

Metodología para la determinación de riesgo geotécnico en minería a cielo abierto

Methodology for determination of geotechnical risk in open pit

Javiera Chacón

Departamento de Geología, Universidad de Chile, Chile, Javiera.chacon.p@ug.uchile.cl

RESUMEN: El creciente consumo global de recursos minerales está impulsando la explotación de yacimientos cada vez menos accesibles, generando condiciones geotécnicas y geomecánicas más complejas. Esto aumenta significativamente el riesgo geotécnico, impactando en la seguridad, viabilidad técnica y económica, condicionando el desarrollo del proyecto. La evaluación de este riesgo, fundamental para la toma de decisiones y gestión efectiva, implica analizar el complejo comportamiento mecánico de rocas y suelos, considerando diversas características y parámetros presentes los que modifican el comportamiento de los materiales. Este trabajo, propone una metodología para evaluar el riesgo geotécnico en minas a cielo abierto, desarrollada en tres etapas: primero, una evaluación basada en análisis cuantitativos y cualitativos de las características anteriormente mencionadas, proporcionando los fundamentos teóricos; segundo, la calibración y validación mediante casos de estudio y generación de modelos, buscando conclusiones y mejoras. Por último, la tercera etapa, que concluye en la elaboración del software, el que actualmente se encuentra en las últimas etapas de su desarrollo. De esta manera, se obtiene una metodología que integra criterios técnicos y herramientas necesarias para evaluar este riesgo.

ABSTRACT: In open-pit mining operations, the depletion of initial reserves and the increasing difficulty in accessing new resources necessitate deeper mining operations, thereby raising geotechnical risk. Given the significant and complex task of assessing this risk, it is imperative to implement tools capable of evaluating and modeling such risk. This paper presents a methodology to assess geotechnical risk in open pit mining operations, setting the groundwork for the development of a tool that automates the construction of geotechnical risk models. This work consists of three main stages: The first involves assessing geotechnical risk based on quantitative and qualitative analyses of slope stability, providing the theoretical foundations for the methodology. In the second stage, the aim is to calibrate and validate the developed approach through case studies and the generation of respective geotechnical risk models to derive conclusions and enhancements. Finally, the third stage, which concludes with the development of the software, is currently in progress. In this way, a methodology is obtained that integrates technical criteria and necessary tools to evaluate geotechnical risk, representing a significant advancement in ensuring project safety and viability, as well as achieving effective risk management.

KEYWORDS: Geotechnical risk, Engineering geology.

1 INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es una técnica de extracción mineral basada en realizar excavaciones superficiales para acceder a los depósitos. Estas deben cumplir con criterios de seguridad y estabilidad, los cuales están definidos ya sea en estándares de las compañías mineras o por el organismo estatal que las supervisa. El agotamiento progresivo de las reservas está impulsando la adopción de diseños más agresivos los que conllevan un aumento del peligro geotécnico, generando condiciones o fenómenos de origen geotécnico y/o asociado a entes geotécnicos que afectan directa o indirectamente al proyecto minero.

En este sentido, el riesgo geotécnico será comprendido como las potenciales pérdidas materiales y/o económicas debidas a un evento geotécnico, de esta forma el riesgo será el resultado de la relación entre la probabilidad y las consecuencias de este.

La evaluación de riesgo geotécnico ha estado estrechamente ligada con los análisis de estabilidad geotécnica, centrándose en el cálculo del Factor de Seguridad (FoS), los cuales se realizan principalmente durante las etapas de planificación y diseño minero, con el objetivo de definir la geometría óptima del rajo (Hernández 2019). Sin embargo, la ausencia de normativas específicas en algunos países, sobre la frecuencia de los controles de estabilidad

en labores mineras, puede resultar en que estas evaluaciones se realicen reactivamente, es decir, en situaciones de evidente inestabilidad, limitando así la acción preventiva.

Esta situación es particularmente problemática considerando que los proyectos mineros experimentan cambios significativos durante desarrollo, especialmente debido a los cambios geométricos constantes a las que se somete un rajo abierto, persiguiendo la maximización de la recuperación de mineral. La falta de un monitoreo continuo y preventivo puede, por tanto, no reflejar adecuadamente los riesgos geotécnicos cambiantes asociados, subrayando la necesidad de un enfoque más dinámico y proactivo en la evaluación y gestión del riesgo geotécnico en minería a cielo abierto. Reconociendo las limitaciones del FoS, la industria ha desarrollado una serie de metodologías y herramientas para la evaluación de peligros y riesgos geotécnicos, entre ellas:

- Índice de Riesgo Geotécnico (GRI) (Itasca 2018): Metodología que reúne los elementos clave comúnmente involucrados en un análisis de estabilidad geotécnica y proporciona una estimación relativa de la condición de riesgo para un diseño dado. Los elementos clave que participan en su definición son el diseño geométrico y los componentes del modelo geotécnico (modelos

geológicos, de resistencia del macizo rocoso, estructurales e hidrogeológicos).

- GeoHazmap (Castro et al. 2011): Software que permite evaluar los posibles peligros relacionados con minas a cielo abierto y subterráneas, tanto espacial como estadísticamente, y presentar los resultados de la evaluación de peligros en forma gráfica 3D. Los peligros son identificados y abordados caso por caso, permitiendo que el software pueda personalizarse y/o calibrarse según el rendimiento real del talud de la fosa.
- Evaluación del Riesgo de Caídas de Rocas para Canteras (ROFRAQ) (Alejano 2006): Enfoque probabilístico basado en una secuencia de eventos: a) Existencia de bloques separados del macizo rocoso. b) Equilibrio metaestable de los bloques. c) Ocurrencia de fenómenos desestabilizadores. d) Trayectoria del material rocoso inestable. e) Impacto potencial con máquinas o trabajadores.

De esta forma, la evolución de los métodos de evaluación de riesgos geotécnicos en minería ha llevado al desarrollo de procedimientos que, aunque son matemáticamente menos precisos que los tradicionales, ofrecen una perspectiva más realista de las condiciones de seguridad en el entorno minero. Estos enfoques empíricos se ajustan mejor a las circunstancias reales de los lugares de trabajo, particularmente en lo que respecta a los taludes en producción y paredes finales de los rajes.

Estas nuevas metodologías amplían el alcance del análisis de riesgos, pero no profundizan en la estimación de la probabilidad de daños o no abordan el riesgo global de la mina. La literatura sobre riesgos en minería, especialmente en el ámbito geotécnico, es escasa. Las investigaciones se han dispersado en diversos aspectos, relegando los temas geotécnicos a un segundo plano. En este trabajo la metodología presentada se enfoca en evaluar el riesgo geotécnico, por lo que considera tanto los factores geológicos como las consecuencias, determinando el peligro y sus efectos que pueden ser cuantificados a través de diversos parámetros. De esta forma, la evaluación del riesgo geotécnico resulta una tarea compleja, pues se requiere considerar múltiples variables y sus interacciones.

2 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo presentada en este estudio consta de dos etapas, tal como se ve en la Figura 1. La primera etapa, identificada en rojo, consiste en una revisión teórica de los factores que controlan el riesgo geotécnico en minería a cielo abierto y un sistema de evaluación de estos. La segunda etapa, resaltada en azul, corresponde a la definición de tareas que permiten determinar, de manera práctica, los elementos que controlan el riesgo en cada faena minera, permitiendo jerarquizarlos y evaluarlos, de manera que se obtenga una evaluación integrada de riesgo. De manera complementaria, se está desarrollando un software, el cual permitirá automatizar el proceso de la etapa 2, entregando como resultado, un mapa de riesgo geotécnico para un rajo en especial.

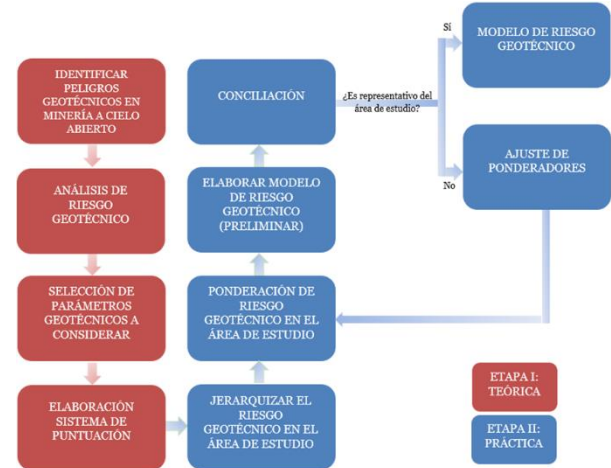


Figura 1. Diagrama de flujo presentando las dos etapas metodológicas de este estudio.

2.1 Identificación de peligros geotécnicos

Esta etapa inicial se enfoca en la identificación de los peligros geotécnicos que pueden afectar a las operaciones mineras a cielo abierto. Esto implica una revisión detallada de la bibliografía, prestando especial atención a conceptos, enfoques y metodologías utilizadas previamente. El objetivo principal es elaborar un marco conceptual con la definición de términos y caracterización de los peligros geotécnicos.

2.2 Análisis de riesgo geotécnico

En esta etapa, se realiza un análisis detallado de cada peligro geotécnico identificado en la etapa anterior. El análisis se lleva a cabo de manera independiente para cada peligro, considerando dos aspectos principales: la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias para la operación. Para evaluar la probabilidad de ocurrencia, se examinan cuidadosamente los factores que pueden condicionar y desencadenar cada evento geotécnico. Por otro lado, la evaluación de los elementos expuestos implica establecer las áreas que podrían verse afectadas por el peligro.

2.3 Selección de parámetros geotécnicos a considerar

Esta etapa se centra en la definición precisa de los parámetros y datos que servirán como variables de entrada para el modelo de riesgo geotécnico. Basándose en los resultados de las etapas anteriores, se seleccionan los peligros geológicos más relevantes y significativos para el contexto específico de operaciones mineras a cielo abierto.

Para cada peligro seleccionado, se elaboran tablas de clasificación detalladas, donde se asigna a cada parámetro considerado un rango de valores o categorías. Estas tablas permitirán una evaluación cuantitativa de la probabilidad de ocurrencia de cada peligro. Paralelamente, se desarrollan tablas para evaluar las consecuencias, basadas en los posibles daños resultantes del peligro geotécnico. A cada factor se le asigna un valor numérico según su gravedad, lo que permitirá una evaluación cuantitativa del impacto potencial.

2.4 Elaboración de sistema de puntuación

En esta etapa final, se desarrolla un sistema de puntuación que modela la interacción entre los distintos factores de riesgo geotécnico. El sistema se basa en dos ecuaciones principales:

Probabilidad de ocurrencia:

Se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$PO = \alpha A + \beta B + \dots + \mu N \quad (1)$$

Donde, PO corresponde a la probabilidad de ocurrencia, α, β, γ son los coeficientes resultantes de análisis de sensibilidad y normalización. Y A, B, C son resultado de la valorización de cada peligro según jerarquización.

La fórmula presentada permite la estimación cuantitativa del peligro geotécnico para distintos escenarios posibles dentro de la minería a cielo abierto. Por ello, el valor de las variables (A, B, C, etc.) y los coeficientes (α, β, γ , etc.) son resultado del análisis realizado a la mina en estudio basado en las tablas elaboradas en la etapa anterior. La ecuación entrega puntajes que varían entre 0 y 100, donde las puntuaciones más altas indican mayor probabilidad de peligro geotécnico.

Valor de impacto

Se calcula mediante la suma directa de los valores asignados a cada consecuencia. Estos valores provienen de las tablas de clasificación elaboradas en la etapa anterior, donde a cada factor de consecuencia se le asignó un valor numérico según su gravedad.

$$VI = f_1 + f_2 + \dots + f_n \quad (2)$$

Con

VI= Valor de impacto.

f_1, f_2, f_n = Valorización de cada consecuencia según jerarquización.

Al sumar estos valores, se obtiene un valor total de impacto que representa la magnitud acumulada de las consecuencias derivadas del peligro geotécnico evaluado. Este enfoque permite una evaluación más directa y transparente de las consecuencias, basada en los criterios establecidos en las tablas de clasificación.

Finalmente, la evaluación del riesgo geotécnico se realiza mediante el uso de matrices de riesgo (Figura 2). Estas matrices combinan los valores obtenidos de la probabilidad de ocurrencia del peligro geotécnico (PO) y el valor de impacto (VI), permitiendo asociar ambos parámetros.

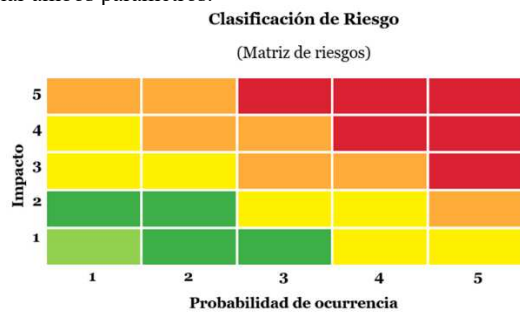


Figura 2. Matriz de riesgo.

La matriz de riesgo consiste en una tabla de doble entrada de 5 x 5 cuyo resultado expresa el nivel de riesgo en un rango de cinco niveles: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. El proceso de evaluación consiste en ingresar el resultado de la Probabilidad de ocurrencia en la columna correspondiente y el resultado del análisis de severidad de las consecuencias en la fila apropiada. La intersección de ambos va a determinar el nivel de riesgo resultante. Esta matriz de riesgo proporciona una herramienta visual y cuantitativa que facilita la gestión de riesgos geotécnicos en minería a cielo abierto.

2.5 Jerarquizar el riesgo geotécnico en el área de estudio

Se recopilan y analizan antecedentes relevantes, incluyendo datos geológicos, geotécnicos e históricos de la mina. Un aspecto crucial de esta etapa es la interpretación de los datos específicos de la mina para asignar puntajes según las tablas de clasificación desarrolladas previamente. Este proceso permite determinar los valores de las variables (A, B, C, etc.) que se utilizarán en la ecuación de probabilidad de ocurrencia, así como las variables (f_1, f_2, f_n) que se aplicarán en la ecuación para el valor de impacto, asegurando que el modelo se ajuste de manera precisa a las condiciones particulares del sitio.

2.6 Ponderación del riesgo geotécnico en el área de estudio

Tras el análisis de los riesgos geotécnicos, se identifican los peligros geotécnicos que ejercerán un control fundamental en el desarrollo del proyecto. En esta etapa, se asignan porcentajes a cada categoría de riesgo, de manera que representen adecuadamente el estado de riesgo de la mina. Estos porcentajes se traducen en los coeficientes (α, β, μ) de la ecuación mediante un análisis de sensibilidad. Este proceso es crucial para capturar las dependencias entre los diferentes factores de riesgo y asegurar que el modelo refleje con precisión la realidad del sitio.

2.7 Elaboración de modelo de riesgo geotécnico

Utilizando el software QGIS, se generan múltiples capas de entrada basadas en los datos analizados en las etapas anteriores. Estas capas se integran mediante la fórmula de nivel de peligro geotécnico. Posteriormente, se realiza un cruce con la evaluación de las consecuencias (valor de impacto) para elaborar un mapa de riesgo geotécnico. El resultado es modelo de riesgo geotécnico que presente una zonificación del riesgo geotécnico que incluye una simbología clara e información sobre las razones que fundamentan cada categoría de riesgo en sectores específicos de la mina.

2.8 Conciliación y mejoras de mapa de riesgo geotécnico

La última etapa consiste en realizar el contraste entre los resultados obtenidos del modelo de riesgo geotécnico con el estado actual de éste en la mina y con inestabilidades presentadas históricamente. Proceso que permitirá realizar un análisis crítico de la propuesta, identificando limitaciones y estableciendo ajustes o mejoras necesarias para obtener resultados más precisos. En caso de que el modelo de riesgo geotécnico represente adecuadamente la condición actual de la mina, se establece como modelo de riesgo geotécnico. En caso contrario, se deberá volver a la etapa

“Ponderación de riesgo geotécnico”. De esta forma, se podrá determinar la aplicabilidad y eficacia de la metodología, generando una herramienta útil para la identificación del riesgo geotécnico en operaciones mineras.

2.9 Elaboración de software

Como etapa final, realizada en conjunto con la fase de validación y con el respaldo de un equipo multidisciplinario, se desarrollará un software capaz de generar automáticamente mapas de riesgo geotécnico. Este sistema permitirá integrar y procesar de forma eficiente toda la información recopilada, facilitando la elaboración de estos mapas críticos para la evaluación y mitigación de riesgos geológicos.

La elaboración del mapa de riesgo geotécnico se llevará a cabo aplicando la metodología previamente descrita. El área de estudio se subdividirá en celdas o polígonos, y se utilizará la función matemática mencionada anteriormente para calcular las puntuaciones finales asociadas a los riesgos identificados en cada sector.

3 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los pasos metodológicos presentados en la sección anterior.

3.1 Identificación de peligros geotécnicos

Los peligros geotécnicos en la minería son diversos y varían según la operación minera, influenciados por factores como ubicación, instalaciones y características específicas. Su distribución y frecuencia no son uniformes, incluso dentro de una misma mina. Entre los principales peligros geotécnicos se incluyen:

- Geometría y orientación de la excavación.
- Tensiones naturales e inducidas.
- Propiedades físicas de la roca/suelo.
- Factores ambientales (precipitaciones, procesos de hielo/deshielo).
- Condiciones hidrogeológicas (presión de poros, nivel freático).
- Estructuras geológicas.
- Actividades mineras.
- Historial de inestabilidad.
- Actividad sísmica.

Con ello, el comportamiento de un talud está determinado tanto por sus características intrínsecas como por las del entorno. Cualquier problema geotécnico surge de uno o más de estos peligros y sus interacciones. Por lo tanto, es crucial conocer estos factores, al menos aproximadamente, desde las etapas iniciales de un proyecto minero.

3.2 Análisis de riesgo geotécnico

Geometría y orientación de la excavación

En general, conforme aumenta la altura del talud los problemas tienden a ser más complejos (Ramírez Oyanguren, P, Alejano Monge, L. 2008), entre ellos:

- Mayor incidencia de las condiciones estructurales.
- Fenómenos de fluencia y rotura progresiva.

- Mayor influencia de factores hidrogeológicos.
- Mayor susceptibilidad frente a fenómenos dinámicos.
- Inestabilidades asociadas a estados tensionales elevados.

Ancho de berma: Condiciona la capacidad de contener los desprendimientos de material o caída de rocas desde bancos superiores.

Tensiones naturales e inducidas

Las tensiones que actúan sobre una mina a cielo abierto pueden ser naturales, que corresponde al estado tensional inicial del macizo rocoso en cualquier punto de su interior, que es el correspondiente a los procesos tectónicos y gravitacionales o inducidas que se generan como consecuencia de la modificación del estado de esfuerzos naturales debido a un reajuste tensional alrededor de las excavaciones.

Cualquier modificación en el estado tensional de un sólido origina desplazamientos relativos entre puntos de su interior, que se cuantifican adecuadamente mediante su deformación.

Propiedades físicas de la roca/suelo

La naturaleza del material geológico juega un papel fundamental en la determinación del tipo y grado de inestabilidad que puede desarrollarse en un terreno. Diferentes litologías presentan diversos grados de susceptibilidad a deslizamientos o roturas, siendo las propiedades físicas y resistentes del material factores determinantes en la estabilidad global del terreno.

Las características geológicas clave incluyen el tipo de material (sea suelo o roca), su composición, densidad, plasticidad, contenido de humedad y permeabilidad. En el caso específico de las rocas, su litología, grado de alteración y meteorización influyen significativamente tanto en la resistencia de la roca intacta como en la del macizo rocoso en su conjunto.

Es importante destacar que las unidades litológicas menos competentes pueden tener una influencia notable en la estabilidad, especialmente en situaciones donde se producen concentraciones importantes de esfuerzos, deformaciones o desplazamientos. La resistencia y deformabilidad de estas unidades pueden ser factores críticos en el comportamiento general del terreno.

Condiciones hidrogeológicas

La presencia de agua compromete significativamente la estabilidad de los taludes mineros. El agua genera cambios en la presión de poros, produciendo una tensión hidrostática sobre las rocas de magnitud uniforme en todas direcciones. Esto reduce la resistencia al disminuir los esfuerzos normales y la pérdida de cohesión entre partículas. Consecuentemente, si los poros se encuentran rellenos de agua menor será su resistencia. Además, el agua aumenta los esfuerzos de corte al incrementar el peso del terreno y genera fuerzas desestabilizadoras en discontinuidades, donde puede infiltrarse por las estructuras ejerciendo tensiones contrarias a las que lo mantienen estable.

Las aguas subterráneas también afectan las propiedades mecánicas de las rocas mediante procesos de meteorización química y física, erosión de materiales blandos y arcillosos, arrastre de materiales finos y disolución. Estos procesos pueden abrir discontinuidades y crear cavidades.

Las consecuencias de la minería bajo el nivel freático se pueden dividir según su efecto en las operaciones y su efecto en la estabilidad del talud. En primer lugar, se tiene que en general los tajos abiertos (excepto aquellos en cortes de ladera) actúan como sumideros de agua superficial, es decir, el agua superficial fluye

hacia el piso del tajo desde todas las direcciones dentro del “área de influencia” (que aumenta a medida que el tajo se excava progresivamente más profundo por debajo del nivel freático, lo que va a provocar una reducción en la eficiencia operativa y un aumento en los costos producto de:

- Pérdida de acceso a áreas del tajo debido a inundaciones.
- Procesos de perforación y voladura ineficientes.
- Mayor desgaste y daño del equipo.
- Pérdida general de eficiencia operativa.

Mientras, por los motivos vistos anteriormente, la presencia de agua va a reducir la estabilidad de los taludes debido a una pérdida de resistencia en los taludes del rajo.

Factores ambientales

Los procesos de meteorización física y química juegan un papel crucial en la alteración de las rocas. La meteorización física, principalmente controlada por factores climáticos como la temperatura y la humedad, produce la fracturación mecánica de las rocas a través de diversos mecanismos:

La formación de hielo en poros y grietas puede causar fracturas debido al aumento de volumen del agua al congelarse. En climas áridos, la insolación genera acusadas diferencias térmicas en cortos períodos, provocando tensiones por dilatación y contracción que fracturan las rocas. La cristalización de sales en poros o grietas también puede causar rotura y disgregación por la expansión de los cristales.

Algunos materiales, como arcillas y sulfatos, experimentan hidratación, aumentando su volumen y generando deformaciones que pueden fracturar la roca. La capilaridad en minerales con estructuras hojosas o fisuras permite la penetración de agua, que ante cambios de temperatura puede causar roturas estructurales debido a la diferencia en los coeficientes de dilatación.

Por otro lado, los procesos químicos, que ocurren en presencia de agua y son intensificados por la temperatura, son más pronunciados en climas húmedos que en secos. Estos procesos transforman los minerales existentes en nuevos compuestos e incluyen procesos de oxidación y reducción, hidratación, hidrólisis, disolución.

Estos procesos de meteorización, tanto físicos como químicos, actúan de manera sinérgica en la naturaleza, contribuyendo significativamente a la alteración y degradación de las rocas a lo largo del tiempo.

Las precipitaciones, son otro factor importante y actúan aumentando el grado de saturación de los materiales y, por tanto, incrementar la presión de fluidos, lo que genera una disminución de la resistencia de los materiales durante un periodo determinado. Además, el aumento en la escorrentía superficial producido por las lluvias intensifica la erosión de laderas, pudiendo activar mecanismos de inestabilidad (Lara 2007). Dependiendo del volumen, la intensidad y la distribución de las precipitaciones, así como del régimen climático y la respuesta del terreno a estas precipitaciones, pueden desencadenar inestabilidades (González de Vallejo et al. 2002).

Estructuras geológicas

Las estructuras geológicas abarcan una variedad de elementos como planos de estratificación, discontinuidades, pliegues, foliación, esquistosidad, sets de diaclasas, grietas de tensión y fallas. Estas formaciones pueden definir zonas de debilidad, marcar transiciones entre unidades geológicas, indicar áreas de

cizallamiento, señalar sectores de menor calidad geomecánica o sugerir potencial actividad sísmica asociada a fallas activas o reactivación de ellas. La caracterización de estas estructuras se realiza en dos niveles: las estructuras principales, que son aquellas de mayor envergadura y continuidad espacial, afectando grandes volúmenes de roca y las estructuras secundarias, que incluyen discontinuidades de menor escala como juntas y fallas a nivel de banco, con influencia más localizada.

La presencia de estructuras geológicas mayores juega un papel crucial en la estabilidad de los macizos rocosos. Su orientación y condición son determinantes, ya que indican la dirección de los esfuerzos y revelan posibles campos tensionales anisótropos. Estas estructuras definen potenciales planos de rotura, delimitan bloques de roca de diversa competencia y pueden actuar como canales conductores de agua, influyendo así tanto en la dirección del movimiento como en el tamaño de los bloques susceptibles a deslizarse. Además, las zonas adyacentes a las estructuras principales suelen presentar una disminución en la calidad del macizo rocoso debido a la presencia de materiales de relleno como salbanda, roca triturada o rellenos arcillosos, así como un aumento en el grado de fracturamiento. Así, la estructura geológica, en combinación con los parámetros geométricos del talud van a definir los problemas de estabilidad que se puedan generar.

Actividades mineras

La intervención humana, y para este estudio en particular la actividad minera, pueden causar modificaciones en el entorno que con frecuencia juegan un papel decisivo en la generación de mecanismos de inestabilidad.

Entre ellos, se encuentra la construcción de infraestructura que disminuirá gradualmente la resistencia de los depósitos o macizos rocosos; la acumulación de material del suelo, que luego puede ser movilizado por eventos posteriores, o la generación de taludes a partir de rellenos artificiales, cuya heterogeneidad y en general, baja compactación, los hacen depósitos altamente densificables y con riesgo de colapso (Sernageomin y Pontificia Universidad Católica de Valparaíso 2018). Asimismo, la redistribución del peso de los materiales y la alteración del estado tensional de las laderas debido a la construcción y operación minera pueden generar sobrecargas estáticas. Estas sobrecargas modifican el equilibrio de fuerzas en el terreno, potencialmente desestabilizando áreas previamente estables.

Además, las actividades realizadas en la faena contribuirán a la generación de sismicidad inducida, lo cual influirá en la desestabilización producto de vibraciones que pueden volverse frecuentes y constantes, reduciendo paulatinamente la resistencia de los depósitos y macizos rocosos.

El daño inducido por tronadura es todo cambio que reduce las propiedades resistentes del macizo rocoso como material físico. El daño sobre el macizo rocoso debido a este proceso es causado por tres mecanismos distintos:

- A través de la generación de nuevas fracturas al ser superada la resistencia dinámica de la roca.
- Por extensión y apertura de fracturas existentes debido a una excesiva presión de gases.
- Al provocar inestabilidad de un mecanismo de falla (falla plana, cuña, vuelco, deslizamiento circular, etc.) que en condiciones estáticas era estable.

En la evaluación del daño por tronadura, se distinguen dos

categorías principales. El daño en campo cercano producido por fracturamiento de roca intacta, por abertura y extensión de fracturas rellenas y pérdida de cohesión en los planos de discontinuidad. Por otro lado, el daño en campo lejano se caracteriza por la apertura y extensión de fracturas y por activación de mecanismos de inestabilidad preexistentes.

Historial de inestabilidades

Los depósitos de inestabilidades anteriores, por lo general son sensibles a movilizarse nuevamente ya que a menudo adquieren geometrías irregulares y poco consolidadas. La naturaleza heterogénea de estos depósitos, combinada con su disposición frecuentemente desordenada, los hace particularmente vulnerables a nuevos episodios de inestabilidad.

Actividad sísmica

Los sismos pueden generar movimientos de talud de diversos tipos, dependiendo de las características de los materiales involucrados, la magnitud del sismo y de la distancia al epicentro. Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometido el talud, pudiendo producir su inestabilidad (Lara 2007). Además, otros efectos que pueden generar los eventos sísmicos se encuentran:

- Rotura en superficie del terreno por desplazamiento de fallas activas.
- Deformaciones superficiales inducidas por fallas activas.
- Posible actividad sísmica asociada a fallas activas o reactivación de fallas.
- Reduce las propiedades resistentes del macizo rocoso.
- Licuefacción.

Consecuencias

En general, se detalla que la accidentabilidad minera es baja en comparación con las demás industrias, sin embargo, es la que mayor expuesta está (Sernageomin 2019). Entre los ámbitos que se pueden ver afectados se encuentran el ámbito ambiental, ámbito económico, ámbito de seguridad o social.

Según el registro de Sernageomin, se tiene que en Chile el mayor número de accidentados es debido a accidentes cuya causa inmediata sea la caída de roca, incluyendo los derrumbes y colapso por subsidencias.

Esta situación, se repite en Estados Unidos, donde “Caída, rodadura o deslizamiento de material” está clasificada dentro de las tres primeras categorías con mayor número de fatalidades y costos

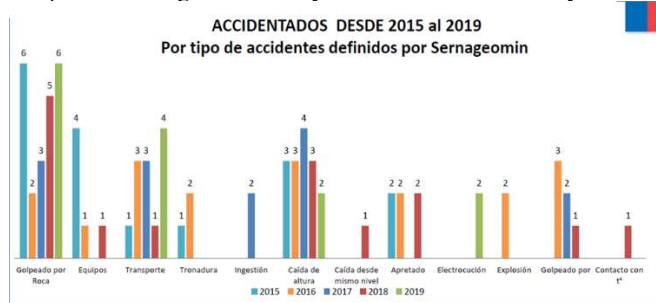


Figura 3. Cantidad de accidentes según tipo de accidentes en Chile. Extraído de SERNAGEOMIN (2019).

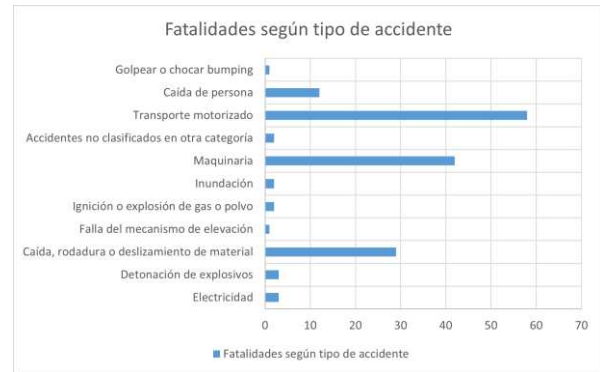


Figura 4. Fatalidades según tipo de accidentes en EEUU. A partir de (Mine Safety And Health Administration (MSHA), s. f.).

3.3 Selección de parámetros geotécnicos

Se consideran 6 parámetros principales que buscan representar cada uno de los peligros mencionados anteriormente. Estos parámetros se presentan de manera concisa en la Tabla 1.

Conciliación geotécnica

Las condiciones geométricas son establecidas en las etapas de diseño, donde se estima el ángulo cara de banco mediante un análisis cinemático, para permitir una operación segura para trabajadores y equipos. Además, se determina la altura del banco, sujeta al tipo de equipo de carguío que se utilizará, y el ancho de bermas, que busca contener los desprendimientos de material o caídas de rocas desde bancos superiores. Por lo tanto, para considerar estos aspectos, se utilizarán el factor de condición y el factor de diseño, los que serán útiles para observar posibles desviaciones y fallas del diseño que puedan comprometer la estabilidad del talud.

Características del macizo rocoso

En este caso, se busca representar la calidad de la roca, como un indicador de resistencia, para ello se utilizan las clasificaciones para el macizo rocoso basadas en parámetros como GSI y RMR.

Intervención antrópica

Incluye la presencia de infraestructura cercana al rajo que pueda afectar la estabilidad de la mina y la existencia de sobrecargas.

Antecedentes generales

Se considera la existencia de inestabilidades previas como un antecedente crítico. Paralelamente, el registro detallado de los eventos sísmicos que hayan superado los parámetros de diseño establecidos en el estudio de riesgo sísmico original.

Modelo estructural

Uno de los criterios para evaluar la presencia de fallas o zonas de fallas, es considerar los ponderadores según su cercanía a las fallas mayores. Así las zonas atravesadas por fallas serán zonas más susceptibles a deslizamientos, zonas a distancia de menos de 100 metros de la traza como moderadamente susceptibles y unidades a más de 100 metros de la traza como menos susceptibles. Sin embargo, estas pueden ser modificadas dependiendo de las condiciones del terreno donde se encuentre el proyecto.

Complementariamente, se considerará la identificación de los modos de falla o probabilidades de falla obtenidos en el desarrollo del diseño de la mina.

Modelo hidrogeológico

En este caso, se consideran las condiciones del nivel freático y presión de poros como datos de entrada para la evaluación de riesgo geotécnico, además de las precipitaciones y variaciones estacionales de humedad.

Tabla 1. Factores a considerar en metodología.

Categoría	Factor a considerar
Conciliación geotécnica	Factor de diseño
	Factor de condición
Modelo de masa rocosa	Calidad de macizo rocoso (RMR, GSI)
Modelo estructural	Cercanía a una falla mayor y/o zona de cizalle
	Probabilidad de falla
Modelo hidrogeológico	Nivel freático
	Procesos de hielo/deshielo
	Presión de poros
	Pluviometría
Intervención antrópica	Presencia de infraestructura cercana al rajo
Antecedentes generales	Registro de sismos con aceleraciones mayores al máximo probable
	Registro de inestabilidades previas

3.4 Elaboración de sistema de puntuación

La evaluación y cuantificación de riesgos en un sitio minero es un proceso que requiere establecer una escala de evaluación que permita medir y ponderar adecuadamente cada peligro para estimar el posible comportamiento del talud ante la ocurrencia de un peligro determinado. Además, se debe calificar los criterios según las consecuencias esperadas para el peligro geotécnico, considerando su nivel de importancia relativa. Una vez definidos los criterios y su importancia relativa, se procede a calificarlos y sumarlos, lo que produce un índice de riesgo general para la superficie de la mina.

Para cada grupo de peligros, se ha asignado un peso porcentual que define su grado de importancia en la generación del evento. De esta forma, el evaluador, deberá ingresar a la tabla correspondiente e identificar la valorización de cada factor de acuerdo con la situación en la que se encuentra el proyecto minero y determinar el nivel final mediante el empleo de la Ecuación $PO = \alpha A + \beta B + \dots + \mu N$ (1).

Esta formulación implica una evaluación de los factores críticos que van a determinar el potencial de falla en cada dominio geotécnico a escala de zonas de diseño, pues cada zona tiene configuraciones y características geológicas, geotécnicas y estructurales similares. La Tabla 3 detalla las especificaciones para cada factor, indicando los rangos de valores posibles y el peso asignado a cada uno de ellos. Estos pesos representan la contribución de cada rango a la probabilidad total.

Una vez obtenidos los valores de los factores y aplicados los ponderadores correspondientes, se procede a sumar los pesos de cada factor para obtener un valor total, según lo indicado en la Ecuación 1. Este valor total se utiliza para determinar la clasificación de la probabilidad de generación del mecanismo de inestabilidad, según los criterios establecidos en la Tabla 2. Esta tabla define los rangos de valores totales y su correspondiente clasificación de probabilidad, que puede ser muy baja, baja, media, alta y muy alta.

De igual manera que para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia, se requiere determinar las pautas de evaluación para la severidad de las consecuencias. Así, se definen rangos para evaluar el impacto de la inestabilidad en la superficie indicados en la Tabla 4. Cada rango se asocia con un valor numérico que representa la severidad del impacto, según se ve en la Tabla 2.

El análisis de probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias se integran en la matriz de riesgo. Los valores de probabilidad se asignan a las columnas, mientras que los de severidad se ubican en las filas. La intersección de estos valores determina el nivel de riesgo específico para cada unidad evaluada.

Tabla 2. Clasificación según probabilidad de ocurrencia y consecuencias.

Valor asignado	1 (Muy bajo)	2 (Baja)	3 (Media)	4 (Alta)	5 (Muy alta)
Probabilidad	[0-15)	[15-25)	[25-50)	[50-75)	[75-100]
Valor de impacto	[0-3)	[3-6)	[6-9)	[9-12)	[12-15]

Tabla 3. Factores y rangos para evaluación de probabilidad de ocurrencia.

<i>Categoría</i>	<i>Factores</i>	<i>Rangos</i>	<i>Valor asignado</i>
Conciliación geotécnica	Factor de diseño	De acuerdo con diseño de ingeniería o mayor	0
		Ocasionalmente menor al diseño de ingeniería.	0.5
		Construcción sistemática, menores a lo indicado en el diseño o bien, sin monitoreo.	1
	Factor de condición	Medias cañas y pared estabilizada	0
		Se aprecian medias cañas, pero falta estabilización	0.25
		Sobre excavado en la base del banco	0.5
		Deudas en parte superior	0.75
		Bloques sueltos en la cara del banco y falta de carguío	1
Modelo de masa rocosa	Considerar la calidad del macizo rocoso según RMR	80-100	0
		60-80	0.25
		40-60	0.5
		20-40	0.75
		0-20	1
	Considerar la calidad del macizo rocoso según GSI	80-100	0
		60-80	0.25
		40-60	0.5
		20-40	0.75
		0-20	1
Modelo estructural	Cercanía a fallas mayores	Unidad a más de 100 metros de falla mayor	0
		Unidad entre 60 y 100 metros de falla mayor	0.25
		Unidad entre 40 y 60 metros de falla mayor	0.5
		Unidad entre 20 y 40 metros de falla mayor	0.75
		Unidad a menos de 20 metros de falla mayor	1
	Probabilidad de falla	0-10%	0
		10-30%	0.5
		30-65%	0.75
		65-100%	1
Modelo hidrogeológico	Nivel freático	Nivel freático muy profundo (>50m bajo superficie)	0
		Nivel freático profundo (30-50m bajo superficie)	0.25
		Nivel freático moderado (10-30m bajo superficie)	0.5
		Nivel freático poco profundo (5-10m bajo superficie)	0.75
		Nivel freático superficial (<5m bajo superficie)	1
	Presión de poros	Muy baja	0

		Baja	0.25	
		Media	0.5	
		Alta	0.75	
		Muy alta	1	
Pluviometría		Lluvia anual (mm):<100; Nieve anual (cm):<10	0	
		Lluvia anual (mm):100-350; Nieve anual (cm): 10-35	0.25	
		Lluvia anual (mm):350-1000; Nieve anual (cm):35-100	0.5	
		Lluvia anual (mm):1000-2000; Nieve anual (cm):100-200	0.75	
		Lluvia anual (mm):>2000; Nieve anual (cm):>200	1	
Antecedentes generales	Registro o evidencia de mecanismos de inestabilidad	Ningún evento registrado	0	
		1 evento registrado en periodo de evaluación	0.25	
		2-3 eventos registrado en periodos de evaluación	0.5	
		4-5 eventos registrados en periodo de evaluación	0.75	
		Más de 5 eventos en periodo de evaluación	1	
Registro o evidencias de sismos con aceleración superior a la máxima		Ningún evento registrado	0	
		Se registra	1	
Intervención antrópica	Presencia de infraestructura cercana	Sin infraestructura cercana	0	
		Infraestructura a más de 500m	0.25	
		Infraestructura entre 200-500m	0.5	
		Infraestructura entre 50-200m	0.75	
		Infraestructura a menos de 50m	1	
	Sobrecargas estáticas		Inexistencia de sobre cargas	0
			Existencia baja de sobrecargas (<1kt/m ²)	0.5
			Existencia moderada de sobrecargas (1-5kt/m ²)	0.75
			Existencia elevada de sobrecargas (>5kt/m ²)	1

Tabla 4. Factores a considerar para evaluación de las consecuencias.

Factor	Potencial de impacto				
	1 (Muy bajo)	2 (Baja)	3 (Media)	4 (Alta)	5 (Muy alta)
Seguridad (f_1)	Accidente menor, sin tiempo perdido, no requiere tratamiento médico.	Accidente menor, sin tiempo perdido, requiere tratamiento médico.	Accidente con tiempo perdido o enfermedad ocupacional incapacitante <40%.	Accidente o enfermedad ocupacional que causa una fatalidad o incapacidad permanente.	Accidente o enfermedad ocupacional que causa múltiples fatalidades o incapacidades permanentes.
Medio ambiente (f_2)	Impacto ambiental de baja significancia.	Impacto ambiental menor, localizado y reversible a corto plazo.	Impacto ambiental moderado, con efectos en el corto plazo y reversible naturalmente.	Daño ambiental reversible, con efectos por mediano plazo en área extensa, que	Daño ambiental irreversible, con efectos por largo plazo en área extendida. Puede afectar el permiso ambiental vigente.

					requiere acciones de remediación.
Costos (f_3)	Pequeñas reparaciones en equipos o infraestructura.	Implementación de medidas de seguridad adicionales. Reforzamiento menor de estructuras.	Implementación de sistemas de monitoreo avanzados. Obras de estabilización localizadas.	Rediseño significativo de áreas afectadas. Paralización parcial de operaciones. Reparaciones mayores en infraestructura crítica.	Cierre temporal o permanente de áreas de producción. Reubicación masiva de infraestructura. Compensaciones por daños a comunidades o medio ambiente. Pérdidas significativas de producción a largo plazo.

4 CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología para la evaluación de riesgo geotécnico en operaciones mineras a cielo abierto mediante un sistema de puntuación que permite analizar e integrar de manera sistemática la información geológica, geotécnica, estructural e hidrogeológica de la zona de estudio. Mediante este enfoque, se logra una comprensión profunda de los diversos peligros geotécnicos presentes en el proyecto minero, sus controladores y sus posibles consecuencias. De esta manera, se logra una metodología que permite ponderar y clasificar el riesgo geotécnico bajo diversas condiciones geológicas y geográficas.

Es importante destacar que la construcción de un mapa de riesgo geotécnico es un proceso dinámico y en constante evolución, por lo que debe actualizarse a medida que avance el desarrollo de la mina y se disponga de información relevante. Así, una de las principales fortalezas de esta propuesta radica en su capacidad para implementarse en un software especializado, lo que permitirá automatizar el modelamiento y mapeo de los riesgos geotécnicos de manera eficiente y precisa. Con ello, facilitará la visualización y generación de mapas de riesgo geotécnico, permitiendo el uso a tiempo de la información para la gestión efectiva de los riesgos geotécnicos en la industria minera, minimizando los impactos adversos en la productividad y la seguridad de la faena y sus trabajadores en cada etapa del proyecto minero. Además, su implementación conlleva beneficios significativos, como la capacidad de integrar y visualizar grandes volúmenes de datos complejos, realizar análisis de sensibilidad, explorar múltiples escenarios y obtener escenarios previos. No obstante, también presenta desafíos, como la necesidad de contar con datos de entrada precisos y actualizados, enfrentar incertidumbres inherentes a los modelos y garantizar una interpretación adecuada de los resultados por parte de expertos.

En general, las herramientas tecnológicas son recursos valiosos y complementarios para los planificadores mineros e ingenieros, pero no reemplazan la investigación geológica y geotécnica, ni el

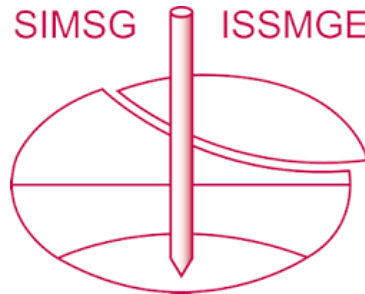
criterio experto en la toma de decisiones.

En cuanto a los posteriores avances, se proyecta la validación de la metodología propuesta mediante su implementación en casos de estudio de operaciones mineras a cielo abierto representativas de diversas condiciones geológicas y geográficas. Esta etapa de validación en escenarios prácticos permitirá evaluar el desempeño, precisión y aplicabilidad de la metodología y del software, identificando oportunidades de mejora y ajuste. Además de la generación de otros módulos dentro de la herramienta computacional que facilite la difusión de los mapas de riesgo geotécnico en la mina.

5 REFERENCIAS

- Alejano, L. H.W. Stockhausen, E. Alonso, F.G. Bastante, P. Ramirez Oyanguren. 2006. *ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 45 (8), 1252-1272.
- Castro, L., Cottrell, B., Barker, P., Sintim, K. 2011. *Application of GeoHazmap to the Pit Slope Design for the Detour Lake Project*. International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Vancouver, Canada.
- González De Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall. 432-440.
- Hernández, F. 2019. *Hacia la Automatización del análisis de estabilidad de taludes mineros*. Universidad de Chile. 15-20.
- Itasca Consulting Group Inc (2018). *Proposing a Geotechnical Risk Index*. Disponible en: <https://www.itascainternational.com/staging/cn/software/applications/proposing-a-geotechnical-risk-index>
- Lara, M. 2007. *Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Universidad de Chile. 10-25.
- Ramírez, P., & Alejano, L. 2004. *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. 270-275.
- Sernageomin. 2019. *Balace de seguridad minera en Chile*. 3-4.
- Sernageomin y Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2018. *Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes*. 23-33.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.