**GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN OPERACIONES MINERAS DE ALTOS ESFUERZOS**

(Operaciones mineras y gestión de activos – Geotecnia/Geomecánica)

**Cody Alfredo Gomez Rozas1 Juan Andres Jarufe Troncoso 2**

1 Autor: Cía. Minera Raura, Jr. Giovanni Batista Lorenzo Bernini 149, Of. 501-A Torre Trazzo San Borja - Lima - Perú ([cody.gomez@raura.com.pe/codygomezrozas@icloud.com](mailto:cody.gomez@raura.com.pe/codygomezrozas@icloud.com) , Tel: 99768801)

2 Autor: Kepler SPA. dirección Comercial: Andres de Alcázar 365 Of. 603 Edificio Alcázar 603 Rancagua ( [Juan.Jarufe@usach.cl](mailto:Juan.Jarufe@usach.cl), Tel: +56957998273).

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**RESUMEN**

Compañía Minera Raura, es un yacimiento polimetálico que explota sus minerales por medio del método sublevel stoping. Como parte de su proceso de profundización se viene evaluando el impacto de las secuencias de minado en la sismicidad inducida y peligro sísmico, dentro de lo cual se enmarca este proyecto, el cual busca comprender la naturaleza de la sismicidad inducida en las operaciones de Raura, establecer relaciones entre la minería, sismicidad y peligro sísmico y, además, proveer una línea base para calibrar y validar modelos numéricos de la mina.

Cía. Minera Raura, tiene un sistema de monitoreo microsismico provisto por la empresa ESG, este sistema se implementó en 2019 con 22 sensores desplegados principalmente por encima del Nv. 4100. Actualmente el sistema de monitoreo microsismico cuenta con 62 sensores de monitoreo con una cobertura de operaciones del debajo del Nv. 3900, con el sistema de monitoreo se han registrado eventos sísmicos de hasta magnitud momento (*Mw*) 2.5, los cuales han generado daño principalmente asociado a caída de roca gatillado por sismicidad. Estas inestabilidades generan una fuente de peligro para los trabajadores y para el negocio minero, por lo cual es importante el entendimiento de las fuentes de sismicidad y su relación con minería.

**1. Introducción**

La sismicidad inducida por minería en contextos de altos esfuerzos no es un fenómeno nuevo, desde hace más de 40 años se define como un riesgo operativo relevante. En Cía. Minera Raura, se ha identificado que los daños asociados a eventos sísmicos se presentan como spalling y deformación de excavaciones en zonas previamente perturbadas y estos mecanismos obedecen a una combinación de factores como el operativo, geomecánicos y de diseño, los cuales deben ser controlados mediante una gestión integral del riesgo.

Determinar la recurrencia sísmica en función del tonelaje (tpd) disparado por estructura dentro del plan de producción mensual, así como, determinar el impacto de este tonelaje en las zonas o fuentes sismogénicas.

Durante el análisis de eventos con daño registrados en los últimos años (2021-2024), se ha evaluado su distribución espacial de los eventos, mecanismos de activación y correlación con la evolución de los planes de minado. Esta información permitió establecer una zonificación preliminar de peligro sísmico, útil para establecer secuencias de minado, ratios de producción, así como, estrategias de sostenimiento que permitan en una primera instancia generar un ambiente seguro de trabajo y consecuentemente una continuidad operacional sostenida.

Imagen que contiene Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 1. Vista longitudinal de la mina y distribución de los sensores de monitoreo microsismico (Raura, 2025)

Imagen que contiene Aplicación

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 2. Evolución de eventos microsismicos 2022-2024.

La figura muestra la evolución de los eventos microsismicos desde el año 2022, se puede apreciar un incremento considerable en cuanto a la cantidad de eventos microsismicos registrados en el primer semestre del año 2025, esto se debe principalmente a la actualización del sistema de monitoreo y el incremento en la detectabilidad de eventos microsismicos en el rango de magnitudes de -2.5 ≤ Mw ≤ 2.0.

**2. Objetivos**

El objetivo de este trabajo es determinar las estimaciones del peligro sísmico asociado al Plan de Producción 2025 en Cía. Minera Raura, lo cual se materializa como la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de magnitud significante y su ubicación más probable.

Los resultados de este trabajo se basan en modelos numéricos calibrados en base a la sismicidad observada en Raura, tanto en términos de Momento Sísmico (*Mo*) como en Probabilidad de ocurrencia de sismicidad.

**3. Compilación de Datos y Desarrollo del Trabajo**

Para el análisis de la sismicidad en Cía. Minera Raura, se realizó una revisión crítica de la información histórica del sistema de monitoreo, identificándose variaciones en la calidad y completitud de los registros en años anteriores. Por este motivo, se optó por considerar únicamente los datos comprendidos entre el 2022 y el 2024, al corresponder a un periodo con trazabilidad validada, cobertura continua y condiciones operativas estables, lo que garantiza su confiabilidad para el análisis geomecánico desarrollado.

Posteriormente se realizó una zonificación del comportamiento sísmico para después evaluar el peligro sísmico, relación con voladuras/disparos en términos temporales y espaciales y finalmente se desarrolla un modelo empírico para determinar el peligro sísmico en base a las toneladas extraídas mediante la voladura de tajos.

**3.1 Análisis de la información base considerada**

Al graficar la totalidad de la información entregada, se observa un extenso periodo de monitoreo sísmico, abarcando desde fines del 2019 hasta la actualidad, sin embargo, se notan cambios en los rangos de magnitudes manifestado por cambios en las magnitudes máximas registradas y también en las magnitudes mínimas (Figura 4 1). Este tipo de cambios en los datos registrados están asociados a variaciones en la configuración del sistema sísmico, ya sea adición de nuevos sensores, calibraciones y/o actualizaciones del software de monitoreo.

Gráfico, Escala de tiempo

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 3. Evolución de las magnitudes registradas y del momento sísmico acumulado. Se observan cambios importantes en particular en las magnitudes mínimas registradas, lo cual es un indicador de cambios en el sistema de monitoreo.

**3.2 Metodología de análisis**

Evaluar la sismicidad inducida por minería es complejo, los eventos sísmicos son descritos por más de una docena de parámetros sísmicos inherentes a la fuente sísmica, a los cuales hay que sumar los aspectos geológicos, geotécnicos y mineros de los cuales, además, en ciertos casos, hay importante variabilidad o error en la información.

Uno de los principales métodos para abordar datos con incertidumbre es considerarlos como un grupo grande de datos, donde el error que pudiese existir es aplicable a todas las mediciones y, por lo tanto, se considera como un error sistemático, transversal a todas las mediciones realizadas. Desde este punto de vista, el análisis de una gran cantidad de datos permitirá evaluar los cambios en las tendencias del comportamiento de los datos, cambios que sobresalen por sobre el error sistemático mencionado anteriormente. Dentro de este mismo enfoque, el análisis de un solo evento en particular (eventos sísmicos en este caso) no se considerará como un resultado concluyente, ya que puede estar sujeto a una gran variabilidad dadas las incertidumbres en el monitoreo y también a la variabilidad del macizo rocoso.

Si bien la metodología de análisis se muestra como un proceso secuencial de etapas consecutivas, en la práctica es un proceso recursivo, donde los distintos estudios van validando o modificando supuestos originales, de manera de fortalecer de manera continua, en cada iteración las conclusiones obtenidas. Las principales tareas para realizar dentro de este análisis sísmico son:

* Análisis exploratorio de datos que permita definir distintos comportamientos sísmicos en la mina, definiendo distintos dominios sismogénicos. Esto se realiza por medio de la relación de Gutenberg Richter y con la relación entre voladuras y sismicidad.
* Evaluar los cambios del comportamiento sísmico al modificar variables asociadas a la instrumentación (número de sensores que registran los eventos, error de ubicación), de manera de evaluar la sensibilidad de la interpretación sísmica frente a estas variables de origen instrumental.
* Evaluar el peligro sísmico de la mina, calculando la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos por sobre una magnitud determinada.

Este análisis se realizó de manera global para la mina, pero también se sectorizó en función de los dominios sismogénicos de la mina, para finalmente se establecer relaciones entre las voladuras realizadas y la sismicidad generada, de manera de poder realizar una herramienta predictiva de sismicidad en función del tamaño de las voladuras realizadas.

**3.3 Definición de dominios sismogénicos**

El mecanismo de ruptura y el peligro sísmico son los principales aspectos para evaluar dentro de la sismicidad inducida por minería. La determinación del mecanismo de ruptura entrega información acerca de cuándo y dónde podrían generarse eventos sísmicos, mientras que el peligro sísmico informa acerca de la probabilidad de ocurrencia de un evento por sobre cierta magnitud. Ambos criterios permiten estimar las potenciales magnitudes, ubicación y distribución temporal de la sismicidad esperada.

La determinación tanto del mecanismo de ruptura como del peligro sísmico no puede realizarse para toda la mina como un solo conjunto de datos, esto debido a que zonas con un mayor peligro sísmico podrían “promediarse” con zonas de bajo peligro, obteniendo un nivel final de peligro que no es representativo de las condiciones de los distintos sectores de la mina (J. Jarufe, 2025).

Para realizar una definición de distintos dominios sismogénicos, es decir zonas donde la respuesta sísmica sea diferente en relación a las excavaciones realizadas, esta definición no es aleatoria ni sujeta a una clusterización computacional ya que hay distintos aspectos que deben considerarse como lo son: la ubicación espacial de los eventos, la relación con la producción de mina y el mecanismo de ruptura, el cual está asociado a la relación frecuencia magnitud y al modelo de Gutenberg Richter asociado a cada dominio sismogénico.

*3.3.1 Ubicación espacial de sismicidad inducida*

Al observar la distribución espacial de los eventos sísmicos en Raura, es posible ver cómo se forman distintas agrupaciones de eventos sísmicos (figura 4), las cuales se generan a causa de la interrelación entre voladuras, estructuras, fallas y otras características de la minería y del macizo rocoso. Si bien es posible generar un “clúster” para cada uno de estos grupos para analizarlo y estudiarlo de manera independiente, es poco operacional tener 30 zonificaciones, por lo tanto, se han definido 3 zonas principales que engloban el 99% de todos los eventos sísmicos ocurridos durante el año 2024.

Gráfico, Gráfico de dispersión

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 4. Agrupaciones de eventos sísmicos observadas durante el año 2024

La realización de una zonificación en base al comportamiento sísmico se realizará en base a:

* *Ubicación espacial de los grupos de sismicidad*, se buscan y definen agrupaciones de eventos sísmicos solamente en base a su posición espacial. Estas agrupaciones se originan a causa del fracturamiento del macizo post tronadura, ya sea en el entorno cercano de la voladura o a alguna distancia, ya que depende también de las condiciones del macizo rocoso.

**Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.**

Figura 5. Agrupaciones espaciales de eventos microsismicos

* *Relación positiva entre producción minera y momento sísmico,* la premisa fundamental de este estudio es que la sismicidad esta generada por la distribución de esfuerzos post-voladura, debido a esto es importante que los volúmenes de control definidos muestren una relación entre las voladuras realizadas y la sismicidad registrada. Ejemplos de esta relación entre la minería y sismicidad se observa en la figura 6, donde se observan tendencias similares en el comportamiento de ambas variables.

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 6. Evolución temporal de la producción mina y de la sismicidad inducida, para un volumen de control definido.

* *Ajuste de modelo Gutenberg-Richter*, cuando la relación frecuencia magnitud presenta una curva muy pronunciada que no sigue una tendencia lineal como la pronosticada por Gutenberg y Richter (figura 7-a) puede deberse a falencias instrumentales y también a la captura de distintos mecanismos de falla en un solo grupo de eventos tal como se ve en la figura 7-b, donde se muestra una población de eventos sísmicos con múltiples mecanismos de ruptura. La figura 7-c muestra un caso con una clara tendencia lineal, la cual es aceptable para este trabajo.

Gráfico

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 7. Distintos ejemplos de relaciones de frecuencia magnitud. a) muestra un caso causado por error de instrumentación y por múltiples mecanismos de ruptura. b) muestra un comportamiento bimodal dado por distintos mecanismos de ruptura, c) muestra un comportamiento donde se aprecia una clara tendencia lineal.

Considerando todo lo anterior, se han definido tres zonas de control principales, las cuales están asociadas a las estructuras mineralizadas, las voladuras realizadas y la ocurrencia de eventos microsismicos en estas zonas. De esta manera se definen los dominios sismogénicos de Vanesa, Hadas y Margot.

Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 8. Delimitación de las zonas-dominios sismogénicos (Raura, 2025).

Es importante destacar que los volúmenes acá definidos buscan solucionar un problema geomecánico (zonificación de comportamientos del macizo) pero también debe contemplar un punto de vista operacional, ya que se busca poder relacionar la sismicidad y la producción dentro de cada volumen. Mientras más volúmenes de control se definan, más difícil será generar relaciones con la producción minera y en los casos que se logra, la capacidad de predicción se limita debido a la poca cantidad de datos que se obtienen.

Una vez definidos los dominios sismogénicos, se procede a evaluar el mecanismo de ruptura y el peligro sísmico de cada sector. Los parámetros utilizados para estimar los mecanismos de ruptura son:

* Valor b de la relación GR.
* Ubicación espacial de los eventos sísmicos
* Temporalidad con relación a las voladuras

Es importante mencionar que tanto el mecanismo de ruptura como el peligro sísmico son parte de un análisis retrospectivo, basado en la historia de la mina. Para evaluar el peligro sísmico a futuro es necesario realizar simulaciones numéricas o algún modelo empírico.

*3.2.2 Valor la variable “b” de la relación Gutenberg-Richter*

Se evaluó la relación de GR, para cada uno de los volúmenes de control definidos anteriormente después de haber filtrado de magnitudes menores a -1, obteniendo que para el periodo enero 2024 -diciembre del 2024 los valores “b” observados son de 0,7 (Vanesa), 0.9 (Margot) y 0.76 (Hadas 1 y 4).

Gráfico

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 9. Distribución de frecuencia magnitud para los distintos volúmenes de control definidos.

Si bien los valores de “b” son un ligeramente más bajos que lo usualmente observado en minería subterránea, se mantienen dentro de los rangos de mayor ocurrencia a nivel mundial (entre 0.7 y 2.0). Valores b más altos implican una menor diferencia entre el evento sísmico más alto y bajo, lo cual significa que las rupturas son más parecidas en tamaño entre ellas, lo que se corresponde con un material más homogéneo. Por el contrario, un valor “b” más bajo indican una mayor variabilidad en las magnitudes y una mayor diferencia en los tamaños de ruptura.

Del análisis podemos considerar que el fracturamiento más homogéneo está relacionado con esfuerzos que afectan un volumen de roca homogéneo, que la fracturan sin patrones predefinidos y por eso los tamaños son relativamente homogéneos. Mayor variabilidad en el tamaño de las fracturas (valor “b” más bajo) ocurre debido a que el material presenta variabilidad espacial en su resistencia, correspondiente a un macizo heterogéneo ya sea por distintas litologías presentes o por una zona de falla que determina una zona inestable con rupturas más grandes. Bajo este esquema, valores “b” más altos se relacionan a falla del macizo como consecuencia directa de los esfuerzos inducidos post-voladura, mientras que valores “b” más bajos se relacionan con zonas de falla que se activan, donde las rupturas no ocurren necesariamente cerca de la voladura producto de la redistribución de esfuerzos a lo largo del macizo fracturado.

En base a esta interpretación, se concluye que la sismicidad en mina Raura ocurre debido a que la distribución de esfuerzos post voladura fractura zonas con discontinuidades, ya sea por contactos litológicos o fallas. Esto es de suma importancia, ya que las discontinuidades tienen el potencial de acumular carga para liberarla después, lo cual en la práctica significa que puede haber eventos sísmicos importantes varias horas después de las voladuras.

Finalmente, se observa que se logra un buen ajuste del modelo Gutenberg Richter, lo cual indica que los datos considerados siguen un mismo mecanismo de ruptura.

**4. Presentación y discusión de resultados**

Con base a los hallazgos con respecto a los dominios sismogénicos y características de la explotación minera, se establecen relaciones entre minería y sismicidad de manera de lograr un modelo empírico del peligro sísmico de la mina basado en la explotación mensual que se realiza en cada dominio sismogénico.

De forma inicial se realizará una comparación con el momento sísmico (símil de la deformación sísmica del macizo) y con la magnitud equivalente calculada de la mina. Posteriormente se realizará una comparación en términos de peligro sísmico, dado como la probabilidad anualizada de experimentar un evento con magnitud superior a cierto valor.

Finalmente se propone un modelo de peligro sísmico en base a la producción, para cada uno de los dominios sismogénicos generados anteriormente.

**4.1 Modelo empírico**

De manera inicial, se establece una relación entre las toneladas totales minadas en cada dominio sismogénico y la sismicidad en ese mismo volumen, considerando siempre eventos sísmicos con magnitud superior a -1.

Las relaciones entre minería y sismicidad se observan en la figura 10, donde se buscó una tendencia promedio que pudiera representar en términos globales el comportamiento de cada sector. En algunos casos parecieran haber distintas tendencias en un mismo sector, sin embargo, es necesario hacer un estudio con respecto al porqué del cambio de tendencia y verificar que sea debido a una condición minera y así elaborar distintas tendencias asociadas a distintas variantes de explotación. En este ejercicio, se ha asumido que el método y variantes de explotación son iguales y por lo tanto no se han desarrollado cambios en las líneas de tendencia por sector.

Los cambios de tendencia debido a condiciones geológicas-geotécnicas se han asumido como parte de la variabilidad natural de la roca y es parte de la dispersión en el resultado que se obtiene.

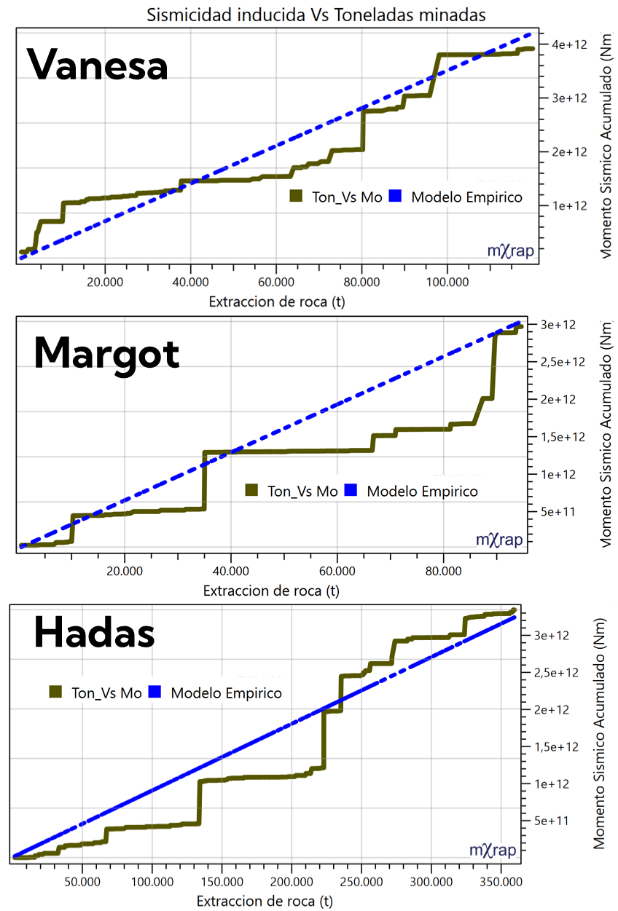


Figura 10. Relaciones entre toneladas extraídas y momento sísmico para los distintos dominios sismogénicos considerados.

Dado que la relación entre minería y sismicidad se considera lineal, esta puede expresarse de la forma:

ec. 1

Donde:

* *Mo,* corresponde al Momento sísmico en Nm.
* *Ton*, corresponde a las toneladas de la voladura.
* *V*, variable;
* *Cte.*, constante corresponden a valores establecidos empíricamente a partir de la figura 10.

Los resultados obtenidos empíricamente se observan en la tabla a continuación:

Tabla 1. Resultados de ecuación empírica para cada zona sismogénica.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Variable | Constante | Zona |
| 3.20000E+07 | 1.00000E+10 | Margot |
| 3.50000E+07 | 1.00000E+10 | Vanesa |
| 9.00000E+06 | 7.00000E+9 | Hadas 4 |
| 9.00000E+06 | 7.00000E+9 | Hadas 1 |

**4.2 Verificación del modelo**

Para verificar que las variables y constantes definidas anteriormente son válidas y representan el comportamiento del momento sísmico de la mina, se realizó el ejercicio inverso al anterior, donde en base a la producción de la mina durante el año 2024, los ponderadores de la tabla anterior y la ecuación 1, se calculó el momento sísmico total esperado para la mina. El resultado de este ejercicio se observa en la figura 11, donde se observa una buena correlación en términos generales del comportamiento sísmico medido (línea azul) y la estimación de momento sísmico de manera empírica (línea roja).

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 11. Comparación entre momento sísmico real y obtenido de método empírico, realizado de forma posterior a las calibraciones descritas anteriormente.

Otra forma de verificar los resultados del modelo empírico realizado es por medio de la magnitud equivalente (Meq). La magnitud equivalente corresponde a un número que representa en la misma escala de magnitud de la mina, toda la ruptura sísmica que ha ocurrido durante una ventana de tiempo, de esta manera, por medio de un único número en la escala de magnitudes de la mina, se representa todo el comportamiento sísmico de cada mes. Para calcular la magnitud equivalente, se utiliza la suma de los momentos sísmicos de todos los eventos sísmicos ocurridos en cada mes y luego se aplica la ecuación de Hans Kanamori para obtener la Magnitud Momento:

ec. 2

Donde:

* Mo corresponde a la suma de momentos sísmicos de cada mes.

El significado practico de esta magnitud equivalente es el de ilustrar toda la sismicidad que ocurre en un periodo de tiempo a través de un numero en una escala similar a la escala de magnitudes.

De la figura 12, se observa que la magnitud equivalente real, obtenida para cada uno de los volúmenes de control (VSA) suele ser algunos decimales menores que la magnitud equivalente empírica obtenida a través del modelo empírico desarrollado.

Gráfico

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 12. Resultados de análisis para cada uno de los dominios sismogénicos definidos. Se compara la magnitud equivalente real (estrellas) con la magnitud equivalente obtenida de manera empírica (círculos unidos por líneas), la cual es calculada en base a la producción mensual en cada dominio sismogénico (barras azules)

**4.3 Modelo de peligro sísmico empírico**

Para generar una herramienta practica que permita relacionar las toneladas en voladura con el peligro sísmico, se generó una tabla con los posibles tonelajes a extraer y sus respectivos peligros sísmicos. El procedimiento para llegar a estos valores es:

* Determinar tonelajes a extraer de manera mensual.
* En base al tonelaje, calcular una magnitud equivalente, utilizando las relaciones voladura-sismicidad establecidas.
* Una vez que se obtuvo la magnitud equivalente, se utiliza el valor “b” obtenido del análisis sísmico para calcular el valor “a” en cada dominio sismogénico.
* Con el valor “a” y valor “b”, es posible calcular el peligro sísmico.
* Dado que el tonelaje considerado es mensual, el peligro sísmico resultante también es mensual por lo que el resultado es anualizado.
* Se construye el gráfico que relaciones los tonelajes con las probabilidades.

Estos gráficos se observan en la figura 13 donde se concluye que la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud 2.5 o más es casi cierta en un periodo de un año con voladuras mensuales de más de 20 Kt en las estructuras de Vanesa y Margot, mientras que Hadas presenta los menores niveles de peligro sísmico, con probabilidades de un 70% de ocurrencia para voladuras de hasta 40Kt.

Es importante mencionar que la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico no es lo mismo que la probabilidad de un estallido de roca, ya que esta última es bastante menor.

Para que ocurra un estallido de roca debe ocurrir la probabilidad conjunta de un evento sísmico relevante, de que la velocidad pico de partícula sea suficiente para causar daño y de que el sistema de fortificación sea insuficiente y falle.

Gráfico

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura 13. Probabilidad de ocurrencia de un evento de magnitudes mayores a 2, 2.5 y 1.5 para los distintos dominios sismogénicos analizados.

**5. Conclusiones**

Se ha realizado un análisis a la información sísmica del año 2024 enfocado en la caracterización del comportamiento sísmico del macizo rocoso, orientado a generar una línea base en la calibración de modelos numéricos y también a generar un modelo empírico de peligro sísmico en base a la relación entre voladuras y sismicidad inducida.

Los principales hallazgos de este trabajo se refieren a el mecanismo de ruptura, se observa que la mayoría de los eventos sísmicos ocurren a las pocas horas post voladura y cercanos a la voladura cuando son de baja magnitud. Los sismos más grandes ocurren a una mayor distancia debido a fracturamiento del macizo en el entorno de los tajos. Los eventos de magnitud momento mayor a 1.5 ocurren casi exclusivamente en las unidades Vanesa y Hadas1. En base a esto se concluye que la sismicidad es en la mayoría de los casos el resultado directo de la distribución de esfuerzos post voladura, por lo cual cualquier método para estimar la sismicidad debe requerir como dato de entrada a las voladuras realizadas.

Se definieron 3 dominios sismogénicos, donde cada uno tiene un mecanismo de ruptura común (verificado por la pendiente del modelo GR), una relación determinada entre voladura y sismicidad y están agrupados en el mismo sector espacial. Esta zonificación se realizó principalmente para ayudar a la construcción del modelo de peligro sísmico empírico.

El modelo empírico que permite estimar la probabilidad de que, dada una voladura con cierto tonelaje, se genere un evento sísmico con una magnitud mayor o igual a un valor dado. Se ha considerado que el uso del modelo GR en base a la información sísmica provee una buena línea base para la posterior calibración de otro tipo de modelos, como empíricos o numéricos.

Las probabilidades de ocurrencia de sismicidad no deben compararse con las probabilidades de estallido de roca o de accidentabilidad, ya que para estas últimas es necesario considerar la probabilidad conjunta de otros sucesos, lo que hace que la probabilidad baje considerablemente.

El modelo empírico acá desarrollado no considera distintos métodos de minado, de tener variantes en los métodos de minado se podría generar modelos de peligro sísmico asociados a estos métodos de explotación.

**7. Referencias bibliográficas**

Wesseloo, J. (2020). Addressing misconceptions regarding seismic hazard assessment in mines: b-value, Mmax, and space-time normalization. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *120*(1), 67-80.

Gibowicz, S. J., & Kijko, A. (2013). *An introduction to mining seismology* (Vol. 55). Elsevier.

Jarufe, J., Perez, S., Hurtado, J. P., & Cifuentes, C. (2022). Seismic hazard calculation using the equivalent magnitude obtained from numerical modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *153*, 105081.

**Cody Alfredo Gomez Rozas**

Ingeniero Geólogo especializado en Geomecánica y Geotecnia, con más de 19 años de experiencia en minería a cielo abierto, subterránea y proyectos mineros en Latinoamérica. Ha liderado equipos en Geomecánica, ocupando cargos desde jefatura hasta Superintendencia y Gerencia corporativa en empresas mineras. Experto en evaluación y selección de métodos de explotación minera, diseño de minas a cielo abierto y subterráneas, así como en mecánica de rocas y sistemas de sostenimiento. Amplia experiencia en definición y ejecución de estrategias de monitoreo geotécnico, desarrollo de modelos geotécnicos y evaluación de diseños mineros basados en riesgo. Combina habilidades técnicas y de liderazgo en gestión de equipos geotécnicos en el sector minero.

Actualmente desempeñándome como Superintendente de Geomecánica y Geotecnia en Cía. Minera Raura.

**Juan Andres Jarufe Troncoso**

Universidad de Santiago de Chile/Kepler Spa. Chile.

Juan Jarufe es académico del Departamento de ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile y Consultor Senior de la Empresa Kepler, especializándose en el análisis del peligro sísmico inducido por excavaciones mineras profundas. además de dictar cátedras de mecánica de Rocas y Peligro sísmico en excavaciones subterráneas a realizado investigación en minería profunda en Perú, Chile, Canadá y Suecia, además de proyectos de consultoría en proyectos de minería y túneles en distintos países en Sudamérica.