

Aproximación geomecánica usando velocidades de onda y su relación con el parámetro “b”

 Andree Espinoza *¹

¹ *Compañía Minera La Poderosa S.A., Lima Perú*

Recibido 09 Oct 2023 – Aceptado 05 Ago 2024 – Publicado 06 Ago 2024

Resumen

En esta investigación se ha presentado un análisis exhaustivo y riguroso sobre la microsismicidad y su importancia para el análisis de estructuras geológicas, con especial atención a la aplicación de la tabla GSI (Índice de resistencia geológica por sus siglas en inglés) y su relación con la seguridad. La presencia de estos eventos sísmicos indica la existencia de tensiones y deformaciones en las estructuras geológicas, que pueden tener un impacto significativo en la seguridad de la operación. Por tanto, el monitoreo de la microsismicidad es una herramienta esencial para la gestión de riesgos geomecánicos. En este trabajo se ha explorado la relación entre microsismicidad y estructuras geológicas, utilizando la tabla GSI como una herramienta importante para la interpretación de datos microsísmicos. En este trabajo los datos microsísmicos serán analizados y correlacionados con la tabla GSI, lo que permitirá una mejor comprensión de las características geomecánicas de la mina y una evaluación más precisa del riesgo geomecánico.

Palabras clave: Geomecánica, microsismicidad, parámetro “b”, tabla GSI, trayectoria de rayos, velocidades de onda.

Geomechanical approximation using wave velocities and their relationship with the parameter “b”

Abstract

In this research, an exhaustive and rigorous analysis about microseismicity and its importance for the analysis of geological structures will be presented, with special attention on the application of the GSI table and its relationship with safety. The presence of these seismic events indicates the existence of stresses and deformations in the geological structures, which can have a significant impact on the safety of the operation. Therefore, microseismicity monitoring is an essential tool for geomechanical risk management. In this thesis the relationship between microseismicity and geological structures will be explored, using the GSI table as an important tool for the interpretation of microseismic data. In this work, the microseismic data will be analyzed and correlated with the GSI table, which will allow a better understanding of the geomechanical characteristics of the mine and a more accurate evaluation of geomechanical risk.

Keywords: Geomechanics, microseismicity, b parameter, GSI table, seismic ray arrays, wave velocities.

1. Introducción

La microsismicidad es la técnica de detección y análisis de pequeños eventos sísmicos que ocurren durante el avance y explotación minera, y su estudio es fundamental para garantizar una operación segura y eficiente.

La tabla GSI es una herramienta desarrollada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas para evaluar la estabilidad geomecánica de estructuras rocosas.

A través del cálculo y análisis de las velocidades de las ondas P y S y su relación con el mapeo geomecánico; este estudio tiene como objetivo establecer la relación di-

*pespinoza@poderosa.com.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



recta entre el parámetro “b” como indicador estructural y su relación directa como las velocidades de los eventos microsísmicos, permitiendo de esta manera una aproximación del mapeo geomecánico de forma sistemática.

La actividad minera subterránea, conocida como sismicidad inducida, está estrechamente relacionada con la actividad sísmica. Esta actividad se manifiesta a través de desprendimientos de rocas, eventos de relajamiento o estallidos de rocas, lo cual puede tener un impacto directo al personal, la infraestructura y los equipos que operan en el interior de la mina.

Para desarrollar la matriz GSI, RMR (Clasificación del macizo rocoso por sus siglas en inglés) y valor Q se considera la velocidad de la onda P, que se relaciona con la dureza del macizo rocoso y la velocidad de la onda S, que se relaciona con el nivel de fracturamiento. Se deben tener en cuenta los valores residuales durante el procesamiento de la información, así como la geolocalización precisa utilizando tanto geófonos uniaxiales como geófonos triaxiales.

A diferencia de la tomografía sísmica, que analiza las velocidades de los rayos sísmicos a través del macizo rocoso, el cálculo de velocidades para la obtención de la matriz GSI, RMR y Q considera la velocidad inicial del evento microsísmico, es decir, la velocidad en la localización donde se originó este evento. Para este cálculo, se requiere información como la distancia del evento al sensor, los primeros arribos procesados de las ondas P y S, los arribos teóricos y el tiempo de inicio del evento microsísmico.

Los datos microsísmicos utilizados en este estudio provienen de un sistema constituido por 16 geófonos (12 geófonos uniaxiales y 4 geófonos triaxiales) y se obtuvo un catálogo de eventos con distintos valores de magnitud momento. El análisis del parámetro “b” y los valores obtenidos permitieron aproximar un mapeo “sistemático” que muestra una correlación directa entre las velocidades de las ondas sísmicas y las características de los medios por donde se propagan. Los volúmenes de baja velocidad corresponden a rocas de baja calidad y alta acumulación de esfuerzos, mientras que los volúmenes de alta velocidad indican una buena calidad de roca y eventos microsísmicos de alta magnitud debido a la resistencia del medio.

En consecuencia, este estudio evalúa la importancia del parámetro “b” y su relación con las velocidades de las ondas sísmicas con la finalidad de obtener una aproximación más precisa de los distintos esquemas de mapeo geomecánico en volúmenes alejados de campo visual en yacimientos mineros, proporcionando de esta manera una información valiosa para la evaluación de la estabilidad de las labores mineras y la mitigación de los efectos de los eventos microsísmicos.

1.1. Objetivos

- Determinar las velocidades de propagación de las ondas sísmicas P y S en el área de estudio.
- Establecer la relación entre las velocidades de las ondas sísmicas y el mapeo geomecánico en diferentes formas, como el Índice de Resistencia Geomecánica (GSI), el Índice de Masas Rocosas (RMR) y el valor Q.
- Se busca determinar si el parámetro b y su relación con las velocidades de las ondas sísmicas pueden ser utilizados como indicadores de la calidad de las rocas en los yacimientos mineros.
- Proporcionar una aproximación más precisa del mapeo geomecánico realizado por el sistema de monitoreo microsísmico en la mina Pencas de la veta Choloque en la U.P. Marañón, perteneciente a Compañía Minera Poderosa S.A., y evaluar su efectividad en el campo.

2. Antecedentes

No se han identificado registros previos de la utilización del sistema de monitoreo microsísmico y su vinculación con la tabla geomecánica (GSI) en la literatura. Los esfuerzos de investigación tradicionalmente han centrado su atención en el análisis de la trayectoria de los rayos sísmicos y su comportamiento en el contexto geológico, siguiendo la premisa de Aki y Lee (1976) [1], quienes destacaron este enfoque en su obra. Además, se ha reconocido que el monitoreo microsísmico constituye una técnica de vanguardia que incorpora avanzados análisis, como la tomografía sísmica, como señaló Glassner (1990) [2] en su trabajo.

Del mismo modo, se ha destacado la importancia de los mecanismos focales en la comprensión del comportamiento del macizo rocoso, como lo indicaron Um y Thurber (1987) [3] en su investigación.

Esta valiosa herramienta permite la observación de movimientos a pequeña escala en fracturas y microfracturas. A través de la aplicación del monitoreo microsísmico y la correlación de las velocidades de onda, se pueden identificar áreas de interés mediante el agrupamiento de eventos que comparten parámetros similares.

3. Metodología

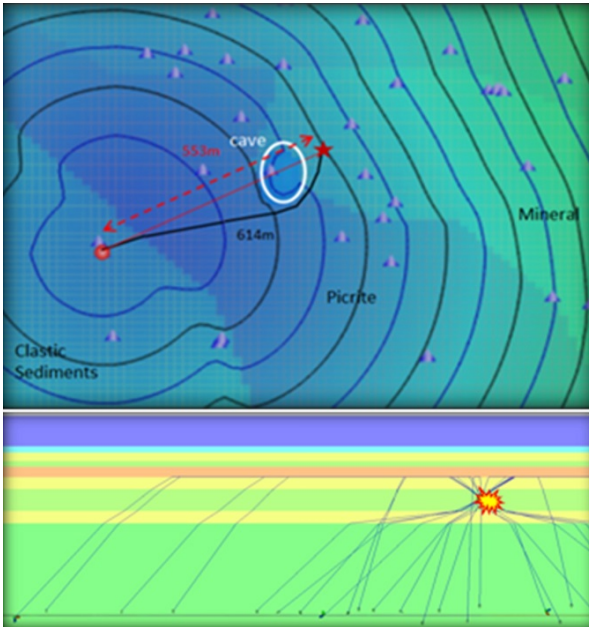
3.1. Aproximación al mapeo geomecánico

Para el desarrollo de la matriz GSI, RMR y valor Q, es necesario tener en cuenta dos consideraciones fundamentales. En primer lugar, la onda P (debido a su trayectoria directa) se relaciona con la dureza del macizo rocoso. En segundo lugar, la onda S, al ser una onda de trayectoria cortante o de cizalla, se relaciona con el nivel de fracturamiento en el medio.

Durante el procesamiento de la información, es crucial considerar los valores residuales o de calidad, específicamente en este caso en particular. Esto implica tomar en cuenta la precisión y confiabilidad de los datos procesados. Para lograr una buena geolocalización, se requiere utilizar al menos 4 geófonos uniaxiales capaces de registrar 4 arribos de la onda P, así como 2 geófonos triaxiales para obtener dos arribos de la onda S y determinar las polaridades de las ondas sísmicas.

De forma más resumida, el desarrollo de la matriz GSI, RMR y valor Q implica considerar la relación entre las ondas P y S con la dureza del macizo rocoso y el nivel de fracturamiento respectivamente. Además, es necesario considerar los valores residuales o de calidad durante el procesamiento de la información. Para una geolocalización precisa, se requiere de la adecuada utilización de geófonos uniaxiales y triaxiales.

Se deberá considerar un modelo de estudio en tres dimensiones, el cual irá modificando su velocidad a medida que se realiza la profundización.



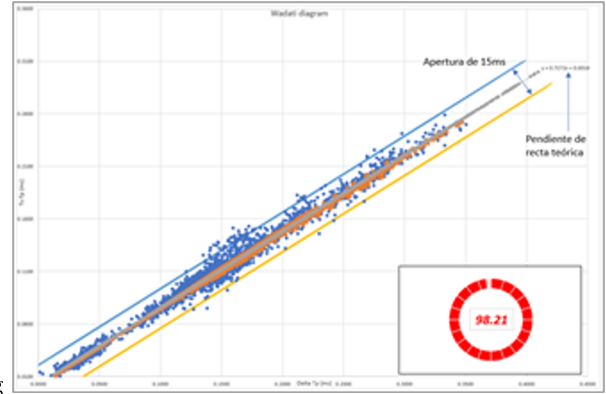
1.jpg

Figura 1: Modelo de trayectoria de rayos sísmicos en tres dimensiones

Para establecer un correcto control de calidad de la geolocalización de los eventos microsísmicos se hace uso del diagrama de "Wadati" cuyos valores para eje son determinados por medio de las siguientes relaciones [4]:

$$\begin{aligned} Y &= T_s - T_p \\ X &= T_p \end{aligned} \quad (1)$$

Donde: T_s = tiempo de arribo de la onda S (en milisegundos), T_p = tiempo de arribo de la onda P (en milisegundos).



2.jpg

Figura 2: Uso del diagrama de Wadati con una apertura de +/- 15 milisegundos sobre la recta teórica de los primeros arribos

Es importante establecer una relación que cuente con una apertura de +/- 15 milisegundos con el objetivo de garantizar que al menos el 80 por ciento de los primeros arribos tanto de P como de S se encuentren dentro de este margen de tolerancia, la cual se puede ajustar para tener mejor precisión en el procesamiento hasta 10 milisegundos en relación con la pendiente teórica de los primeros arribos.

A diferencia de la tomografía sísmica, la cual analiza las velocidades de los rayos sísmicos a través del macizo rocoso, el cálculo de velocidades que permitió obtener la matriz GSI se enfoca en la velocidad de inicio del evento microsísmico en el punto origen de este.

Para realizar el cálculo, se requiere tener en cuenta los siguientes elementos:

- 1) La distancia entre el evento y el geófono (uniaxial y/o triaxial).
- 2) El tiempo de llegada procesado de la onda P y S.
- 3) Los tiempos de llegada teóricos de las ondas P y S (en el caso de que no se disponga de una llegada clara durante el procesamiento) y
- 4) El tiempo inicial del evento microsísmico.

El cálculo del verdadero tiempo de arribo de P se calcula por medio de: $T_p = T_{zero} - T_{pp}$.

El cálculo del arribo real de S se calcula por medio de: $T_s = T_{zero} - T_{sp}$.

Donde: T_{zero} = tiempo de inicio del evento microsísmico, T_{pp} = tiempo de arribo de la onda P procesada, T_{sp} = tiempo de arribo de la onda S procesada.

Para el caso de la velocidad de la onda P se utiliza la expresión siguiente: $V_p = D/T_p$

Para la velocidad de la onda S se utiliza: $V_s = D/T_s$

Para calcular el control de calidad de la residual del sistema se utiliza:

$$R_c = (T_{sc} - T_{pc}) + \frac{V_p V_s}{V_p - V_s} \quad (2)$$

Donde: R_c = residual calculada, T_{pc} = tiempo de arribo calculado por sistema para la onda P, T_{sc} = tiempo de arribo calculado por el sistema para la onda S, V_p = velocidad de P y V_s = Velocidad de S.

El cálculo de la residual de procesamiento se calcula mediante la expresión:

$$R_p = (T_{sp} - T_{pp}) \left(\frac{V_p + V_s}{V_p V_s} \right) \quad (3)$$

Donde: R_p = residual procesada, T_{pp} = tiempo de arribo procesado para la onda P, T_{sp} = tiempo de arribo procesado para la onda S, V_p = velocidad de P, V_s = velocidad de S

Con ambas residuales calculadas se obtiene la residual total, la cual no debe exceder el 5 por ciento para ser considerado como un cálculo efectivo de las velocidades tanto para la onda P como la onda S.

$$R_t = \frac{R_c - R_p}{R_c} \leq 5\% \quad (4)$$

Donde: R_t = residual total, R_c = residual calculada por el sistema, R_p = residual de procesamiento.

3.2. Matrices de aproximación al mapeo geomecánico

Comprendiendo el comportamiento de las velocidades de la onda P y la onda S; en el caso del sistema de monitoreo microsísmico de Pencas se determinó que $V_{pmax} = 9000$ m/s $V_{pmin} = 4200$ m/s, $V_{smax} = 4100$ m/s y $V_{smn} = 2200$ m/s se creó la matriz de 4×4 donde cada valor de esta matriz corresponde a un índice de resistencia geológico GSI, RMR y valor Q .

Rangos V_p		Matriz V_p	Rangos V_s		Matriz V_s
5894.00	5993.50	4	3334.00	3355.00	4
5993.51	6093.00	3	3355.01	3376.00	3
6093.01	6192.50	2	3376.01	3397.00	2
6192.51	6292.00	1	3397.01	3418.00	1

Tabla 1: Matriz de correlación de velocidades de onda P y Onda S para el mapeo GSI.

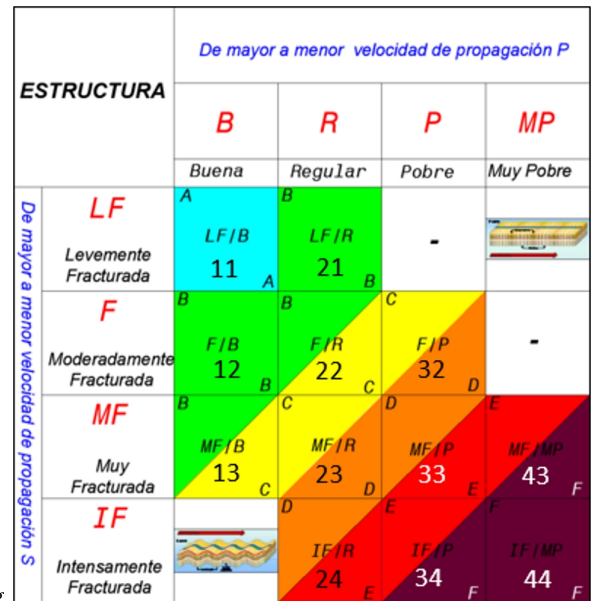
RMR de Bienieawsky							
5894.00	5943.75	V	8	6093.04	6142.79	III A	4
5943.76	5993.51	IV B	7	6142.80	6192.55	II B	3
5993.52	6043.27	IV A	6	6192.56	6242.31	II A	2
6043.28	6093.03	III B	5	6242.32	6292.00	I	1

Tabla 2: Aproximación de velocidad de onda P para el RMR Bienieawsky.

		Valor Q		
3334.00	3343.33	EXCEPCIONALMENTE MALA	IX	9
3343.34	3352.68	EXTREMADAMENTE MALA	VIII	8
3352.69	3362.02	MUY MALA	VII	7
3362.03	3371.36	MALA	VI	6
3371.37	3380.71	MEDIA	V	5
3380.72	3390.05	BUENA	IV	4
3390.06	3399.39	MUY BUENA	III	3
3399.40	3408.74	EXTREMADAMENTE BUENA	II	2
3408.75	3418.08	EXCEPCIONALMENTE BUENA	I	1

3.jpg

Tabla 3: Aproximación de velocidad de onda S para el valor de Q.



3.jpg

Figura 3: Cartilla geomecánica GSI con datos matriciales de acuerdo con su velocidad P y velocidad S.

3.3. Caracterización del parámetro b

El parámetro b es una medida que describe la distribución relativa del tamaño de los eventos sísmicos en una zona y período específicos [5]. Cuantitativamente, valores bajos de b indican la predominancia de sismos de magnitud elevada debido a la resistencia del medio a la ruptura y una mayor acumulación de esfuerzos. Por otro lado, valores altos de b implican la presencia de medios de menor resistencia y acumulación de esfuerzos [6]. Los valores bajos de b varían entre 0 y 3, mientras que los valores altos van de 3 en adelante, de acuerdo con la magnitud momento.

La estimación de b se basa principalmente en la magnitud momento (M_w), que es la magnitud a partir de

la cual se detectan todos los eventos en un volumen de espacio-tiempo completo [7], [8]. Esta estimación se realiza utilizando la Distribución Frecuencia-Magnitud, establecida por primera vez por Ishimoto e Ida (1939) [9] y posteriormente por Gutenberg y Richter (1944) [10]. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(N) = a - bM \quad (5)$$

Donde: N = número acumulado de eventos, M = magnitud de momento, a = parámetro el cual describe la producción de eventos, b = parámetro el cual describe la distribución relativa del tamaño de los eventos.

Resumen de medición de esfuerzos

		Consecuencia 1	Consecuencia 2	Consecuencia 3	Consecuencia 4	Consecuencia 5
Alta calidad de roca	Baja calidad de roca	Disminución de esfuerzos	Disminución de velocidad de propagación	Disminución de eventos microsísmicos	Eventos con magnitud momento alta	Parámetro "b" bajo
Baja calidad de roca	Alta calidad de roca	Aumento de esfuerzos	Aumento de velocidad de propagación	Aumento de eventos microsísmicos	Eventos con magnitud momento baja	Parámetro "b" elevado

4.jpg

Tabla 4: Cartilla geomecánica GSI con datos matriciales de acuerdo con su velocidad P y velocidad S.

3.4. Datos y estimación del parámetro b

Los datos microsísmicos utilizados en este estudio fueron recolectados a través de una red de 16 geófonos instalados en el sistema de monitoreo microsísmico de Pencas (SMM Pencas). De estos geófonos, 12 son uniaxiales y 4 son triaxiales (ver Figura 7). Los datos se registraron durante los meses de octubre a diciembre de 2022, lo que permitió obtener un catálogo de 9039 eventos con magnitudes momento que varían entre -1.75 y 0.49.

Para la estimación del parámetro b , se utilizó este catálogo sísmico junto con distintos programas de procesamiento e interpretación de datos. Con el fin de analizar la variación espacial del parámetro b , se dividieron las áreas de estudio en 6 zonas distintas (ver Figura 8).

Para estimar la magnitud momento, se empleó el método de Mejor Combinación propuesto por Wiemer (2001) [7] y Wiemer (2002) [8]. El histograma de magnitudes momento (ver Figura 6) muestra una distribución relativamente uniforme, lo que garantiza una estimación confiable del parámetro b .

4. Resultados y discusión

En las Tablas 4 a 6 se presentan los valores porcentuales de ocurrencia del tipo de roca determinados mediante el cálculo de velocidades de onda tanto para la onda P como para la onda S en todo el volumen de adquisición (ver figuras 9, 10 y 11).

Índice de calidad GSI	
LF/B	0.49%
F/B	3.13%
MF/B	2.73%
LF/R	8.87%
F/R	16.77%
MF/R	0.00%
IF/R	26.93%
F/P	28.29%
MF/P	0.00%
IF/P	8.59%
MF/MP	1.39%
IF/MP	0.11%

5.jpg

Tabla 5: Aproximación del porcentaje de ocurrencia del índice geomecánico GSI entre los meses de octubre a diciembre del 2022

Índice de calidad RMR	
I	3.00%
II A	2.44%
II B	17.99%
III A	42.95%
III B	30.52%
IV A	1.95%
IV B	0.61%
V	0.54%

6.jpg

Tabla 6: Aproximación del porcentaje de ocurrencia del índice geomecánico RMR entre los meses de octubre a diciembre del 2022

Índice de calidad valor Q	
excepcionalmente buena	0.61%
extremadamente buena	0.90%
muy buena	3.82%
buena	43.08%
media	48.68%
mala	2.22%
muy mala	0.28%

Tabla 7: Aproximación del porcentaje de ocurrencia del índice de calidad valor Q entre los meses de octubre a diciembre del 2022

De acuerdo con los valores hallados, el valor de *b* muestra una variación e incremento de magnitud para los clusters 4, 5 y 6 (la ubicación de los cluster puede ser observada en la figura 8), lo cual hace sugerir que estas zonas presentan una magnitud elevada debido a la resistencia del medio en el cual se encuentran estos volúmenes; mientras que para los clusters 1, 2 y 3 (la ubicación de los cluster puede ser observada en la figura 8) los valores de “*b*” son elevados y pertenecen a zonas con menor acumulación de esfuerzos (figura 12).

5. Conclusiones

1. A través del análisis de velocidades durante el periodo de octubre a diciembre de 2022, se logró estimar la presencia de diferentes tipos de rocas, los cuales varían en función del tiempo y los esfuerzos a los que están sujetos en los volúmenes de interpretación.
2. El análisis de velocidades se enfocó únicamente en eventos naturales, excluyendo los eventos relaciona-

dos con la sismicidad inducida, con el objetivo de lograr una mejor interpretación. Para ello, se utilizaron 9,039 eventos en total.

Zonas	Parámetro "b"	Magnitud momento mínima	Magnitud momento máxima
Zona 1	3.36 +-1.38	-0.5	0.25
Zona 2	4.45+-2.23	-0.7	-0.05
Zona 3	4.03+-1.66	-0.9	-0.14
Zona 4	2.53+-1.04	-0.6	0.52
Zona 5	2.38+-0.64	-1	0.24
Zona 6	2.38+-0.76	-0.8	0.13

Tabla 8: Aproximación del porcentaje de ocurrencia del índice de calidad valor Q entre los meses de octubre a diciembre del 2022

3. Se pudo realizar una aproximación sistemática del mapeo geomecánico para los niveles analizados. Se observó una correlación directa entre las velocidades y las características de los medios a través de los cuales se propagan las ondas. Esto demuestra que es posible utilizar la interpretación de velocidades para aproximarse al mapeo geomecánico en sus diferentes formas utilizando el sistema de monitoreo microsísmico.

4. Los valores obtenidos para el parámetro “*b*” (Tabla 7) guardan relación directa con las calidades de roca interpretadas para los distintos tipos de mapeo geomecánico existentes.

6. Anexos

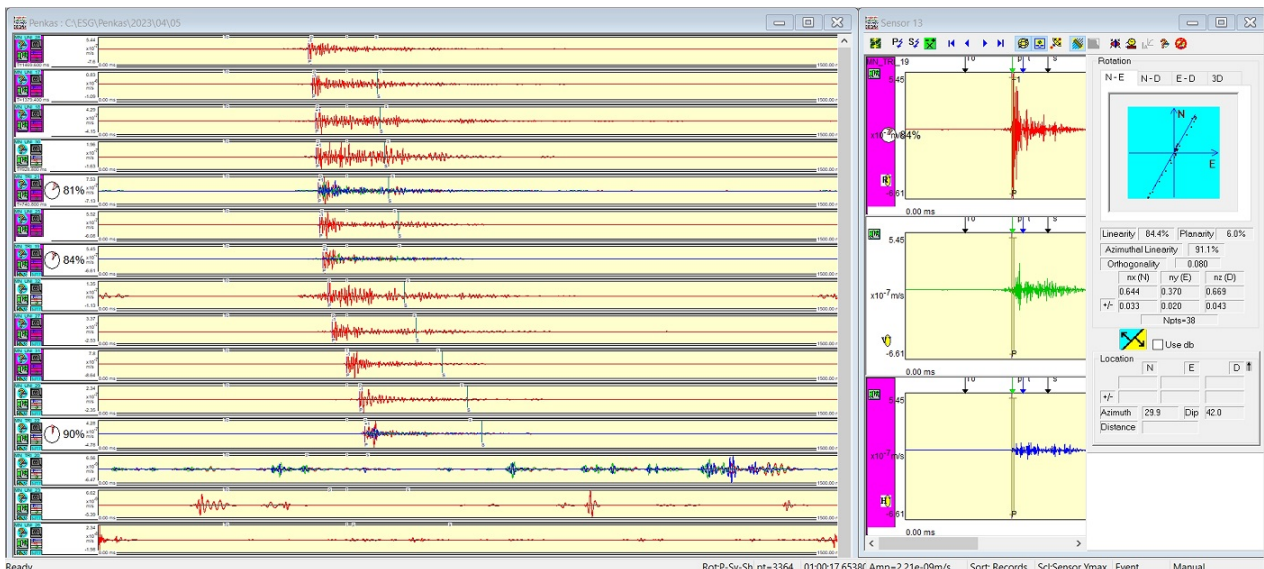
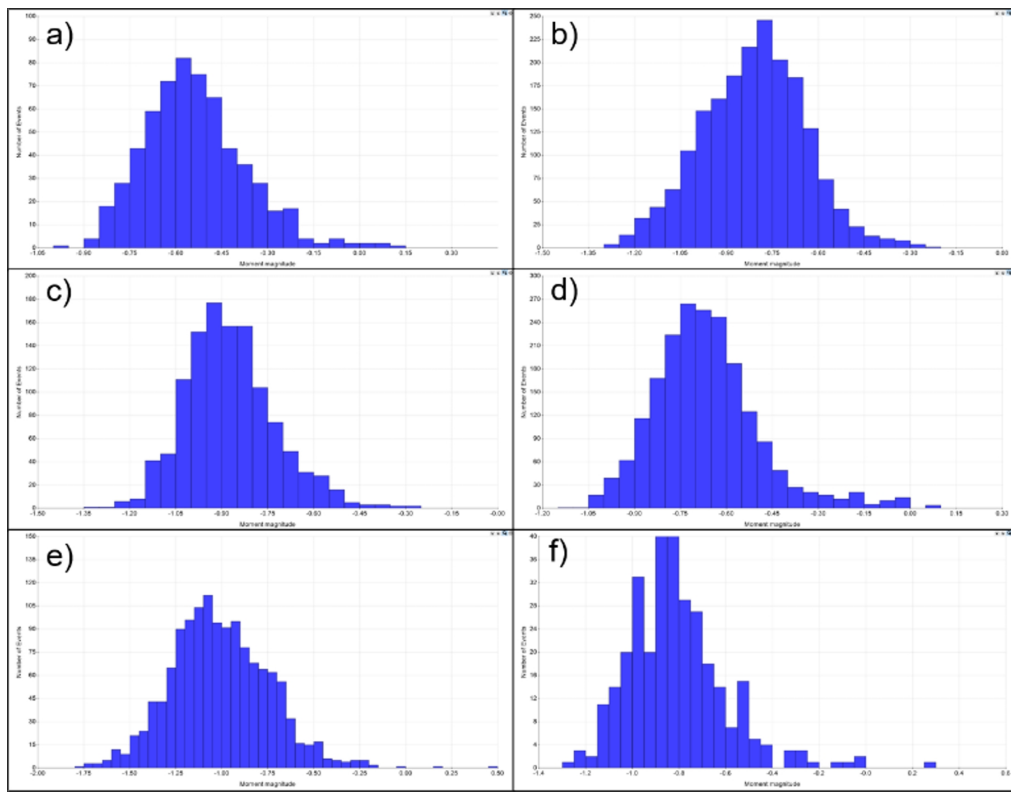


Figura 4: Procesamiento y análisis para geolocalización de eventos microsísmicos (uso de distintos tipos de geófonos).

Number	Date/Time	Evid	SrcN	SrcE	SrcD	Mw	slD	T	Description	Processed				Calculated				Theoretical		
										SrcDist	Ppick	Spick	Perror	Serror	TParr	TSarr	Sampl	Tzero	Ppick	Spick
705	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	1	g	MN_UNI_4	267.3	0.4154	0.454	-0.0009	0.0043	0.4163	0.4497	0.0002	0.3715	0.0439	0.0825
706	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	2	g	MN_UNI_5	885.6	0.5216	0.6272	0.0014	-0.0033	0.5202	0.6305	0.0002	0.3715	0.1501	0.2557
707	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	3	g	MN_UNI_6	205	0.405	0.4314	-0.0009	-0.0001	0.4059	0.4315	0.0002	0.3715	0.0335	0.0599
708	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	4	g	MN_UNI_7	250	0	0	9999	9999	0.4135	0.4447	0.0002	0.3715	0.042	0.0732
709	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	5	g	MN_UNI_8	85.6	0	0	9999	9999	0.3859	0.3965	0.0002	0.3715	0.0144	0.025
710	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	6	g	MN_UNI_10	107.2	0.3894	0.4044	0	0.0017	0.3894	0.4027	0.0002	0.3715	0.0179	0.0329
711	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	7	g	MN_UNI_11	180.6	0.4006	0.424	-0.0012	-0.0003	0.4018	0.4243	0.0002	0.3715	0.0291	0.0525
712	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	8	g	MN_UNI_12	212	0.4072	0.4354	0.0001	0.0019	0.4071	0.4335	0.0002	0.3715	0.0357	0.0639
713	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	9	g	MN_UNI_13	651.2	0.4808	0	0	9999	0.4808	0.5621	0.0002	0.3715	0.1093	0.1906
714	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	10	g	MN_UNI_14	824.2	0.5112	0.618	0.0014	0.0056	0.5098	0.6124	0.0002	0.3715	0.1397	0.2465
715	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	11	g	MN_UNI_15	733.3	0.4942	0	-0.0005	9999	0.4947	0.5862	0.0002	0.3715	0.1227	0.2147
716	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	12	g	MN_UNI_16	580	0.4702	0	0.0013	9999	0.4689	0.5414	0.0002	0.3715	0.0987	0.1699
717	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	13	G	MN_TRI_1	793	0.5042	0.6046	-0.0004	0.001	0.5046	0.6036	0.0002	0.3715	0.1327	0.2331
718	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	14	G	MN_TRI_2	879.2	0.5176	0.632	-0.0015	0.0036	0.5191	0.6284	0.0002	0.3715	0.1461	0.2605
719	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	15	G	MN_TRI_3	158.4	0.3934	0.4166	-0.0047	-0.0013	0.3981	0.4179	0.0002	0.3715	0.0219	0.0451
720	34:41.3	0	9146225	212214.5	1481.7	-1.1	16	G	MN_TRI_9	52.1	0.373	0.3866	-0.0072	0	0.3802	0.3866	0.0002	0.3715	0.0015	0.0151
721	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	1	g	MN_UNI_4	780.8	0.378	0.4694	0.0003	-0.0054	0.3777	0.4748	0.0002	0.2448	0.1332	0.2246
722	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	2	g	MN_UNI_5	1673.5	0.528	0	-0.0016	9999	0.5296	0.7374	0.0002	0.2448	0.2832	0.4926
723	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	3	g	MN_UNI_6	977.2	0.4114	0.5264	0.0004	-0.006	0.411	0.5324	0.0002	0.2448	0.1666	0.2816
724	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	4	g	MN_UNI_7	1048.7	0.424	0.5618	0.0007	0.0082	0.4233	0.5536	0.0002	0.2448	0.1792	0.317
725	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	5	g	MN_UNI_8	742.2	0	0	9999	9999	0.371	0.4631	0.0002	0.2448	0.1262	0.2183
726	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	6	g	MN_UNI_10	753.6	0.373	0.46	-0.0001	-0.0067	0.3731	0.4667	0.0002	0.2448	0.1282	0.2152
727	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	7	g	MN_UNI_11	791.2	0.3798	0.4782	0.0004	0.0004	0.3794	0.4778	0.0002	0.2448	0.135	0.2334
728	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	8	g	MN_UNI_12	758.6	0.3738	0.4654	0	-0.0026	0.3738	0.468	0.0002	0.2448	0.129	0.2206
729	05:35.2	0	9145433	212006.2	1435.6	-0.5	9	g	MN_UNI_13	1460.9	0.4936	0.6802	0.0002	0.0052	0.4934	0.675	0.0002	0.2448	0.2488	0.4354

5.jpg

Figura 5: Base de datos con valores calculados de velocidades y residuales de control de calidad.



8.jpg

Figura 6: Histograma de magnitud momento; a) Zona 1; b) zona 2; c) zona 3; d) zona 4; e) zona 5; f) zona 6.

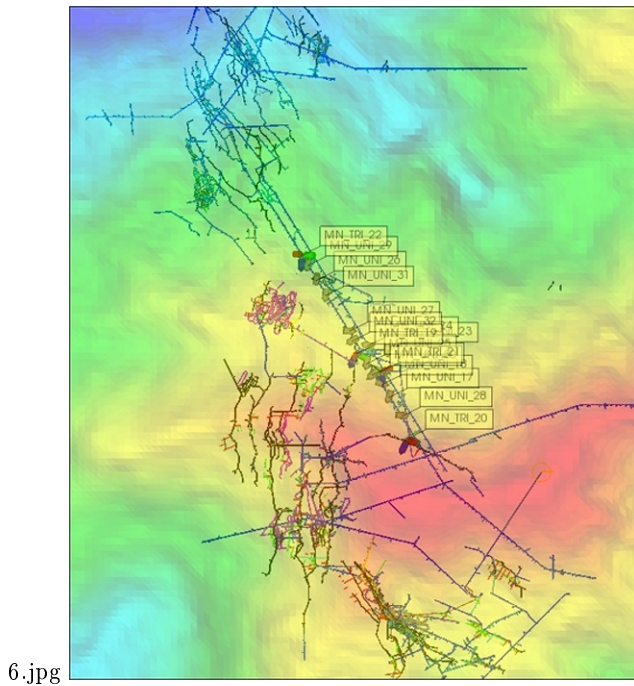


Figura 7: Red de geófonos instalados para el SMM Pencas

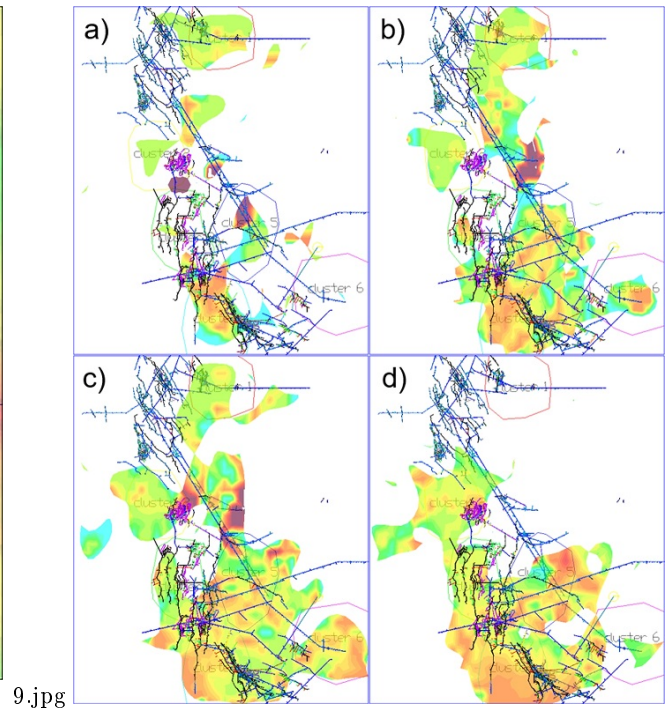


Figura 9: Planos de aproximación geomecánica GSI para los niveles a) 1680; b) 1800; c) 1915 y d) 2220.

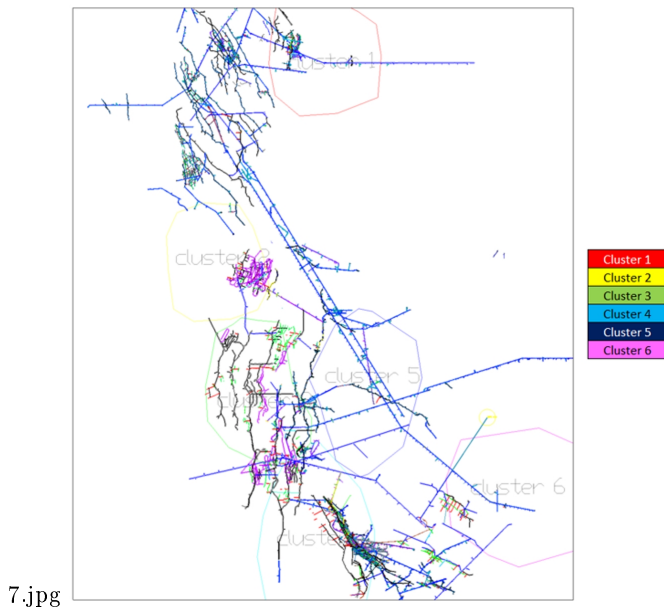


Figura 8: Zonas de investigación del parámetro b .

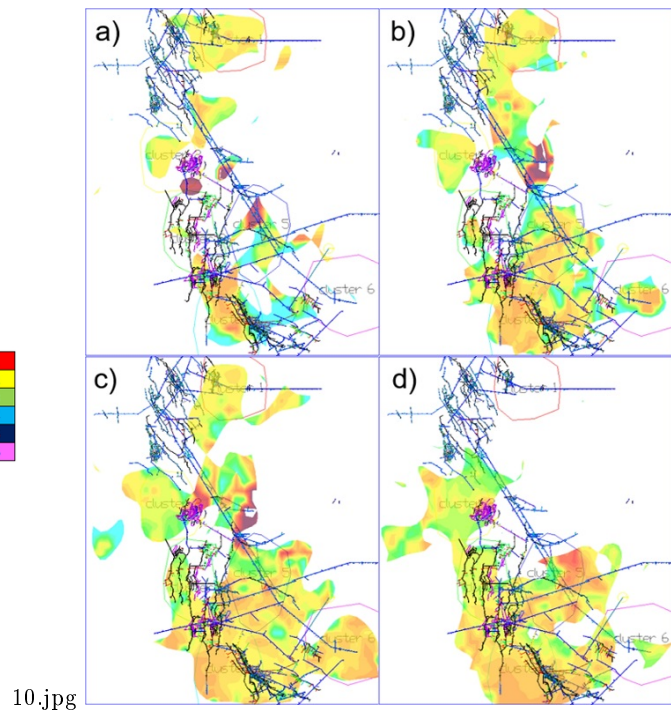
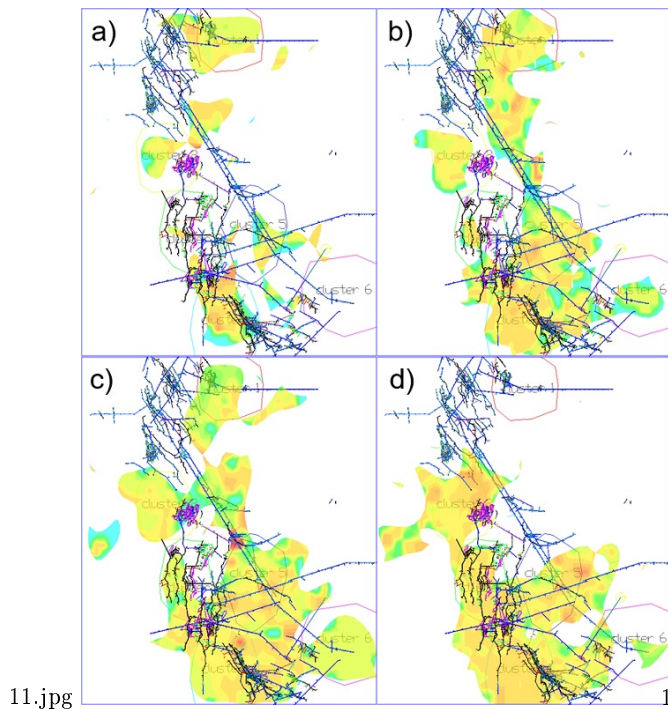
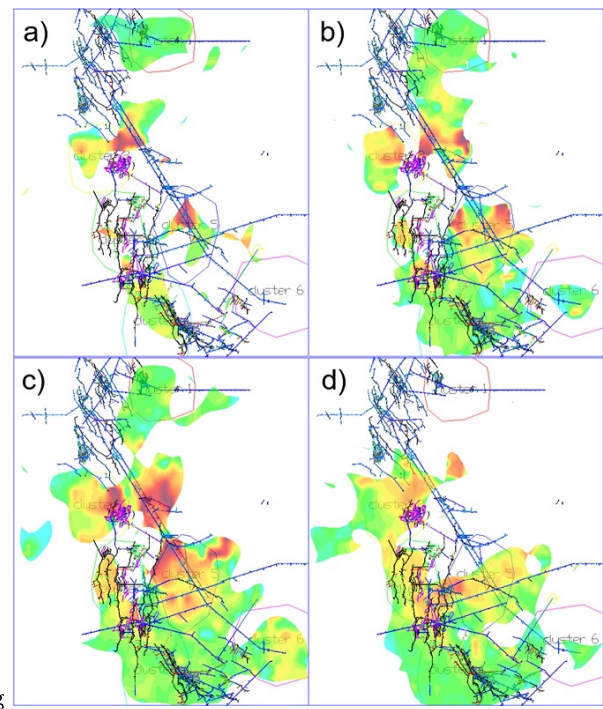


Figura 10: Planos de aproximación geomecánica RMR para los niveles a) 1680; b) 1800; c) 1915 y d) 2220.



11.jpg

Figura 11: Planos de aproximación geomecánica valor de Q para los niveles a) 1680; b) 1800; c) 1915 y d) 2220.



12.jpg

Figura 12: Planos del valor b para los niveles a) 1680; b) 1800; c) 1915 y d) 2220.

Referencias

- [1] K. Aki and W.H.K. Lee. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first p arrival times from local earthquakes 1. A homogeneous initial model. *Journal of Geophysical Research*, 81:0148–0227, 1976. doi: 10.1029/JB081i023p04381.
- [2] Andrew S. Glassner. *An introduction to Ray Tracing*. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 3th edition, New York, 1990.
- [3] J. Um and C. Thurber. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3), 1987.
- [4] S. Tsuboi, K. Abe, K. Takano, and Y. Yamanaka. Rapid determination of mw from broadband p waveforms. *Geophysical Research Letters*, 85(2):606–613, 1995.
- [5] J. Farrel, S. Husen, and R. Smith. Earthquake swarm and b – value characterization of the Yellowstone volcano – tectonic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188:260–276, 1997.
- [6] Trifu C. Urbancic T. Seismic monitoring of mine environments. *Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, pages 941–950, 1997.
- [7] S. Wiemer. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72:373–382, 2001.
- [8] S. Wiemer and M. Wyss. Mapping spatial variability of the frequency – magnitude distribution of earthquakes. *Advances in Geophysics*, 45:259–302, 2002.
- [9] M. Ishimoto and K. Iida. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 17:443–478, 1939.
- [10] B. Gutenberg and C.F. Richter. Frequency of earthquakes in california. *Bulletin of Seismological Society of America*, 34-4:185–188, 1944.