



IMPORTANCIA EN LA ESTIMACIÓN DE MECANISMOS FUENTE PARA EL MONITOREO SÍSMICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA.

Caso: Minera Juanicipio

Presenta: Ing. Marlen Santa Cruz Guevara
Departamento de Geomecánica



- 1. Introducción
- 2. Generalidades
 - 2.1. Geometría del yacimiento
- 3. Marco teórico referencial
 - 3.1 ¿Qué es la sismicidad?
 - 3.2 Mecanismos de fuente
- 4. Metodología
 - 4.1 Nuestro sistema
 - 4.2 Alcances del sistema sísmico
 - 4.2.1 Análisis de sensibilidad
 - 4.2.2 Limitaciones del sistema sísmico
- 5. Resultados
 - 5.1 Estimación de mecanismos fuente.
 - 5.2 Evidencias en obra directa.
 - 5.3 Plan de remediación.
 - 5.4 Protocolo de monitoreo microsísmico
- 6. Conclusiones
- 7. Referencias bibliográficas

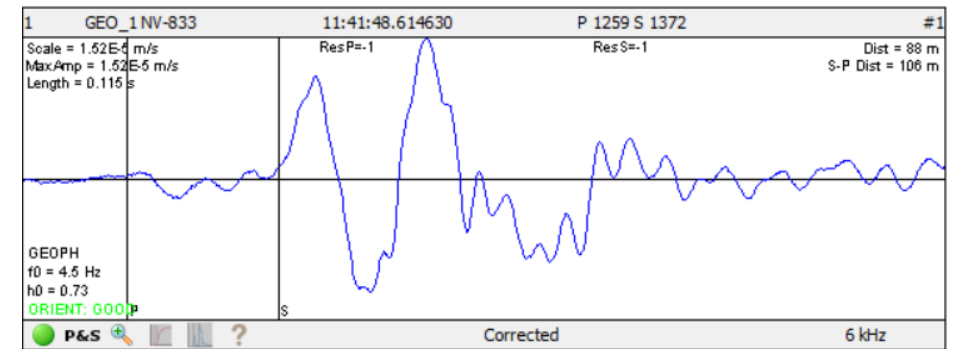


Figura 1. Registro sísmico

1. Introducción

El objetivo general de este trabajo es demostrar la aplicación de la estimación de mecanismos de fuente en eventos microsísmicos ocurridos en Minera Juanicipio, con el propósito de integrar información geomecánica-sísmica e identificar zonas potenciales de inestabilidad y contribuir a la formulación de estrategias operacionales orientadas a la gestión del riesgo y la seguridad en minería subterránea.

- ✓ Identificar zonas con potencial de inestabilidad estructural, a partir de la integración de la información sísmica y geomecánica, para apoyar la toma de decisiones.
- ✓ Diseñar un protocolo de monitoreo sísmico orientado a la gestión del riesgo geotécnico, que permita establecer criterios de alerta, acciones preventivas y medidas de respuesta para mejorar la seguridad operacional.
- ✓ Realizar diseños de fortificación de reforzamiento adecuado a las necesidades de cada sitio.

2. Generalidades

2.1 Geometría del Yacimiento

Minera Juanicipio, ubicada a 6 Km al SW de la Cd. de Fresnillo, está dominada por la mineralización económica de vetas epitermales de sulfuración intermedia tipo Bonanza contiene valores de Au-Ag y hacia su porción inferior muestra zoneamiento incrementando los valores de Pb-Zn.

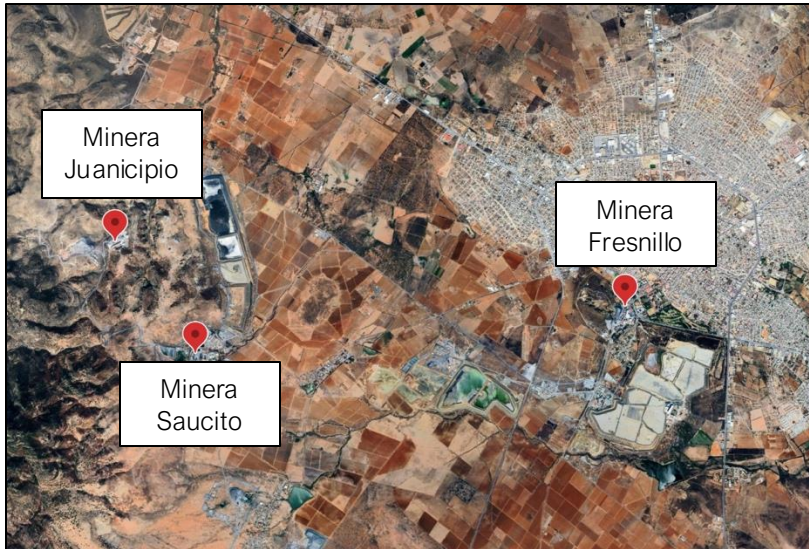


Figura 2. Distrito Fresnillo
Imagen tomada de Google earth

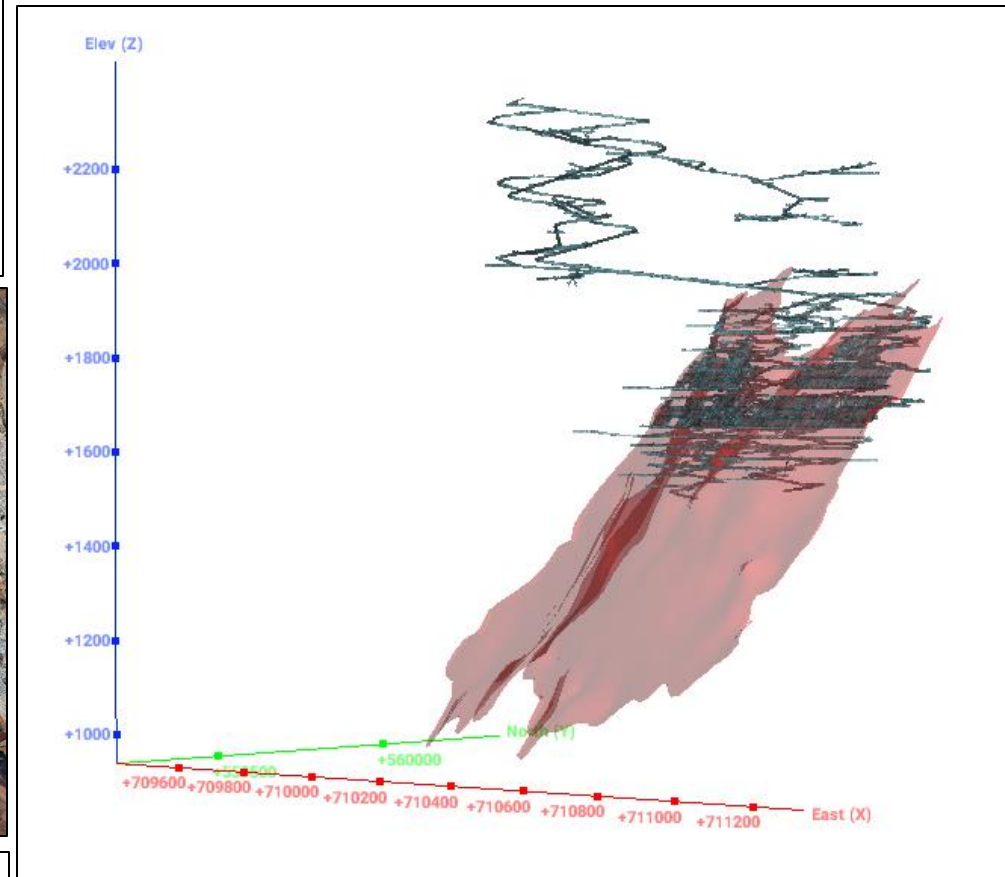


Figura 3. UNIDAD MINERA JUANICIPIO
Modelo de Veta Valdecañas

- La vetas conocidas forman parte de una serie de lineamientos de orientación NW que tipifican el patrón estructural del Distrito Fresnillo.
- La Veta Valdecañas esta definida como una estructura a lo largo de 1,500 m con rumbo N 60° W y buzamiento al S con 50° en promedio.
- Presenta espesores reales que varían desde 0.50m hasta 24.0 m con promedio de 6.50m.
- Está detectada desde los 400m hasta 1,500m de profundidad respecto a la superficie.

3. Marco teórico referencial

3.1 ¿Qué es la sismicidad?

Sismicidad inducida

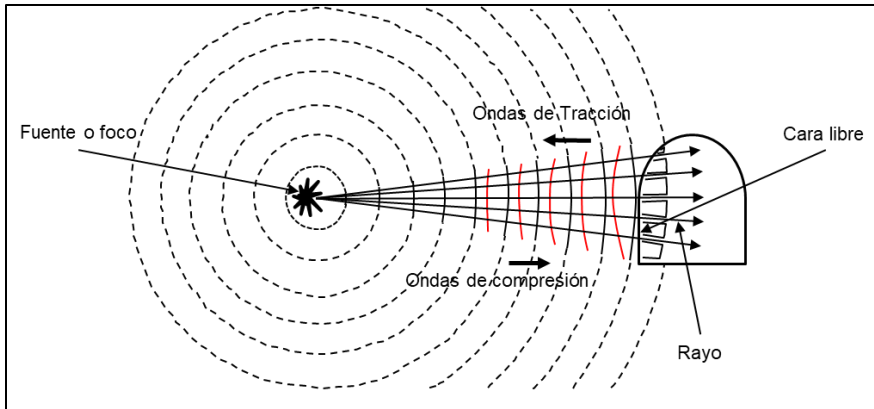


Figura 4. Ejemplo de sismicidad inducida mecanismo de estallido de roca

Tomado de: <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/mitigacion-del-estallido-de-roca-en-excavaciones-subterranas/>

Comúnmente descrita como la ocurrencia de sismos causados por fallas de rocas, como resultado de cambio de esfuerzos en la roca cercana a las excavaciones de la mina.

Estos eventos son causados por cambios en el esfuerzo cortante o disminuciones del esfuerzo normal que actúa en los planos de falla. (Gibowicz y Kijko, 2013).

Sismicidad tectónica

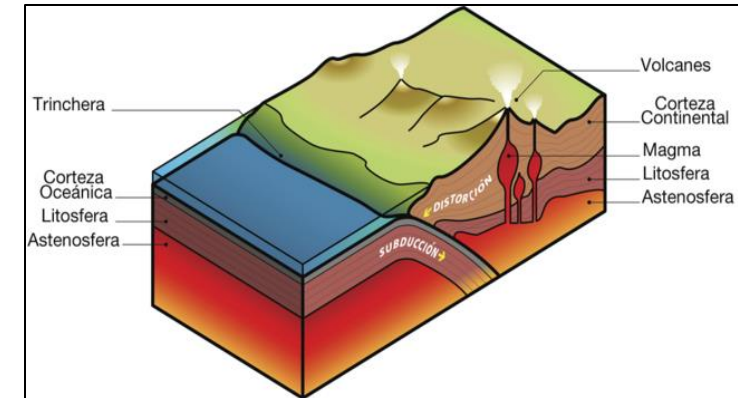
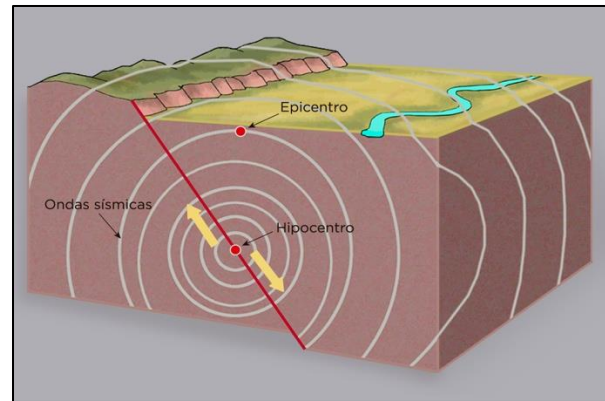


Figura 5. Ejemplo de sismicidad tectónica

Tomado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41494614>

De acuerdo con el servicio sismológico Nacional, un sismo es un rompimiento repentino de las rocas en el interior de la Tierra. Esta liberación repentina de energía se propaga en forma de ondas que provocan el movimiento del terreno.

Estos eventos son principalmente causados por el movimiento de las placas tectónicas, también pudiendo ser por el deslizamiento de un bloque de corteza terrestre con respecto a otro, siendo este conjunto lo que suele denominarse falla.

3. Marco teórico referencial

3.2 Mecanismos de fuente

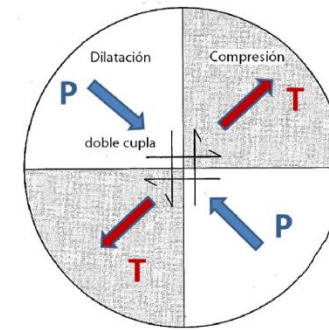
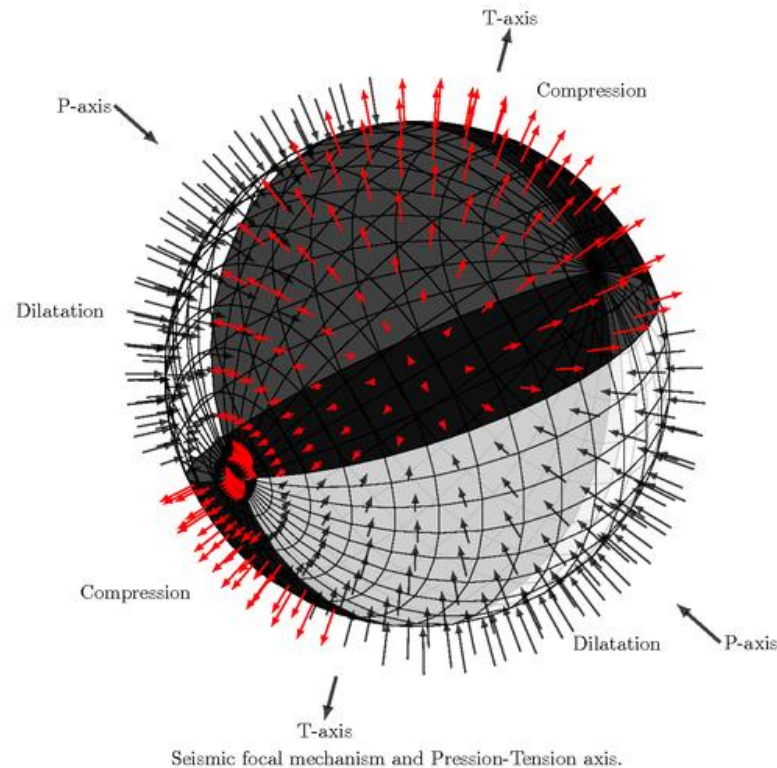
Mecanismos de fuente = Tensor de momento = Representa la fuente de un evento sísmico



Deformación en el punto de origen que genera las ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se propagan hasta llegar a la superficie, reflejando en la misma, el patrón de radiación de la fuente.

Observando este patrón en las diversas estaciones sísmicas podemos conocer el mecanismo que tuvo lugar en la fuente.



Los mecanismos focales son la orientación y tipo de movimiento en la fuente de un evento sísmico.

Figura 6. Mecanismo focal sísmico en 3D
Tomado de: <https://texample.net/seismic-focal-mechanism-in-3d-view/>

3. Marco teórico referencial

3.2 Mecanismos de fuente

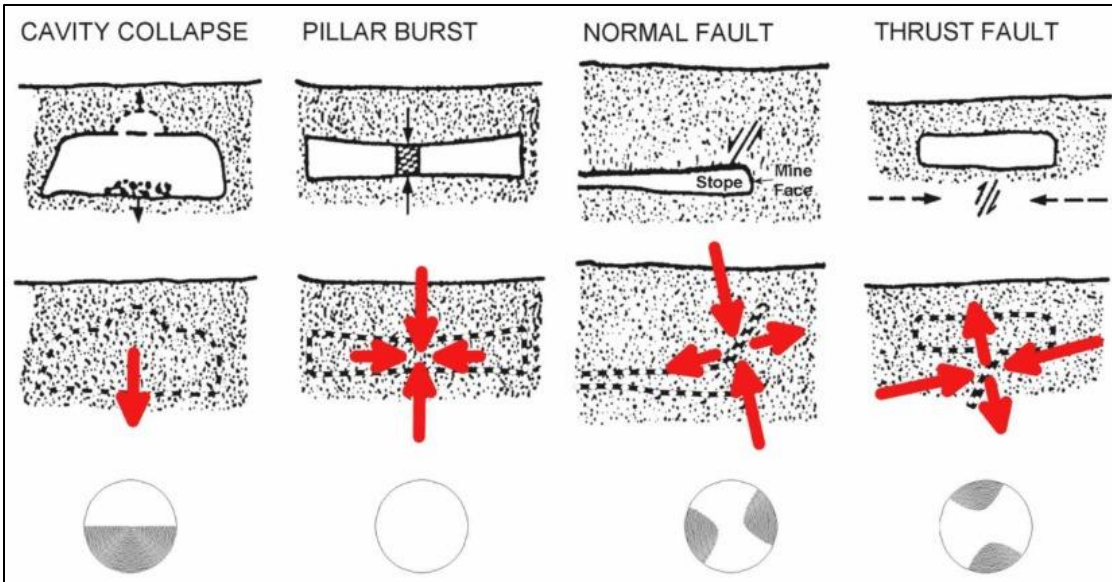


Figura 7. Diagrama esquemático de seis posibles formas en que pueden ocurrir microsismos inducidos. [Tomado de Hasegawa et al. (1989, Fig. 3)]

Formas de falla en sismicidad inducida:

- (A) Colapso de cavidad
 - (B) Estallido de pilar
 - (C) Falla tensional
 - (D) Falla normal
 - (E) Falla inversa
 - (F) Fallamiento inverso somero (casi horizontal)
- [Tomado de Hasegawa et al. (1989)]

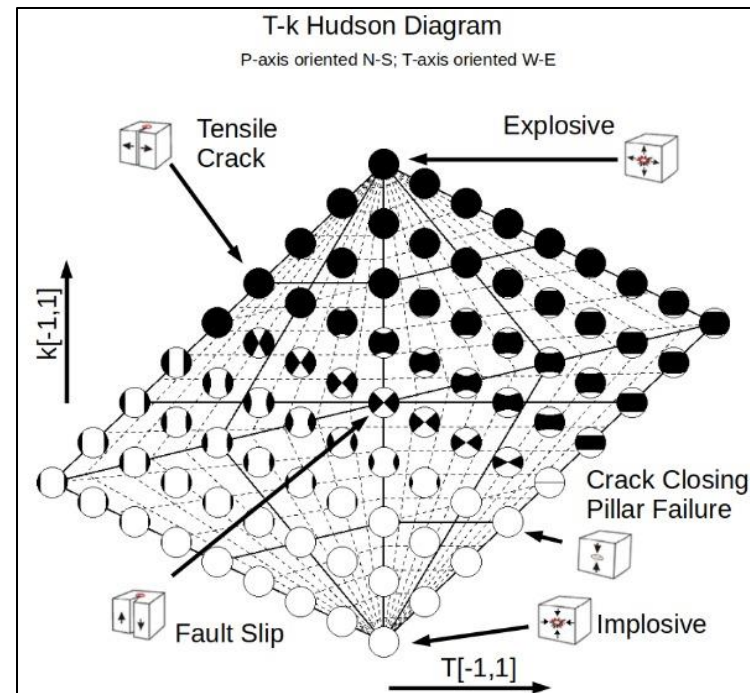


Figura 8. Clasificaciones de acuerdo al diagrama de Hudson
Tomado de: IMS

4. Metodología

4.1 Nuestro sistema

Nuestro sistema: Minera Juanicipio

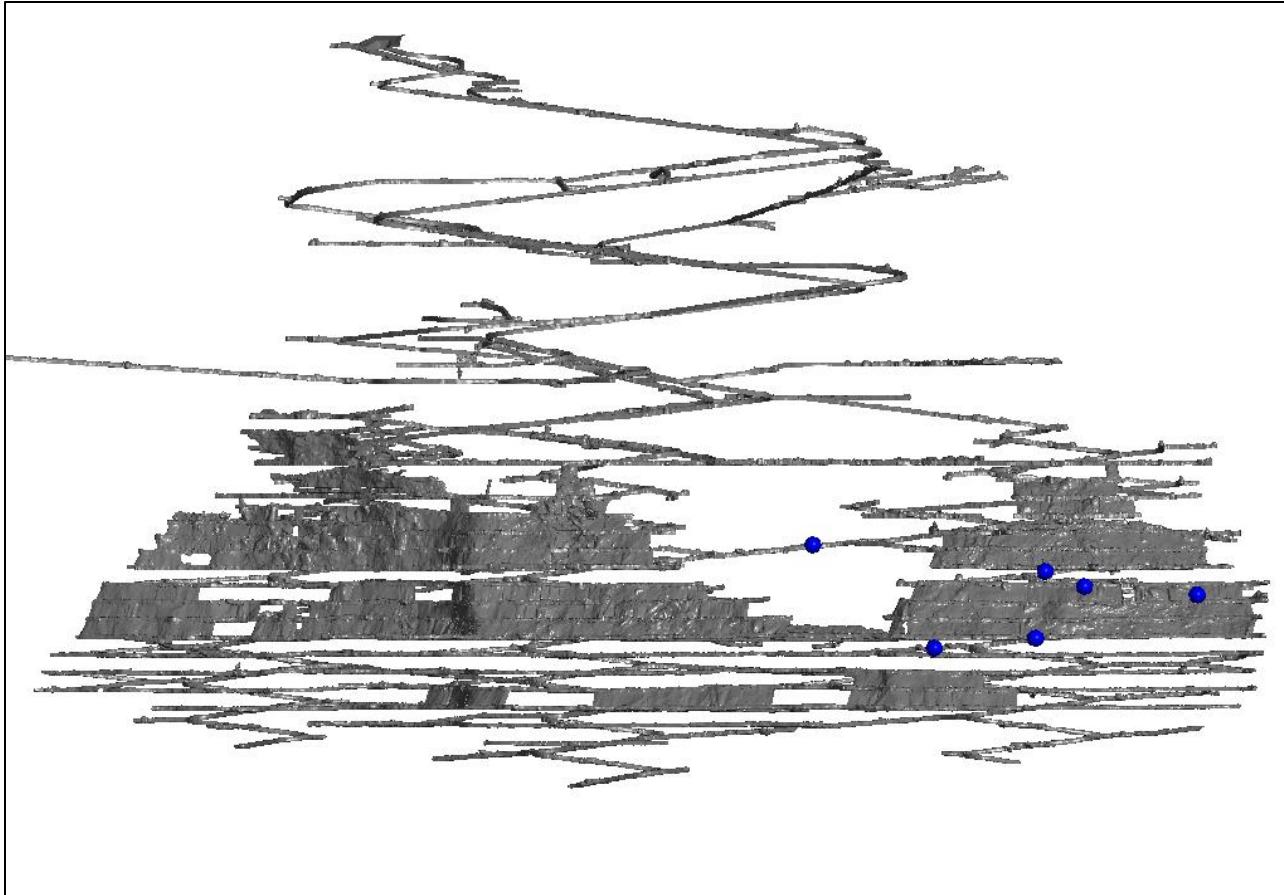


Figura 9. Ubicación espacial de los sensores

Sistema de monitoreo
que cuenta con:
1 estación sísmica
6 geófonos
 3 Uniaxiales
 3 Triaxiales

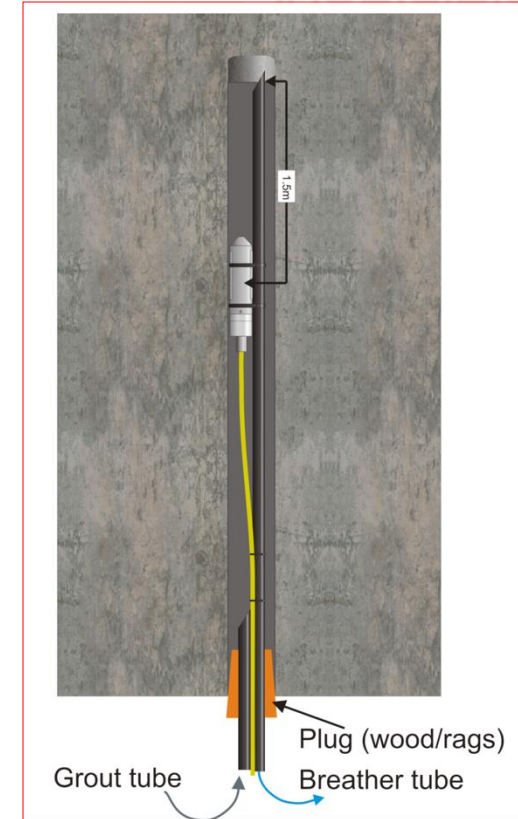


Figura 10. Esquema de geófono

4. Metodología

4.2 Alcances del sistema sísmico

4.2.1 Análisis de sensibilidad

Magnitud mínima detectable [Mw]

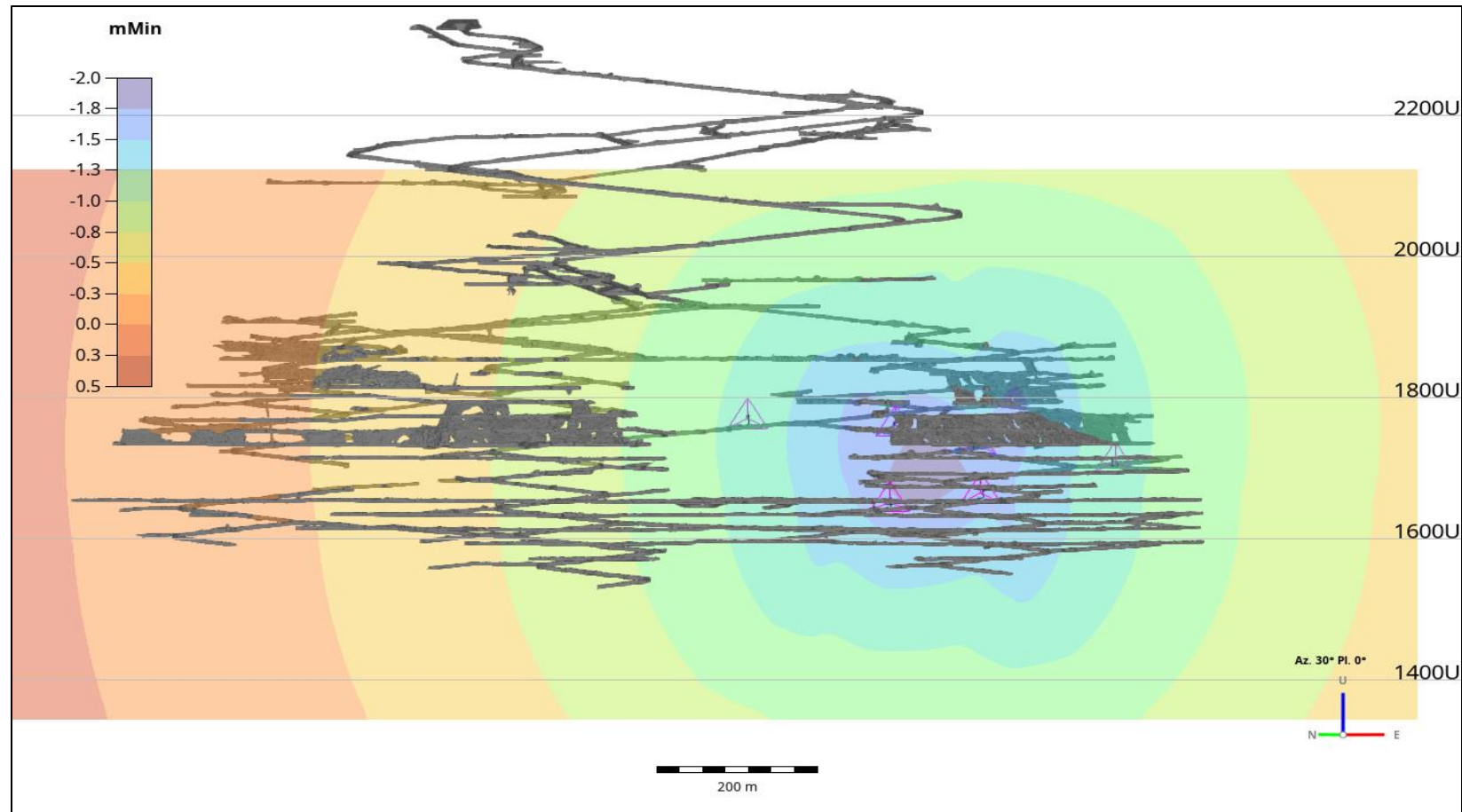


Figura 11. Magnitud mínima detectable [Mw]. Vista Juanicipio

4. Metodología

4.2 Alcances del sistema sísmico

4.2.2 Análisis de sensibilidad

Error en la localización [m]

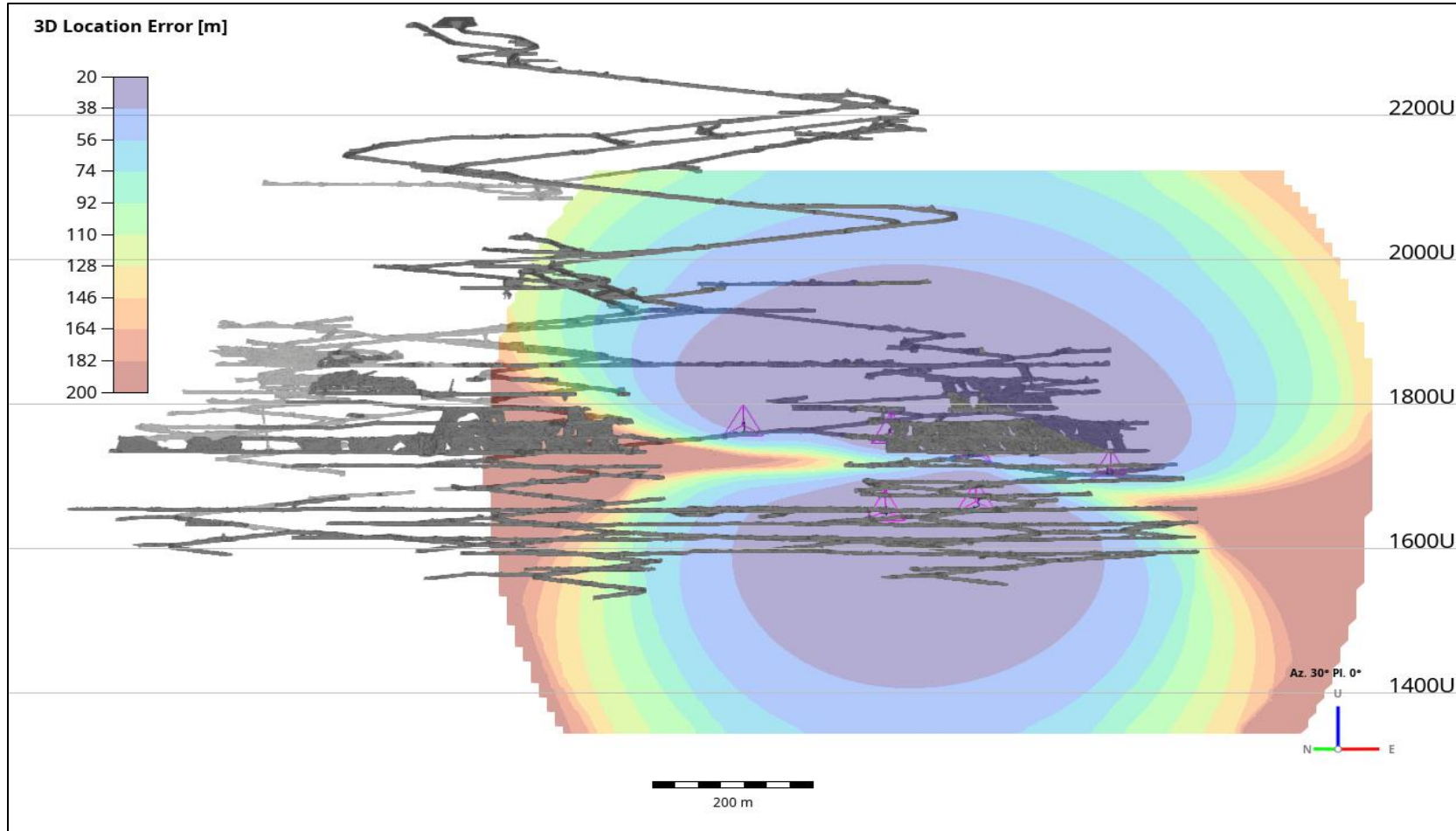


Figura 12. Magnitud mínima detectable [Mw]. Vista Juanicipio

4. Metodología

4.2 Alcances del sistema sísmico

4.2.3. Esquema de expansión

Esquema de expansión Fase 1

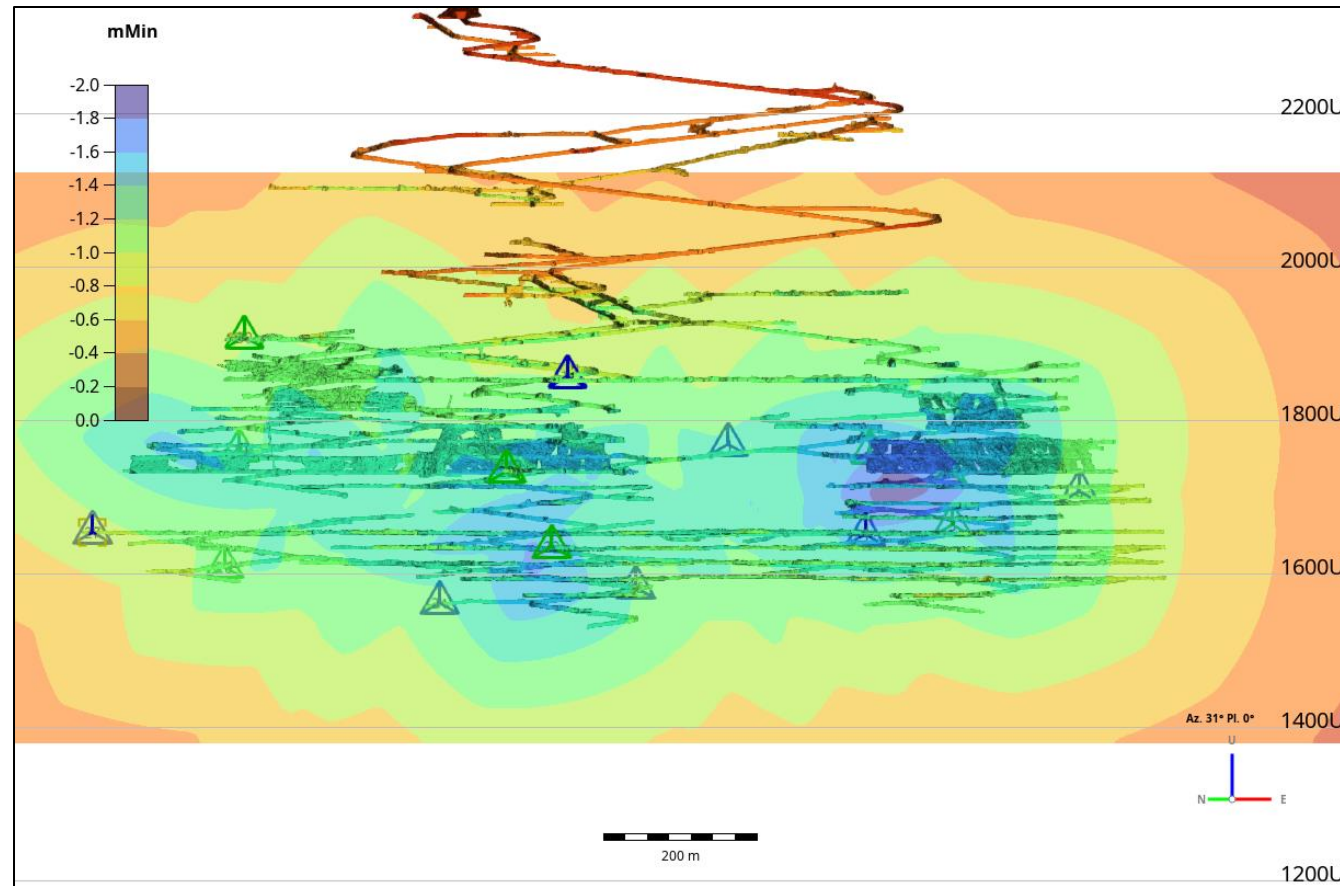


Figura 13. Magnitud mínima detectable [Mw]. Vista Juanicipio

4. Metodología

4.2 Alcances del sistema sísmico

4.2.2 Limitaciones del sistema sísmico

¿Qué necesito para poder estimar mecanismos fuente?

Limitaciones para la estimación de mecanismos de fuente:

- 1.- Buena cobertura (evento rodeado de geófonos)
- 2.- Buena calidad de datos
 - 2.1 Buena instalación de los sensores sin factores de ruido como eléctrico y/o mecánico.
 - 2.2 Señal del evento sin ruido, o que la señal sea más grande que el ruido.

Figura 14. Evento rodeado de geófonos

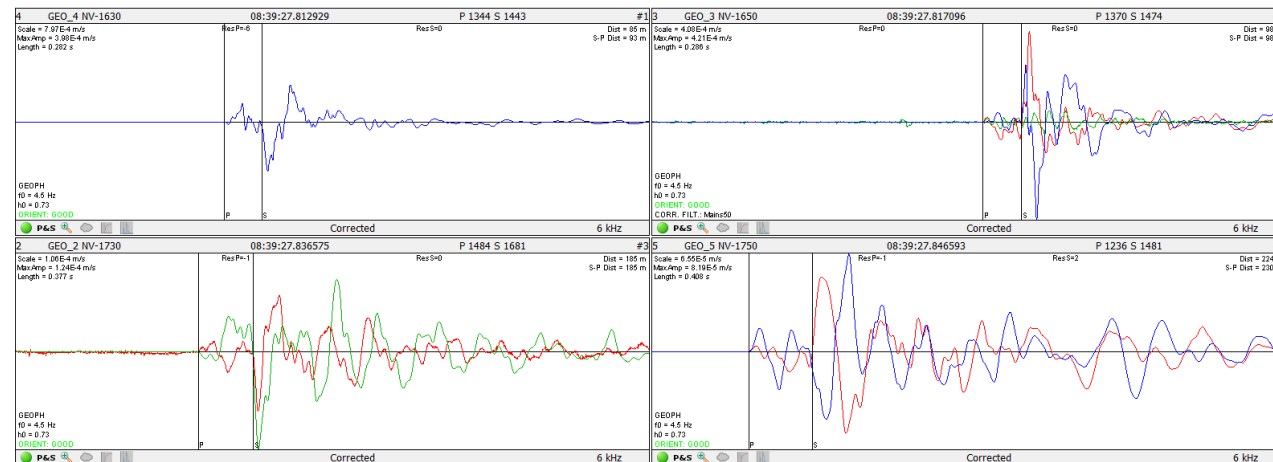
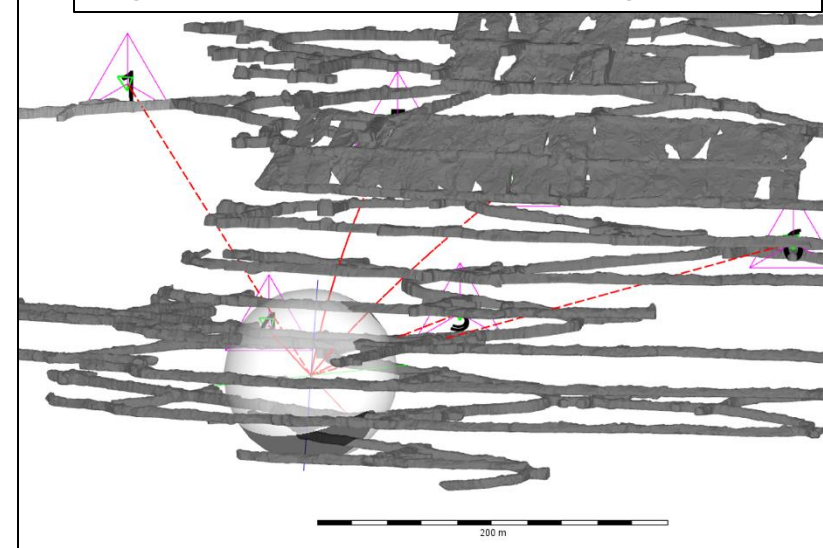


Figura 15. Registro sísmico

5. Resultados

5.1 Estimación de mecanismos fuente

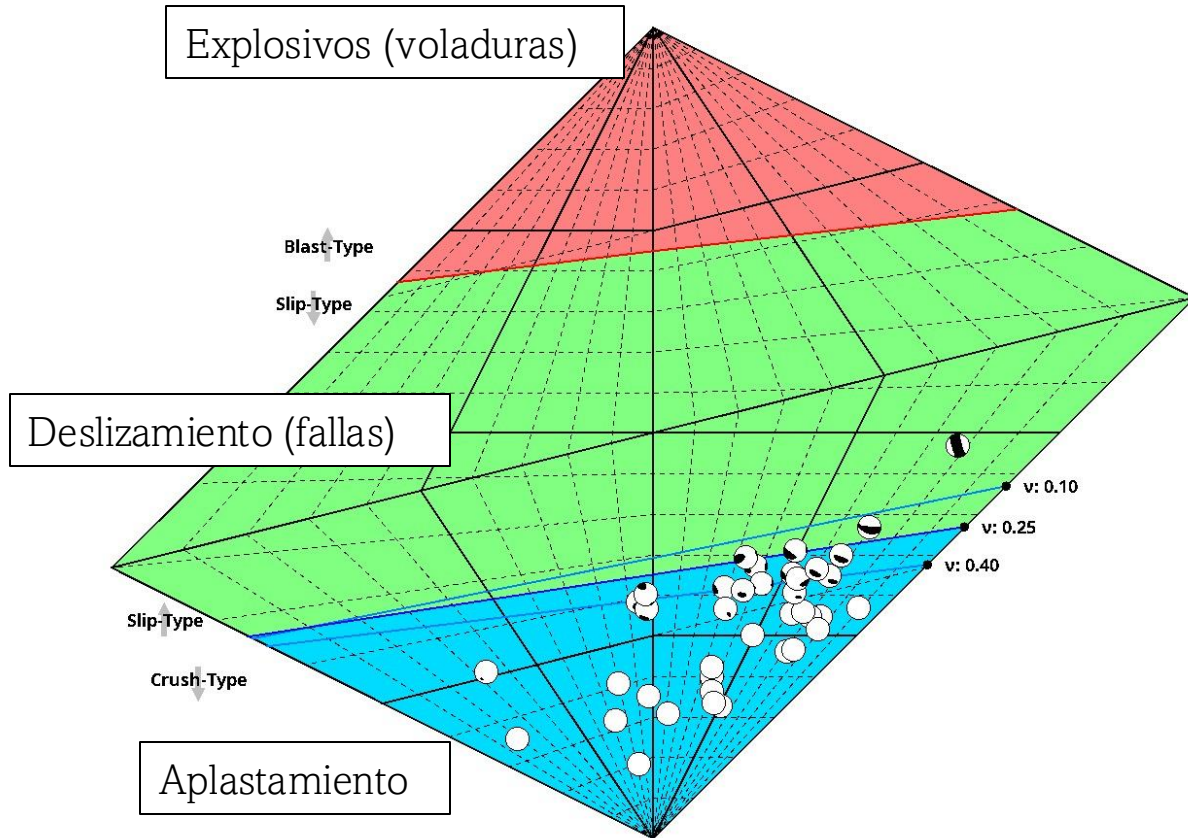


Figura 16. Mecanismos de fuente identificados en Juanicipio
Tomado de: IMS

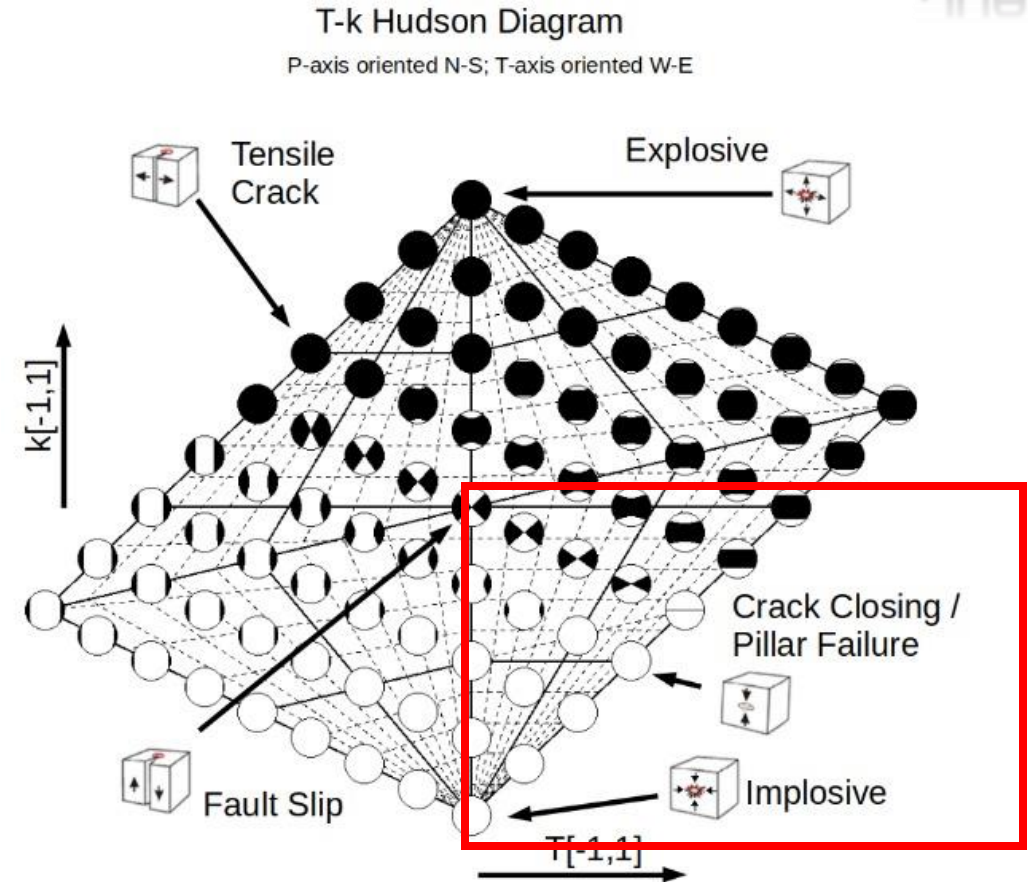


Figura 17. Clasificaciones de acuerdo al diagrama de Hudson
Tomado de: IMS

5. Resultados

5.1 Estimación de mecanismos fuente

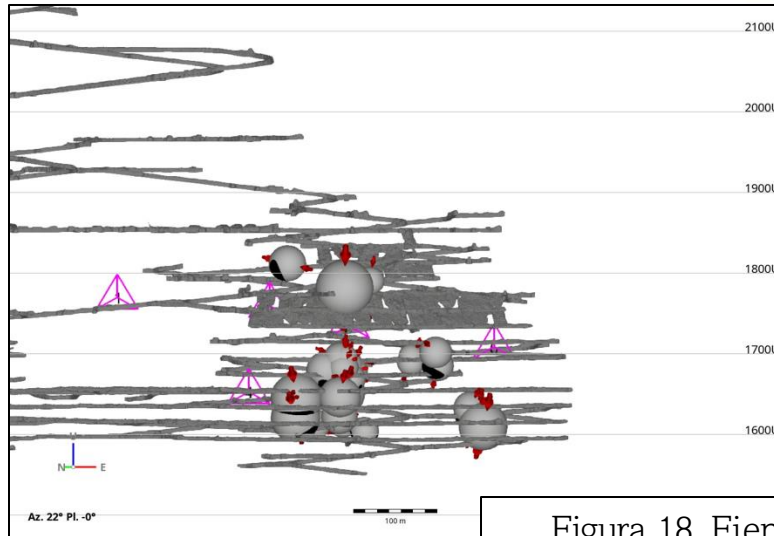


Figura 18. Ejemplo de mecanismos de falla identificados.

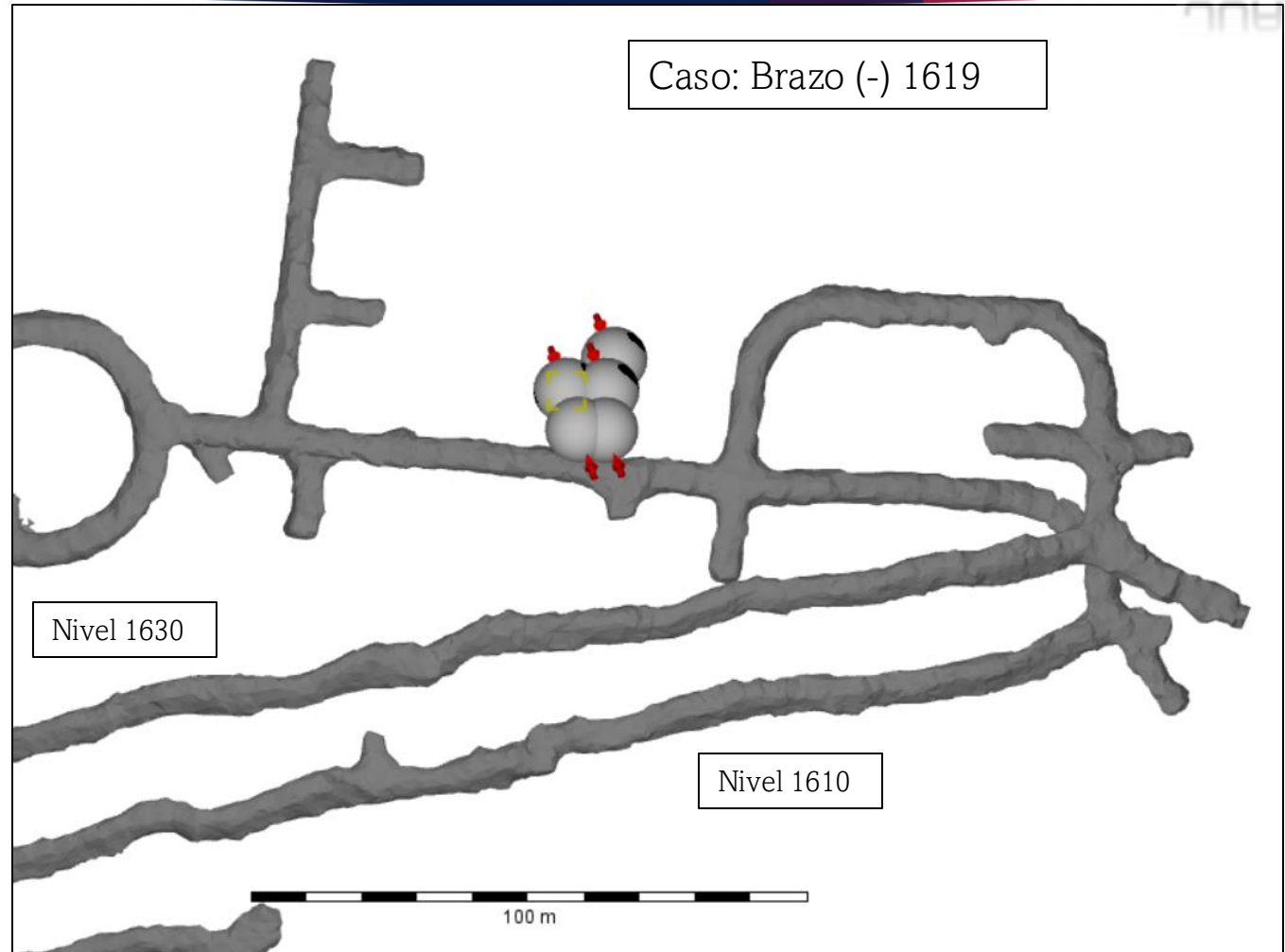
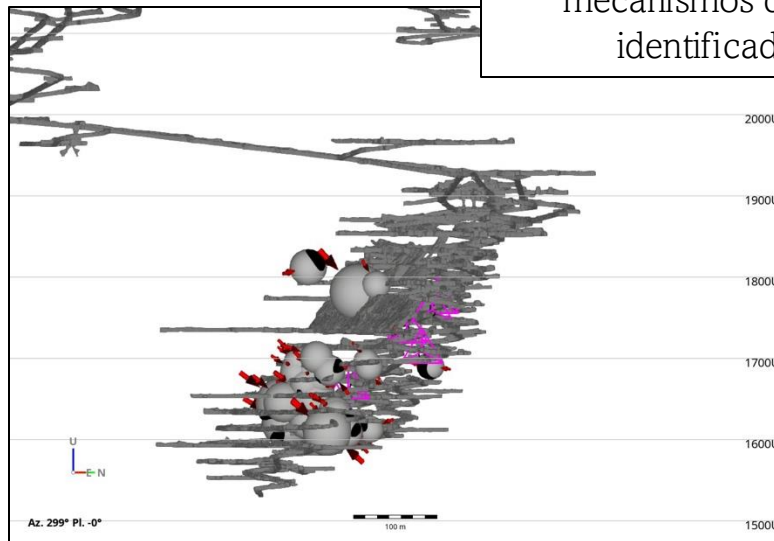


Figura 19. Ejemplo de mecanismos de falla identificados en obra directa

5. Resultados

5.2 Evidencias en obra directa

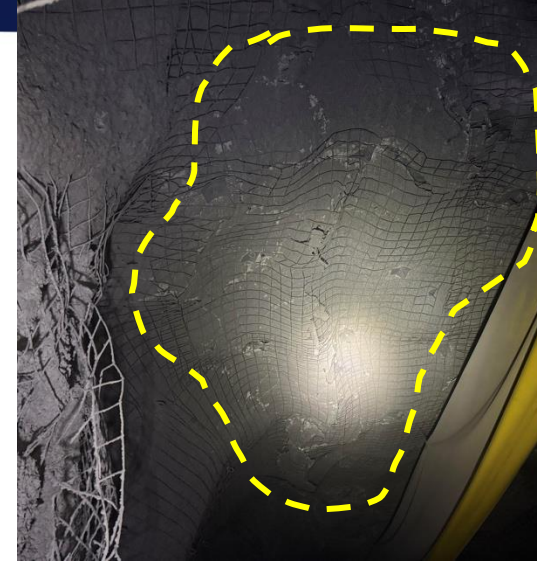
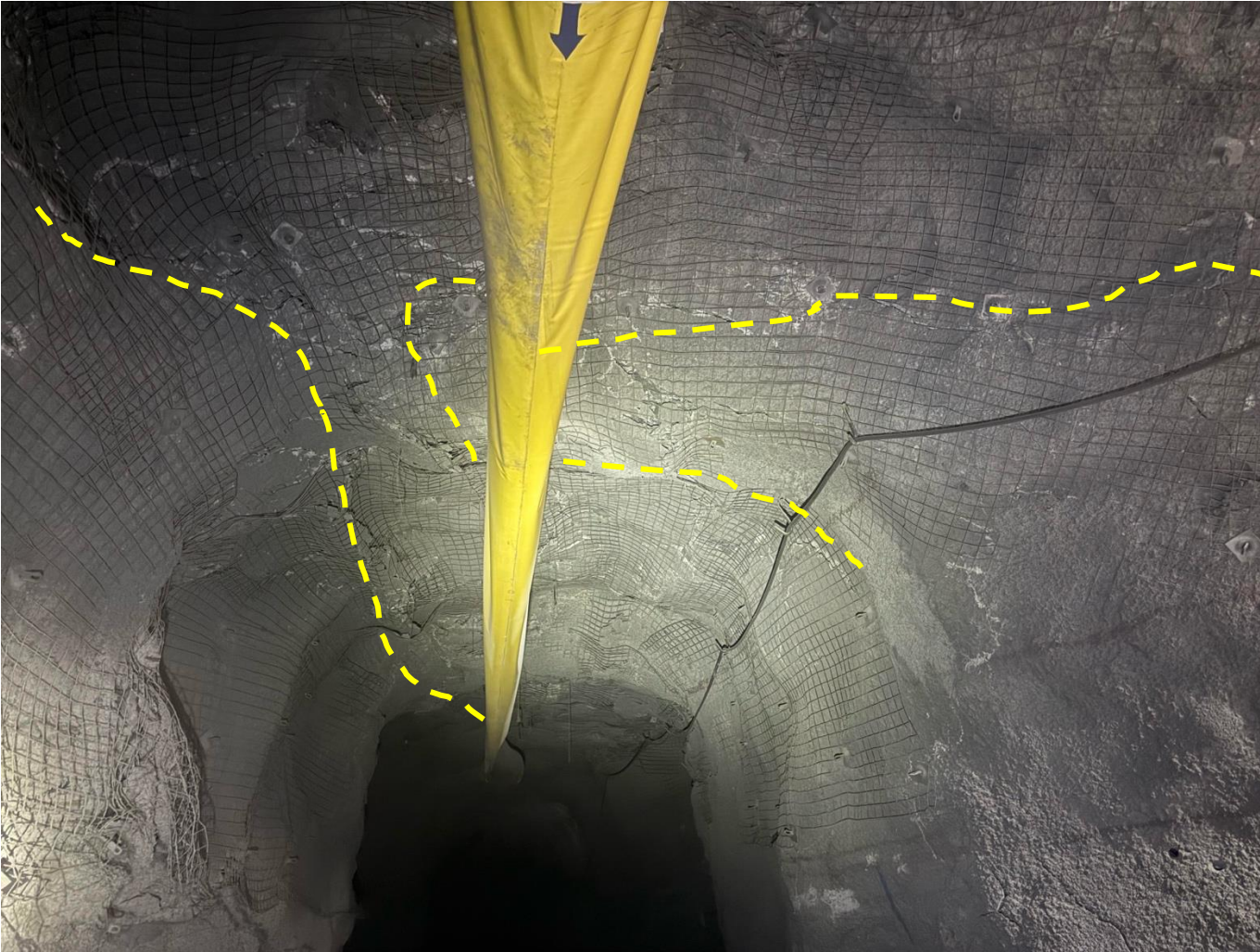
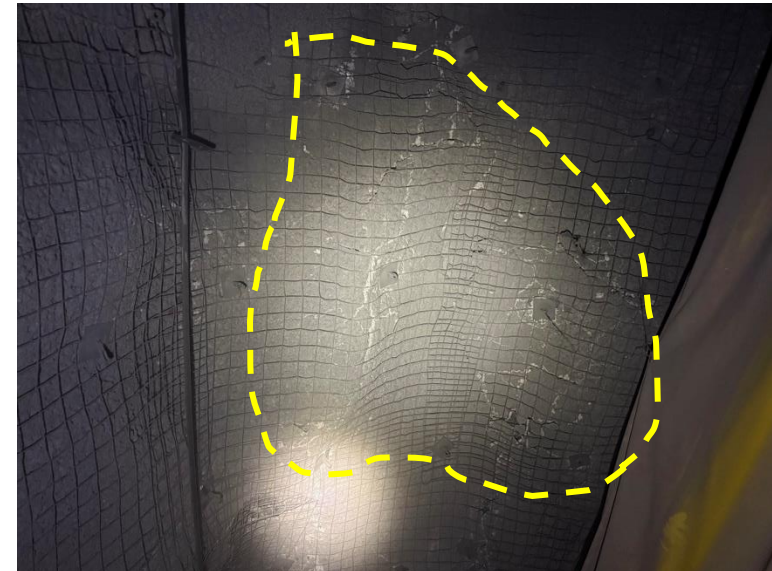


Figura 20. Evidencias en obra directa donde se tiene identificado mecanismo de falla tipo “aplastamiento”.



5. Resultados

5.3 Plan de remediación

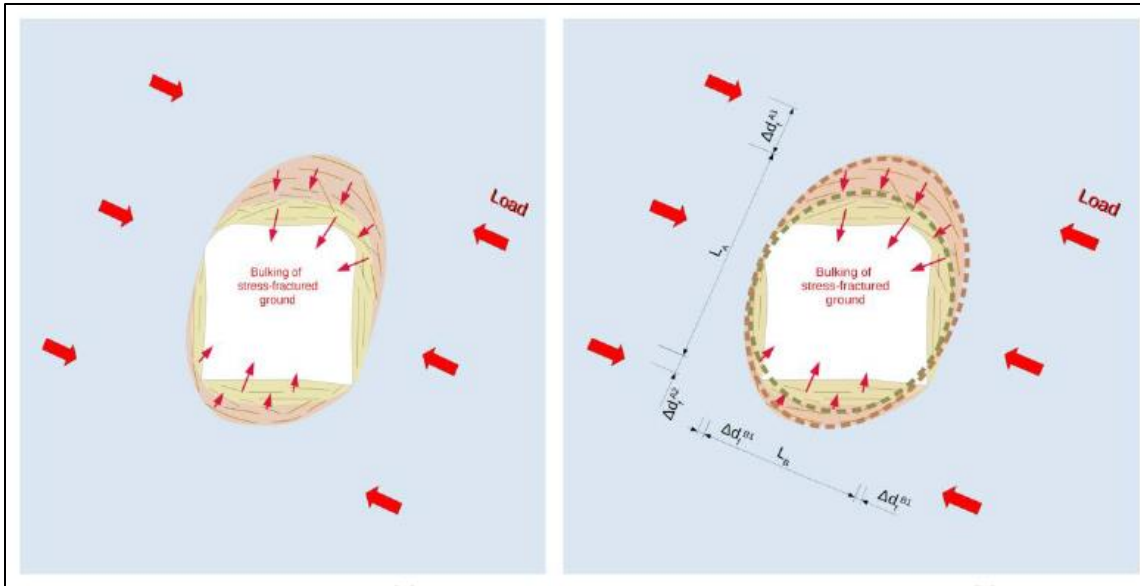


Figura 21 (a) Modelo conceptual de fracturación alrededor de un túnel;
(b) Aproximación de un túnel y su zona de daño por cavidades Kaiser,
P. K., & Malovichko, D. A. (2022)

$$M_0 = 2[(1-\nu)/(1-2\nu)] \sigma_{\max} L_3 D_A \Delta d_f^A,$$

Ecuación 1. Fórmula para el momento escalar

Donde:

σ : Esfuerzo principal máximo

Δd_f^A : Profundidad de ruptura por deformación

ν : Coeficiente de Poisson

L_3 : Longitud estimada del daño en metros.

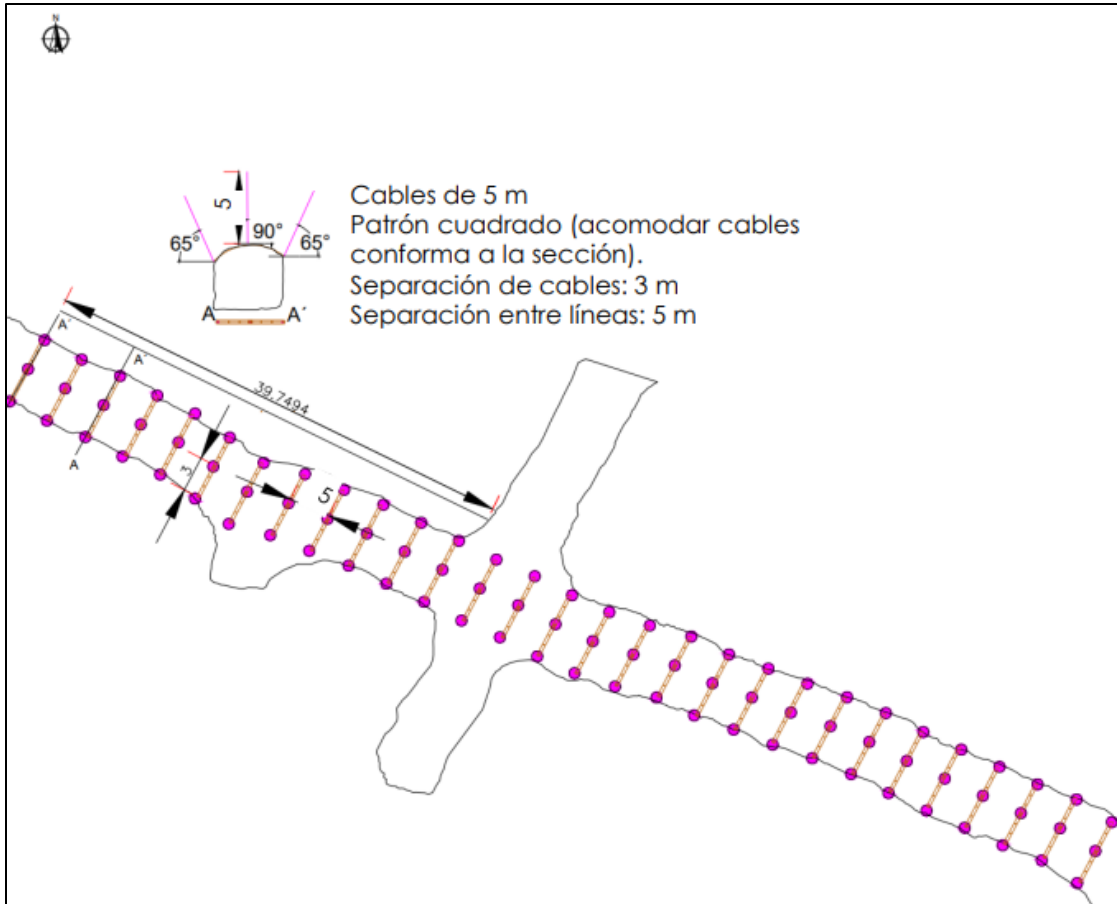
L_A : Longitud de la excavación perpendicular a la dirección de esfuerzo principal.

M_0 : Momento sísmico escalar (energía total liberada durante el evento)

Se consideró un evento magnitud 1.1, despejando Δd_f^A , y utilizando valores conocidos previamente de la roca encajonante para la obtención valor del coeficiente de Poisson y estimación de esfuerzo, se realizó una aproximación de la profundidad de ruptura obteniendo un valor de **1.6 metros**.

5. Resultados

5.3 Plan de remediación



De acuerdo con Moss y Kaiser (2021), esto lleva a dos alternativas prácticas:

1. Diseñar el sostenimiento en todas las ubicaciones para un alto FS previo al evento, de modo que se puedan cubrir las consecuencias de la demanda de desplazamiento.
2. Adoptar un programa de PSM (Mantenimiento preventivo de sostenimiento) para mantener estratégicamente el FS "instalado" agregando capacidad de sostenimiento suplementario.

Figura 22. Plantilla de cables para remediación zona deformada

5. Resultados

5.2 Protocolo de monitoreo microsísmico

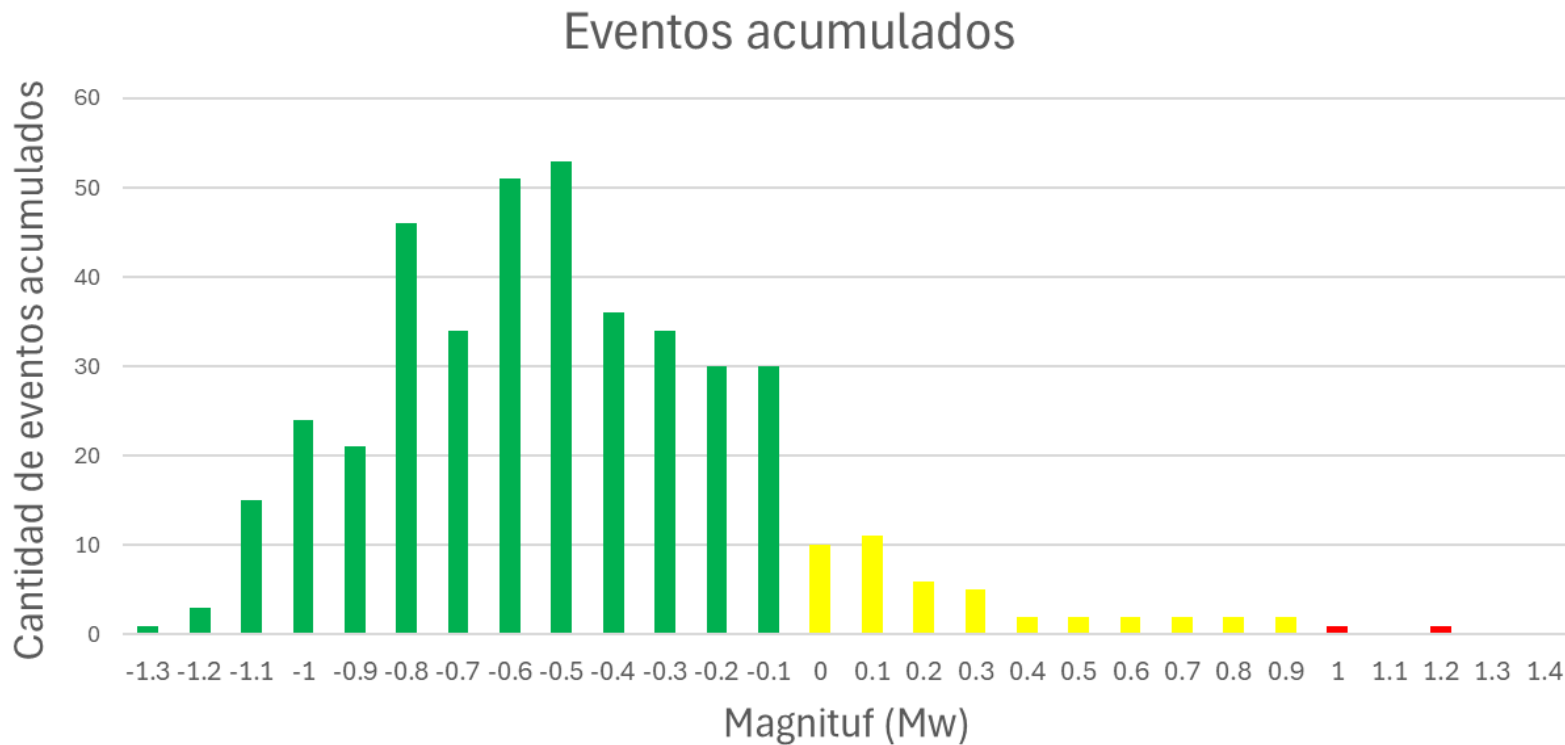


Figura 23. Gráfica de eventos acumulados en Minera Juanicipio, historial con corte al 30 de Mayo 2025.

Total 424 eventos

Total 32 eventos con mecanismo de falla identificado

CLASIFICACIÓN	
MAGNITUD	CLASIFICACIÓN
<0,0 (Valores negativos)	MUY BAJO
>0,0 (Valores positivos)	BAJOS/MEDIOS
>1	FUERTES

Figura 24. Clasificación de acuerdo con el Protocolo de monitoreo.

5. Resultados

5.4 Protocolo de monitoreo microsísmico

PROTOCOLO DE MONITOREO SÍSMICO				
MAGNITUD	CLASIFICACIÓN	PROCEDIMIENTO	CONTACTO	ACCIONES
<0,0 (Valores negativos)	MUY BAJO	En caso de observar una recurrencia de más de 5 eventos en un mismo lugar, notificar a personal de mecánica de rocas.	Mecánica de rocas (Supervisión en turno)	Monitoreo en caso de recurrencia (más de 5 eventos en una misma zona)
>0,0 Hasta 0.99 (Valores positivos)	BAJOS/MEDIOS	Solicitar a IMS revisión y rectificación del evento. (Llamada, Whatsapp, correo), notificar a personal de mecánica de rocas en turno.	Mecánica de rocas (Supervisión en turno) Contactar a IMS para revisar evento: - correo: seismology.ca@imseismology.org - WhatsApp: +1 249 315 8515	Durante el turno por parte de mecánica de rocas se acudirá a la revisión del sitio (Zona a la obra más proxima/zona del evento) . Se reportará si se detectó alguna anomalía, y si se requiere se tomarán acciones,
>1	FUERTES	Solicitar a IMS revisión y rectificación del evento. (Llamada, Whatsapp, correo), notificar a personal de mecánica de rocas en turno.	Mecánica de rocas (Supervisión en turno) Contactar a IMS para revisar evento: - correo: seismology.ca@imseismology.org - WhatsApp: +1 249 315 8515	Personal de mecánica de rocas acudirá a la revisión del sitio (Zona a la obra más proxima/zona del evento) . Se reportará si se detectó alguna anomalía, y si se requiere se tomarán acciones,

Figura 25. Protocolo de monitoreo microsísmico de Minera Juanicipio




Regla	Categoría
 Incremento de actividad sísmica	Activity Rate
 EVENTO MAGNITUD MAYOR A 0.0	Events
 EVENTO MAGNITUD MAYOR A 1.0	Events

Figura 26. Regla de alertas para eventos en software Ticker de IMS

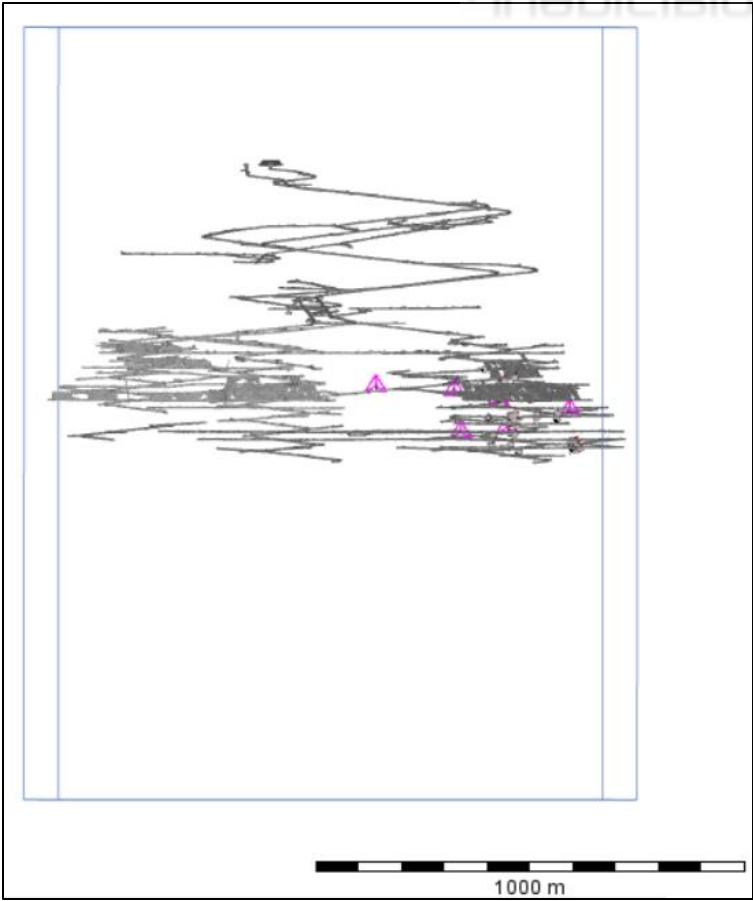


Figura 27. Vista de Minera Juanicipio en software Ticker con “box” de delimitación.

- El poder tener un sistema de monitoreo microsísmico permite poder analizar el comportamiento del macizo rocoso y los esfuerzos nos permite identificar zonas con potencial de inestabilidad, para diseñar planes de remediación con una adecuada planificación y evaluar la efectividad de sostenimientos y fortificaciones implementadas.
- Conocer el mecanismo de falla es fundamental para entender la naturaleza del esfuerzo que originó el evento. (Dirección del esfuerzo principal), y cómo es que será la falla ¿se abre?, ¿se desliza?, ¿colapsa?
- Con una base de datos se lleva un registro día a día con ubicación espacial y magnitud, que nos permite identificar patrones de actividad sísmica.
- Mejoras en la optimización del diseño minero, ajuste en la secuencia de explotación y diseño de las excavaciones.
- Alerta temprana con un protocolo de monitoreo, monitoreado 24/7 ante cualquier eventualidad, y poder efectuar la toma de decisiones sobre la seguridad del personal.

PERIMITE TENER ACCIONES PREVENTIVAS PARA LA SEGURIDAD DEL PERSONAL Y LAS OPERACIONES MINERAS.

- P.K. Kaiser, A. Moss, Deformation-based support design for highly stressed ground with a focus on rockburst damage mitigation, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 14, Issue 1, 2022, Pages 50-66, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.05.007>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775521000962>).
- Gibowicz, S. J., & Kijko, A. (2013). An introduction to mining seismology. Elsevier.
- Servicio Simológico Nacional. <http://www.ssn.unam.mx/>.
- Kaiser, P. K., & Malovichko, D. (2015). Energy and displacement demands imposed on rock support by strainburst damage mechanisms. Laurentian University & Institute for Mine Seismology.
- Kaiser, P. K., & Malovichko, D. A. (2022). Energy and displacement demands imposed on rock support by strainburst damage mechanisms. En M. Diederichs (Ed.), Proceedings of the 10th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RASIM), Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- 5. Hudson, JA, Pearce, RG y RM Rogers (1989) Gráfico de tipo de fuente para la inversión del tensor de momento, Revista de Investigación Geofísica, 94(B1), 765–774.

¡GRACIAS!