

ESTUDIO DE EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN LAS PROXIMIDADES A CENTROS MINEROS

Jorge A. Lagunas⁽¹⁾, A. Gustavo Ayala Milián⁽¹⁾, Hiram Badillo-Almaraz^(2,*) y Marco A. Escamilla⁽¹⁾

RESUMEN

En los últimos años se ha observado un aumento significativo de la 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. Este estudio se centra en investigar si este aumento de sismicidad está relacionado con los trabajos de explosiones de las minas que operan en la región. Se analizan los registros correspondientes a estos sismos obtenidos de la estación ZAIG del SSN, ubicada en la ciudad de Zacatecas, utilizando distintos criterios de la literatura para distinguir entre un sismo y una explosión. Estos registros también son comparados con los datos obtenidos de una campaña de monitoreo de vibración realizada en una mina. Los resultados indican que un considerable número de estos sismos están directamente relacionados con la actividad minera, lo que sugiere que esta es la principal causa del aumento de la actividad sísmica en la región. Adicionalmente, se evalúan los niveles de vibración de los registros asociadas con las explosiones mineras identificadas en este trabajo con la norma internacional ISO, que define distintos niveles permisibles según el tipo de estructura. Los resultados ponen en alerta a las autoridades y a la población sobre los riesgos potenciales asociados a las explosiones mineras.

Palabras clave: zona sísmica; explosiones en minas; vibraciones; sismicidad; centros mineros

STUDY OF SEISMIC EVENTS RECORDED IN THE PROXIMITIES OF MINING CENTERS

ABSTRACT

In recent years, a significant increase in seismic activity has been observed in areas considered to have low seismicity. This is the case of the state of Zacatecas, Mexico, where a notable rise in seismic events has been recorded in recent years. From 2015 to 2019, 16 earthquakes were registered in the state, while in 2020 alone, the National Seismological Service (SSN) reported 116 seismic events. This study focuses on investigating whether this increase in seismicity is related to

Artículo recibido el 12 de junio de 2023 y aprobado para su publicación el 29 de febrero de 2024. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, e-mail: JLagunasM@iingen.unam.mx; GAyalaM@iingen.unam.mx; MEscamillaG@iingen.unam.mx

^(2,*) Programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde No. 801, Zacatecas, Zac., México, 98060. e-mail: hbadillo.civil@uaz.edu.mx. **Autor para correspondencia.**

DOI: [10.18867/ris.111.645](https://doi.org/10.18867/ris.111.645)

the blasting activities of the mines operating in the region. The records of these earthquakes obtained from the SSN's ZAIG station, located in Zacatecas City, are analyzed using different criteria from the literature to distinguish between an earthquake and an explosion. These records are also compared with data obtained from a vibration monitoring campaign carried out in a mine. The results indicate that a considerable number of these earthquakes are directly related to mining activity, suggesting that this is the main cause of the increased seismic activity in the region. Additionally, the vibration levels of the records associated with the mining explosions identified in this work are evaluated against the international ISO standard, which defines different permissible levels according to the type of structure. The results alert authorities and the population about the potential risks associated with mining explosions.

Keywords: seismic zone; mining blasting; vibrations; seismicity; mining centers

INTRODUCCIÓN

Recientemente se han observado un incremento en la actividad sísmica en localidades con actividad minera, como resultado de la extracción de canteras de superficie a gran escala y la minería subterránea profunda. En el estado de Zacatecas el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de la UNAM registró 16 sismos entre los años 2014 y 2019. En el 2020 los sismos registrados por el SSN se ascendieron a 116 (UNAM SSN, 2021).

Algunos estudios han demostrado que la actividad sísmica en estas localidades se incrementa progresivamente a medida que aumenta la profundidad promedio y el alcance de las operaciones mineras (Kisslinger, 1976). Con el objetivo de conocer los efectos de las vibraciones debido a la actividad minera en estructuras civiles ubicadas cercanas a las minas se han realizado campañas de monitoreo de vibraciones en diferentes minas del estado de Zacatecas. Estas campañas 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.

No obstante, de que en los últimos años se han realizado grandes esfuerzos para realizar estas investigaciones aún se tiene poca información al respecto, lo que se ve reflejado en el poco conocimiento del uso de los índices de tolerancia en normas internacionales vigentes para la evaluación de estos efectos.

En el presente artículo se presentan los resultados de una investigación sobre el efecto de las vibraciones en las estructuras y en sus usuarios debido a explosiones controladas en minas. Se realizó una revisión de la normativa internacional especializada respecto a los niveles de seguridad en las estructuras y de la tolerancia en los usuarios de éstas. 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. Finalmente, de los resultados obtenidos de una instrumentación, utilizando acelerómetros, se compararon con los niveles máximos de tolerancia propuestos en algunas de las normas especializadas internacionales.

SISMICIDAD INDUCIDA POR MINERÍA

La sismicidad inducida por la minería es definida 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 incrementos 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).

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 observó 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).

Algunos de los temblores de mina de mayor magnitud registrados ocurrieron en el distrito minero de Potasa a lo largo del río Werra, en el sur de Alemania, el día 13 de marzo de 1989 y el día 23 de junio de 1975, con una magnitud $ML=5.6$, $mb=5.5$ y $ML=5.2$, $mb=5.4$ respectivamente. Otro sismo considerable se registró el día 7 de abril de 1977 en Sudáfrica, en el distrito minero de oro de Klerksdorp, con magnitud $ML=5.2$ y $mb=5.5$. (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 $ML=3$, supuestamente causaron daños (Redmayne, 1988).

ESTÁNDARES INTERNACIONALES

En la mayoría de las investigaciones sobre los efectos producidos por voladuras en estructuras civiles se ha concluido que la velocidad de partícula (VP) es el parámetro más adecuado para cuantificar las vibraciones de una voladura y estimar los niveles de confort en las personas, esto debido a que la VP 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).

En la actualidad se cuenta con varias normativas en las 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 reconocidos se encuentran el USBM 8507 (1980), la norma DIN 4501 (1999), la norma BS 6472 (1992) y la ISO 101337 (1992).

USBM 8507

El departamento de minas de los Estados Unidos (U.S. Bureau of Mines) es una de las organizaciones más reconocidas en la investigación de los efectos de voladura, y el impacto que tienen en las diferentes estructuras. En el reporte USBM 8507 (Siskind *et al.*, 1980) se definen los límites de VPP dependientes de la frecuencia. 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. De manera general se establece un límite máximo de 50 mm/s para frecuencias mayores de 40 Hz.

DIN 4150-3

La norma alemana (DIN 4150, 1999) establece los valores de VPP en función de la frecuencia. En la tabla 1 se presentan los valores máximos permitidos de velocidad de partícula, en mm/s, con diferentes frecuencias asociadas para diferentes tipos de edificaciones.

Tabla 1. Valores límite de VPP (mm/s) Norma DIN 4150-3 "Structural Vibration Buildings. Effects of Vibration on Structures" (DIN 4150, 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

Norma BS 6472

El apéndice C de la norma británica (BS 6472, 1992) se centra 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. Estas curvas varían dependiendo de la posición de la persona tal como se muestra en la figura 1. 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%. En la tabla 2 se presentan las curvas que corresponden a los límites de vibración de acuerdo con el tipo de estructura que se esté monitoreando.

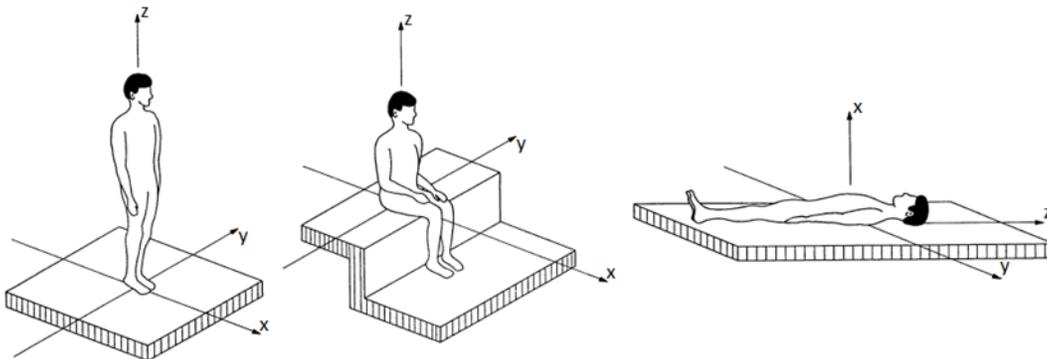


Figura 1. Sistema de coordenadas para la medición de vibraciones sobre las personas

Tabla 2. Factores usados para establecer magnitudes satisfactorias de vibración en edificios respecto a la respuesta humana (BS 6472, 1992)

Tipo de estructura	Tiempo	Exposición a vibración continua (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

ISO 10137

La Organización Internacional de Normalización (ISO, 1992) 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., por sus siglas en inglés). Se consideran los distintos tipos de estructuras siguientes, área de trabajo crítico (como quirófanos de hospitales, laboratorios de precisión, etc.), residenciales, oficinas y centros comerciales.

ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS EN MINA

Para conocer los efectos de las vibraciones de minas ubicadas en el estado de Zacatecas, sobre las estructuras y sus usuarios, 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). En la figura 2 se muestra la ubicación de los puntos de monitoreo y los bancos donde se realizaron trabajos de voladura.

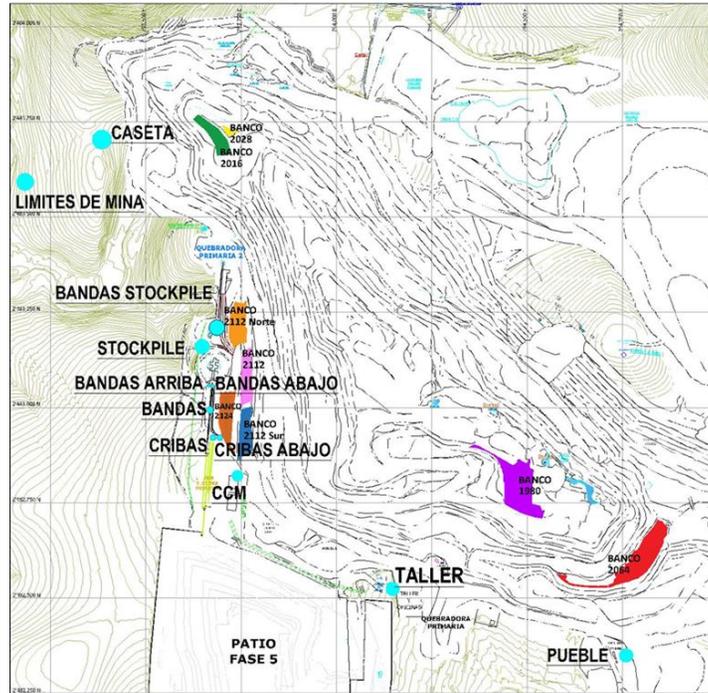


Figura 2. Puntos de Monitoreo

Para cada voladura, se registró el banco donde se realizó la voladura, la ubicación del sismógrafo, la fecha, la distancia medida desde el sismógrafo hacia la plantilla de barrenación de la voladura, la carga máxima de explosivo por tiempo de retardo y también la velocidad de partícula máxima y su frecuencia asociada en Hz.

Revisión de vibraciones ante los estándares internacionales

Se realizó una revisión de acuerdo con los límites permisibles de vibración que establecen las normas mencionadas anteriormente. En las figuras 3 a 8 se muestran de manera gráfica los límites establecidos por cada una de estas normas y los valores correspondientes de los registros obtenidos. Cada punto en rojo corresponde a una voladura y su valor máximo obtenido en términos de velocidad de partícula, o aceleración según corresponda, y su frecuencia asociada.

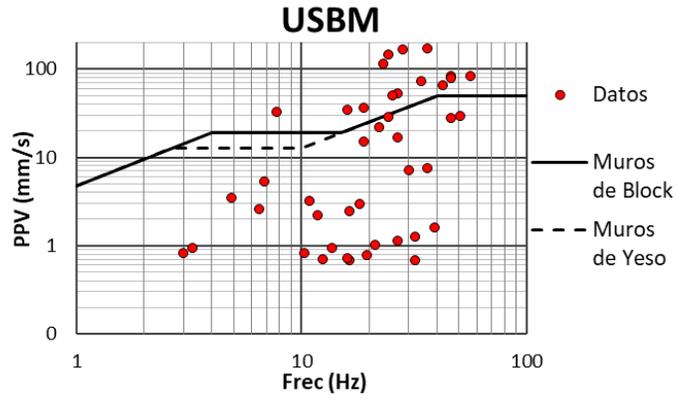


Figura 3. Revisión USBM 8507

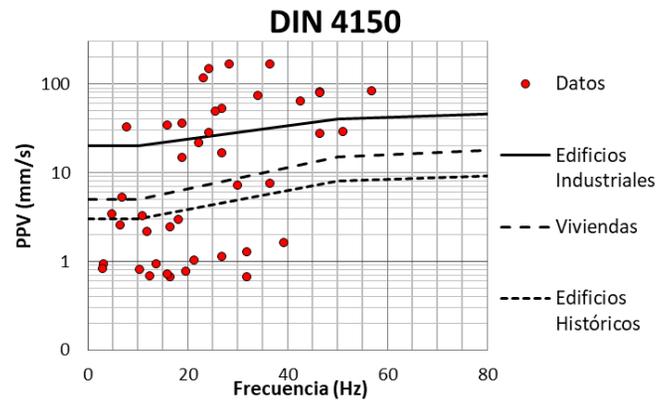


Figura 4. Revisión DIN 4150

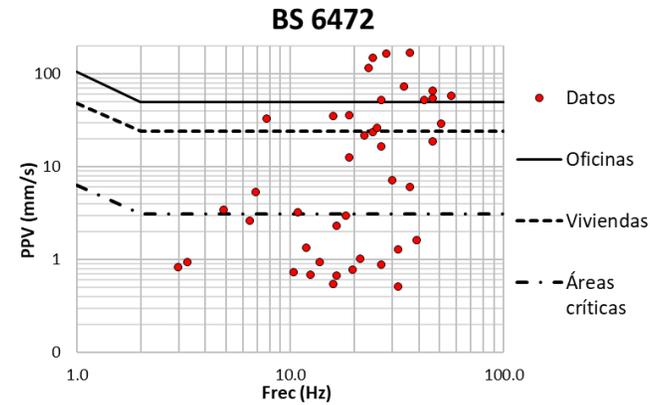


Figura 5. Revisión BS 6472 ejes X y Y

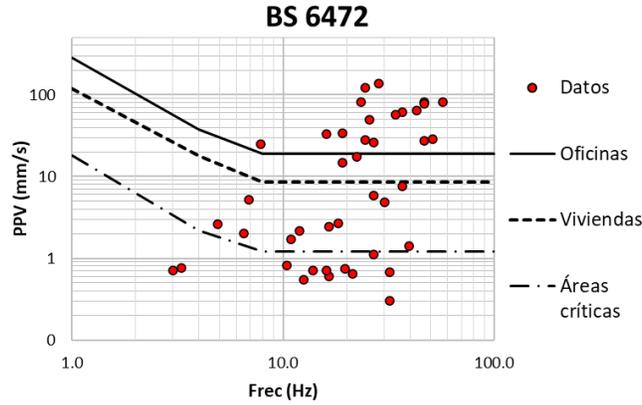


Figura 6. Revisión BS 6472 eje Z

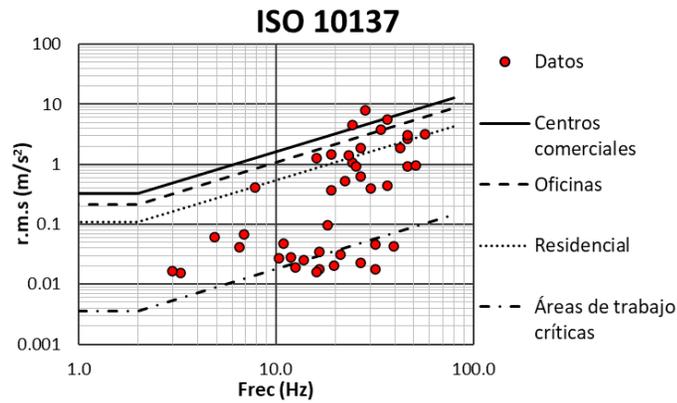


Figura 7. Revisión ISO10137 ejes X y Y

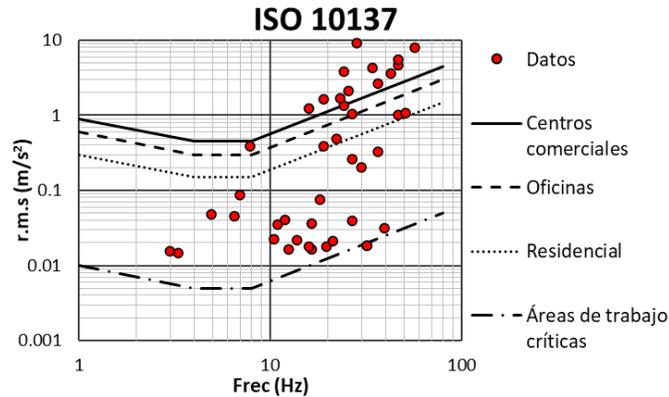


Figura 8. Revisión ISO 10137 eje Z

De acuerdo con esta revisión se observa que los límites que define la norma USBM son superados en 13 de los registros (30.95%). Para el caso de la norma DIN 4150, el límite máximo permisible corresponde para estructuras de tipo industrial, para este tipo de estructuras el límite permisible se superó en 15 ocasiones (35.71%), mientras que para viviendas y edificios históricos se superan los límites en 21 y 25 ocasiones (50 y 59%) respectivamente.

Las normas BS 6472 e ISO 10137 definen límites de vibración permisibles distintos para los ejes horizontales y para el eje vertical. Sobre los resultados obtenidos se puede observar que la componente vertical toma gran importancia para vibraciones producidas por explosiones controladas, ya que en la mayoría de los casos los valores máximos de VPP y r.m.s. se encuentran en esta componente vertical.

Los resultados obtenidos de estas vibraciones 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.

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 una zona de baja sismicidad (zona A) tal como se muestra en el mapa de la figura 9.

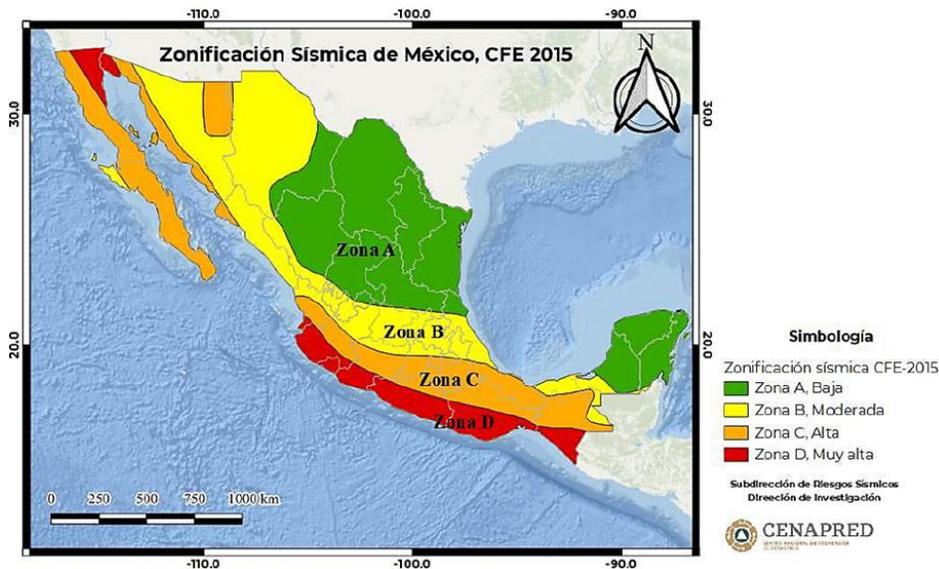


Figura 9. Zonificación sísmica CFE (2015)

En el mes de julio de 2020 se observó un gran incremento en el número de eventos respecto a años anteriores, 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. 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” (Valadez, 2020).

Algunos vecinos de las colonias afectadas testifican 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).

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 (Valadez, 2020). De acuerdo con el catálogo sísmico para el estado de Zacatecas se observa que 85 de los 116 sismos reportados se presentaron dentro del horario de mina, representando un 73% del total. Además, 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 10 se pueden observar los epicentros de los sismos registrados dentro de la zona urbana de la ciudad de Zacatecas. Los sismos reportados a profundidades menores a 1 km se muestran en color azul. En esta figura se observa una gran cantidad de registros cercano a la mina Cozamin.

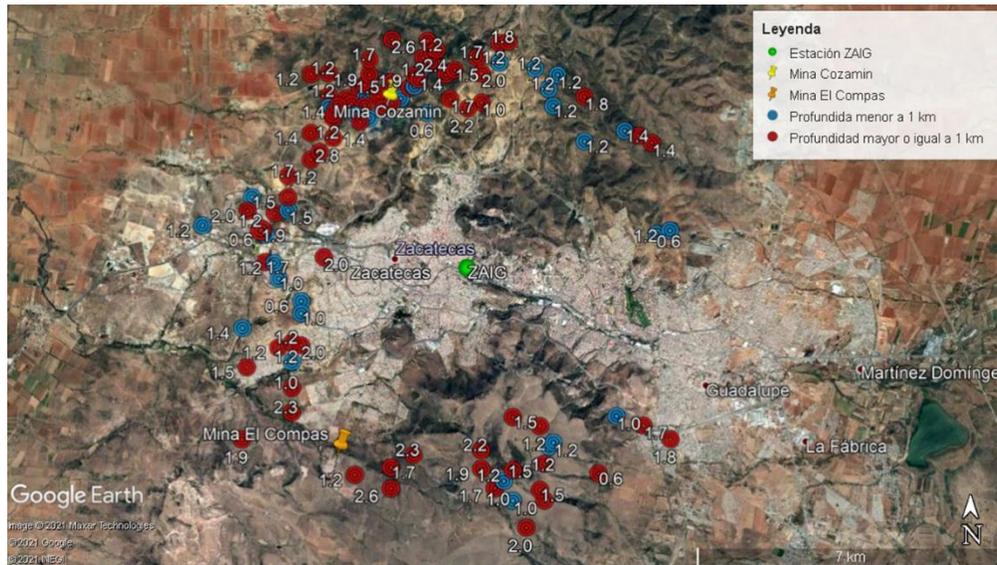


Figura 10. Epicentros de los sismos registrados por el SSN en la ciudad de zacatecas en el año 2020

De acuerdo con la literatura especializada, existen distintos criterios para 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) Duración del evento (BBC Mundo, 2016); 4) Mecanismos focales (SSN, 2014); 5) Análisis de espectrogramas (Havskov *et al.*, 2020).

Determinación del 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 la ubicación de las minas. De acuerdo con el catálogo de sismos 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 10, muchos de estos sismos se ubican cercanos a las minas. En la figura 11 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.

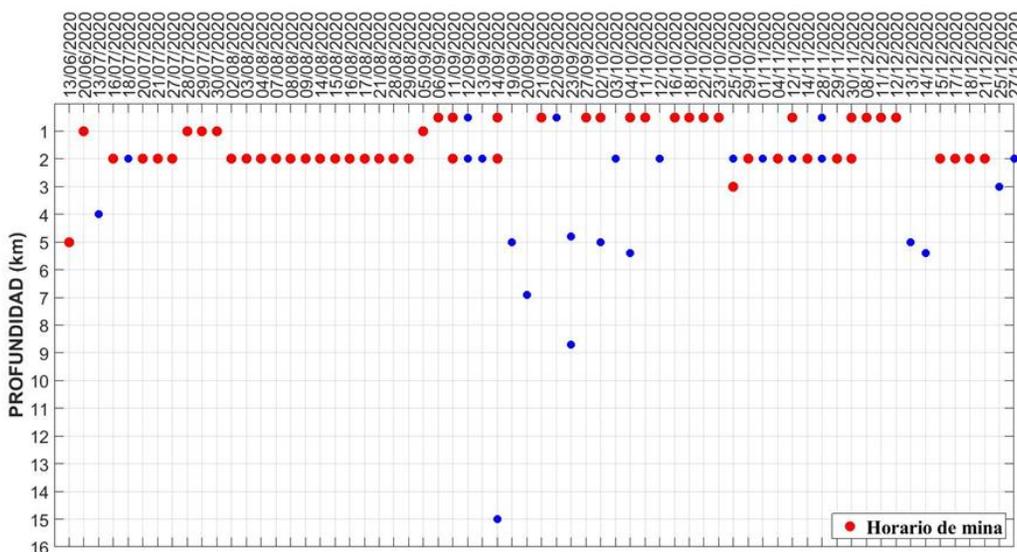


Figura 11. Relación de profundidades y horario de mina de los registros

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). Esto quiere decir que en los registros sísmicos se observa claramente el arribo de las ondas P y S (figura 12), mientras que en los registros de explosiones las ondas S no son apreciables (figura 13 y 14).

Esta observación se presenta en los registros obtenidos de la campaña de monitoreo de vibración en la mina. En la figura 15 se muestra un ejemplo de estos registros, 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, sin embargo, resulta complicado apreciar el arribo de las ondas S.

De los registros obtenidos de la estación ZAIG del 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 ejemplos de ellos se muestran en la figura 16.

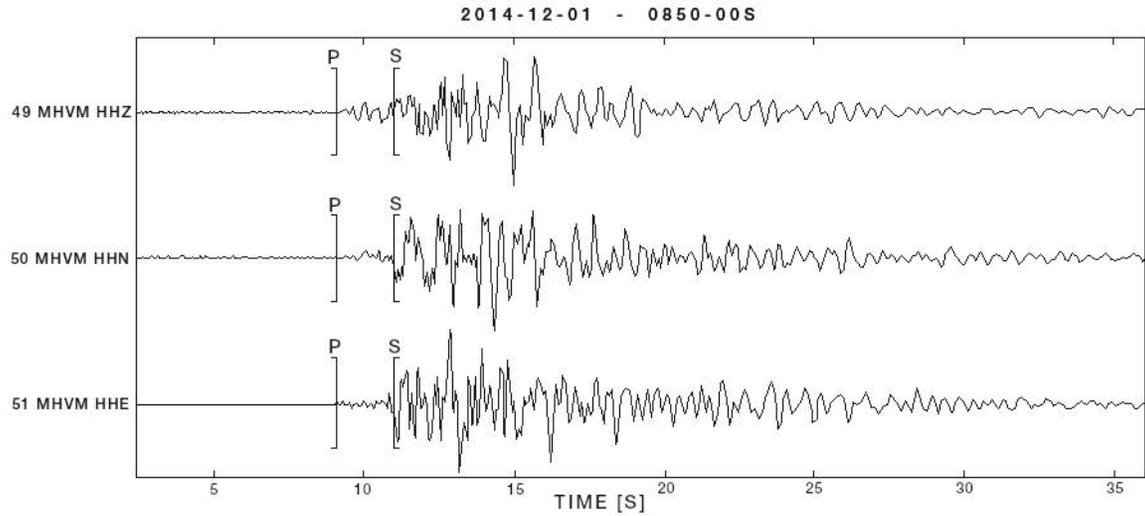


Figura 12. Registro sísmico de un temblor que ocurrió el día 1 de diciembre de 2014 de magnitud 3.4 (SSN, 2014)

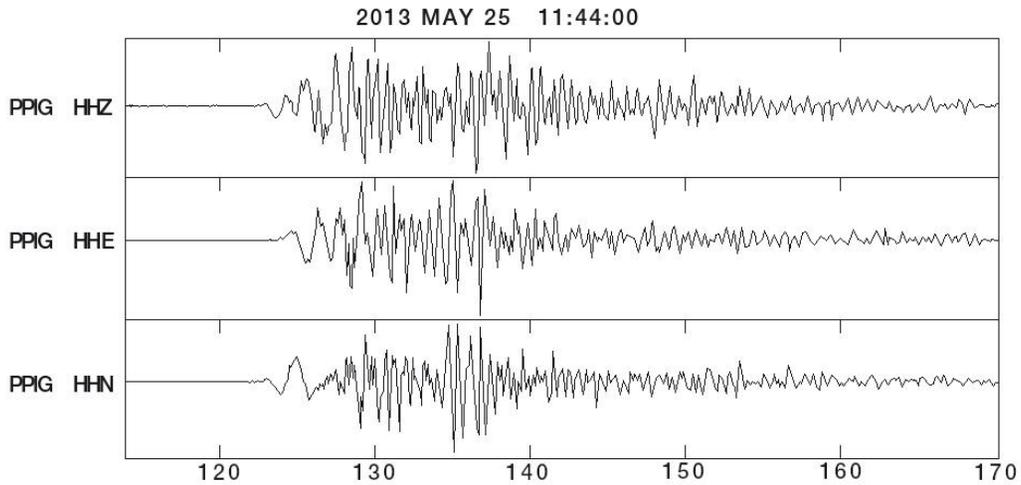


Figura 13. Explosión Natural del volcán Popocatepetl, 25 de mayo de 2013 (SSN, 2014)

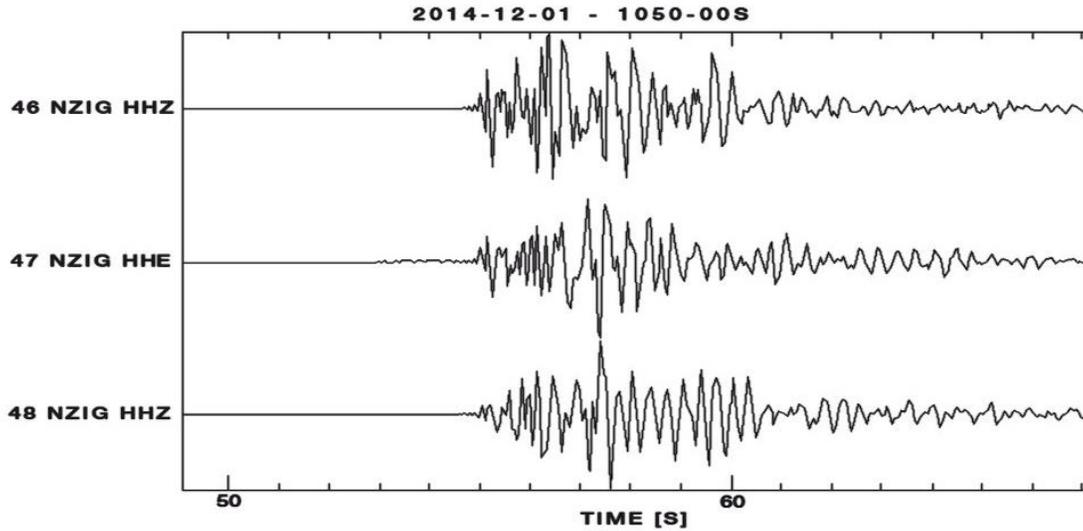


Figura 14. Explosión inducida registrada en la estación sismológica de Banda Ancha ubicada en Nacoziari, Sonora (SSN, 2014)

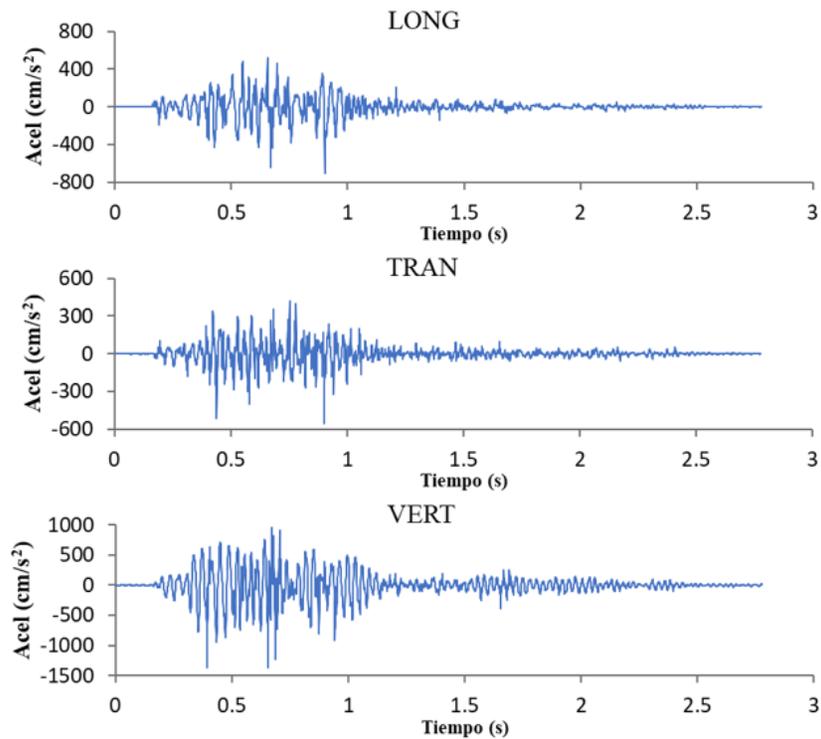


Figura 15. Registro de voladura en mina 18/01/2019

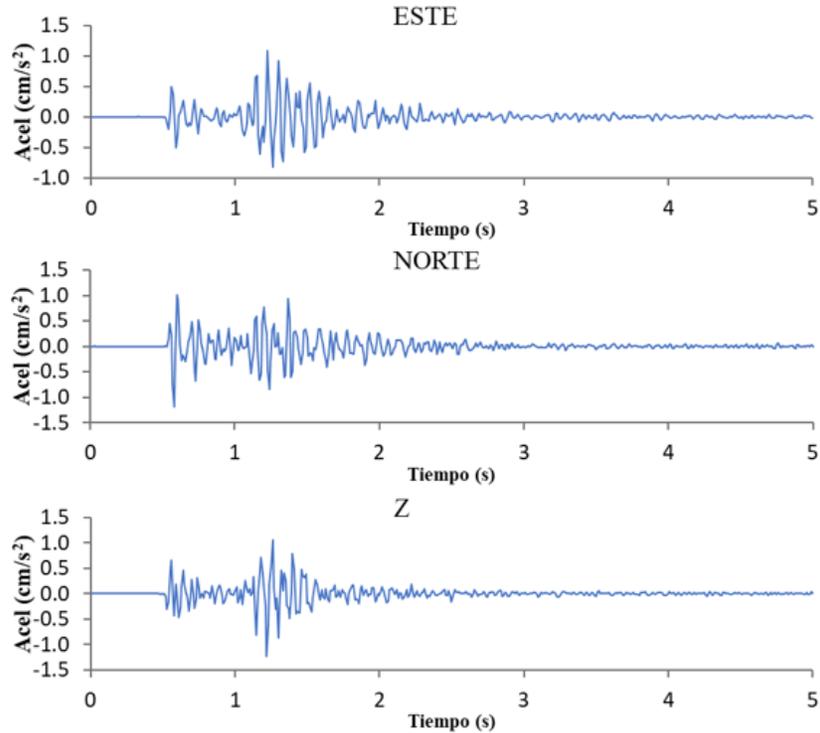


Figura 16. Registro 16/07/2020 02:09:45 M=2.8, prof=2 km

Duración del evento

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 se corrobora esta distinción, ya que los registros obtenidos de las voladuras son de entre 1 y 5 segundos.

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 atípico de 7 minutos. De acuerdo con este criterio solamente seis de los registros pueden ser catalogados como sismos, 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 17.

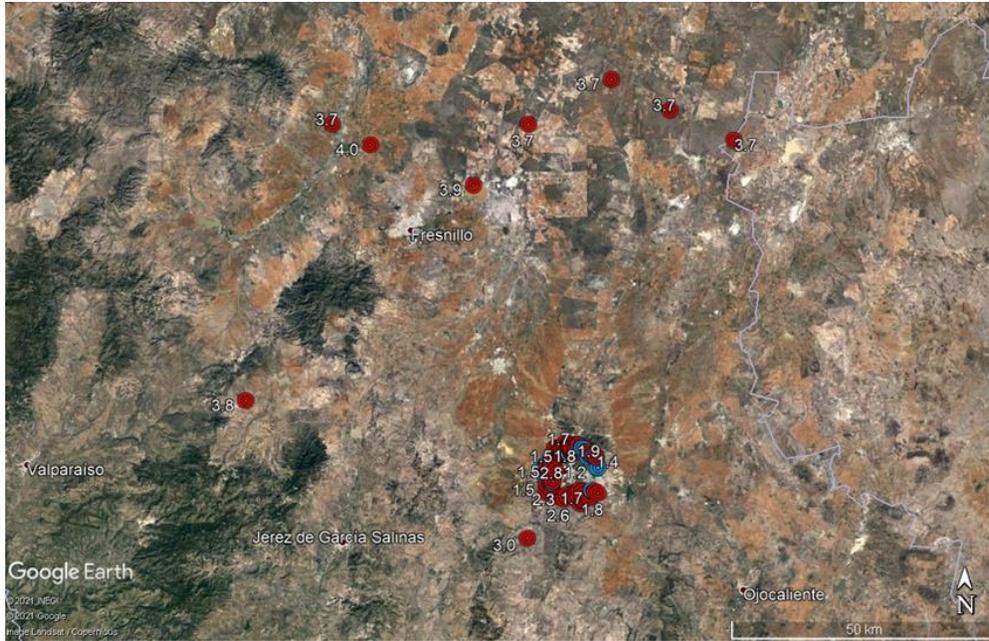


Figura 17. Total de sismos en Zacatecas en el año 2020

Mecanismos focales (pelota de playa)

Los mecanismos focales son muy empleados en sismología 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 (SSN, 2014).

Los diagramas de pelotas de playa son herramientas gráficas que representan la orientación de los esfuerzos en un punto determinado del terreno. Estos diagramas se asemejan a pelotas de playa con dos cuadrantes negros y dos blancos, separados por un arco. Los cuadrantes en color negro indican zonas en compresión, y los cuadrantes blancos zonas en tensión. Para determinar si una zona está en compresión o tensión se deben analizar las formas de onda de los registros, si el primer movimiento en el arribo de las ondas P es hacia arriba indica que la zona está en compresión, y si es hacia abajo indica una zona en tensión.

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, como se muestra en la figura 18, esto se debe principalmente a la orientación del geófono del sismógrafo. Respecto a los registros sísmicos de la estación ZAIG, en algunos de ellos se puede observar un movimiento ascendente en la componente vertical, en particular se analizó el movimiento vertical debido a que para las componentes horizontales este criterio puede variar dependiendo de la ubicación de origen del sismo con respecto a la estación sísmica. Además, el valor máximo de la mayoría de estos registros se encuentra en el lado positivo, algunos ejemplos se muestran en la figura 19.

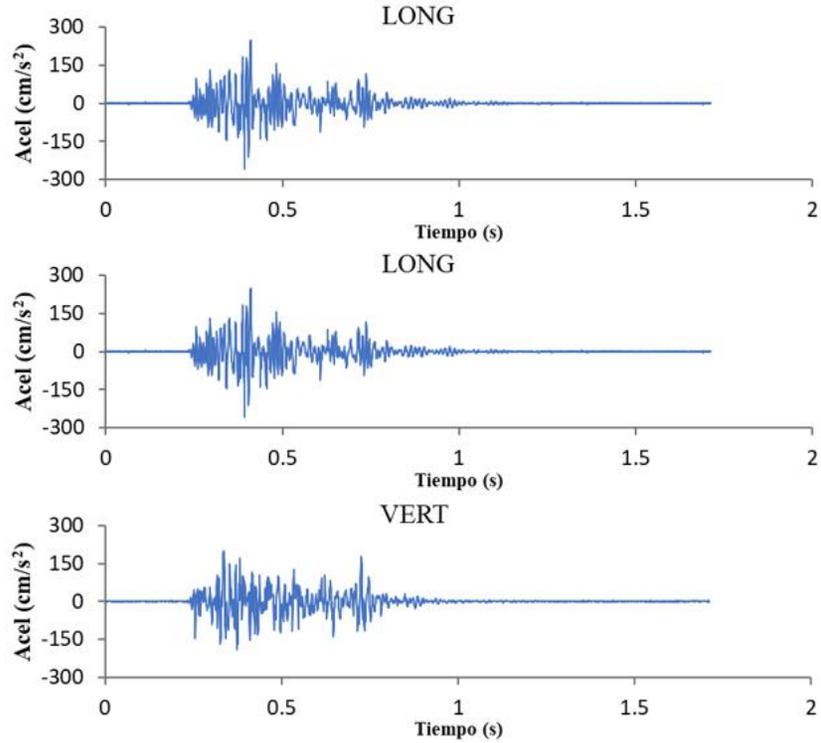


Figura 18. Registro de voladura en la mina, 21/01/2019

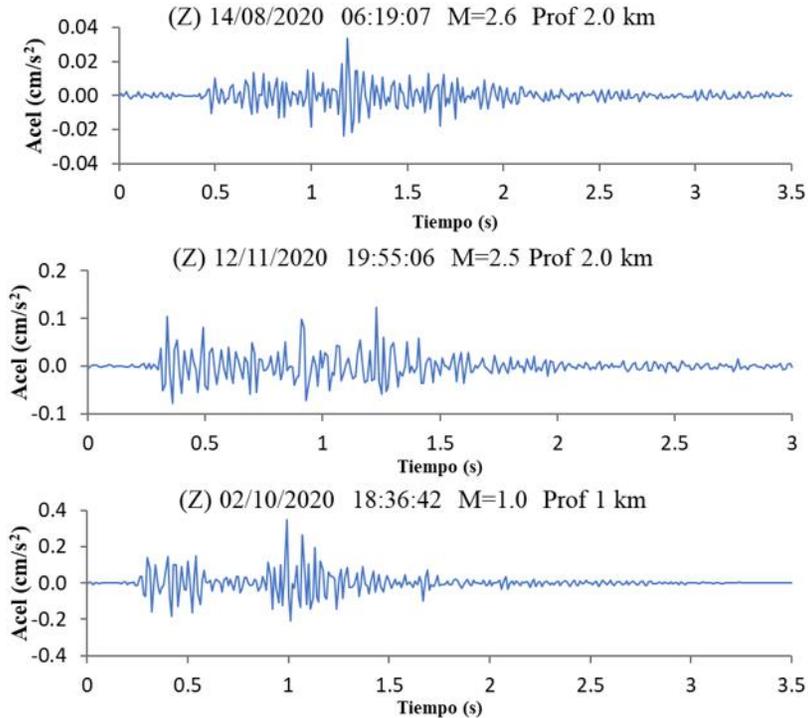


Figura 19. Registros con movimiento ascendente en el eje vertical Z

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 la figura 20 se muestran el registro de un sismo (parte superior) y el registro de una explosión (parte inferior) registrados aproximadamente a la misma distancia de una estación. Además, en las figuras 21 y 22 se presentan los espectrogramas de estos eventos registrados en dos estaciones distintas. Al analizar los espectrogramas que corresponden a la explosión (parte izquierda), se observa que muestran un contenido de frecuencias mayormente concentrado, en cambio para el sismo (parte derecha) se observa una mayor amplitud de frecuencias. La estación OSL (figura 21) 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 22) que se encuentra más alejada, 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 (Havskov *et al.*, 2020).

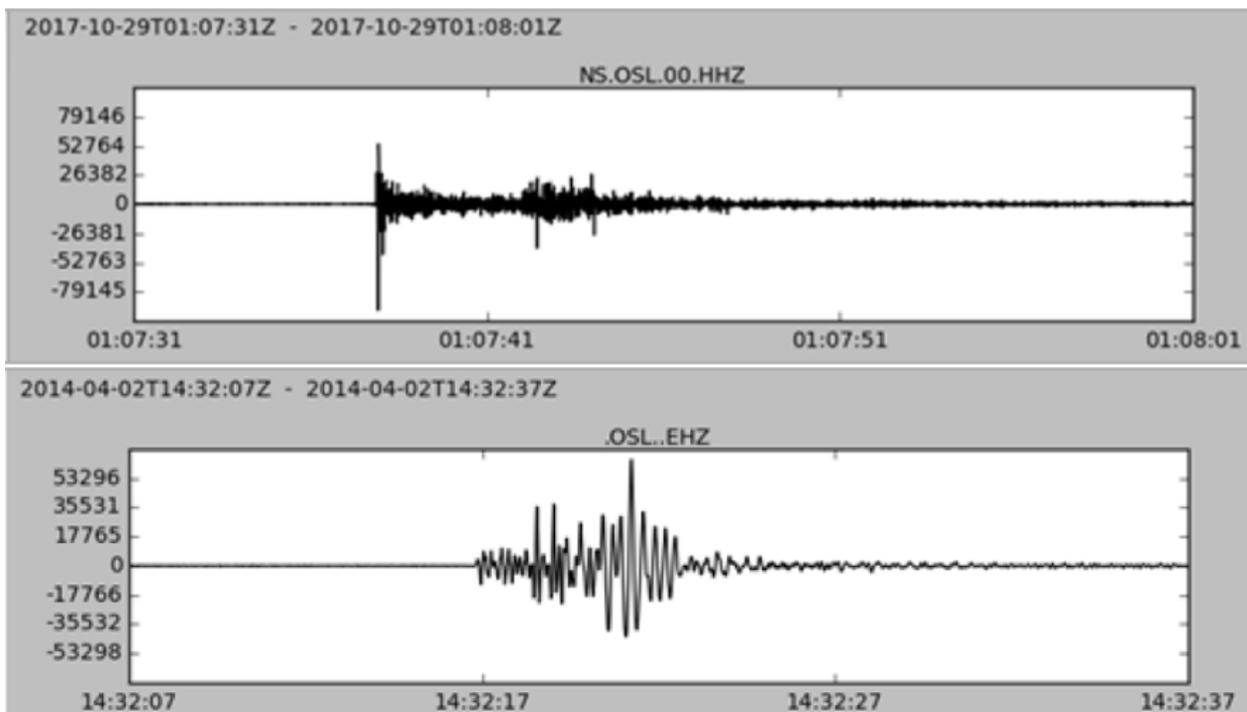


Figura 20. Registro de un sismo (superior) y una explosión (inferior) (Havskov *et al.*, 2020)

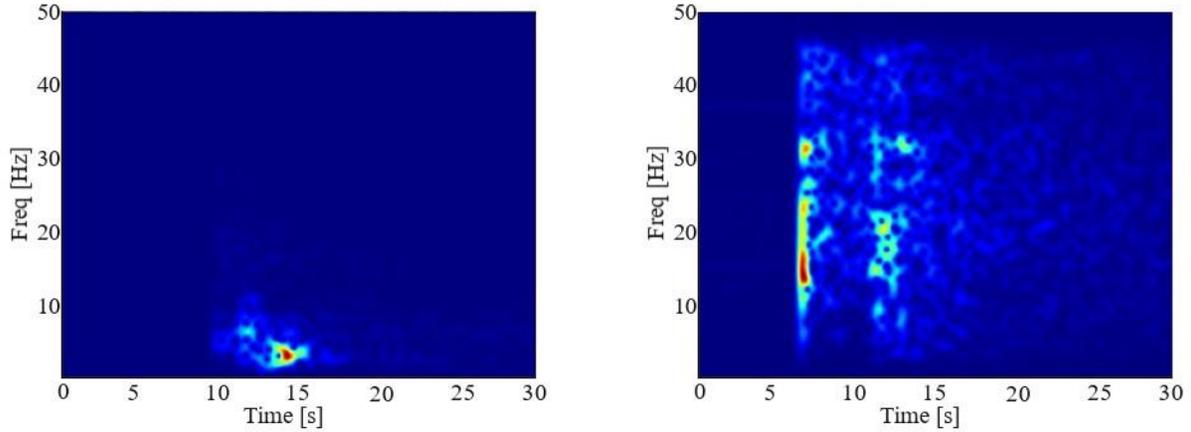


Figura 21. Espectrograma de dos señales de la estación OSL, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Havskov *et al.*, 2002)

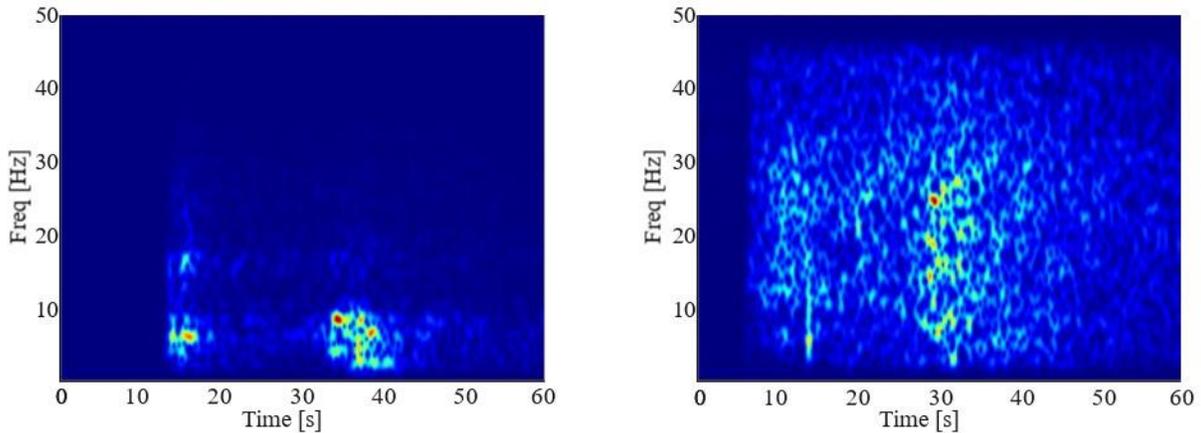


Figura 22. Espectrograma de la estación SKAR, explosión parte izquierda y un sismo parte derecha (Havskov *et al.*, 2002)

Se realizó un análisis espectral de los registros obtenidos en la mina y de los registros sísmicos de la estación ZAIG de Zacatecas. En la figura 23 se presenta un ejemplo de los espectrogramas obtenidos de los registros de voladura de la mina. En las figuras 24 y 25 se presentan los espectrogramas de los sismos registrados en la estación ZAIG registrados el 19 de septiembre y el 16 de julio de 2020, con magnitudes de 4 y 2.8 respectivamente. Para estos registros se ajustó la misma escala de tiempo a 1 min. Estas figuras permiten visualizar con mayor claridad los eventos que tienen una duración mayor a 5 segundos, como se mencionó en uno de los criterios anteriores.

En los espectrogramas de voladura de mina, mostrados en la figura 23, es posible distinguir una frecuencia característica que aparece 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 (figura 24) se presenta un mayor rango de frecuencias a lo largo de toda la duración del evento, lo que dificulta definir una frecuencia dominante de la señal. En cambio, en los eventos de corta duración (figura 25) se observa una mayor concentración en el rango de frecuencias cuando ocurre la mayor intensidad, lo que sugiere ser la frecuencia característica de la señal. Los espectrogramas de los registros

de la estación ZAIG de corta duración muestran grandes similitudes con los espectrogramas obtenidos de los registros de voladura de mina, lo que sugiere que se trata de una explosión. Además, estos registros coinciden en tener una duración menor a 5 segundos y tienen un epicentro cercano a las minas.

Basándonos en los criterios mencionados anteriormente, se determina que 107 de los registros corresponden a explosiones en la mina (92.24%), ya que cumplen con los criterios necesarios para ser clasificados como tales. Por otro lado, se identifican un total de 6 registros clasificados como sismos. Esto debido a los siguientes criterios: estos eventos ocurren a profundidades mayores a 3 km, y aunque se desconoce el desarrollo subterráneo de las minas, es poco probable que alcance esas profundidades; los epicentros de estos sismos se encuentran alejados de las zonas de actividad minera; la duración de estos eventos es mucho mayor en comparación con los registros obtenidos en la mina; además, al comparar los espectrogramas, se nota una similitud entre los espectrogramas de estos registros y los espectrogramas típicos de un sismo, los cuales muestran un amplio campo de frecuencias. Es relevante mencionar que estos 6 sismos guardan una correlación notable con los sismos registrados en años anteriores, donde se reportaron 6, 3 y 4 sismos para los años 2017, 2018 y 2019 respectivamente.

Revisión de vibraciones con los estándares internacionales

Los registros obtenidos de la estación ZIAG se obtuvieron en unidades de aceleración. Debido a que no se conocen las condiciones de frontera, no es posible integrar la señal para convertirla en términos de velocidad, por lo tanto, no es posible aplicar las normas establecidas los límites de vibración permisible en función de la velocidad de partícula máxima. Los límites que se pueden comparar son los correspondientes a la norma ISO, ya que estos se definen en función del valor cuadrático medio (r.m.s.) de la aceleración y su frecuencia asociada.

Los registros relacionados con la actividad minera, determinados según los criterios mencionados anteriormente, son comparados con los límites establecidos por la norma ISO (Figura 26 y Figura 27). En esta evaluación, se observa que las vibraciones producidas por estos registros no superan en ningún caso los límites definidos por esta norma para las estructuras. Sin embargo, es importante señalar que estas vibraciones son perceptibles para las personas en algunas zonas de la ciudad, generando molestias e inconformidades, como ya han manifestado los ciudadanos. Además, es relevante destacar que estos niveles de vibración corresponden al lugar donde se encuentra la estación ZAIG, por lo que, en zonas más cercanas a los epicentros de estos movimientos, los niveles pueden ser mayores (ver figura 10) e incluso superar algunos límites. Por lo tanto, sería conveniente realizar una campaña de monitoreo en distintas zonas de la ciudad para evaluar adecuadamente el impacto de estas vibraciones y tomar medidas preventivas si es necesario.

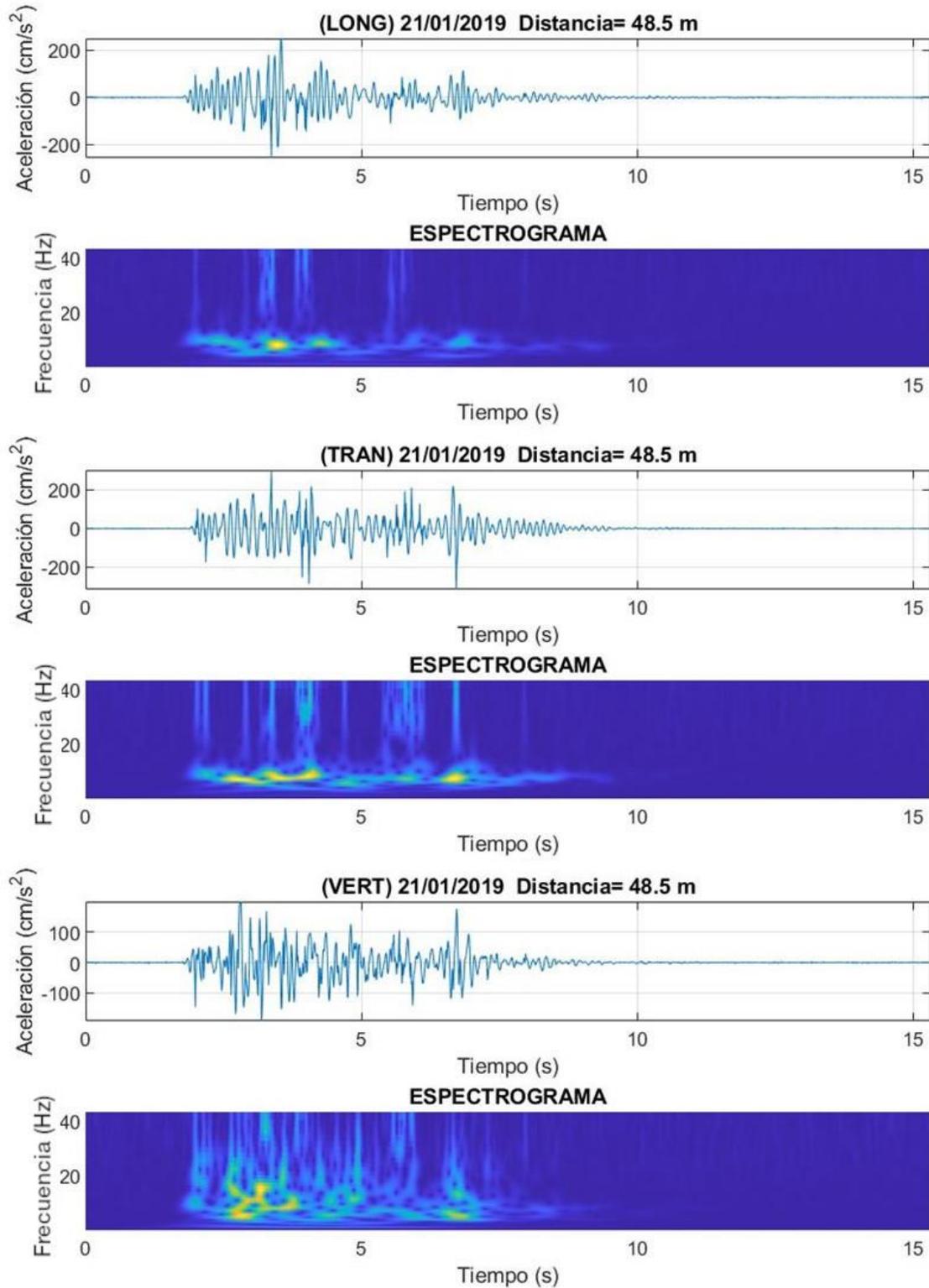


Figura 23. Espectrogramas registro de voladura 21/01/2019 distancia 48.5 m

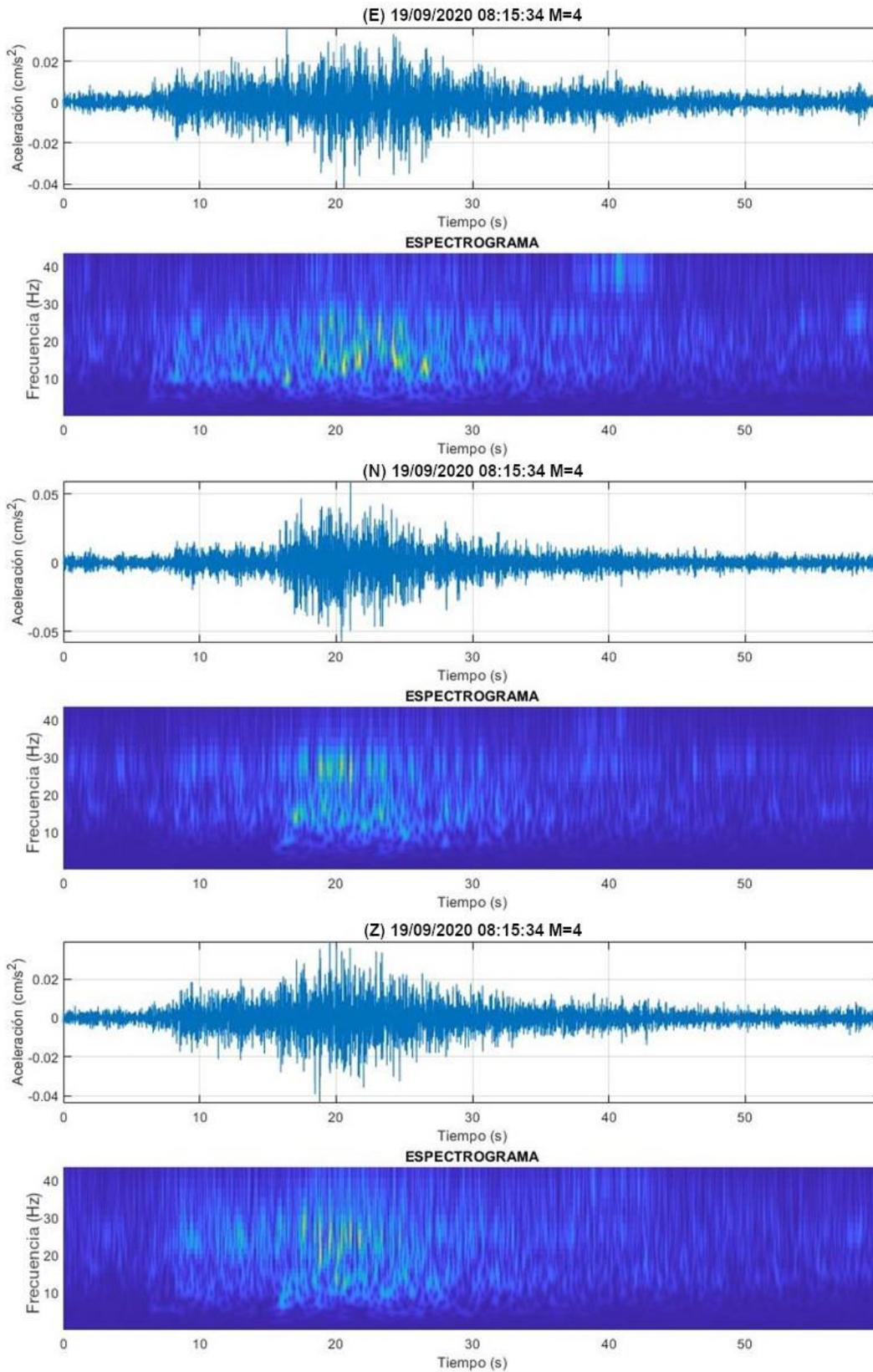


Figura 24. Espectrogramas registro 19/09/2020 08:15:34 M=4.0

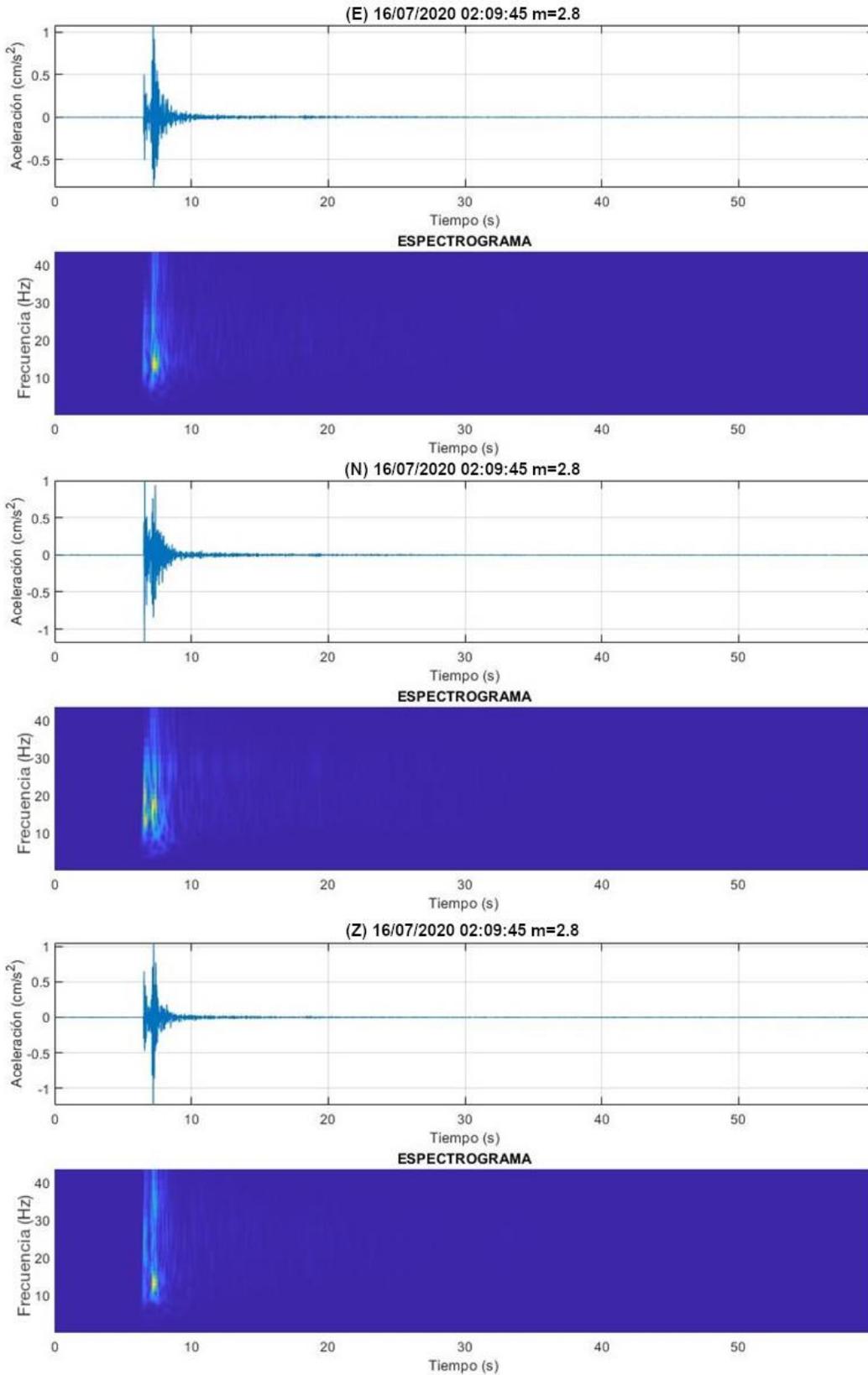


Figura 25. Espectrogramas registro 16/07/2020 02:09:44 M=2.8

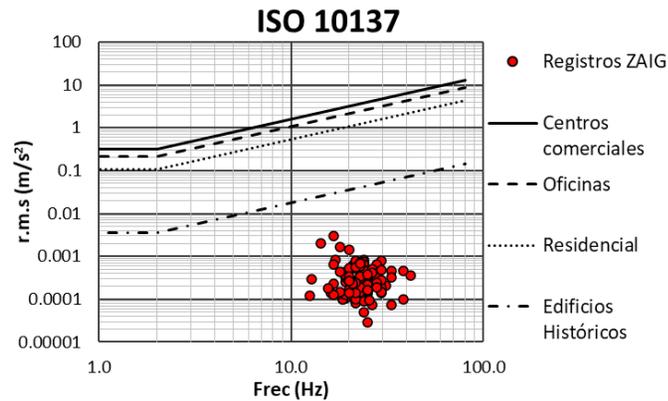


Figura 26. Revisión de los registros de la estación ZAIG, ISO10137 ejes X y Y

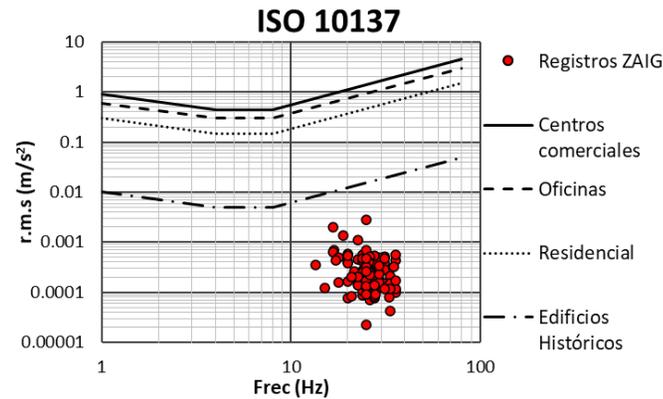


Figura 27. Revisión de los registros de la estación ZAIG, ISO10137 eje Z

CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación y 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 llevó a cabo una campaña de monitoreo en una mina a cielo abierto, durante la cual se obtuvieron registros de vibraciones en términos de velocidad de partícula. Estos registros fueron posteriormente analizados y procesaron para obtener evidencia de las características de las vibraciones producidas por explosiones.
- Se observó un gran incremento en la actividad sísmica en el estado de Zacatecas. De acuerdo con Servicio Sismológico Nacional (SSN) se registraron 116 sismos para el estado en el año 2020.
- Se llevaron a cabo análisis de los registros sísmicos proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de la estación ZAIG, ubicada en la ciudad de Zacatecas, utilizando diversos criterios encontrados en la literatura. El objetivo fue determinar si los eventos registrados son de

origen antropogénico o natural. Para ello, se consideraron aspectos como la determinación del hipocentro, el tiempo de llegada de las ondas P y S, la duración del evento, los mecanismos focales, el análisis de espectrogramas y el 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, se determinó que 107 de los sismos reportados para el año 2020 son producto de explosiones ocasionadas por la industria minera, 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. En particular, se registraron 6, 3 y 4 sismos 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, las vibraciones de los registros obtenidos de la estación ZAIG no superan los límites definidos en esta norma para las estructuras. Sin embargo, es importante destacar que estas vibraciones son percibidas por las personas y han causado incomodidad y nerviosismo entre los ciudadanos, como ya se ha manifestado previamente.
- 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. Por ello, es urgente implementar medidas estrictas para controlar las vibraciones generadas por las explosiones mineras y proteger a la población y las estructuras de posibles daños, como la instalación de sismógrafos en las minas, el uso de explosivos de menor potencia y la implementación de técnicas de voladura más seguras.

AGRADECIMENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología la beca otorgada al primer autor de este artículo para la realización de sus estudios de Maestría en el programa de Posgrado de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS

- 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>
- BS 7385-2 (1993). "Part 2: Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings". Guide to Damage Levels From Ground Borne Vibration, British Standard. <https://www.clacks.gov.uk/document/3243.pdf>
- DIN 4150 (1999). "Part 3: Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures", German Standard, Deutsches Institut Fur Normung E.V. <https://www.baunormenlexikon.de/norm/din-4150-3/2fb00265-fe7d-460e-a9bb-3016d47dc3c0>
- Durrheim, R J, R L Anderson, A Cichowicz, R Ebrahim-Trollope, G Hubert, A Kijko y N Van der Merwe (2006). "The risks to miners, mines, and the public posed by large seismic events in the gold mining districts of South Africa". *In Proceedings of the Third International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Quebec, Canada.

https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/960/Durrheim_2007_d.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Gibowicz, S J (1982). “Seismicity induced by surface mining: the Belchatow, Poland, earthquake of 29 November 1980”. *Acta Mont.*;(Czechoslovakia), 61. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/5201859>
- Gibowicz, S J y A Kijko (2013). *An introduction to mining seismology*. Academic Press, London. 399 p. https://www.researchgate.net/profile/Andrzej-Kijko/publication/259558016_An_Introduction_to_Mining_Seismology/links/572506d408aee491cb3a9e10/An-Introduction-to-Mining-Seismology.pdf
- Havskov, J, P H Voss y L Ottemöller (2020). Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91 (3): 1846-1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>.
- International Standards Organisation (ISO) (1992). “Bases for design of structures—Serviceability of buildings against vibration.” ISO10137, Geneva. <https://www.iso.org/standard/37070.html>
- Kisslinger, C (1976). “A review of theories of mechanisms of induced seismicity”. *Engineering Geology*, 10(2-4), 85-98. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(76\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(76)90014-4)
- Kusznir N J, D P Ashwin y A G Bradley (1980). “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. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90005-4)
- Lagunas, J (2019). “Comportamiento de Estructuras Bajo Cargas Producidas Por Explosiones Controladas”. *Tesis de licenciatura*. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad académica de Ingeniería I, Zacatecas, Zac., México.
- Ramírez Alvarez, E (2020). *Sismos en México y ejercicios de emergencia*. CENAPRED. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/584490/CURSO_SMEE_T2.pdf
- 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. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1988.005.01.45>
- Serrano, M A (2018). “Distinción de un Evento Sísmico: ¿Terremoto o Explosión Nuclear?”. *Revista de la Escuela de Física*, 6(2), 197-213. <http://dx.doi.org/10.5377/ref.v6i2.6994>
- Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2014). “¿Cómo se distingue una explosión de un sismo?”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. México. <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismo-explosion.pdf>
- Siskind, D, M Stagg, J Kopp y C Dowding (1980). “Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting”. *Report of Investigations 8507. Bureau of Mines*. United States. <https://vibrationmonitoringcourse.com/wp-content/uploads/sites/7/2014/03/RI-8507-Blasting-Vibration-1989-Org-Scanned-Doc.pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional. (2021). Catálogo de sismos. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Valadez, A (2020). *Explosión en mina Capstone Gold provoca fuerte temblor en Zacatecas*. La Jornada, 14 de julio 2020. <https://www.jornada.com.mx/ultimas/estados/2020/07/14/explosion-en-mina-capstone-gold-provoca-fuerte-temblor-en-zacatecas-7409.html>
- Velázquez R (2020). Comunicación personal sobre vibraciones percibidas en la colonia Pedro Ruiz González. Zacatecas, Zac. 16 de julio del 2020.