

**INFORME DE VOLADURAS PARA GRECEMAR SA.  
UY2022P1706-0809**

**Leda Sánchez Bettucci**

**Hernán Castro**

**Enrique Latorres**

## Objeto de Análisis

Fue solicitado un estudio del comportamiento de las voladuras y la probabilidad de afectación al cuerpo granítico Chamangá (Grey Blue Chamangá) que es objeto de explotación como rocas ornamentales. Para ello fueron instalados un par de sismómetros (Figura 1) con el fin de monitorear, no sólo las voladuras de cantera, sino también las vibraciones casi continuas de las máquinas trituradoras.

Uno de los equipos fue instalado, el día 4 de julio, directamente sobre la roca y es alimentado a través de un panel solar, mientras que el segundo el 21 de agosto.

## Cronograma

Reconocimiento del área	25/06/2022
Instalación nicho/equipos	02-05/07/2022
Inicio de funcionamiento equipos	05/07/2022
periodo sin datos por problemas técnicos	14-21/08/2022
Fin de monitoreo	08/09/2022



Figura 1. Nicho con sismómetros instalados alimentados con panel solar.

## Marco Teórico

Cuando se efectúa la extracción de recursos minerales por medio de explosivos, el aumento súbito de la presión en el sitio de detonación provoca la emisión de ondas que se propagan a través de las rocas. Si las vibraciones elásticas son lo suficientemente fuertes como para sobrepasar el límite de deformación elástica de las rocas circundantes, estas sufren un proceso de ruptura que se disminuye en intensidad radialmente a partir de la fuente detonante. Las características de las vibraciones generadas por las detonaciones de cantera pueden ser registradas y cuantificadas por sensores sísmicos instalados a una distancia cercana a la fuente.

El estimador más representativo del daño adoptado por las distintas normas de vibraciones en múltiples países (DIN4150, SN640 entre otras) es la Velocidad Pico de Partícula (*PPV por Peak Particle Velocity en inglés*).

Existen numerosos estudios sobre el impacto de las vibraciones asociadas a voladuras (Crandell, 1949; Langefors y Kihlstrom, 1976; Nateghi (2011), Takahashi et al. (2018). Ainails et al., 2016), dando como resultado importantes avances en su control y reducción del impacto de las mismas. Las vibraciones generadas por este tipo de emprendimientos sin el control correspondiente pueden dañar estructuras superficiales existentes además de causar molestias a los residentes en las inmediaciones de las minas/canteras

Si bien la complejidad de la vibración inducida por voladuras es debida principalmente a la heterogeneidad del macizo rocoso, la PPV puede ser estimada por medio de métodos empíricos tales como leyes de atenuación de vibraciones. Estos son muy útiles para predecir el nivel de vibración (Rodríguez et al., 2010) aunque requieren conocer características del diseño de la malla de voladura y la roca por la cual se propagan las ondas. La PPV depende principalmente de la carga máxima, la distancia entre la explosión y el punto de medición, y depende en gran medida de las características del suelo (Adhikari et al., 2006).

La relación más utilizada para su estimación es:

$$PPV(mm/s) = K(D/\sqrt{W})^\beta$$

donde D es la distancia entre los puntos de voladura y medición (m), W el CPD (carga explosiva máxima en kg) y  $D/\sqrt{W}$  es la distancia escalada (SD;  $m/kg^{1/2}$ ).

K y  $\beta$  son las constantes del sitio que se determinarán mediante regresión utilizando un gran volúmen de datos.

La distancia escalada (SD) es un parámetro para la distancia normalizada por la carga utilizada para la detonación. A través de la investigación de la ley de propagación (Konya, 2003) se ha desarrollado un método para estimar y comparar las vibraciones del suelo de una explosión durante la etapa de planificación y diseño, para mantenerse dentro de los límites de vibración prescritos. La amplitud de las vibraciones del suelo se establece por la cantidad de energía presente para crear la vibración y la distancia a través de la cual se han propagado las vibraciones. La fórmula de la distancia escalada relaciona la amplitud de la vibración del suelo con el peso de la carga explosiva por retraso y la distancia desde la explosión. La forma típica de combinar la distancia y la energía explosiva es dividir la distancia real por la raíz cuadrada del peso máximo de la carga explosiva por retardo para obtener una distancia normalizada o escalada (ISEE, 1998) de la siguiente manera:

$$SD = d \sqrt{W} \quad SD \text{ (in } m/kg^{0.5}\text{); } d \text{ distancia verdadera}$$

Rodríguez et al. (2010) y Sambuelli (2008) propusieron un enfoque diferente para determinar la ley de atenuación a partir de un reducido número de voladuras, que son aplicables en determinadas circunstancias.

El uso de explosivos está intrínsecamente asociado con las vibraciones. La onda de vibración se genera en la etapa elástica, creada por el inicio de la voladura, y progresivamente atenuada por el aumento de volumen debido a su expansión en forma esférica (López-Jimeno et al., 2017). Para predecir vibraciones se pueden utilizar enfoques analíticos, empíricos y numéricos (Toraño, et al., 2006 a, b; Argüelles Fraga 2004; Fernández y Rodríguez 2009).

Barker et al. (1993) postulan que los efectos de un banco sobre la radiación sísmica debido a una voladura de cantera pueden modelarse mediante un tensor de momento modificado. McLaughlin et al. (2022) señalan que la radiación teórica de una explosión detrás de un banco es más complicada que el modelo simple sugerido por Barker et al. (1993). Dado que la energía de la detonación es insuficiente para romper más de cuatro veces el diámetro del agujero confinado, en ese punto se forman grietas

radiales y se extienden a lo largo de la cavidad. **Esta energía continúa trabajando en la roca por expansión de estas grietas** (Mohamed y Mohamed 2012). Todo aplastamiento y agrietamiento de los materiales *in situ* tienen lugar dentro de la zona inelástica. Más allá de la zona inelástica, está la zona elástica, donde se produce un daño permanente por la energía de la explosión. Oriard (2002) se refiere a las actividades dentro de la zona elástica como ondas elásticas; donde las rocas pueden estirarse y doblarse, pero nunca se romperán. Todas las estructuras o instalaciones que rodean el sitio de una explosión responderán, con las intensidades de vibración dependientes de las variables físicas tales como; distancia desde la voladura hasta la posición de interés, peso de carga explosiva por retraso, y la frecuencia de vibración (ver Dowding (1985), Hendron y Oriard (1972), Siskind et al. (1980) y Ahsby (1981), Dowding et al., 2003).

Las características geológicas del macizo rocoso afectan la propagación de la vibración del suelo y juegan un papel activo en el valor de la velocidad máxima de las partículas. Los macizos rocosos se caracterizan típicamente por ser discontinuos y anisótropos. Las estructuras discontinuas, como fallas, diaclasas, fisuras y estructuras fracturadas se distribuyen aleatoriamente en el macizo rocoso y tienen implicaciones importantes para ingeniería de voladuras.

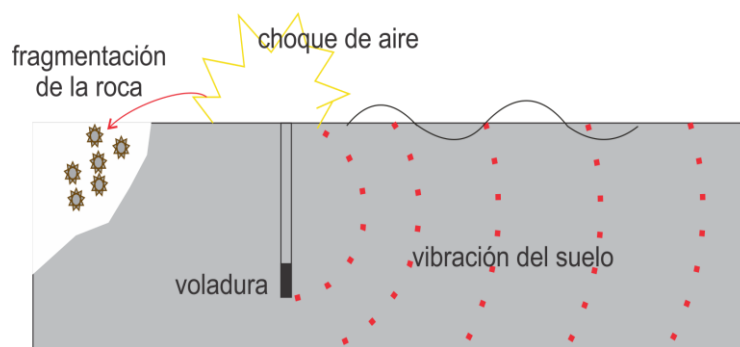
En operaciones de voladura, grietas naturales en la estructura del macizo rocoso cambian por tensiones adicionales inducidas por la voladura, y la resistencia al corte de la superficie estructural se reduce significativamente, lo que disminuye la estabilidad de la roca (Armaghani et al., 2006; Singh et al., 2015; Yin et al., 2018). Lejos del punto de disparo, las características del suelo y del macizo rocoso, que lleva las ondas sísmicas, afecta la función de vibración y la especialidad (Karadogan, 2008; Ozer et al., 2012).

A corta distancia, una onda se transmite esféricamente y la amplitud disminuye inversamente con la distancia desde la explosión. En distancia más largas, otros dos factores afectan el proceso de propagación: (1) la onda se divide en tres tipos de onda que viajan a diferentes velocidades y (2) las variaciones en el medio, como capas o fisuras, pueden introducir más efectos de esparcimiento y dispersión (Dowding, 1985; Kahrman, 2001). Una falla geológica importante que se intercepte puede impedir en gran medida la propagación en una dirección particular (Dowding, 1985; Sarria 1996). Yin et al. (2018) mostró que la tasa de atenuación de la velocidad de vibración y la atenuación de la energía de la vibración de una voladura aumentaron con el aumento

del grado discontinuidades a favor de las cuales ha habido un desplazamiento de corte muy pequeño o nulo (diaclasas). Con base en este resultado, mencionaron que los parámetros estructurales del macizo rocoso (como el número de diaclasas) tienen un impacto significativo en la ley de atenuación.

Durante la operación de voladura, aproximadamente del 15 al 30 % de la energía liberada se utiliza exclusivamente para la fragmentación y desplazamiento de las rocas (Armaghani et al., 2013; Khandelwal y Monjezi, 2013). Por el contrario, el 70-85 % restante de la energía provoca un impacto ambiental no deseado, como la sobrepresión del aire (AOp), la vibración del suelo y las ejetas de rocas en las áreas adyacentes (Hanispanah et al., 2018).

En la [Figura 2](#) se muestra un esquema de propagación. Por otro lado, menos del 1% de la energía puede ser suficiente para causar un flyrock durante la voladura (Adhikari, 1999). Se han desarrollado varias técnicas para predecir el rendimiento de la voladura y compararlo con el valor medido. Para rocas duras, la onda de choque predomina en la fragmentación y los gases contribuyen poco al proceso de fragmentación.



[Figura 2](#). Esquema de voladura mostrando la propagación de las ondas en el subsuelo, choque de aire y fragmentación.

El daño del macizo rocoso provocado por una voladura, definido como la propagación de discontinuidades geológicas inherentes y/o la formación de nuevas grietas a lo largo de planos débiles en el macizo rocoso (Raina et al., 2000; Villaescusa et al., 2004), se ve afectado tanto por los parámetros controlables como por los no controlables (Wang et al., 2018). Las microfracturas son el tipo principal de daño. Cuando las microfracturas en varios granos adyacentes se unen para formar una fractura más o menos continua, esta fractura se vuelve visible a simple vista debido a su mayor

longitud y se denomina mesofractura (Olson et al., 1973). Estos autores muestran el efecto de las explosiones en una cantera de granito sobre los granos minerales antes y después de una voladura.

La extensión del daño de un macizo rocoso inducido por una voladura generalmente se estima usando modelos simplistas en los que algunos factores importantes como la presencia de agua, el confinamiento explosivo y, la secuencia y geometría de la explosión se descartan. Además de PPV o BVV como indicador de la extensión del daño del macizo rocoso inducido por voladuras, la iniciación y propagación de grietas en el macizo rocoso inducidas por voladuras también indican el efecto adverso de las voladuras sobre el macizo rocoso circundante (Wang et al., 2018). Durante la voladura, la reacción química explosiva en el barreno cambia el explosivo de un material confinado a un producto gaseoso de alta presión y alta temperatura. Mientras tanto, la onda de tensión (u onda de choque) se propaga a una mayor velocidad durante un tiempo más corto en comparación con la presión del gas de explosión (McHugh, 1983; Paine y Please 1994). Wang et al. (2018) obtuvieron resultados experimentales que indican que la distancia a la fuente de voladura controla la extensión del daño del macizo rocoso inducido por la voladura. Con un aumento en la distancia a la fuente de voladura, se observa una disminución no lineal en el incremento del daño del macizo rocoso o el daño del macizo rocoso acumulado, y la tasa de disminución cae gradualmente y sugieren que este fenómeno también es aplicable a la velocidad de vibración de las partículas.

A continuación, se muestran distintas normas ([Figura 3](#)) que determinan los límites tolerables de vibración debida a voladuras para cada frecuencia y tipo de estructura. El país no cuenta con una norma propia por lo que en general se utiliza la norma Din 4150 (Alemana) ya que es la más restrictiva.

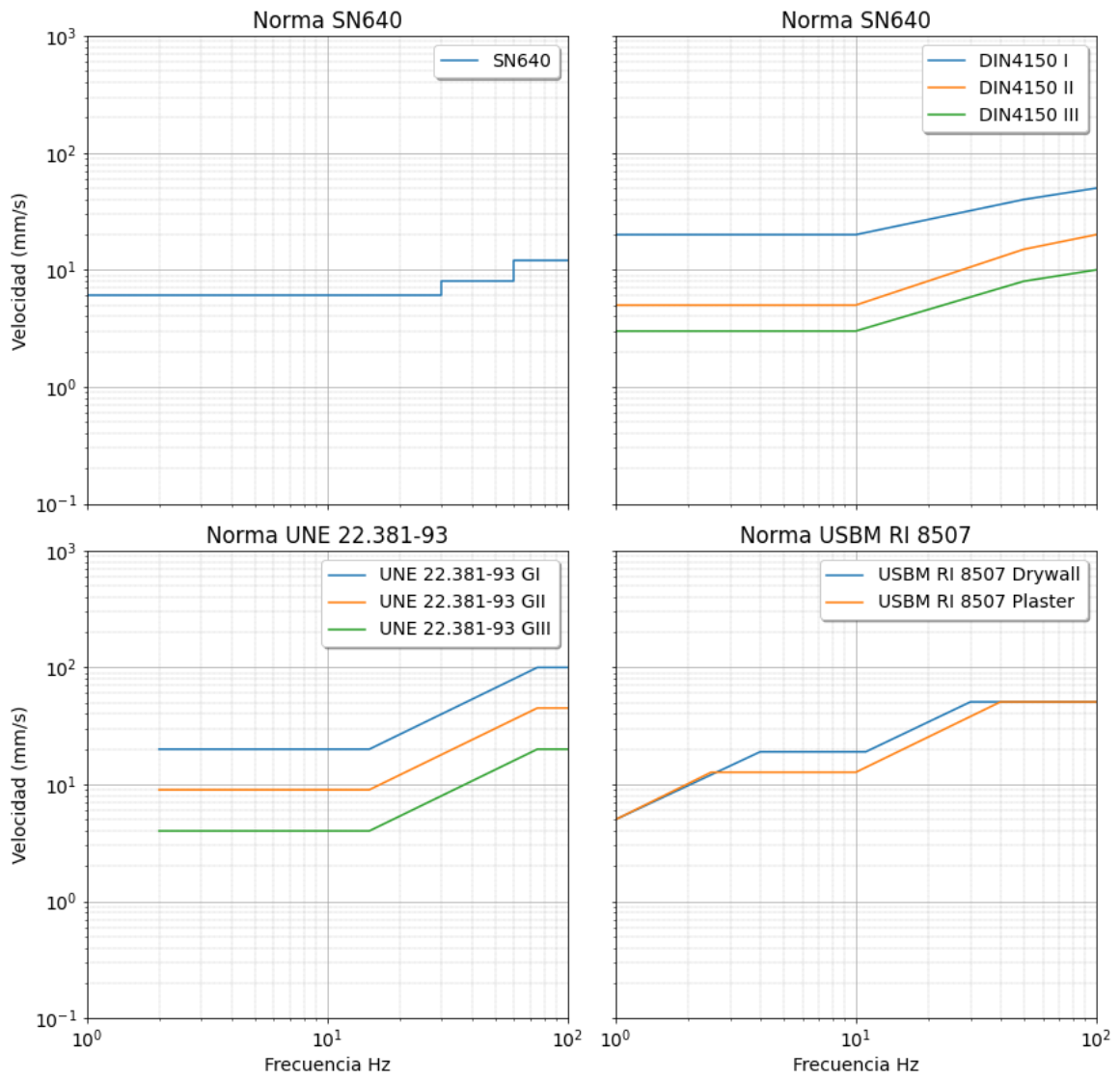
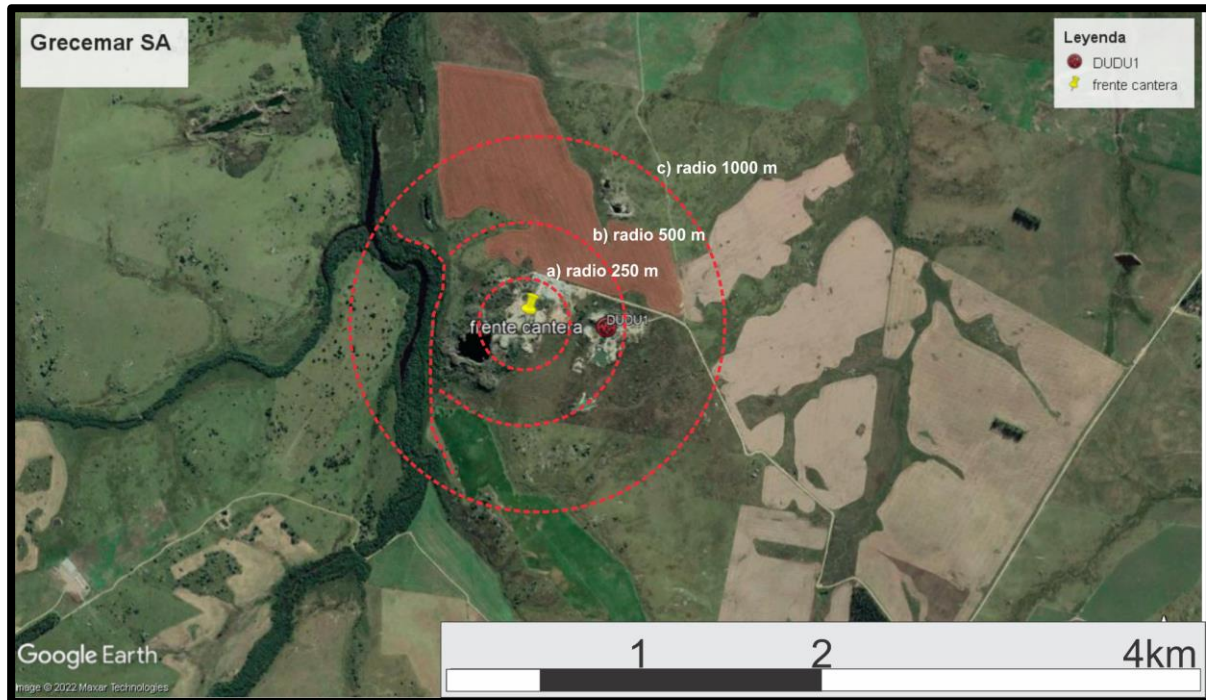


Figura 3. Diseño de las distintas normas existentes. La inferior derecha corresponde a la norma alemana que suele considerarse la más restrictiva.



## Resultados

Puede afirmarse que el macizo rocoso analizado presenta una estructura bastante uniforme. Esto significa que la geología de los sitios de voladura es similar, a excepción de la porción occidental, fuera del predio de GRECEMAR SA donde aparece una importante fractura (ver [Figura 4](#)).



**Figura 4.** Localización del sensor y área de voladuras. El sensor se encuentra a ca. 380 m del frente de explotación. Los círculos muestran las áreas de incidencia (250, 500 y 1000 m).

A partir de las medidas obtenidas pudimos detectar 14 voladuras y calcular la PPV en las tres componentes del sensor para cada una de ellas. En la tabla X se muestran las medidas de PPV para los tres canales del sensor en cada fecha y el valor de la frecuencia.

Tabla 1. Medidas de PPV para las voladuras medidas

Fecha	Hora	Canal	PPV	Frecuencia
7/9/2022	19:59	HNZ	0.11	64.8
7/9/2022	19:59	HNN	0.49	58.23
7/9/2022	19:59	HNE	0.42	59.88
7/9/2022	22:10	HNZ	0.03	25.45
7/9/2022	22:10	HNN	0.01	12.72
7/9/2022	22:10	HNE	0.03	19.17
7/14/2022	19:38	HNZ	0.79	29.57
7/14/2022	19:38	HNN	0.98	48.18
7/14/2022	19:38	HNE	01.02	36.15
7/27/2022	17:25	HNZ	1.32	24.03
7/27/2022	17:25	HNN	1.89	43.76
7/27/2022	17:25	HNE	1.31	27.98
8/1/2022	21:39	HNZ	0.08	22.54
8/1/2022	21:39	HNN	0.05	32.77
8/1/2022	21:39	HNE	0.07	18.65
8/5/2022	16:56	HNZ	0.74	19.31
8/5/2022	16:56	HNN	01.09	38.94
8/5/2022	16:56	HNE	0.91	20.96
8/24/2022	21:22	HNZ	0.13	23.78
8/24/2022	21:22	HNN	0.05	28.19
8/24/2022	21:22	HNE	0.1	25.99
8/29/2022	21:16	HNZ	0.04	16.68
8/29/2022	21:16	HNN	0.02	31.52
8/29/2022	21:16	HNE	0.04	16.93
8/30/2022	21:22	HNZ	0.06	27.28
8/30/2022	21:22	HNN	0.01	26.95
8/30/2022	21:22	HNE	0.04	29.79
8/31/2022	21:18	HNZ	0.03	25.67
8/31/2022	21:18	HNN	0.01	27.35
8/31/2022	21:18	HNE	0.02	32.68
8/31/2022	15:59	HNZ	0.66	30.07
8/31/2022	15:59	HNN	01.08	33.47
8/31/2022	15:59	HNE	1.3	33.46
9/2/2022	21:12	HNZ	0.03	17.58
9/2/2022	21:12	HNN	0.01	37.55
9/2/2022	21:12	HNE	0.03	41.78
9/5/2022	21:37	HNZ	0.04	29.29
9/5/2022	21:37	HNN	0.01	31.4
9/5/2022	21:37	HNE	0.04	15.84
9/7/2022	22:10	HNZ	0.03	25.45
9/7/2022	22:10	HNN	0.01	12.72
9/7/2022	22:10	HNE	0.03	19.17

Si analizamos la fecha en que se dan las voladuras, las mismas se presentan en un promedio de una a dos voladuras por semana, con excepción de la semana del 29 de agosto al 4 de septiembre (Figura 5).

En la Figura 6 se puede observar que la voladura que presentó su máximo valor de PPV fue el 27/07/2022 a las 17:25 UTC (14:25 Hora Local). La misma presenta una PPV máxima en la componente Norte de 1.89 mm/s a 43.76 Hz, 1.32 mm/s a 24.03 Hz en la componente Vertical y 1.31 a 27.98 Hz, en la componente Este.

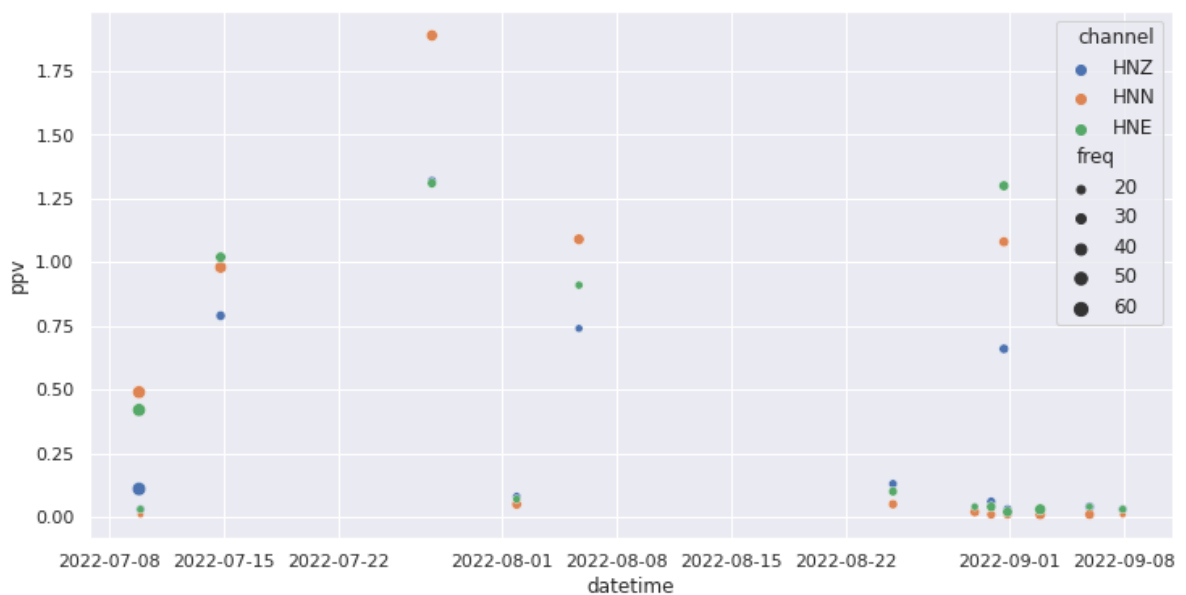


Figura 5. Distribución de los valores de PPV para cada voladura.

Existe un segundo grupo de medidas en los que la PPV varía entre 0.5 y 1.25 mm/s aproximadamente. El tercer grupo de medidas presenta PPV bajas que oscilan entre 0.01 y 0.25.

Observando las estadísticas de las PPV para cada canal, se puede constatar que las medidas tienen una media un poco más elevada en la componente vertical y presentan una desviación estándar relativamente alta para la medida, evidenciando una variabilidad importante en la carga utilizada (Tabla 2). Si bien la media presenta un valor más alto para la componente N, la mediana parece mantenerse muy similar entre las componentes Norte y Este mientras que la Vertical muestra una mediana inferior. Esto es más consistente y se debe a la asimétrica y dispar distribución de los valores de PPV.

Tabla 2. Estadísticas de las PPV por canal para las voladuras registradas

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
channel								
HNE	14	0.38	0.51	0.02	0.03	0.06	0.79	1.31
HNN	14	0.41	0.61	0.01	0.01	0.04	0.86	1.89
HNZ	14	0.29	0.41	0.03	0.03	0.07	0.53	1.32

Si miramos la distribución de las frecuencias, podemos observar que los valores muestran una desviación estándar menor en relación a la media obtenida. Tampoco la media y la mediana se muestran significativamente distantes lo mostraría una asimetría menor de la distribución de las frecuencias (ver Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticas de la frecuencia a la que se da la PPV para las voladuras registradas

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
channel								
HNE	14	28.46	12.06	15.84	19.17	26.98	33.26	59.88
HNN	14	33.13	12.27	12.72	27.56	32.15	38.59	58.23
HNZ	14	27.25	11.6	16.68	22.85	25.45	28.79	64.8

Existe una voladura que muestra valores anómalos de frecuencia situándose la misma en sus tres componentes por arriba de los 50 Hz. Esta voladura fue re-inspeccionada y no existen elementos para considerar que se trata de otra cosa que no sea una voladura ya que sus valores de PPV se encuentran alrededor de la mediana obtenida. Atribuimos esta anomalía a la poca cantidad de voladuras con la que se cuenta para este estudio.

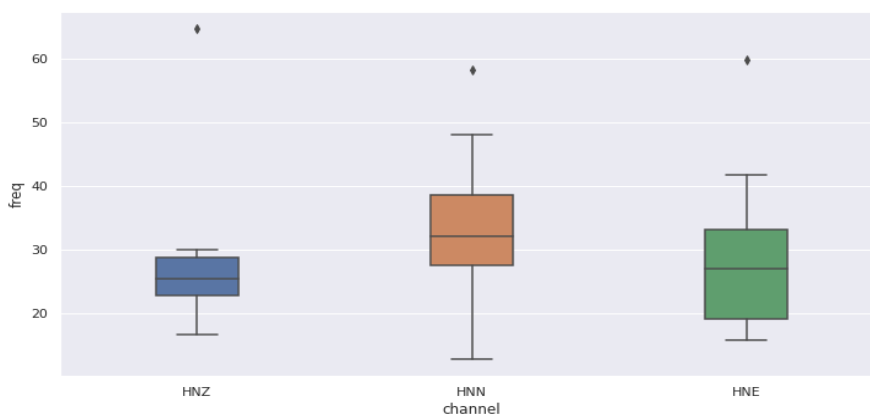


Figura 6. Diagrama de cajas mostrando la distribución de las frecuencias a las cuales fueron obtenidas las velocidades máximas de partícula. La línea central representa la mediana.

Viendo la distribución de las horas convertidas desde UTC a hora local (-03:00) vemos que tanto el mínimo como el máximo de las voladuras se sitúan durante el horario laboral y no existen voladuras en horarios que llamen la atención.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de las horas a las que ocurrieron las voladuras

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
channel								
HNE	14	16.79	2.26	12	16	18	18	19
HNN	14	16.79	2.26	12	16	18	18	19
HNZ	14	16.79	2.26	12	16	18	18	19

En la figura 7 se muestra un histograma con la distribución de la cantidad de medidas por hora en Hora Local.

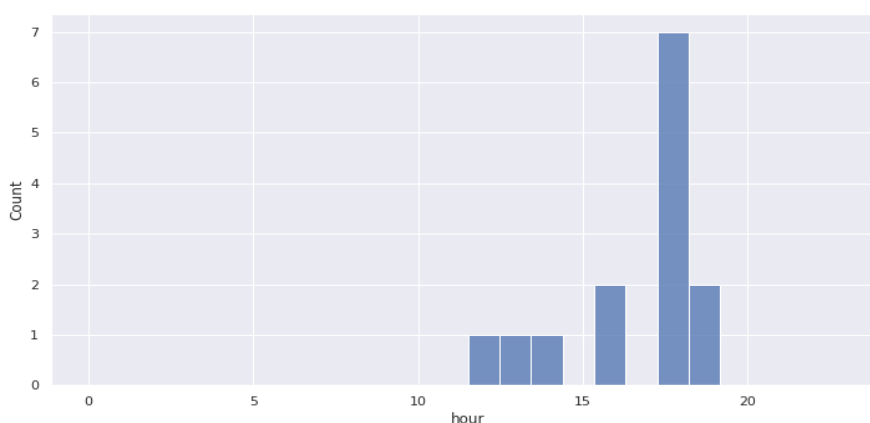


Figura 7. Histograma con la distribución de la cantidad de medidas por hora (Hora Local).

En la siguiente tabla (Tabla 5) se muestran los distintos valores medios por hora de aceleración velocidad y desplazamiento a lo largo de un día, donde se puede apreciar la diferencia entre t0 y tf (inicio a fin de las tareas en la cantera APUSA que es la que se encuentra realizando explotación de material pétreo a través de voladuras y trituración).

Tabla 5. Variaciones en la aceleración del terreno (entre las 9 y las 19hs)

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	tf
acc ( $\mu\text{m/s}^2$ )	115.7	266.01	125.05	191.4	138.5	<b>441.79</b>	52.52	413.05	155.8	228.6	<b>21.18</b>
mm/s <sup>2</sup>	0.116	0.266	0.125	0.191	0.139	0.443	0.052	0.413	0.156	0.229	0.021
vel ( $\mu\text{m/s}$ )	1.05	1.65	1.12	1.51	1.14	2.28	0.65	2.39	1.15	1.63	0.33
disp( $\mu\text{m}$ )	0.06	0.07	0.09	0.1	0.1	0.05	0.08	0.09	0.07	0.08	0.1
gal	0.12	0.027	0.013	0.019	0.014	0.044	0.005	0.041	0.016	0.023	0.02

1 mm/s<sup>2</sup> = 1 000  $\mu\text{m/s}^2$     1 Micrómetro = 0.0001 Centímetro

También se pudo constatar que existen vibraciones permanentes. Durante el horario laboral el área bajo estudio se encuentra bajo vibraciones casi permanentes (Figura 8) que varían entre los 0.1 y los 100 Hz producto de las máquinas trituradoras.

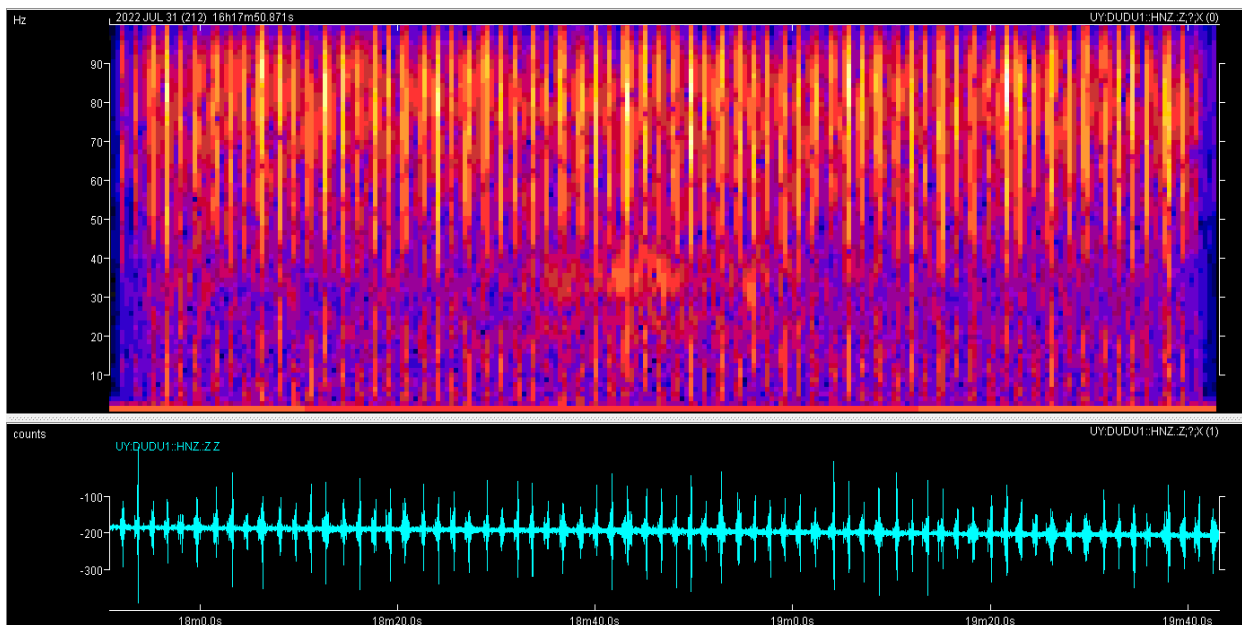


Figura 8. Espectrograma de frecuencias de un fragmento del día 31 de Julio del 2022, de un lapso de ca. 100 minutos (entre las 15 y las 16:40 hora local), mostrando la perturbación del medio.

Toda la zona se encuentra afectada por vibraciones que produce el transporte del material extraído (Figura 9) al sitio de acopio (según informaciones de vecinos circulan al menos 60 camiones por día).



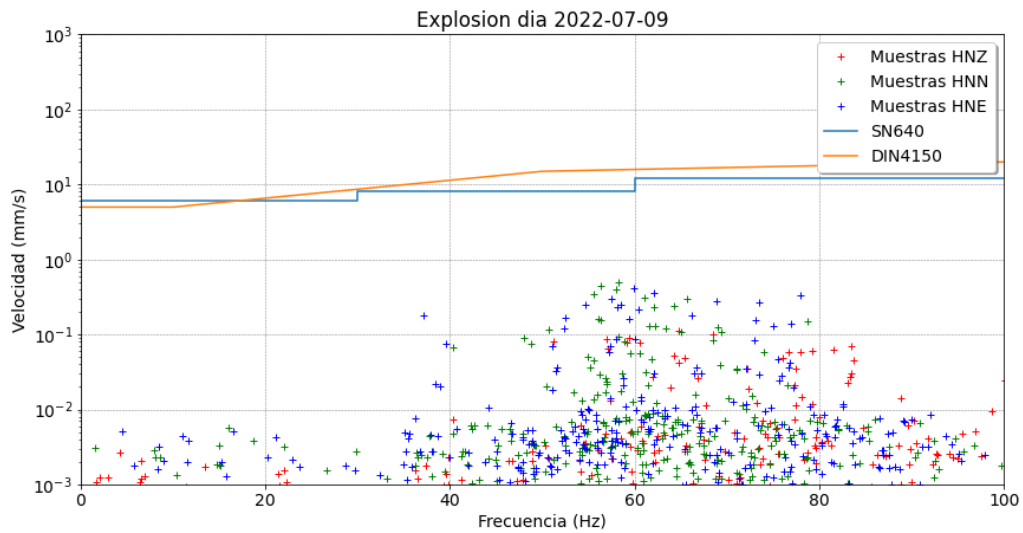
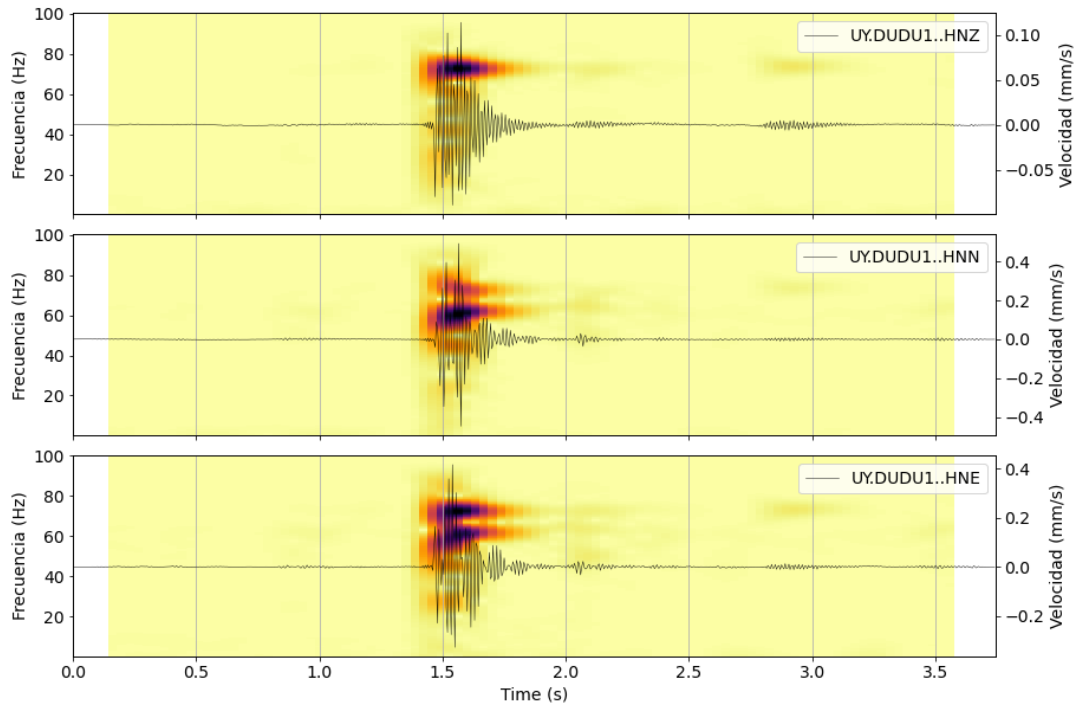
Figura 9. Fotografía tomada el día domingo 21 de agosto donde se puede apreciar la caravana de cuatro camiones.

A continuación se muestran las voladuras que fueron estudiadas usando la norma Din 4150 como marco de referencia y la forma de onda para cada una.

# 09-07-2022

UY.DUDU1..HNZ	0.11371135	64.79700142539222
UY.DUDU1..HNN	0.4938988	58.23097185605235
UY.DUDU1..HNE	0.4164604	59.87825505733454

Voladura del día 09-07-22 a las 16:59

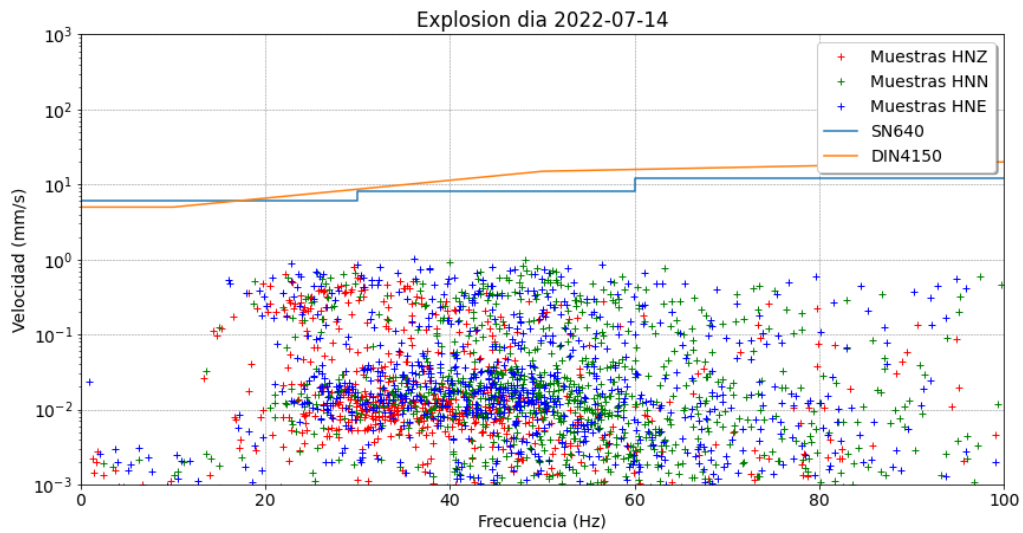
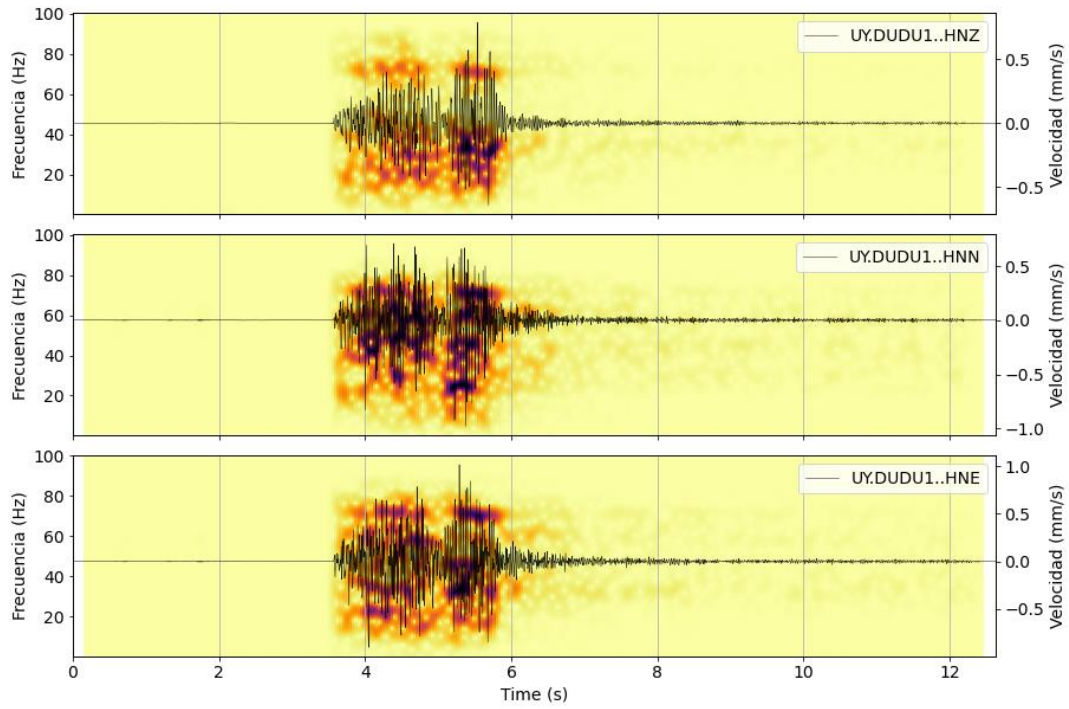




**14-07-2022**

UY.DUDU1..HNZ	0.7887603	29.565247078158823
UY.DUDU1..HNN	0.9798046	48.178958128648794
UY.DUDU1..HNE	1.0162814	36.152467018525115

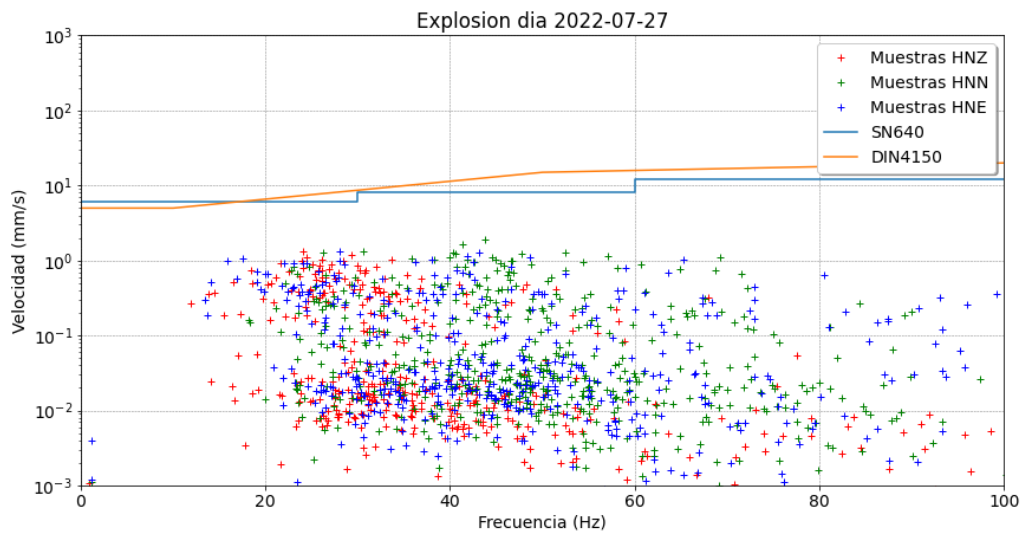
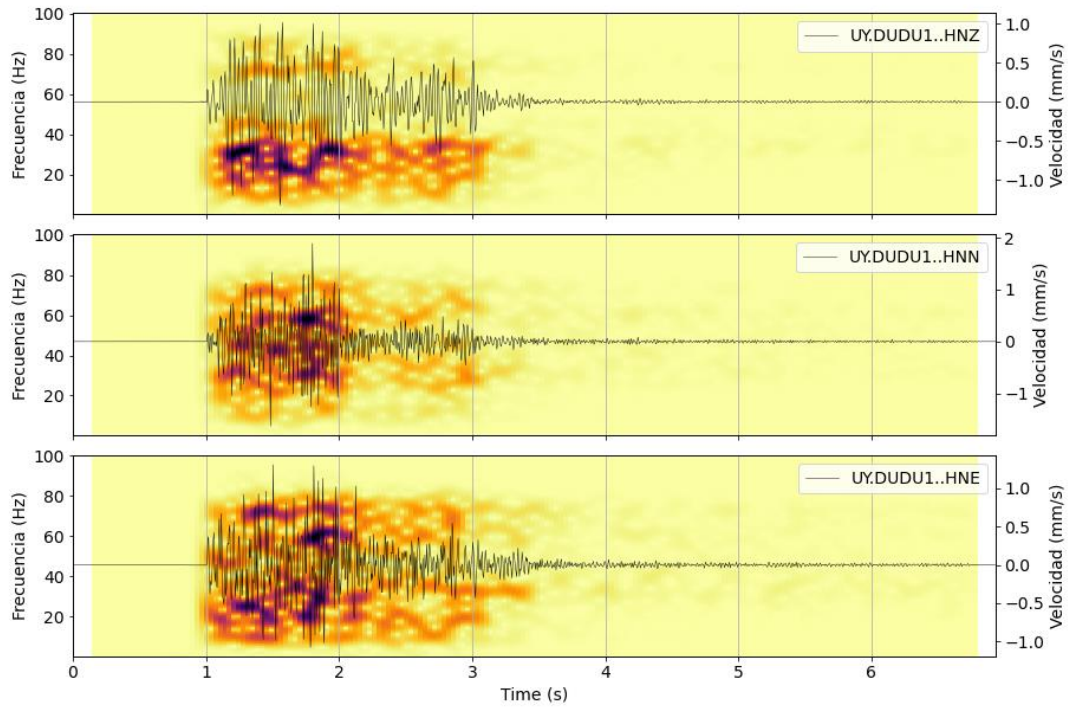
Voladura del día 14-07-22 a las 16:38



**27-07-2022**

UY.DUDU1..HNZ	1.3238305	24.027682247687444
UY.DUDU1..HNN	1.8881398	43.75834656166978
UY.DUDU1..HNE	1.3116795	27.975189190130443

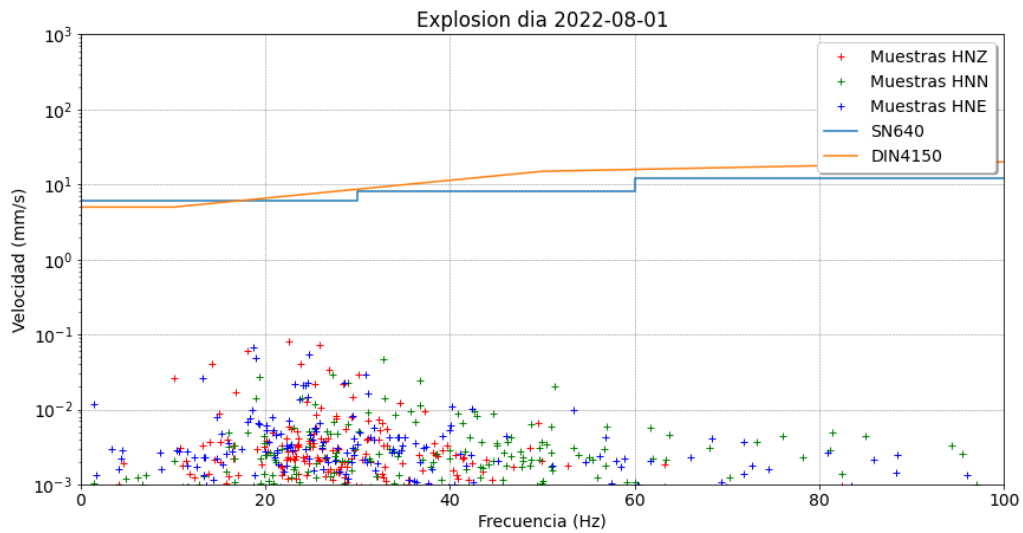
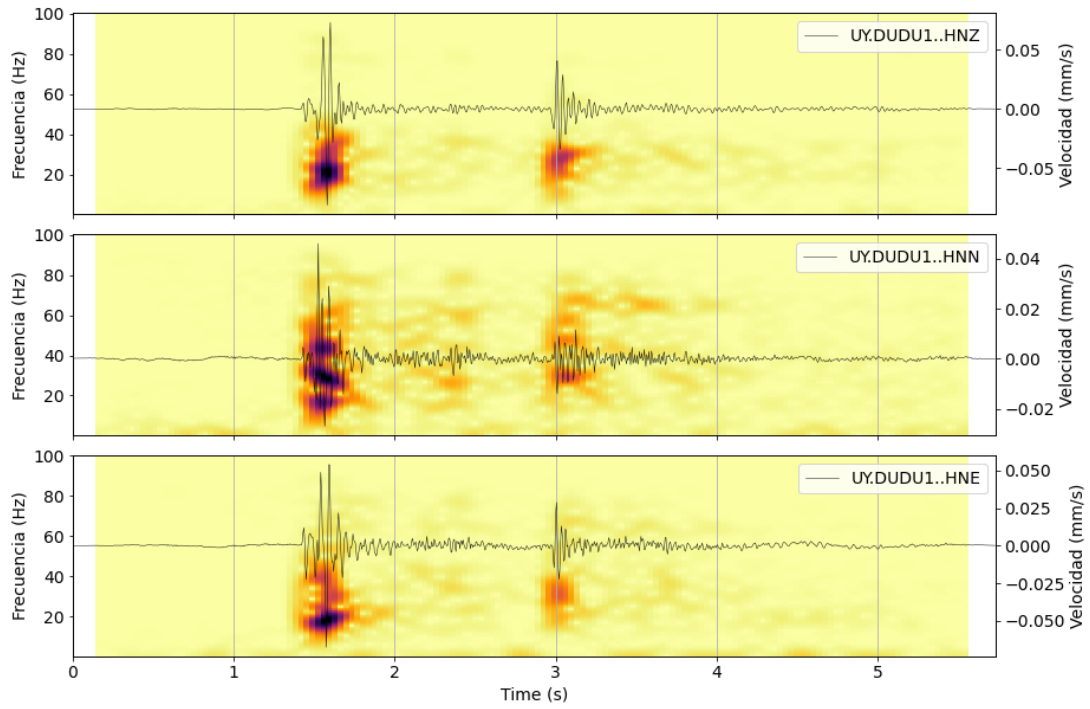
Voladura del día 27-07-22 a las 14:25



**01-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ	0.08108762	22.54068836106746
UY.DUDU1..HNN	0.04613892	32.77132045356458
UY.DUDU1..HNE	0.06776879	18.648248533353726

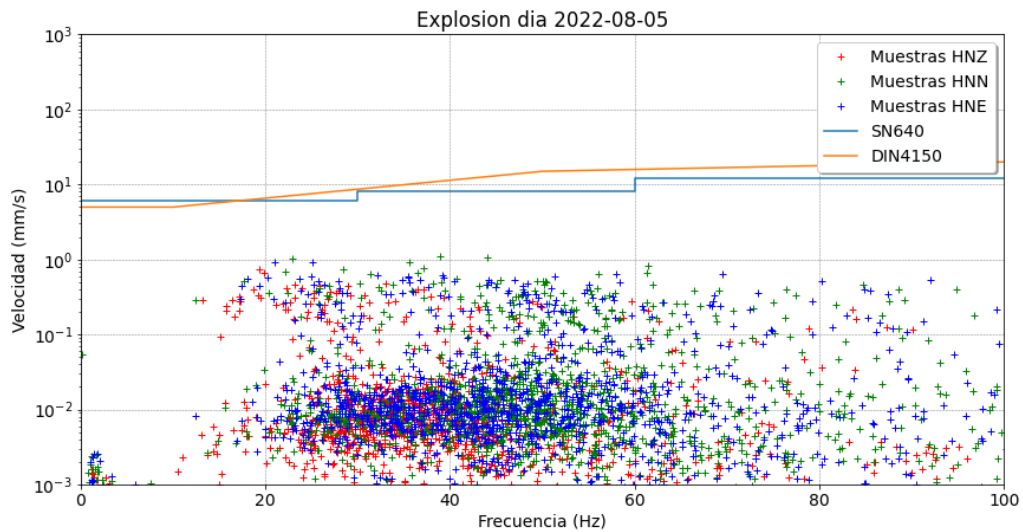
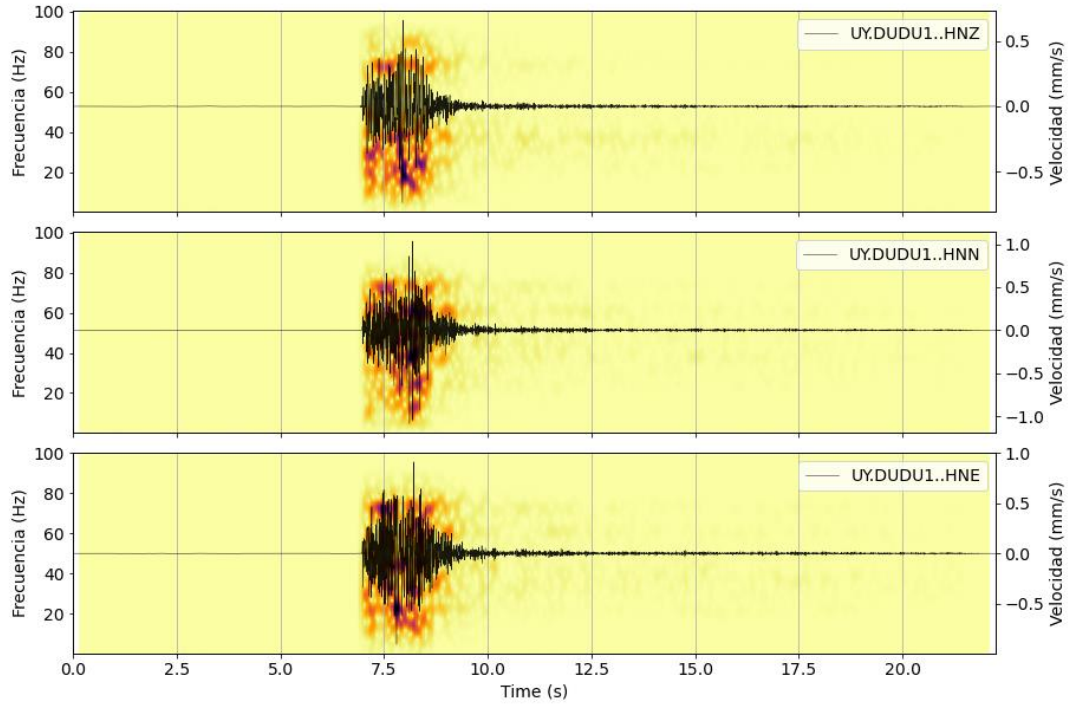
Voladura del día 01-08-22 a las 18:39



**05-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ	134.44714	25.34608431340165
UY.DUDU1..HNN	322.38138	51.9353756743174
UY.DUDU1..HNE	243.5339	58.8216702969985

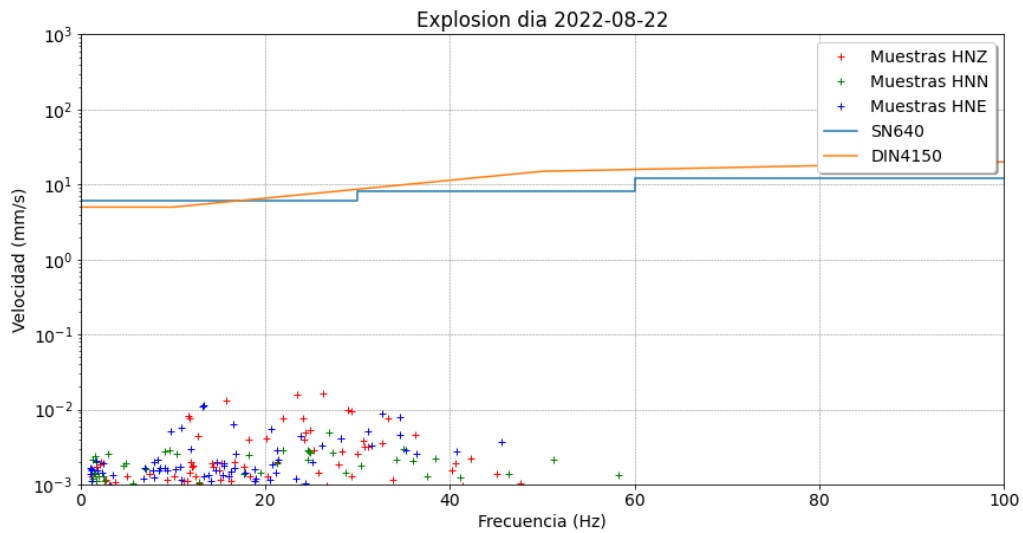
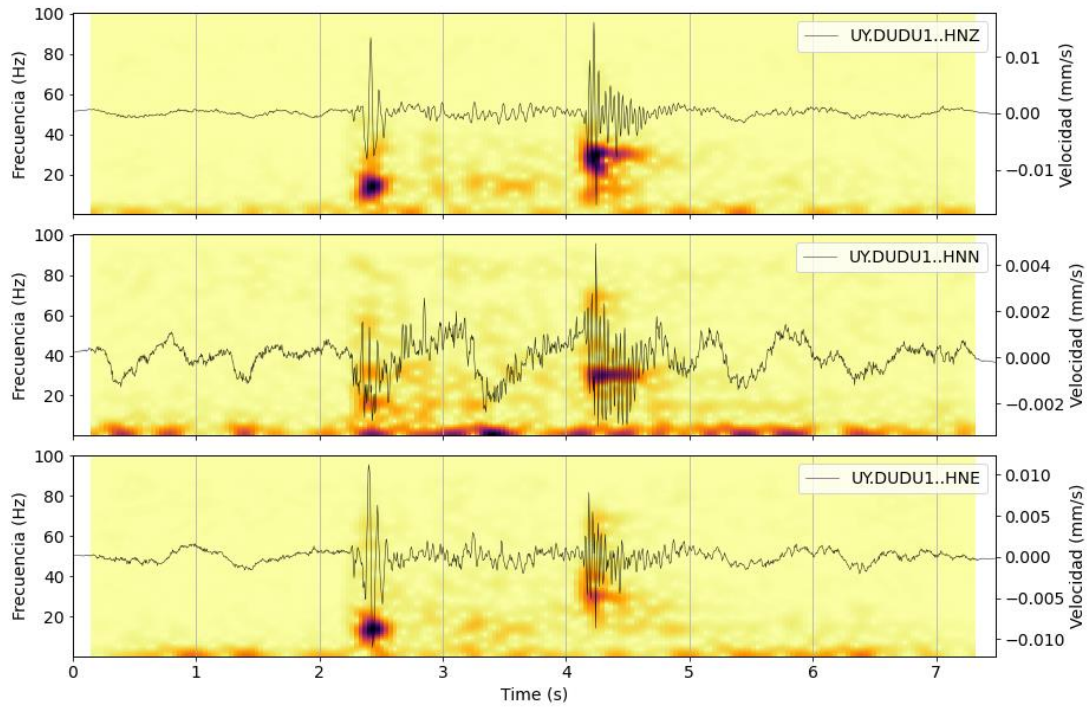
Voladura del día 05-08-22 a las 13:56



**22-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ	0.016249854	26.211517275617897
UY.DUDU1..HNN	0.0049341274	26.88327791672678
UY.DUDU1..HNE	0.011220845	13.262413189126965

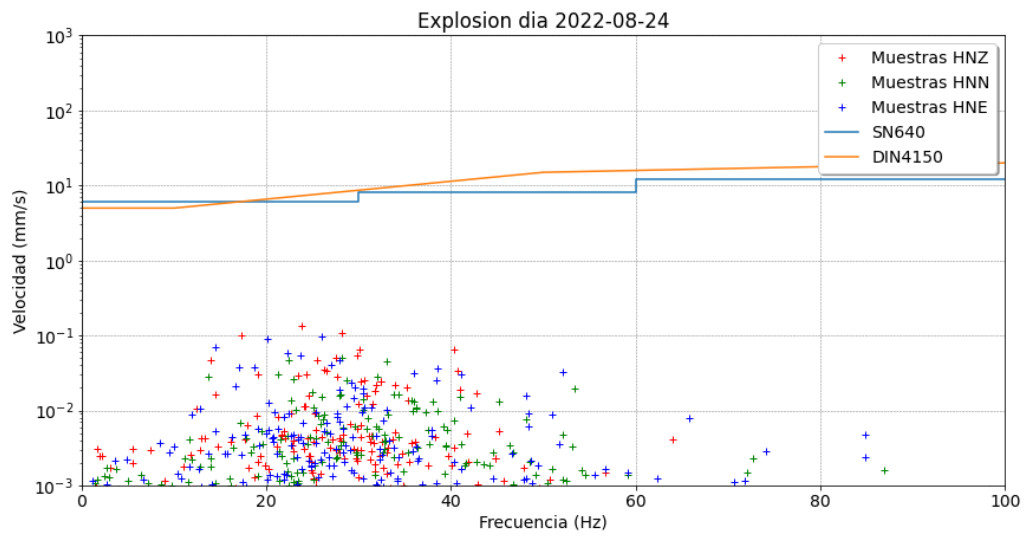
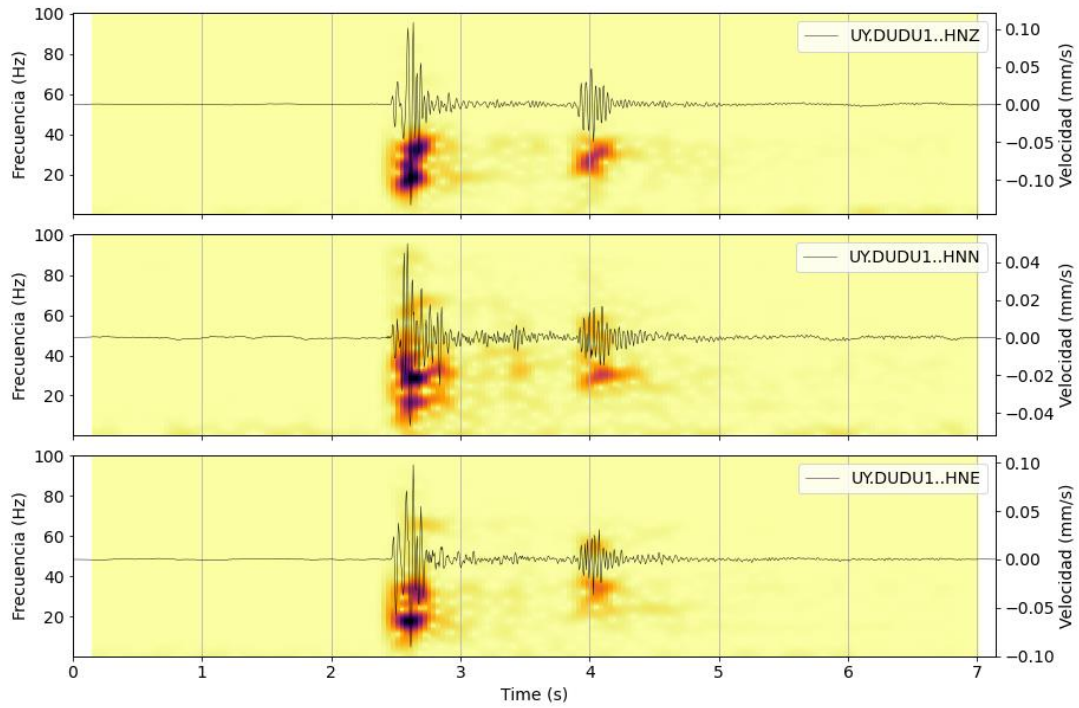
Voladura del día 22-08-22 a las 18:21



**24-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ	0.13350073	23.777232041089487
UY.DUDU1..HNN	0.049769595	28.18978787128214
UY.DUDU1..HNE	0.09794841	25.990776595574943

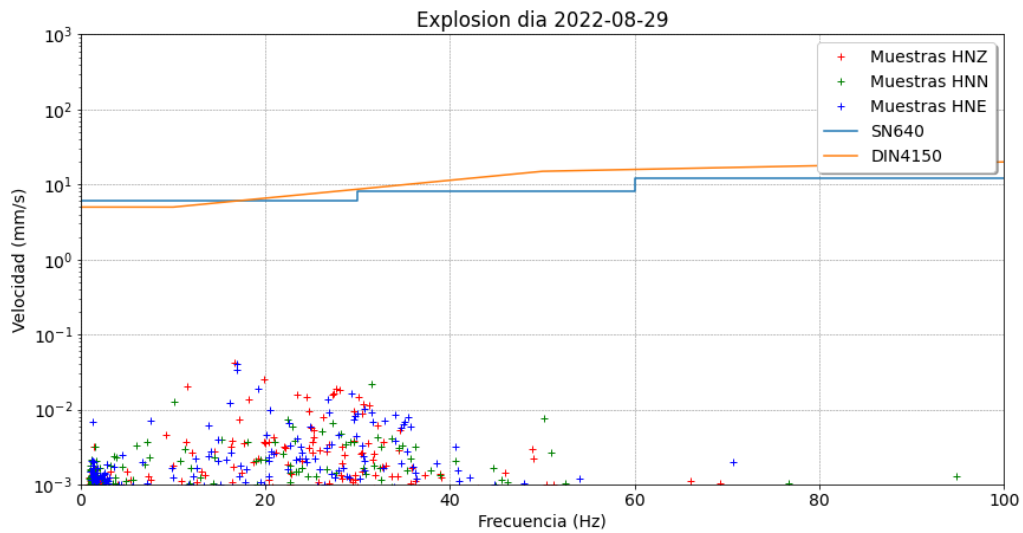
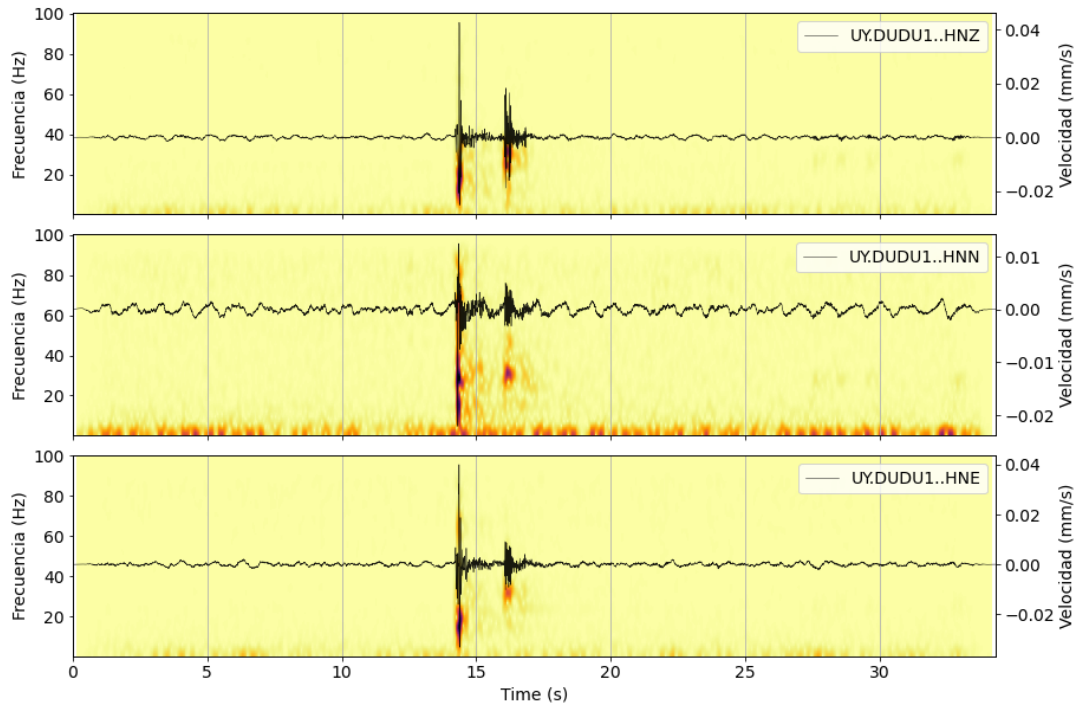
Voladura del día 24-08-22 a las 18:22



**29-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ 0.042640742 16.68293738825397  
UY.DUDU1..HNN 0.022099158 31.521513137000564  
UY.DUDU1..HNE 0.040070977 16.92632676610192

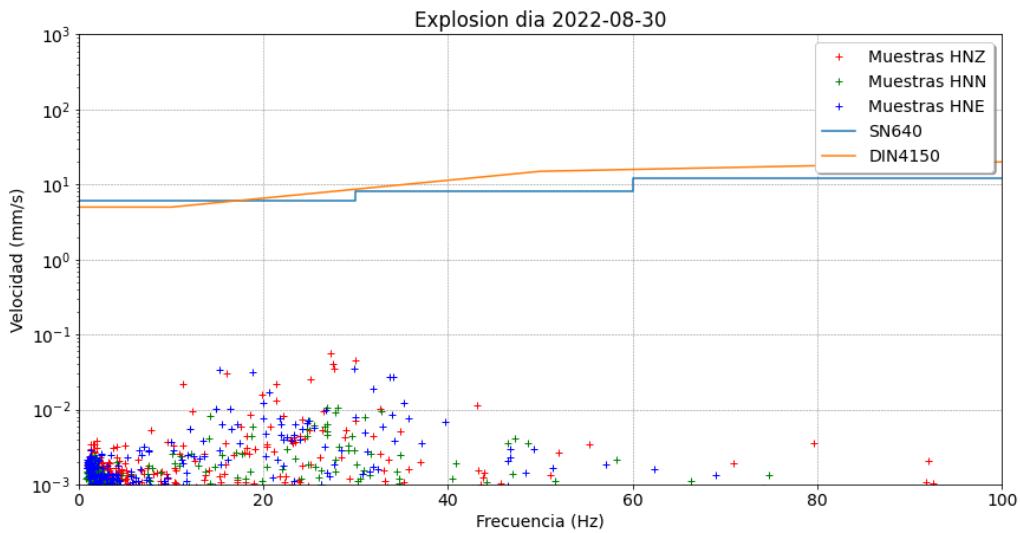
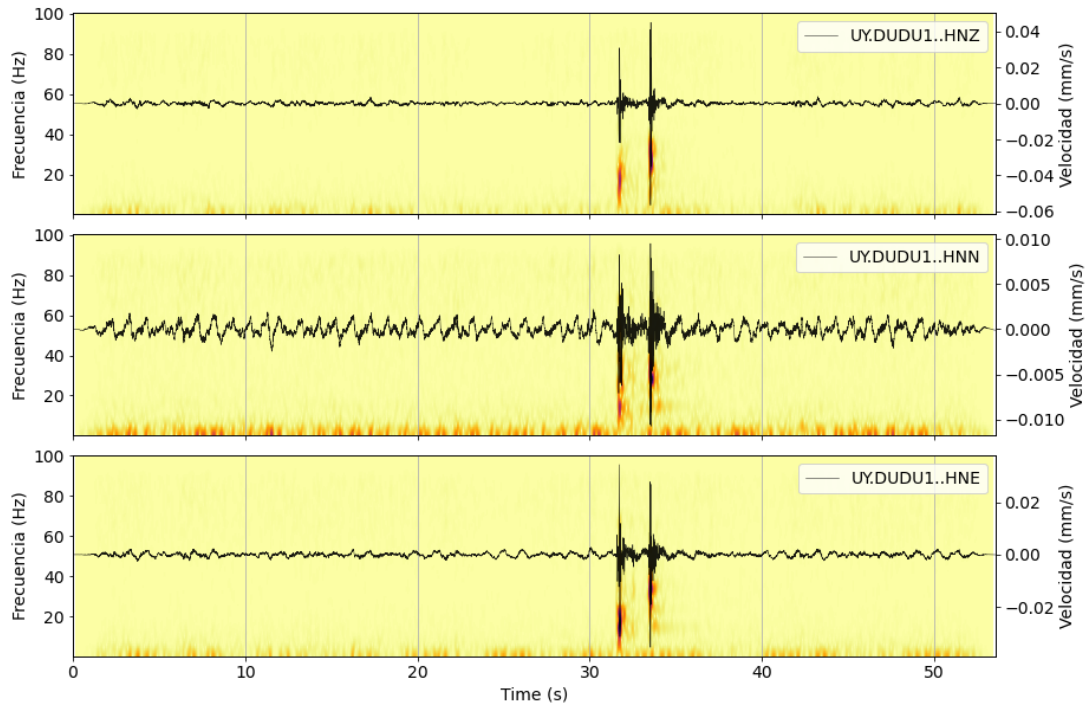
Voladura del día 29-08-22 a las 18:16



**30-08-2022**

UY.DUDU1..HNZ	0.056487236	27.276725619552945
UY.DUDU1..HNN	0.0107546635	26.945421753254426
UY.DUDU1..HNE	0.035335947	29.790934095513833

Voladura del día 30-08-22 a las 18:22

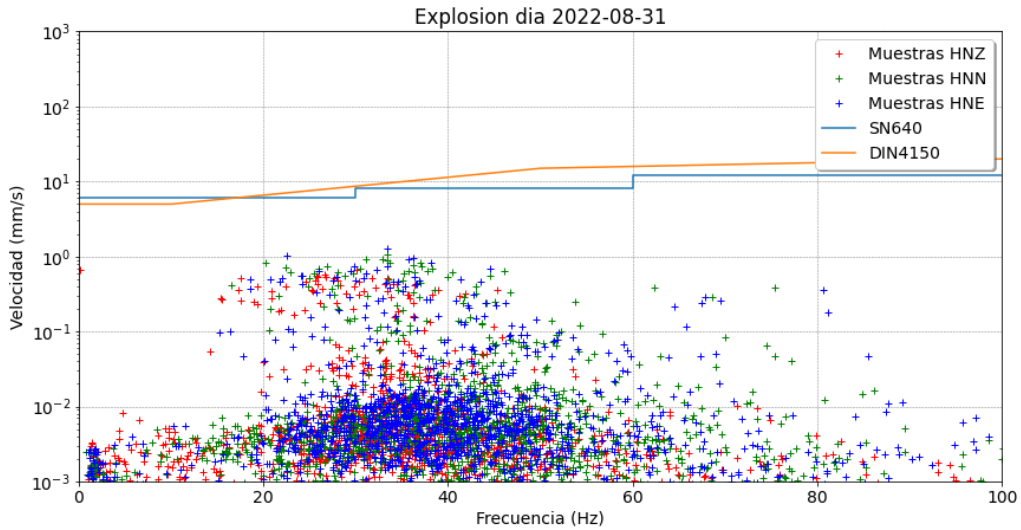
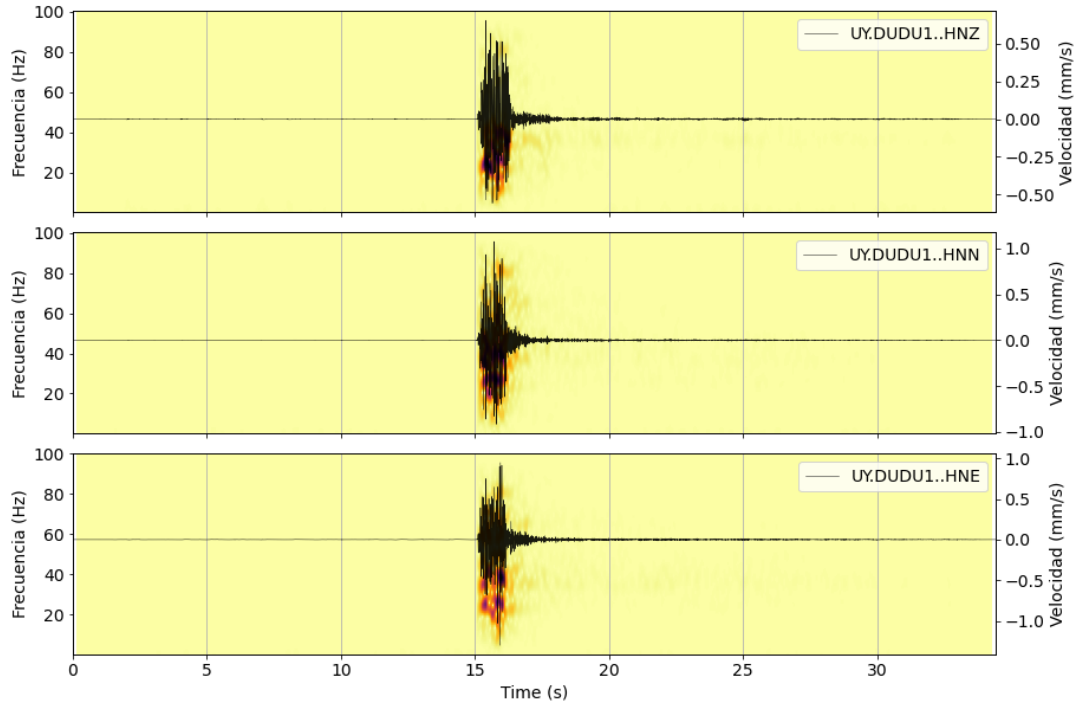




# 31-08-2022 a

UY.DUDU1..HNZ 0.6561793 30.072572787506015  
UY.DUDU1..HNN 1.076488 33.46777010593015  
UY.DUDU1..HNE 1.3000748 33.460659009705616

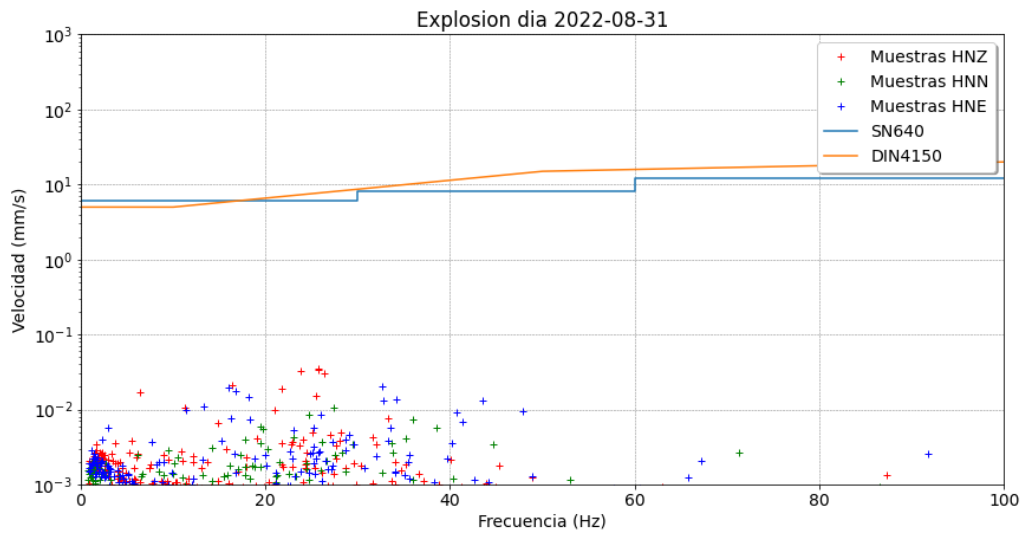
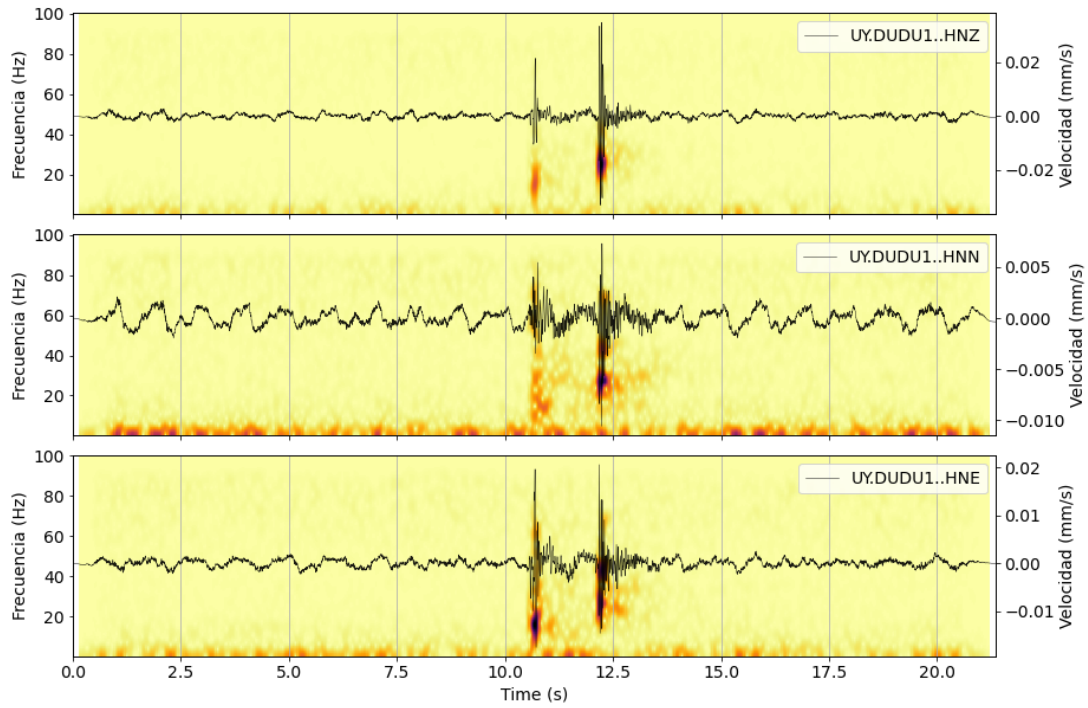
Voladura del día 31-08-22 a las 12:59



# 31-08-2022 b

UY.DUDU1..HNZ 0.034651943 25.668451487884703  
UY.DUDU1..HNN 0.01058467 27.35301115292851  
UY.DUDU1..HNE 0.02057106 32.67508407117341

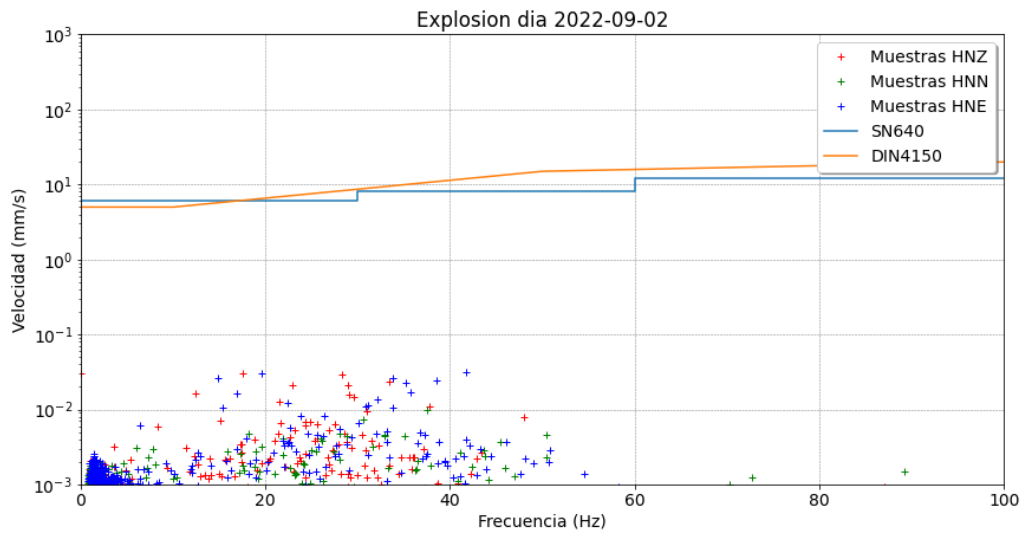
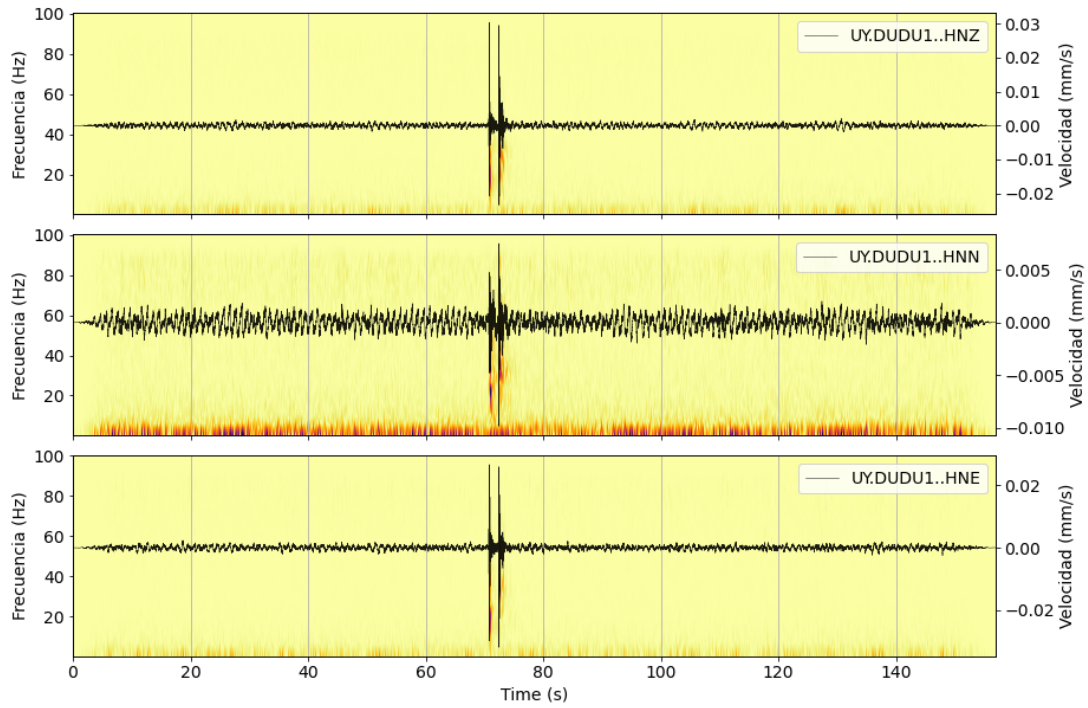
Voladura del día 31-08-22 a las 18:18



**02-09-2022**

UY.DUDU1..HNZ 0.030383516 17.582221602570147  
UY.DUDU1..HNN 0.009845416 37.55398875690517  
UY.DUDU1..HNE 0.031965148 41.77568215822755

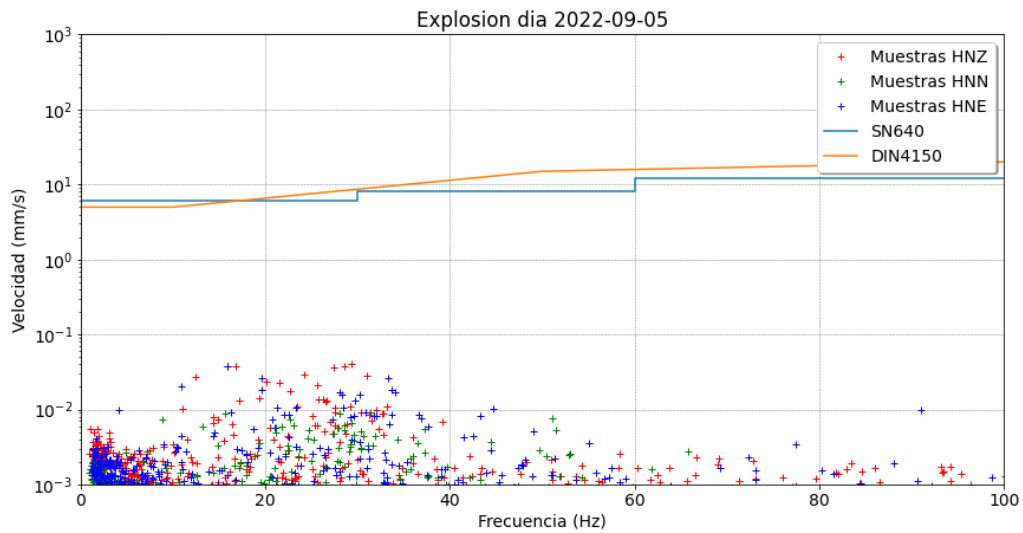
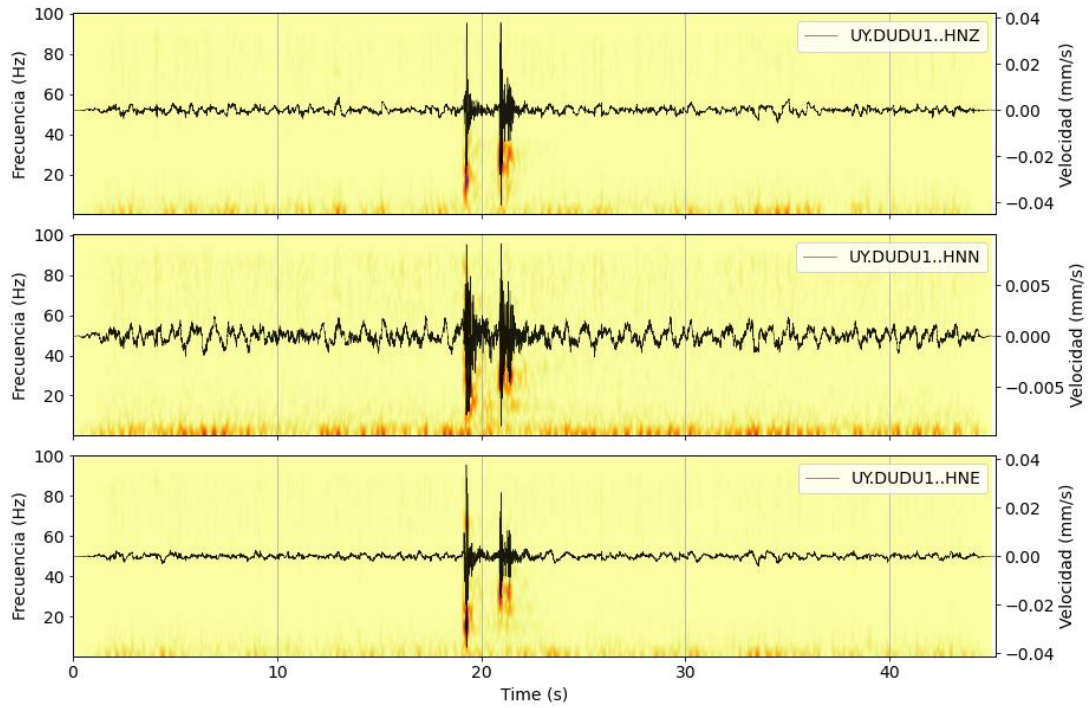
Voladura del día 02-09-22 a las 18:12



05-09-2022

UY.DUDU1..HNZ 0.041066505 29.28603532682167  
UY.DUDU1..HNN 0.009066192 31.39924639708758  
UY.DUDU1..HNE 0.037797045 15.84168611928059

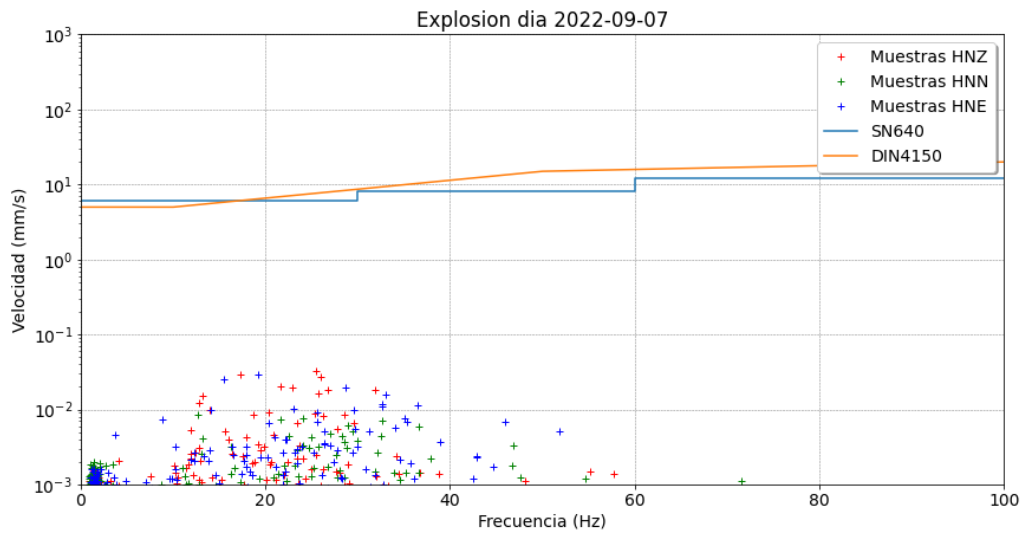
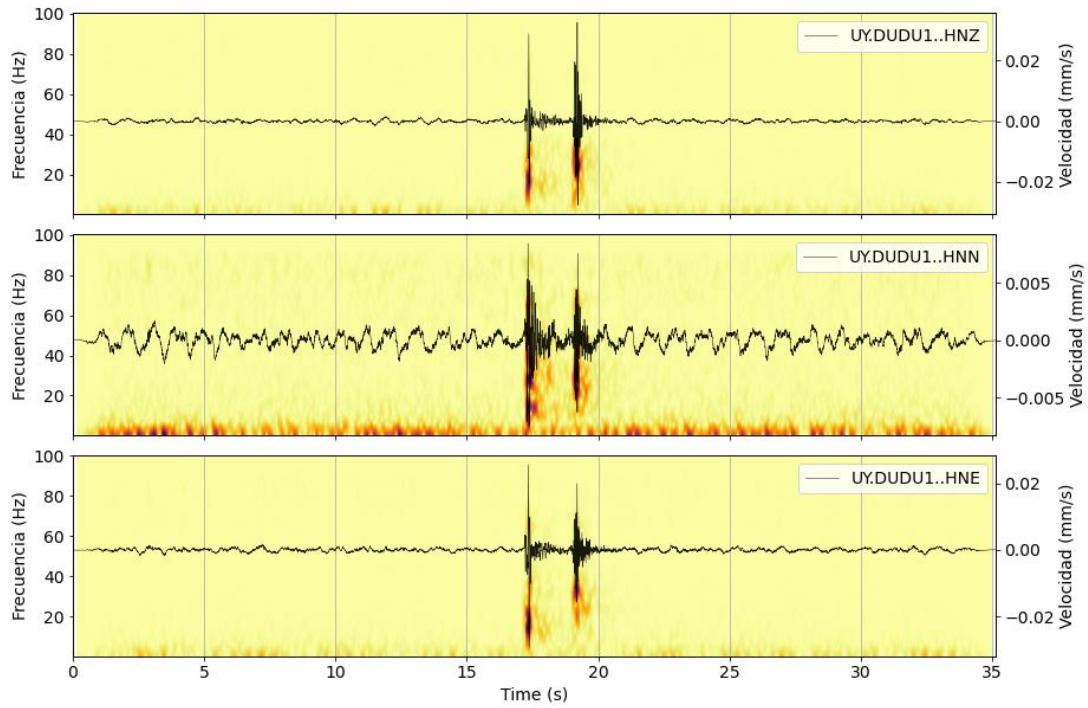
Voladura del día 05-09-22 a las 18:37



**07-09-2022**

UY.DUDU1..HNZ 0.03262786 25.45450280600163  
UY.DUDU1..HNN 0.00839311 12.722479652112614  
UY.DUDU1..HNE 0.029264756 19.16684462333751

Voladura del día 07-09-22 a las 19:11



## **Conclusiones**

Vibraciones altas pueden dañar la roca, produciendo fracturas nuevas o extendiendo, propagando y dilatando fracturas existentes, por lo que la vibración puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

El Proceso de fracturación se inicia en discontinuidades microscópicas (defectos cristalinos, anisotropía del retículo cristalino, de texturas previas, límites de grano) y se propaga a través de superficies de contacto, venciendo la resistencia elástica. Este proceso de fracturación se extiende a toda la roca.

Gran parte de la energía explosiva generada por los explosivos que no se utiliza para romper la roca genera vibraciones dentro del macizo, que produce propagación de microfisuras, generación de nuevas fisuras, etc.

Dentro del radio de 1 km se considera que existe una afectación importante, mientras que para sitios sensibles más distantes llegan a los 2 km. En relación a la afectación humana y de infraestructuras edilicias los niveles de vibración de voladura en sitios a más de 2 km de la cantera son bajos.

Existe poca información bibliográfica que describa cuantitativamente cuáles son los valores de velocidad pico en los cuales el stress al cual se someten los materiales rocosos supera los límites elástico/inelástico. Tampoco existe normativa que aborde estas prácticas. Por lo tanto, nos circunscribimos a la normativa relativa a infraestructuras edilicias, que si bien no son homologable, da un marco común en el ambiente técnico para el tratamiento de vibraciones.

Es importante señalar que el trabajo de voladura se encuentra a una distancia de ca. 380 m junto con un extensivo ritmo de trabajo hace que el macizo se vea perturbado de forma casi permanente. Todo esto produce deformaciones permanentes no elásticas del terreno

La velocidad de propagación de una vibración inducida por una explosión en un macizo rocoso varía dependiendo de muchos parámetros dentro de los cuales los más importantes son variabilidad en el entorno de un macizo rocoso y las características de la voladura (carga, malla de voladura). Dado que no se pudo acceder a las características de las voladuras, no fue posible generar un modelo predictivo de la Velocidad Pico de Partícula en el área. Sin embargo, fueron constatadas 14 voladuras, presentando una velocidad de partícula media de 0.41 mm/s y alcanzando un máximo de 1.81 en la componente Este.

Se considera que la PPV media no es elevada, y dado que el tiempo de medida es limitado no se puede descartar que esto no haya pasado antes.

Más allá que la mayor parte de las voladuras cumplen con los parámetros de la norma DIN 4150, la densidad de voladuras junto con las vibraciones continuas que producen las máquinas trituradoras, más las vibraciones que produce el transporte de los materiales pétreos, sumado al hecho que se trata del mismo cuerpo granítico sujeto a dos explotaciones mineras de naturaleza diferente es plausible suponer que exista microfracturación asociada al conjunto de vibraciones producidas por la cantera en el predio colindante..

## Referencias

- Ainalis, D.; Kaufmann, O.; Tshibangu, J.-P.; Verlinden, O.; Kouroussis, G. Modelling the Source of Blasting for the Numerical Simulation of Blast-Induced Ground Vibrations: A Review. *Rock Mech. Rock Eng.* 2016, 50, 171-193.
- Argüelles Fraga, J. Development of Numerical Models Applied to the Prediction of Vibrations Generated by Blasting; Research Report; Mining, Civil Works and Environment, Department of Mining Exploitation and Prospecting, University of Oviedo: Asturias, Spain, 2004.
- Armaghani, D.J.; Hajihassani, M.; Mohamad, E.T.; Marto, A.; Noorani, S.A. Blasting-induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization. *Arab. J. Geosci.* 2013, 7, 5383-5396.
- Crandell, F.J. 1949. *Ground Vibration Due to Blasting and Its Effect Upon Structures*; Boston Society of Civil Engineers: Boston, MA, USA,
- Dowding, C.H. *Blast Vibration Monitoring and Control*; Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1985.
- Fernández, P.R.; Rodríguez, R. Definition of safety boundaries related to ground vibrations due to blasting. In *Proceedings of the 7th Colloquia of Managers and Technicians of Cement Plants*, Málaga, Spain, 17 November 2009.
- Fernández, P.R.; Rodríguez, R.; Bascompta, M. Holistic Approach to Define the Blast Design in Quarrying. *Minerals* **2022**, 12, 191. <https://doi.org/10.3390/min12020191>
- Gonen, A. 2022. Investigation of Fault Effect on Blast-Induced Vibration. *Appl. Sci.*, 12, 2278. <https://doi.org/10.3390/app12052278>
- James J. Olson, Robert J. Willard, David E. Fogelson, and Kenneth E. Hjelmstad. 1973. *Rock damage from small charge blasting in granite*, U.S. Bureau of Mines.
- Kahriman, A. Prediction of Particle Velocity Caused by Blasting for an Infrastructure Excavation Covering Granite Bedrock. *Miner. Resour. Eng.* 2001, 10, 205-218.
- Karadogan, A. The Investigation of Establishing the National Structure Damage Criteria for the Ground Vibration Induced by Blasting. Ph.D. Thesis, Istanbul University, Istanbul, Turkey, 2008.
- Langefors, U.; Kihlstrom, B. 1976. *The Modern Technique of Rock Blasting*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA.
- López-Jimeno, C.; López-Jimeno, E.; Bermúdez, P.G. 2017. *Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras: Minería y Obras Públicas*; Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Proyectos de Ingeniería: Madrid, Spain.
- McHugh, S. 1983. Crack extension caused by internal gas pressure compared with extension caused by tensile stress. *International Journal of Fracture*, vol. 21, no. 3, pp. 163-176.
- McLaughlin, K. L., Bonner, J. L., & Barker, T. (2004). Seismic source mechanisms for quarry blasts: modelling observed Rayleigh and Love wave radiation patterns from a Texas quarry. *Geophysical Journal International*, 156(1), 79-93.
- Murmu, S.; Maheshwari, P.; Verma, H.K. Empirical and probabilistic analysis of blast-induced ground vibrations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2018, 103, 267-274.
- Nateghi, R. 2011. Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 899-908.
- Ozer, U.; Karadogan, A.; Kalayci, U.; Aksoy, M.; Keti, Z. Effects to the Motion of Vibrations Waves of Fault Planes; ISEE Symposium: Nashville, TN, USA, 2012.
- Paine A. S. and Please, C. P. 1994. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting-some analytical results," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 31, no. 6, pp. 699-706.
- Raina, A. K., Chakraborty, A. K., Ramulu, M. and Jethwa, J. L. 2000. Rock mass damage from underground blasting, a literature review, and lab- And full scale tests to estimate crack depth by ultrasonic method," *Fragblast*, vol. 4, no. 2, pp. 103-125.



- Rodríguez, R.; Bascompta, M.; Fernández, P.; Fernández, P.R. Representative-Area Approach to Define Blast-Induced Ground Vibrations–Damage Prevention Criterion Abacus. *Minerals* 2022, 12, 691. <https://doi.org/10.3390/min12060691>.
- Rodríguez, R.; Lombardía, C.; Torno, S. 2010. Prediction of the air wave due to blasting inside tunnels: Approximation to a phonometric curve. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 25, 483-489.
- Sambuelli, L. 2008. Theoretical Derivation of a Peak Particle Velocity-Distance Law for the Prediction of Vibrations from Blasting. *Rock Mech. Rock Eng.*, 42, 547-556.
- Singh, P.K.; Roy, M.P.; Paswan, R.K.; Dubey, R.K.; Drebenstedt, C. Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining. *Int. J. Rock Mech. Min.* 2015, 80, 79-88.
- Takahashi, Y.; Sasaoka, T.; Sugeng, W.; Hamanaka, A.; Shimada, H.; Saburi, T.; Kubota, S. 2018. Study on Prediction of Ground Vibration in Consideration of Damping Effect by Fragment in the Rock Mass. *J. Geosci. Environ. Prot.*, 6, 1-11.
- Toraño, J.; Ramírez-Oyanguren, P.; Rodríguez, R.; Diego, I. 2006b. Analysis of the environmental effects of ground vibrations produced by blasting in quarries. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 2006, 20, 249-266.
- Toraño, J.; Rodríguez, R.; Diego, I.; Rivas, J.M. 2006a. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction. *Comput. Geotech.* 2006, 33, 15-28.
- Vanbrabant, F.; Chacón, E.P.; Quiñones, L.A. P and S Mach. 2002. Waves Generated by the Detonation of a Cylindrical Explosive Charge? Experiments and Simulations. *Fragblast*, 6, 21-35.
- Villaescusa, E. Onederra, I. and Scott, C. 2004. Blast induced damage and dynamic behaviour of hangingwalls in bench stoping," *Fragblast*, vol. 8, no. 1, pp. 23-40.
- Wang, Y., Wang, S., Zhao, Y., Guo, P., Liu, Y., & Cao, P. (2018). Blast induced crack propagation and damage accumulation in rock mass containing initial damage. *Shock and Vibration*, 2018.
- Yin, Z.-Q.; Hu, Z.-X.; Wei, Z.-D.; Zhao, G.-M.; Hai-feng, M.; Zhang, Z.; Feng, R.-M. Assessment of Blasting-Induced Ground Vibration in an Open-Pit Mine under Different Rock Properties. *Adv. Civ. Eng.* 2018, 2018, 4603687.