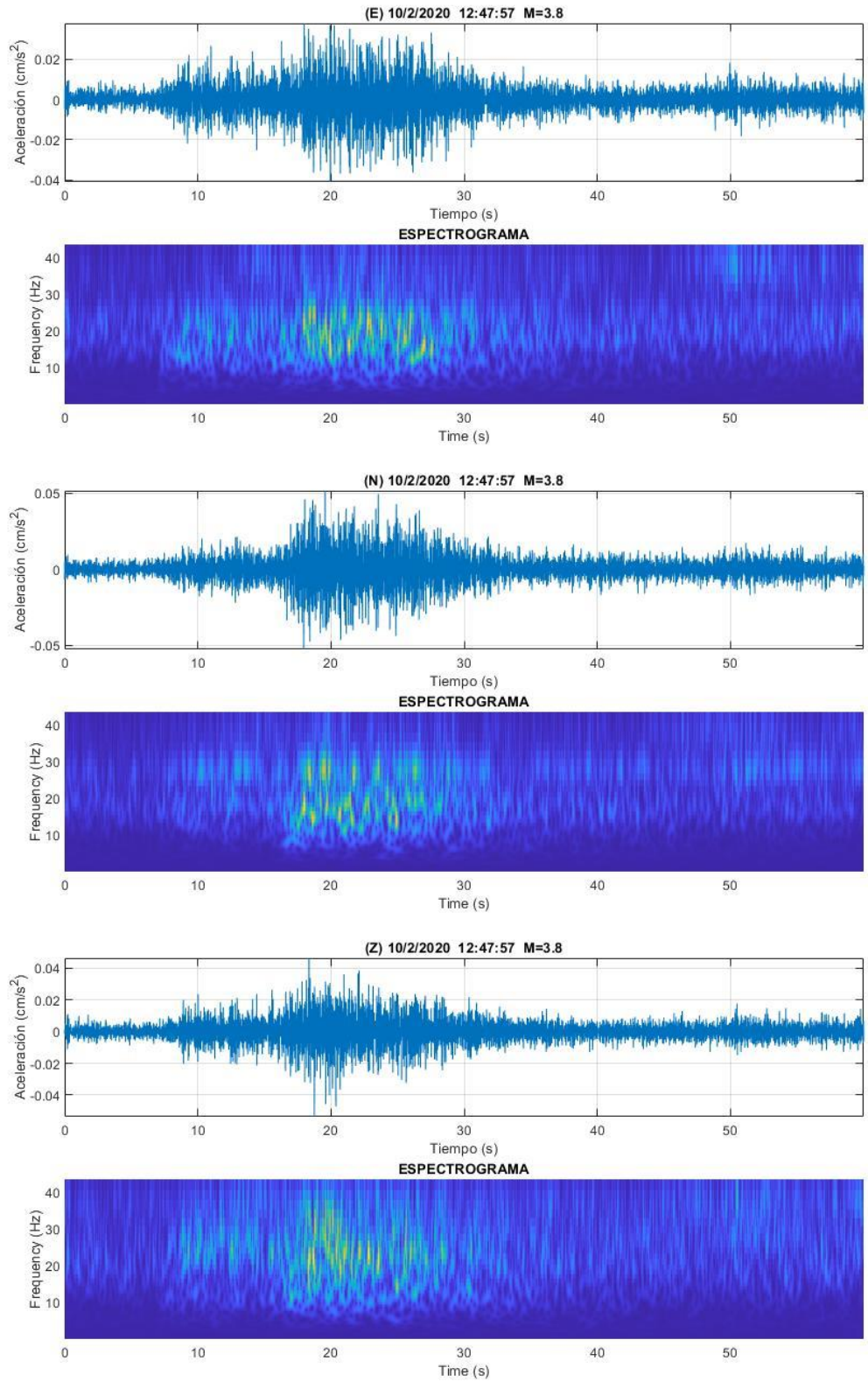


Figura 4.33 Espectrogramas registro 02/10/2020 12:47:57 M=3.8

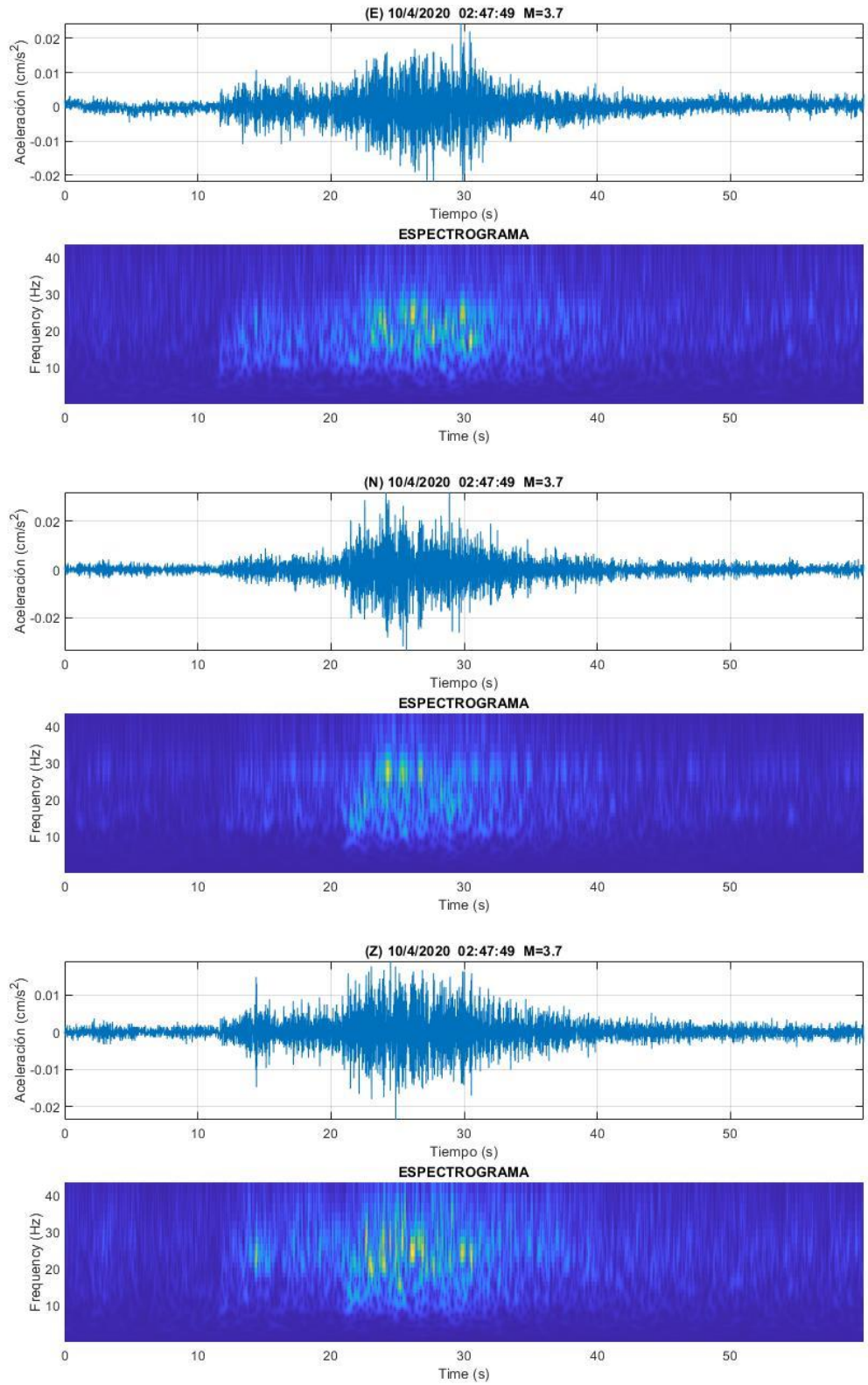


Figura 4.34 Espectrogramas registro 04/10/2020 02:47:49 M=3.7

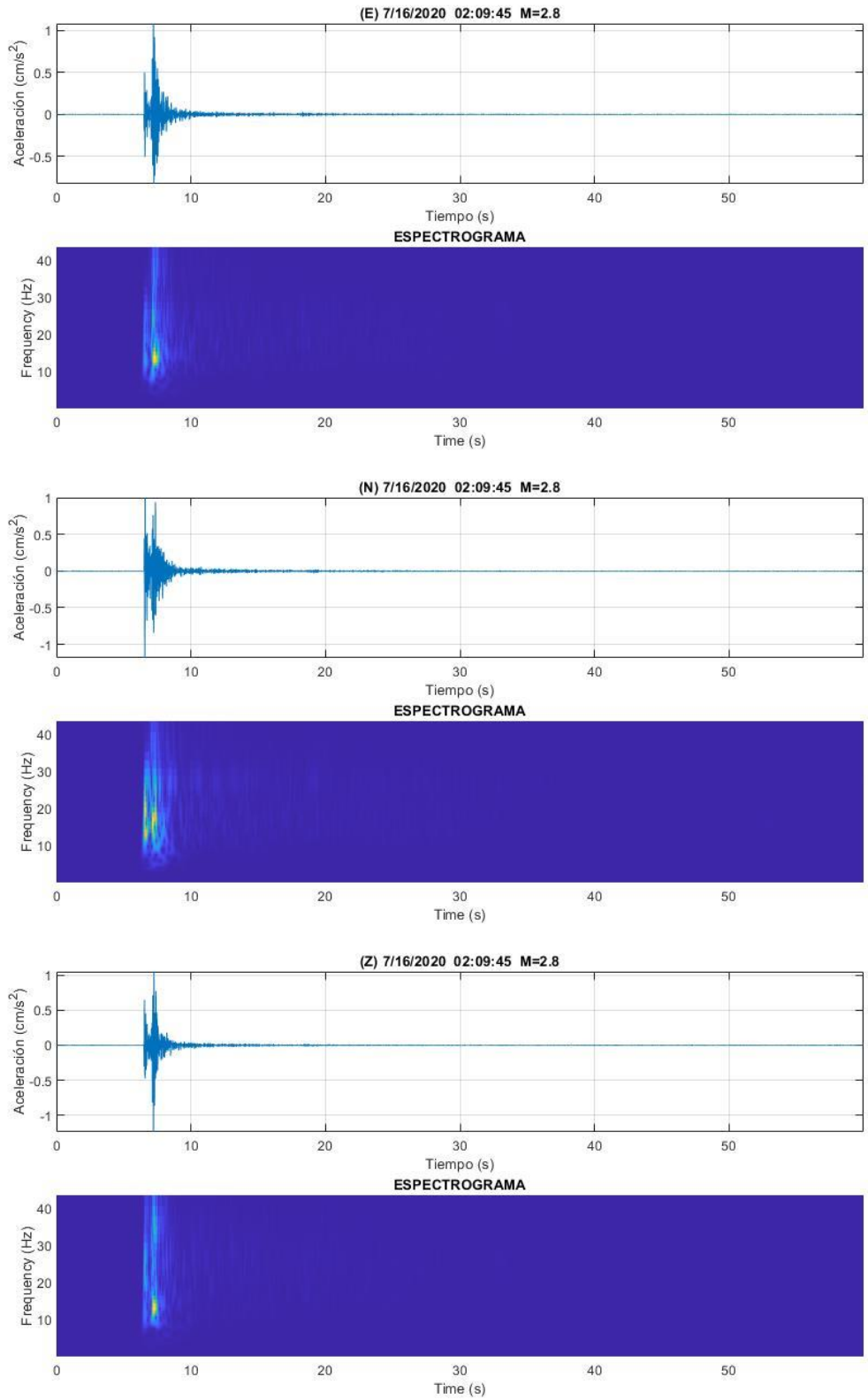


Figura 4.35 Espectrogramas registro 16/07/2020 02:09:44 M=2.8

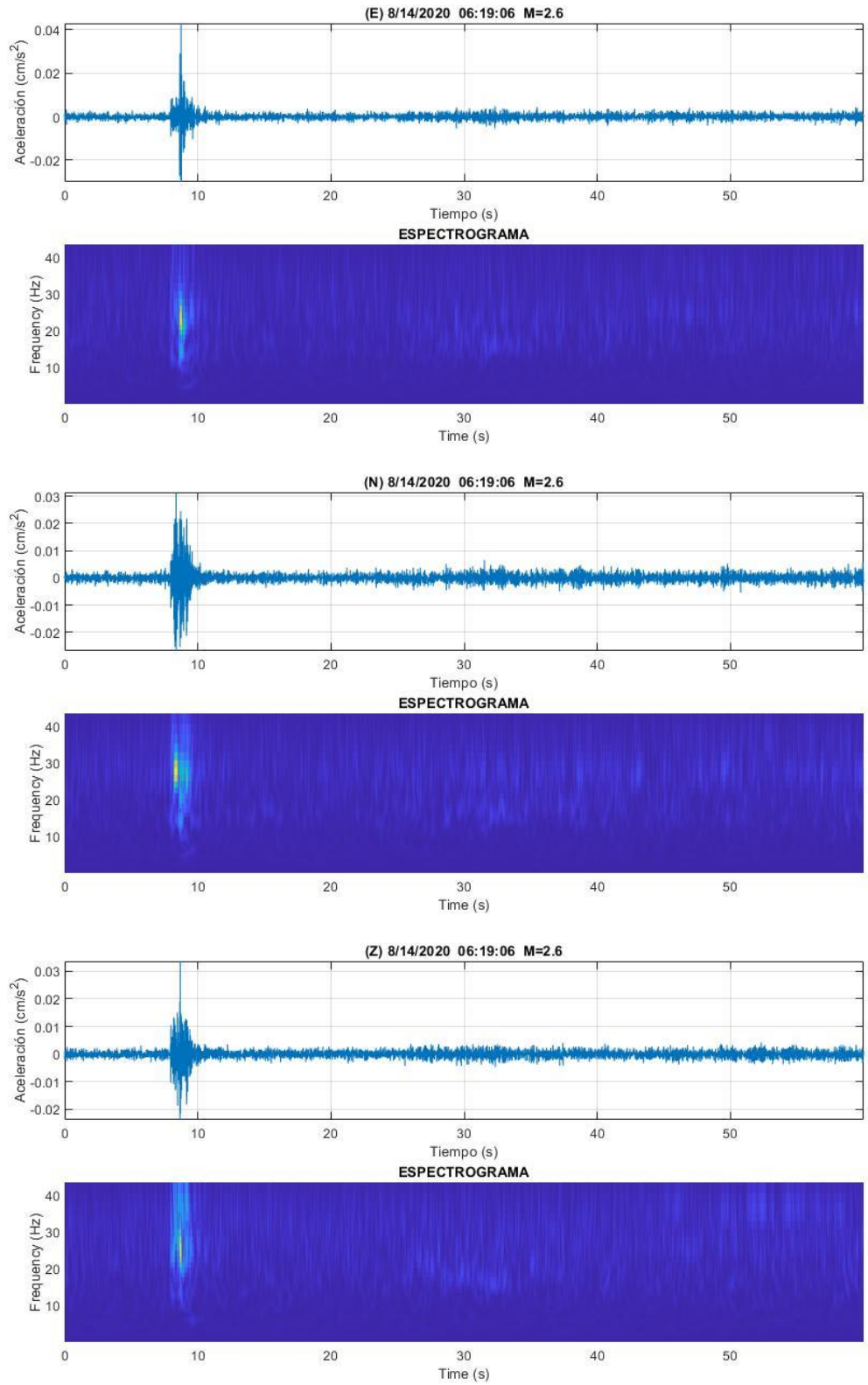


Figura 4.36 Espectrogramas registro 14/08/2020 06:19:06 M=2.6

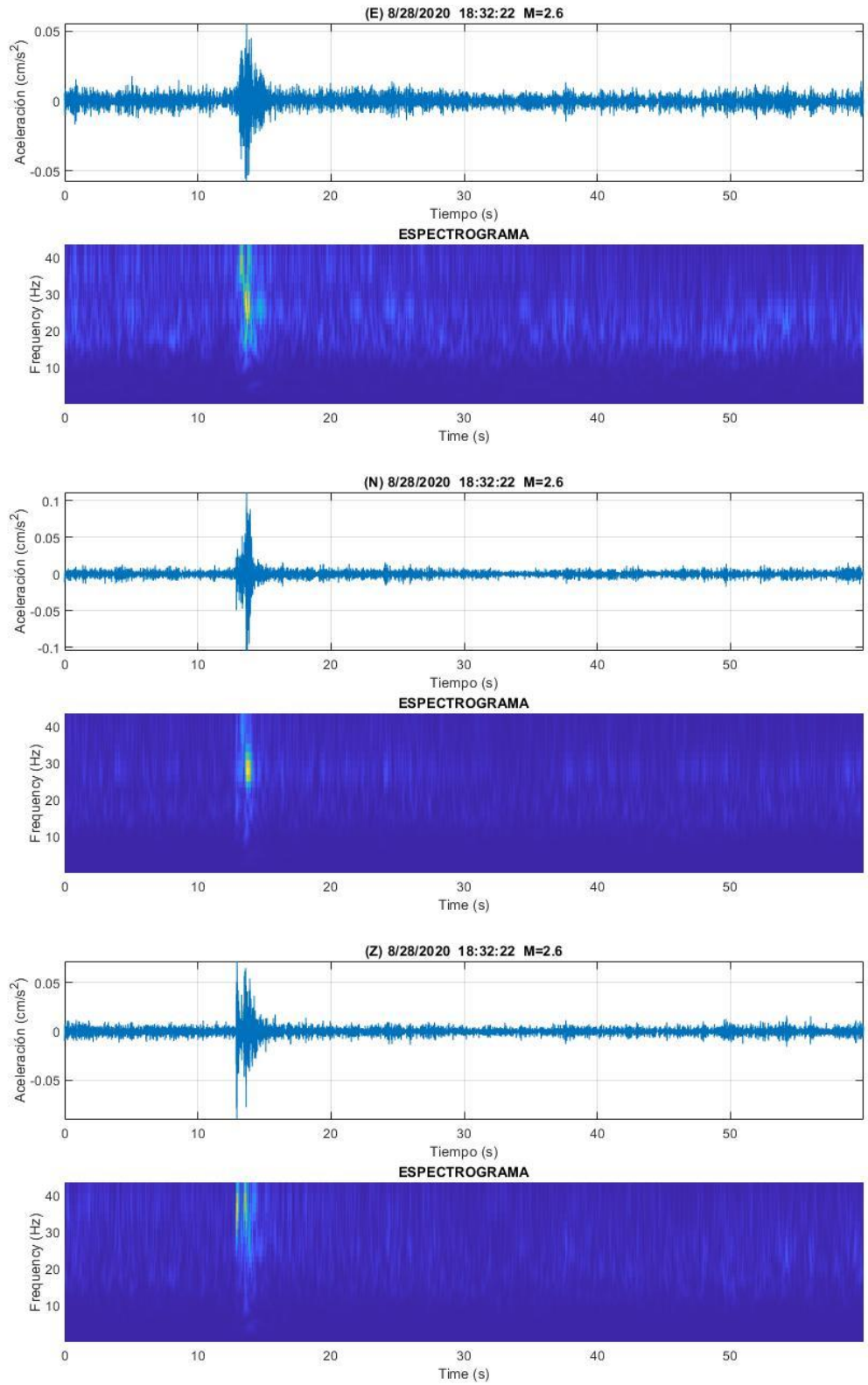


Figura 4.37 Espectrogramas registro 28/08/2020 18:32:22 M=2.6

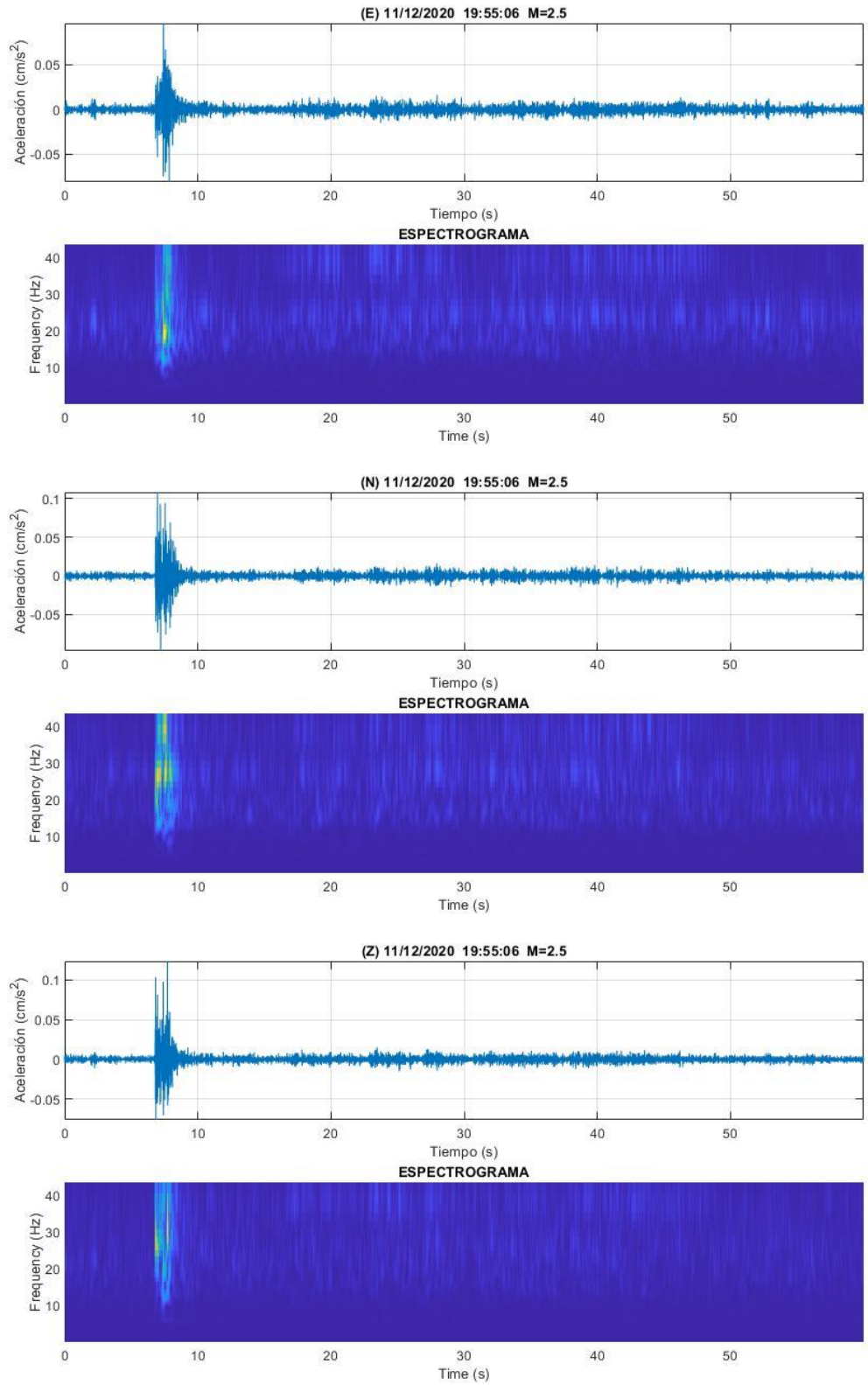


Figura 4.38 Espectrogramas registro 12/11/2020 19:55:06 M=2.5

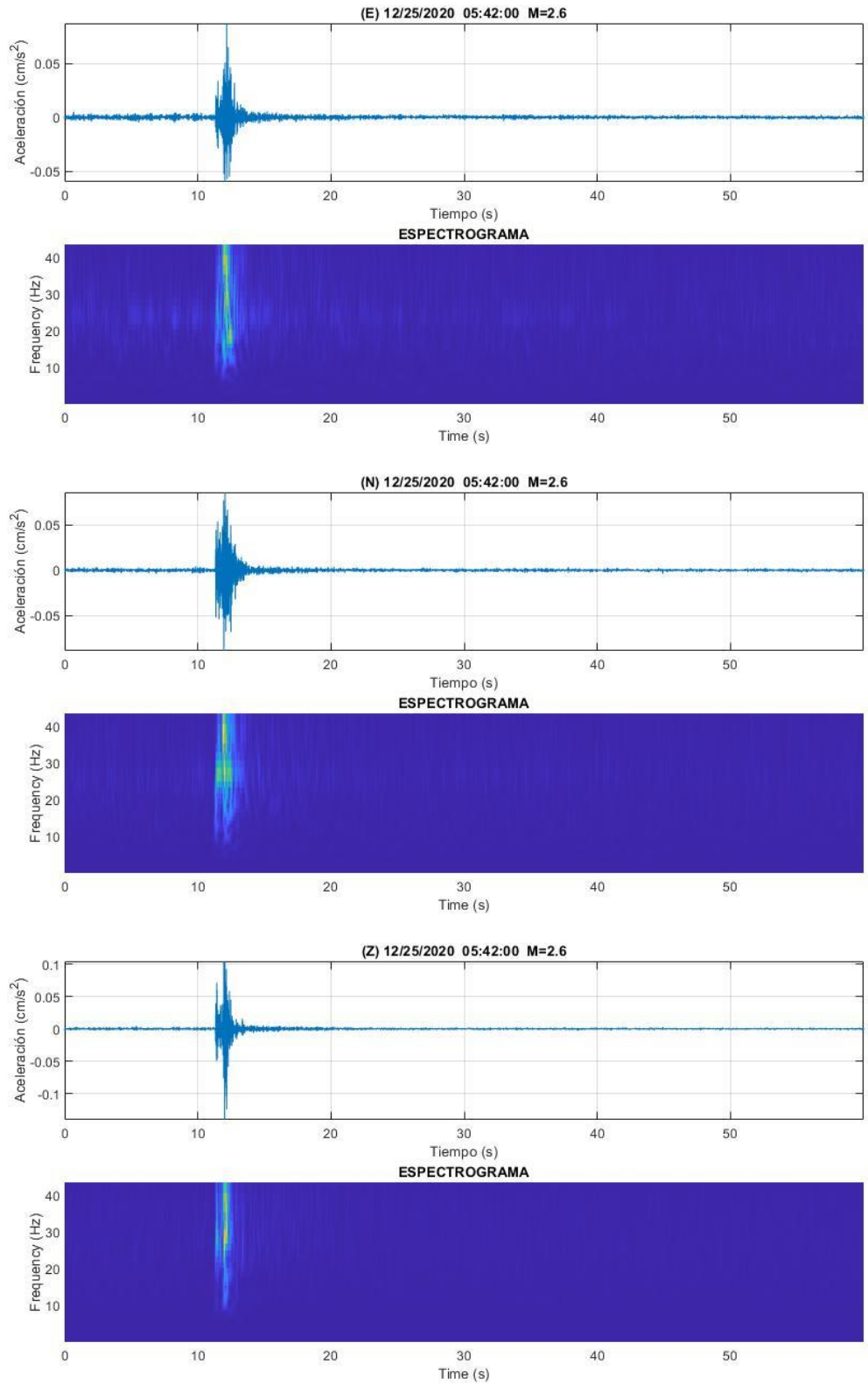


Figura 4.39 Espectrogramas registro 25/12/2020 05:42:00 M=2.6

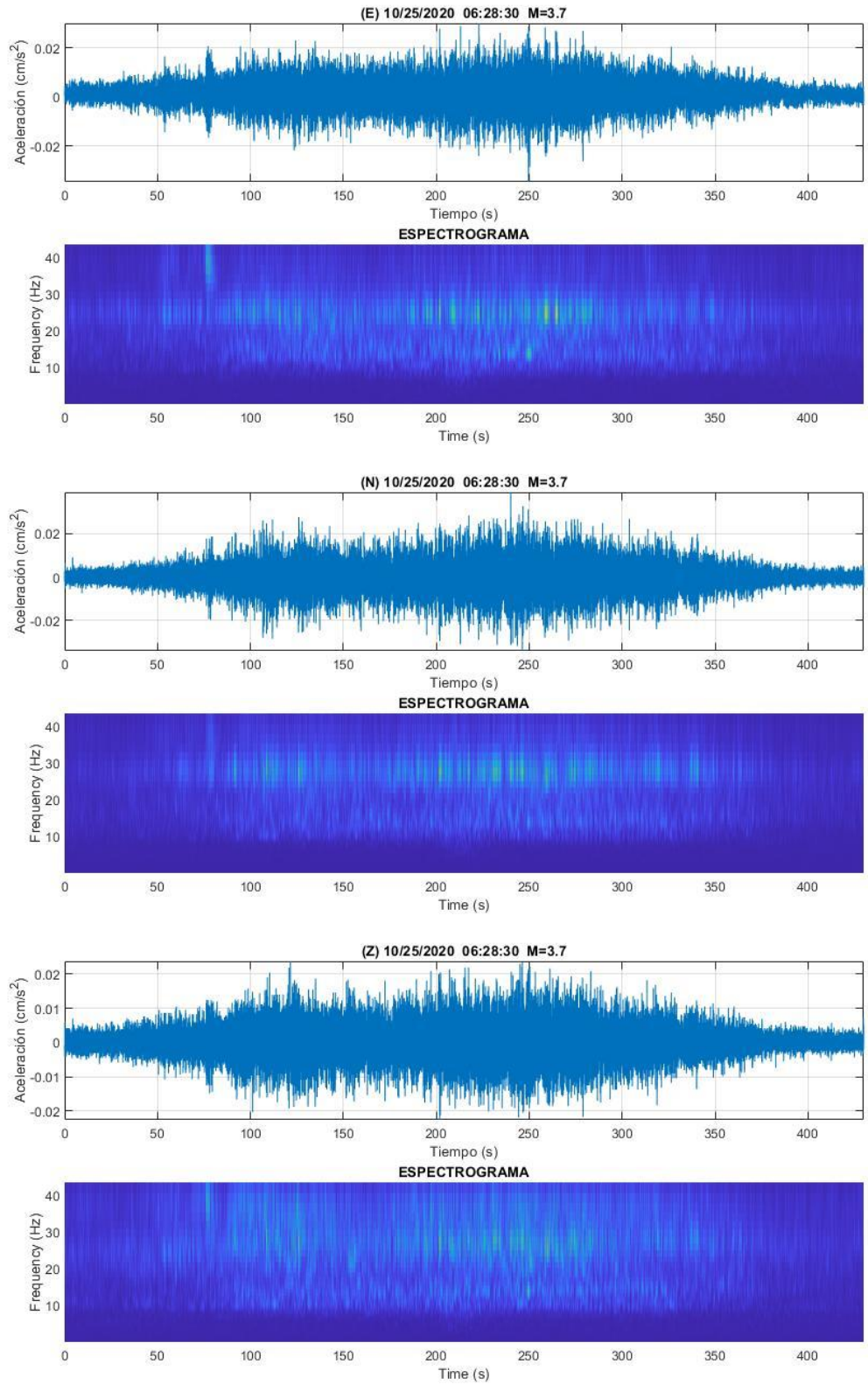


Figura 4.40 Espectrogramas registro 25/10/2020 06:28:30 M=3.7 Duración 7:10 min

En los espectrogramas de las voladuras de mina presentados en las figuras 4.25 a 4.29, es posible distinguir una frecuencia característica que se presenta durante la mayor intensidad del registro en las tres componentes.

Para los registros de la estación ZAIG, se observa que en los espectrogramas de los eventos de mayor magnitud (Figuras 4.30 a 4.34) se presenta un mayor rango de frecuencias a través del tiempo a lo largo de toda la duración del evento, por lo que resulta complicado definir una frecuencia dominante de la señal, mientras que en los eventos de corta duración (Figuras 4.35 a 4.39) se observa una mayor concentración en el rango de frecuencias cuando ocurre la mayor intensidad, relacionando esto con una frecuencia característica de la señal.

Los puntos con mayor coloración en amarillo dentro de los espectrogramas corresponden a los picos obtenidos de los espectros de Fourier, que se muestran en las figuras 4.41 para los registros de mina; 4.42 para los registros de magnitudes mayores a 3.5; y 4.43 para los registros con magnitudes de entre 2.5 a 2.8; los cuales presentan muy buena correlación con los espectrogramas correspondientes.

Los espectrogramas de los registros de la estación ZAIG de corta duración son muy parecidos a los espectrogramas obtenidos de los registros de voladura de mina, por lo que se puede decir que se trata de una explosión. Además, estos registros coinciden en que tienen una duración menor a 5 segundos y se ubican cercano a las minas.

De acuerdo con los criterios antes mencionados, se determina que 107 de los registros corresponden a explosiones de mina (92.24%), ya que cumplen con los criterios correspondientes para ser clasificados como tal.

Por otro lado, se tiene un total de 6 sismos, ya que la profundidad en la que estos ocurren es mayor a 3 km, y difícilmente el desarrollo de una mina puede llegar a estas profundidades, además los epicentros de estos se encuentran lejanos a las zonas de actividad minera; también se observa que la duración de estos es mucho mayor a los registros que se obtuvieron en la mina; además, de acuerdo con la comparativa por medio de los espectrogramas, los espectrogramas correspondientes a estos registros son muy parecidos a los del ejemplo para el caso de sismo en donde se observa un mayor campo de frecuencias que contiene la señal. Por otro lado, se observa que estos 6 sismos se relacionan muy bien con los sismos ocurridos en los años anteriores, en los que se tienen reportados 6, 3 y 4 sismos para los años 2017, 2018 y 2019 respectivamente.

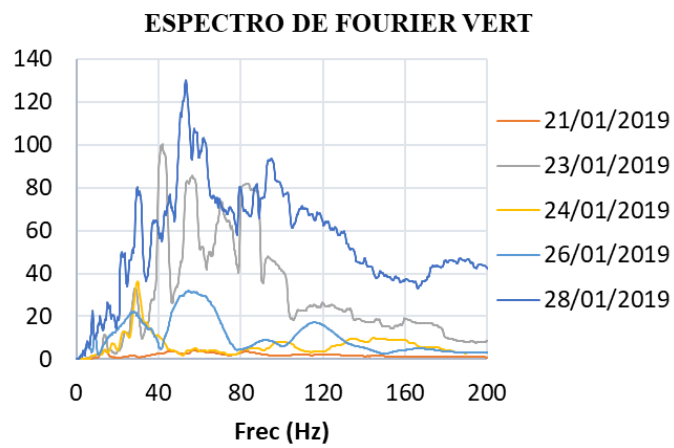
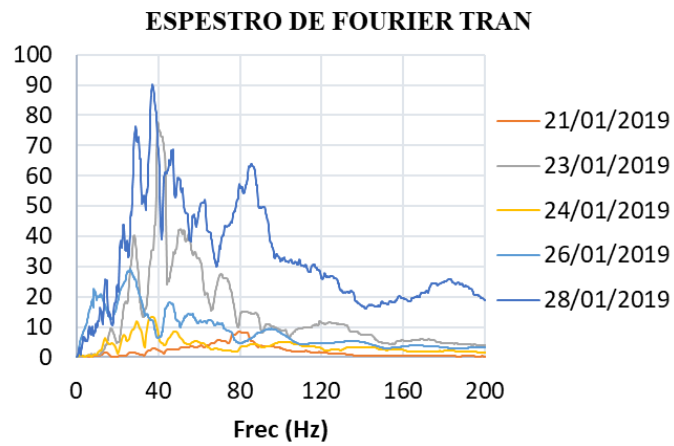
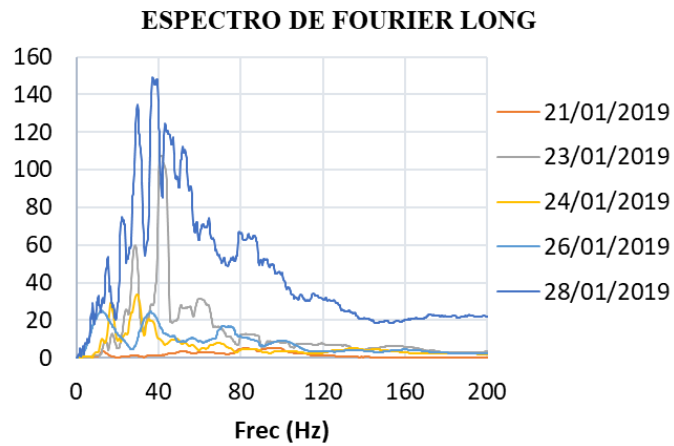
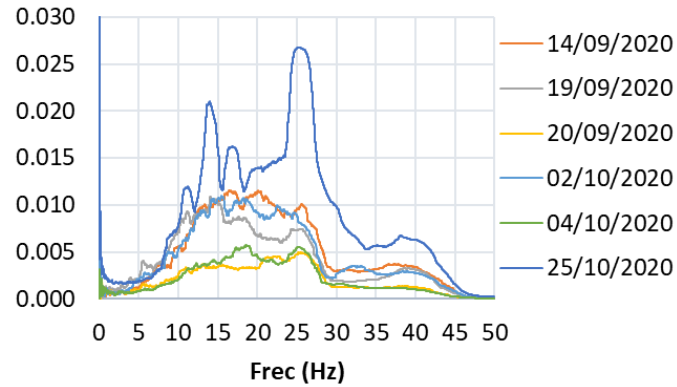
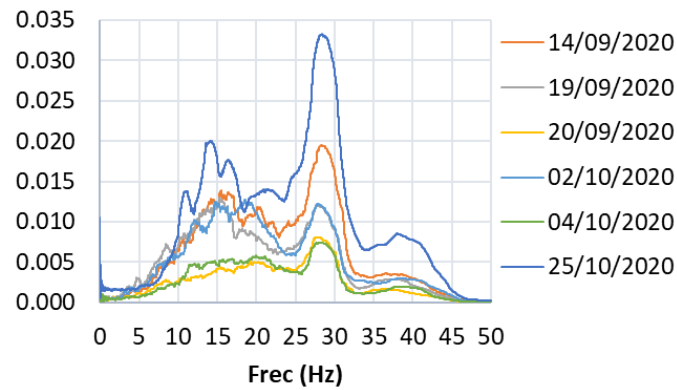


Figura 4.41 Espectros de Fourier para los registros de mina

ESPECTRO DE FOURIER E-O



ESPECTRO DE FOURIER N-S



ESPECTRO DE FOURIER Z

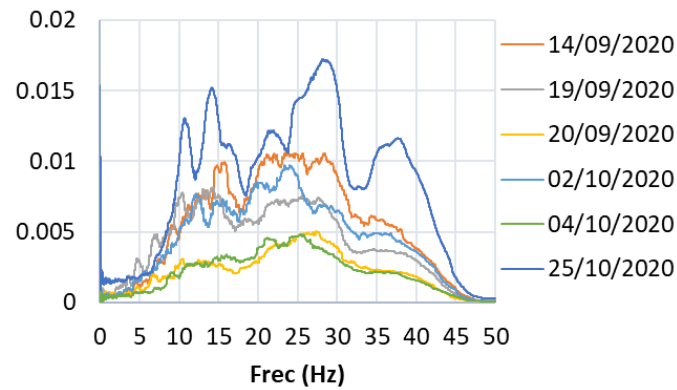
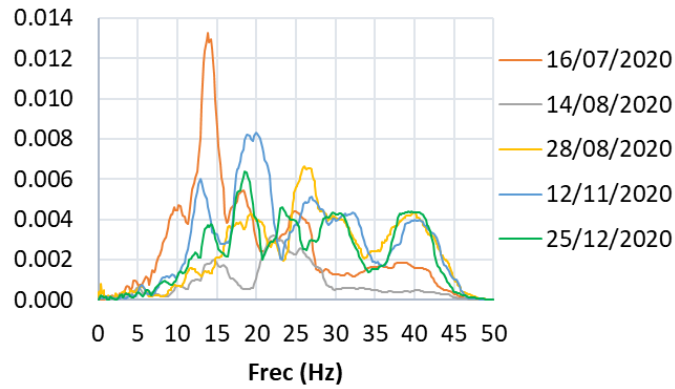
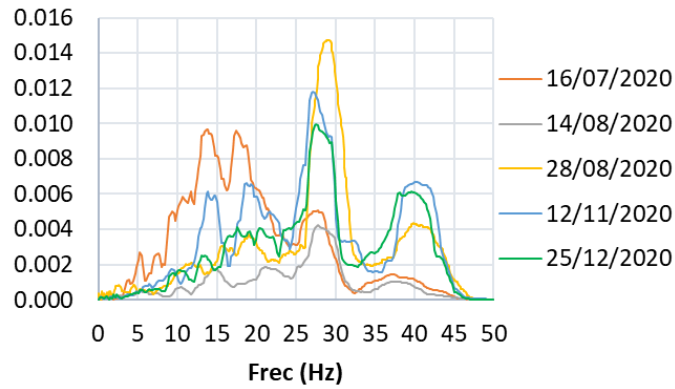


Figura 4.42 Espectros de Fourier para los registros con magnitud mayor a 3.5

ESPECTRO DE FOURIER E-O



ESPECTRO DE FOURIER N-S



ESPECTRO DE FOURIER Z

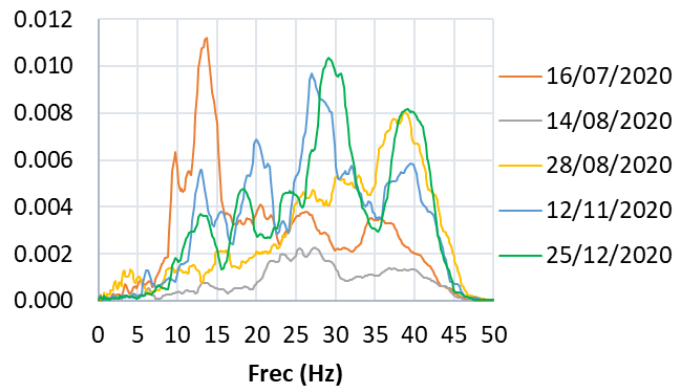


Figura 4.43 Espectros de Fourier para los registros de magnitudes de entre 2.5 a 2.8

4.1.7 Comparativa con los estándares internacionales

Los registros correspondientes a la estación ZIAG se obtuvieron en función de la aceleración, debido a que no se conocen las condiciones de frontera, no es posible obtener una señal en términos de velocidad, integrando la señal, para aplicar las normas que establecen los límites de vibración en función de la velocidad de partícula máxima. Los límites que se pueden comparar son los correspondientes a la norma ISO 10137, ya que estos se encuentran en función del valor cuadrático medio (R.M.S.) de la aceleración y su frecuencia asociada.

Los registros relacionados a la actividad minera determinados de acuerdo con las secciones anteriores son comparados con los límites que establece la norma ISO 10137. En la tabla 4.2 se muestran las fechas de los registros, y los resultados de obtener el valor cuadrático medio (R.M.S.) y la frecuencia asociada a la señal para las componentes Este (E), Norte (N) y el eje vertical Z.

Tabla 4.2 Registros comparados con la norma ISO 10137

Fecha	Hora	Magn.	RMS			FREC		
			E	N	Z	E	N	Z
13/06/2020	06:03:40	2.3	0.0103	0.0137	0.0122	18.5185	16.1290	15.1515
20/06/2020	06:40:13	1.5	0.0090	0.0111	0.0114	25.0000	20.8333	35.7143
13/07/2020	22:08:40	2.2	0.2574	0.2965	0.2800	17.8571	16.6667	25.0000
16/07/2020	02:09:45	2.8	0.0716	0.0813	0.0704	25.1000	17.0000	17.0000
16/07/2020	06:01:08	1.7	0.0364	0.0432	0.0416	33.3333	19.2308	27.7778
20/07/2020	18:21:10	2	0.0055	0.0102	0.0099	20.0000	19.2308	35.7143
20/07/2020	18:39:11	1.5	0.0140	0.0195	0.0182	20.8333	21.7391	25.0000
21/07/2020	06:10:13	1.5	0.0124	0.0205	0.0195	27.7778	26.3158	23.8095
21/07/2020	06:15:51	1.2	0.0263	0.0389	0.0268	19.2308	22.7273	23.8095
21/07/2020	19:09:32	1.4	0.0085	0.0132	0.0154	25.0000	25.0000	27.7778
27/07/2020	18:25:19	1.7	0.0086	0.0100	0.0088	23.8095	18.5185	23.8095
27/07/2020	18:30:28	1.7	0.0183	0.0286	0.0259	17.2414	25.0000	21.7391
27/07/2020	19:14:23	1.8	0.0216	0.0248	0.0380	29.4118	19.2308	31.2500
28/07/2020	06:18:48	1.4	0.0192	0.0213	0.0181	23.8095	31.2500	29.4118
28/07/2020	06:31:08	1.2	0.0249	0.0323	0.0226	20.8333	19.2308	27.7778
28/07/2020	13:21:03	1.4	0.0077	0.0114	0.0076	31.2500	20.8333	20.0000
28/07/2020	18:26:21	1.5	0.0240	0.0383	0.0402	15.6250	27.7778	20.0000
28/07/2020	18:29:13	1.5	0.0306	0.0452	0.0427	18.5185	33.3333	35.7143
28/07/2020	18:37:28	1.2	0.0067	0.0083	0.0070	22.7273	21.7391	26.3158
29/07/2020	06:50:31	1.5	0.0447	0.0824	0.0485	18.5185	23.8095	25.0000
29/07/2020	18:27:20	1.8	0.0095	0.0214	0.0156	23.8095	25.0000	25.0000
30/07/2020	06:18:18	1.2	0.0139	0.0174	0.0158	20.0000	20.0000	17.8571
30/07/2020	18:24:55	1.7	0.0420	0.0624	0.0458	15.6250	20.8333	22.7273
02/08/2020	06:54:58	1.9	0.0292	0.0458	0.0550	31.2500	38.4615	35.7143

02/08/2020	09:37:23	2	0.0111	0.0231	0.0151	22.7273	27.7778	22.7273
03/08/2020	18:25:19	2	0.0529	0.0746	0.0635	19.2308	23.8095	16.6667
04/08/2020	18:43:47	1.8	0.0503	0.0769	0.0488	17.8571	21.7391	17.8571
07/08/2020	18:23:56	1.2	0.0378	0.0646	0.0417	16.6667	23.8095	23.8095
08/08/2020	06:01:03	2	0.0126	0.0345	0.0143	25.0000	25.0000	31.0000
08/08/2020	06:08:48	1.2	0.0079	0.0125	0.0083	21.7391	23.8095	20.8333
08/08/2020	06:52:58	1.8	0.0087	0.0141	0.0126	25.0000	29.4118	27.7778
08/08/2020	18:30:06	1.9	0.0297	0.0360	0.0353	13.8889	19.2308	13.5135
08/08/2020	18:50:48	1.5	0.0202	0.0331	0.0161	22.7273	27.7778	26.3158
09/08/2020	06:23:04	1.9	0.0125	0.0167	0.0148	31.2500	25.0000	31.2500
09/08/2020	06:39:25	1.9	0.0154	0.0191	0.0254	26.3158	29.4118	27.7778
14/08/2020	06:19:07	2.6	0.0025	0.0029	0.0022	20.2000	25.0000	25.0000
15/08/2020	18:01:03	1.4	0.0151	0.0247	0.0198	26.3158	23.8095	26.3158
15/08/2020	18:25:07	1.7	0.0325	0.0807	0.0521	29.4118	29.4118	31.2500
16/08/2020	06:09:37	1.7	0.0167	0.0382	0.0289	20.8333	25.0000	31.2500
16/08/2020	06:40:31	1.7	0.0141	0.0187	0.0176	23.8095	25.0000	27.7778
17/08/2020	06:16:05	1.7	0.0848	0.1421	0.1083	16.1290	20.0000	22.7273
17/08/2020	06:19:12	1.9	0.0058	0.0100	0.0076	17.2414	18.5185	27.7778
21/08/2020	18:16:30	2.2	0.0228	0.0234	0.0273	22.7273	16.6667	25.0000
28/08/2020	18:04:29	1.7	0.0090	0.0100	0.0129	26.3158	38.4615	29.4118
28/08/2020	18:32:22	2.6	0.0069	0.0095	0.0079	19.8000	24.7000	33.0000
28/08/2020	20:49:34	1.7	0.0073	0.0091	0.0115	23.8095	23.8095	35.7143
29/08/2020	06:04:51	1.9	0.0146	0.0262	0.0160	17.8571	21.7391	26.3158
05/09/2020	06:36:19	1.2	0.0283	0.0440	0.0259	25.0000	26.3158	26.3158
06/09/2020	06:22:40	1.2	0.0136	0.0287	0.0207	33.3333	12.8205	33.3333
11/09/2020	18:09:16	1.2	0.0425	0.0456	0.0429	33.3333	25.0000	17.2414
11/09/2020	19:09:56	1	0.0140	0.0275	0.0151	23.8095	29.4118	33.3333
12/09/2020	05:58:15	1.2	0.0258	0.0662	0.0513	26.3158	27.7778	26.3158
12/09/2020	22:45:47	1.5	0.0297	0.0479	0.0399	25.0000	23.8095	27.7778
13/09/2020	08:49:01	1.2	0.0221	0.0294	0.0299	20.0000	20.0000	25.0000
14/09/2020	06:15:46	1	0.0177	0.0293	0.0249	17.8571	23.8095	23.8095
14/09/2020	18:12:43	1	0.0247	0.0355	0.0252	20.0000	25.0000	26.3158
21/09/2020	18:14:03	0.6	0.0101	0.0149	0.0173	16.6667	22.7273	27.7778
21/09/2020	19:20:12	1.2	0.0221	0.0494	0.0501	31.2500	26.3158	29.4118
22/09/2020	07:22:34	0.6	0.0127	0.0241	0.0175	23.8095	25.0000	26.3158
27/09/2020	06:15:44	1.2	0.0223	0.0421	0.0479	22.7273	26.3158	31.2500
27/09/2020	06:39:21	1.5	0.0239	0.0347	0.0331	25.0000	22.7273	25.0000
02/10/2020	18:32:35	1.2	0.0082	0.0133	0.0128	26.3158	17.8571	29.4118
02/10/2020	18:36:42	1	0.0425	0.0538	0.0557	14.2857	20.8333	25.0000
03/10/2020	19:44:05	1.4	0.0394	0.0582	0.0538	25.0000	22.7273	27.7778
04/10/2020	06:06:16	1	0.0053	0.0073	0.0082	33.3333	26.3158	27.7778

04/10/2020	06:12:33	1.2	0.0039	0.0048	0.0043	22.7273	23.8095	33.3333
04/10/2020	06:13:36	1.2	0.0087	0.0181	0.0155	25.0000	25.0000	26.3158
04/10/2020	06:15:48	1	0.0149	0.0217	0.0222	21.7391	25.0000	25.0000
04/10/2020	06:21:41	1	0.0095	0.0156	0.0161	33.3333	25.0000	27.7778
04/10/2020	18:13:29	1.2	0.0466	0.0541	0.0556	17.2414	20.0000	23.8095
04/10/2020	18:15:16	0.6	0.0073	0.0101	0.0091	23.8095	21.7391	25.0000
04/10/2020	18:20:06	1.2	0.0108	0.0125	0.0108	14.2857	19.2308	23.8095
11/10/2020	18:14:46	1	0.0373	0.0551	0.0481	20.0000	21.7391	23.8095
12/10/2020	08:25:42	1.2	0.0103	0.0148	0.0136	21.7391	17.8571	22.7273
12/10/2020	08:37:18	1.2	0.0523	0.0713	0.0697	25.0000	22.7273	25.0000
16/10/2020	06:13:22	1.4	0.0109	0.0126	0.0128	14.7059	16.6667	27.7778
18/10/2020	06:13:43	1.2	0.0303	0.0473	0.0516	27.7778	29.4118	26.3158
22/10/2020	18:04:21	0.6	0.0234	0.0345	0.0386	29.4118	20.0000	20.0000
22/10/2020	18:22:50	1.2	0.0112	0.0147	0.0125	22.7273	29.4118	25.0000
23/10/2020	06:01:11	1.2	0.0124	0.0205	0.0221	29.4118	27.7778	27.7778
25/10/2020	05:25:49	2.4	0.1731	0.2029	0.2013	16.6667	14.2857	16.6667
29/10/2020	18:32:34	2	0.0119	0.0145	0.0133	25.0000	29.4118	25.0000
29/10/2020	18:36:40	2.2	0.0188	0.0271	0.0329	33.3333	20.0000	35.0000
01/11/2020	16:24:54	1.4	0.0457	0.0694	0.0593	14.2857	22.7273	20.0000
04/11/2020	06:01:15	2.3	0.0145	0.0242	0.0238	25.0000	27.7778	29.4118
12/11/2020	18:07:28	1.4	0.0171	0.0245	0.0207	25.0000	21.7391	22.7273
12/11/2020	19:,55:06	2.5	0.0080	0.0094	0.0089	24.0000	25.5000	28.0000
14/11/2020	18:12:42	0.6	0.0125	0.0191	0.0155	25.0000	22.7273	29.4118
28/11/2020	07:04:37	1.2	0.0264	0.0359	0.0405	38.4615	41.6667	26.0000
28/11/2020	07:10:09	1.2	0.0127	0.0160	0.0168	20.0000	25.0000	35.7143
29/11/2020	18:19:21	1	0.0170	0.0229	0.0165	20.8333	20.8333	20.0000
30/11/2020	06:09:47	1	0.0161	0.0240	0.0226	20.0000	21.7391	29.4118
30/11/2020	06:16:54	1.2	0.0313	0.0377	0.0327	33.3333	25.0000	25.0000
30/11/2020	06:25:22	1.2	0.0120	0.0140	0.0173	16.6667	21.7391	25.0000
08/12/2020	06:00:44	1.2	0.0262	0.0331	0.0341	16.6667	33.3333	29.4118
08/12/2020	06:33:13	1.2	0.0079	0.0163	0.0135	23.8095	25.0000	25.0000
11/12/2020	06:04:50	1.2	0.0198	0.0224	0.0224	25.0000	20.8333	26.3158
12/12/2020	06:14:32	0.6	0.0381	0.0439	0.0467	18.5185	17.8571	25.0000
15/12/2020	18:26:34	1.7	0.0133	0.0189	0.0138	25.0000	27.7778	27.7778
17/12/2020	18:50:04	1.2	0.0156	0.0179	0.0204	20.0000	15.6250	20.8333
18/12/2020	06:54:30	1.2	0.0106	0.0120	0.0117	18.5185	12.5000	33.3333
21/12/2020	06:01:15	2.3	0.0199	0.0261	0.0256	16.6667	20.0000	25.0000
21/12/2020	06:12:31	2.2	0.0083	0.0140	0.0118	16.6667	20.0000	31.2500
25/12/2020	05:42:00	2.6	0.0058	0.0075	0.0089	28.4000	33.3000	25.0000
27/12/2020	14:07:07	2.4	0.1447	0.1637	0.1348	14.7059	17.8571	19.0000
27/12/2020	14:08:25	1	0.0473	0.0637	0.0546	20.0000	16.6667	20.0000

La comparativa de estos registros de manera gráfica se puede observar en las figuras 4.44 y 4.45 para los ejes horizontales y el eje vertical respectivamente. En estas figuras se observa que en muchas ocasiones los límites para edificios históricos son superados, sobre todo en la revisión del eje vertical donde estos límites son superados en 65 ocasiones representando un 61% de los registros relacionados a explosiones, lo cual resulta en un alto riesgo para los edificios históricos del centro de zacatecas. Haciendo la misma revisión en el sentido horizontal en 26 ocasiones estos límites son superados representando un 24%. En estas figuras también se observa que en algunos casos los valores obtenidos se encuentran muy cercanos a los límites de vibración permisibles para estructuras de uso residencial

Por otra parte, los resultados de los niveles de vibración de estos registros nos indica que estas son evidentemente perceptibles para las personas, y si tomamos en cuenta que se repiten constantemente, esto puede inducir a que después de un numero alto de repeticiones puedan ser incómodos como ya se ha manifestado por algunos pobladores.

Cabe señalar, además, que estos niveles de vibración corresponden al lugar donde se encuentra la estación ZAIG, que se encuentra ubicada en el centro de la ciudad en donde se cuenta con un amplio número de monumentos históricos considerados patrimonio mundial por la UNESCO desde 1993, muchos de estos monumentos datan de los siglos XVII y XVIII, como es el caso de la catedral, el templo de San Agustín y el templo de Santo Domingo (UNESCO, 2021). Debido a la gran riqueza histórica y cultural que estos representan es importante asegurar la conservación de estos, por lo que los niveles de vibración obtenidos resultan ser una potencial amenaza contra ellos.

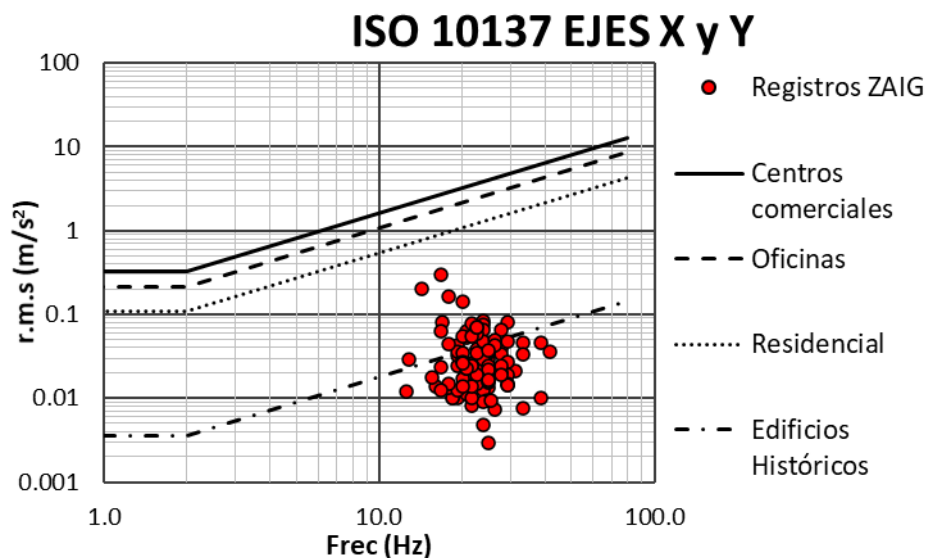


Figura 4.44 Revisión ante la norma ISO 10137 ejes X y Y

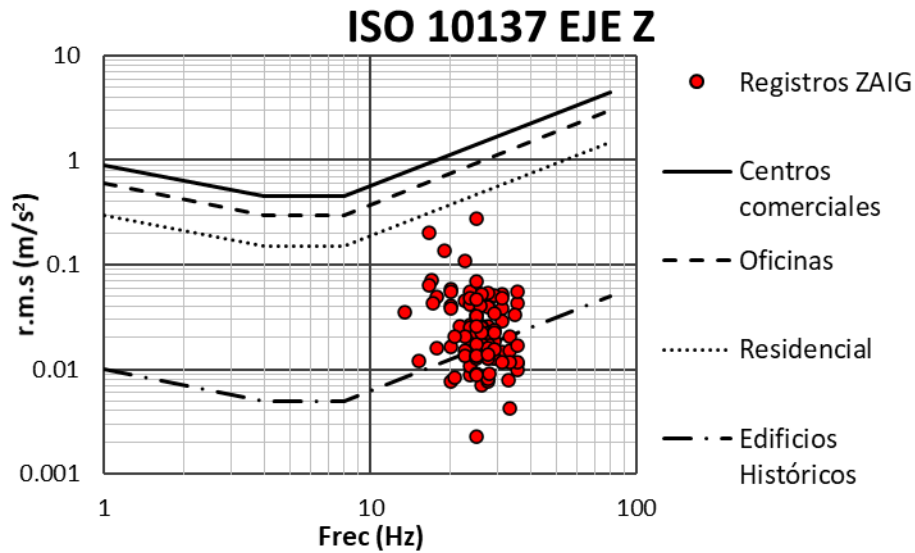


Figura 4.45 Revisión ante la norma ISO 10137 eje Z

De acuerdo con la clasificación de vibraciones que pueden afectar a los humanos que se indican en la norma ISO 10137 estos niveles corresponden a las categorías c y d, ya que son causantes de alarma y miedo a los habitantes, y además pueden ser causantes de interferir actividades. En cuanto a los daños sobre estructuras, de acuerdo con lo observado en las fotografías estos pueden ser considerados como daños menores para las viviendas, no obstante, para el caso de edificios históricos no hay ningún tipo de daño que pueda ser aceptable.

5 CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación, con base a los resultados obtenidos y a las observaciones realizadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron los límites de vibración permisibles para efectos de explosiones que establecen las distintas normas internacionales, como la USBM, DIN, BS y la norma ISO.
- Se realizó una campaña de monitoreo en una mina a cielo abierto donde se obtuvieron registros de vibraciones en términos de velocidad de partícula los cuales se analizaron y procesaron para obtener espectros de repuesta en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración.
- Se observó un gran incremento en la actividad sísmica en el estado de Zacatecas de acuerdo al catálogo de sismos del servicio sismológico nacional (SSN) en la estación ZAIG de la ciudad de Zacatecas en el año 2020, reportándose un total 116 sismos en dicho año.
- Se analizaron los registros sísmicos del SSN de acuerdo a distintos criterios encontrados en la literatura con el fin de determinar si los eventos registrados son antropogénicos o si son de origen natural a través de la determinación del hipocentro, tiempo de llegada de las ondas P y S, duración del evento, mecanismos focales, análisis de espectrogramas y horario de ocurrencia del evento.
- De acuerdo a los criterios propuestos y a la comparación de los registros de la campaña de monitoreo realizada en la mina con los obtenidos del SSN en la estación ZAIG de la ciudad de Zacatecas, se determinó que 107 de los sismos reportados para el año 2020 son producto de explosiones ocasionadas por la industria minera y 6 corresponden a sismos naturales, mientras que en los 3 restantes no se pudo determinar con exactitud la causa de su origen.
- Los 6 eventos considerados como sismos naturales presentan una buena correlación en cuanto al número de eventos sísmicos anuales reportados para el estado de Zacatecas en años anteriores donde se tienen 6, 3 y 4 sismos reportados para los años 2017, 2018 y 2019 respectivamente.
- Se revisaron los límites de vibraciones permisibles para edificios históricos establecidos por la norma ISO 10137. De acuerdo a esta norma los límites correspondientes a la dirección horizontal son superados en el 24% de los registros relacionados a explosiones ocasionadas por la industria minera, mientras que en la dirección vertical son superados en un 61%.

-
- De acuerdo con la revisión de los límites de vibración se determina que existe un riesgo latente hacia las edificaciones que forman parte del patrimonio arquitectónico del centro histórico de la ciudad de Zacatecas.

6 REFERENCIAS

Kisslinger, C. (1976). A review of theories of mechanisms of induced seismicity. *Engineering Geology*, 10(2-4), 85-98.

Gibowicz, S. J., & Kijko, A. (2013). *An introduction to mining seismology*. Elsevier.

Kusznr, N. J., Ashwin, D. P., & Bradley, A. G. (1980, February). Mining induced seismicity in the North Staffordshire coalfield, England. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 17, No. 1, pp. 45-55). Pergamon.

Redmayne, D. W. (1988). Mining induced seismicity in UK coalfields identified on the BGS National Seismograph Network. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 5(1), 405-413.

Gibowicz, S. J. (1982). Seismicity induced by surface mining: the Belchatow, Poland, earthquake of 29 November 1980. *Acta Mont.:(Czechoslovakia)*, 61.

Durrheim, R. J., Anderson, R. L., Cichowicz, A., Ebrahim-Trollope, R., Hubert, G., Kijko, A., ... & Van der Merwe, N. (2006). The risks to miners, mines, and the public posed by large seismic events in the gold mining districts of South Africa.

Kremenetskaya, E. O. (1991). Contemporary seismicity of the NW part of the USSR. *NORSAR Sci. Rep. 1-91/92*, 134-145.

Deza, E., and Jaén, H. (1979). Microtemblores de ultrafrecuencia con la explotación minera a tajo abierto en Cerro de Pasco. *Bol. Soc. Geol. Peru* 63, 237-247.

Horner, R. B., & Hasegawa, H. S. (1978). The seismotectonics of southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15(8), 1341-1355.

Hasegawa, H. S., Wetmiller, R. J., & Gendzwil, D. J. (1989). Induced seismicity in mines in Canada—an overview. *pure and applied geophysics*, 129(3), 423-453.

Siskind D., Stagg M., Kopp J. y Dowding C. (1980). *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting*. Report of Investigations 8507. Bureau of Mines. United States.

Kumar, R., Choudhury, D., & Bhargava, K. (2016). Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 341-349.

Gad, E. F., Wilson, J. L., Moore, A. J., & Richards, A. B. (2005). Effects of mine blasting on residential structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19(3), 222-228.

Pampacata L. (2015). Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera atocongo en zonas cercanas a poblaciones. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima, Perú.

International Standards Organisation. (1992). “Bases for design of structures—Serviceability of buildings against vibration.” ISO10137, Geneva.

BS 7385-2 (1993). Part 2: Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings. Guide to Damage Levels From Ground Borne Vibration, British Standard.

DIN 4150 (1999). Part 3: Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures, German Standard, Deutsches Institut Fur Normung E.V.

Lagunas J. (2019). Comportamiento de Estructuras Bajo Cargas Producidas Por Explosiones Controladas. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad académica de Ingeniería I, Zacatecas, Zac., México.

Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2021): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. Dirección electrónica: <http://www.ssn.unam.mx>

Ramírez Alvarez E., (2020). Sismos en México y ejercicios de emergencia. CENAPRED. Ciudad de México.

Valadez A. (14 julio 2020). Explosión en mina Capstone Gold provoca fuerte temblor en Zacatecas. La Jornada <https://www.jornada.com.mx/ultimas/estados/2020/07/14/explosion-en-mina-capstone-gold-provoca-fuerte-temblor-en-zacatecas-7409.html>

Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2014). ¿Cómo de distingue un sismo de una explosión?. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. México.

Serrano, M. A. (2018). Distinción de un Evento Sísmico: ¿Terremoto o Explosión Nuclear?. *Revista de la Escuela de Física*, 6(2), 197-213.

BBC mundo (10 septiembre 2016). ¿Cómo distinguen los sismólogos un terremoto de una explosión como la de Corea del Norte?. BBC. <https://www.bbc.com/mundo/noticias/37324160#:~:text=Al%20combinar%20datos%20de%20varias,una%20explosi%C3%B3n%20es%20muy%20corta.>

Departamento de Geofísica (24 septiembre 2014). Mecanismo Focal. Facultad de ciencias físicas y matemáticas.

Havskov, J., Voss, P.H. and Ottemöller, L. (2020). Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91 (3): 1846-1852. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220190313>.

Velázquez R. “Declaración sobre vibraciones percibidas en la colonia Pedro Ruiz Gonzáles” Zacatecas. Zac. 16 de julio del 2020.

UNESCO (2021). Lista del patrimonio mundial. Centro histórico de Zacatecas. <https://whc.unesco.org/en/list/676>

Ordáz M. y Montoya C. (2020). DEGRTA (Ver. 12.0). Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de la UNAM.