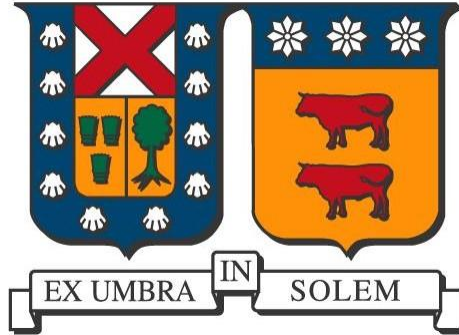


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA Y
MATERIALES



EVALUACION DEL PELIGRO ASOCIADO A CAIDA DE ROCA EN PEQUEÑA
MINERIA

Francisco Javier Valiente Manriquez

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesora Guía
Adeline Delonca

JULIO 2025
Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluacion del peligro asociado a caída de roca en pequeña minería

Nombre del candidato(a): Francisco Javier Valiente Manriquez

Carrera / Grado: Ingeniería civil de minas

Campus: Santiago San Joaquin; **Departamento:** Departamento de ingeniería de minas, metalurgia y materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Adeline Delonca, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 18/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedico este trabajo a mi madre Raquel de las Mercedes Manríquez Manríquez y a mi padre Leonardo Francisco Valiente Campos, quienes me enseñaron de esfuerzo y perseverancia en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este proceso de investigación y desarrollo de mi memoria de título, he recibido el apoyo invaluable de diversas personas. En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi profesora guía, Adeline Delonca, quien me brindó su orientación y apoyo cuando no sabía cómo continuar mi tema de memoria, entregándome conocimiento y parte de su valioso tiempo. Su experiencia y consejos fueron esenciales para la realización de este trabajo.

Agradezco también a mis familiares, especialmente a mi tías y primos, por su constante apoyo, preocupación y motivación a lo largo de la carrera, en especial a mi tía Cristina que como mi segunda madre me recibió en su hogar para avanzar en este proceso, sin ellos este logro no hubiera sido posible.

A mis compañeros de carrera, mis grupos más cercanos, con quienes compartí muchas horas de estudio, momentos malos y momentos buenos, risas y aprendizaje. Gracias por estar ahí y ser muchas veces más que amigos una familia.

No puedo dejar de agradecer a mi padrino Marco Antonio Gahona Almendra quien partió de este mundo y fue el primero en creer en mí, aportando en todo momento para llegar a la meta, a mi abuela que también partió, pero siempre me ayudo.

Finalmente, agradezco a mis padres por su esfuerzo, porque si se pudo, porque sin ellos no sería quien soy, y a mis mascotas que de algún lugar siempre me estarán acompañando, gracias.

Resumen

La pequeña minería en Chile presenta condiciones técnicas y operativas muy distintas a la gran minería, enfrentando altos índices de accidentabilidad, en parte por la escasa gestión del peligro geotécnico por caída de roca. Esta memoria propone una metodología de evaluación basada en *Rock Engineering Systems* (RES), complementada con codificación *Expert Semi-Quantitative* (ESQ), diseñada para aplicarse en contextos con baja disponibilidad de información técnica. A partir de la interacción ponderada entre parámetros estructurales, litológicos e hidrogeológicos del macizo, se construye un Índice de Vulnerabilidad (VI) como indicador del comportamiento general del macizo rocoso.

La metodología contempla la codificación de interacciones mediante juicio experto, el cálculo de pesos relativos y la categorización por nivel de influencia. Como resultado, se logra una zonificación cualitativa por tramos del macizo, útil para orientar medidas preventivas. La herramienta fue validada mediante revisión bibliográfica, comparación con métodos empíricos clásicos y aplicación en una faena real de pequeña minería, mostrando coherencia parcial con la metodología empírica Q de Barton.

Aunque no entrega parámetros de diseño específicos, su simplicidad, rapidez y facilidad de implementación la convierten en una herramienta preliminar eficaz para mejorar la toma de decisiones en faenas de menor escala, aportando al fortalecimiento de la seguridad operativa en entornos con recursos limitados y alta incertidumbre estructural.

Abstract

Small-scale mining in Chile operates under technical and operational conditions that differ significantly from those of large-scale mining, often facing high accident rates due in part to limited management of geotechnical hazards, particularly rockfall. This thesis proposes an evaluation methodology based on Rock Engineering Systems (RES), complemented by Expert Semi-Quantitative (ESQ) coding, specifically designed for use in environments with limited technical information. Through weighted interaction among structural, lithological, and hydrogeological parameters of the rock mass, a Vulnerability Index (VI) is constructed as an indicator of the general geomechanical condition.

The methodology includes expert-based interaction scoring, relative weighting, and influence-level categorization. As a result, a qualitative zoning of the rock mass by section is achieved, providing a practical tool for guiding preventive actions. The tool was validated through literature review, comparison with classical empirical methods, and field application in an active small-scale underground mining site, showing partial consistency with Barton's Q classification system.

Although it does not deliver specific design parameters, the simplicity, speed, and ease of application of the method make it an effective preliminary tool for decision-making in small-scale operations, contributing to enhanced operational safety in contexts characterized by structural uncertainty and limited resources.

Nomenclaturas

Símbolo	Descripción
α_i	Peso relativo del parámetro i en el índice VI
C_i	Valor de 'Causa' del parámetro (influencia ejercida)
E_i	Valor de 'Efecto' del parámetro (influencia recibida)
P_i	Puntuación discreta asignada al parámetro según su condición
$P_{\max}$	Valor máximo de la escala usada en cada parámetro (generalmente 4)
VI	Índice de Vulnerabilidad (0–100)

Abreviaturas

RES	Rock Engineering Systems	Sistemas de Ingeniería de Rocas
ESQ	Expert Semi-Quantitative	Codificación Experta Semicuantitativa
VI	Vulnerability Index	Índice de Vulnerabilidad
RQD	Rock Quality Designation	Designación de la Calidad de Roca
Jn	Joint set number	Número de familias de discontinuidades
Jr	Joint roughness number	Número de rugosidad de las juntas
Ja	Joint alteration number	Número de alteración de las juntas
Jw	Joint water reduction factor	Factor de reducción por agua en juntas
SRF	Stress Reduction Factor	Factor de Reducción por Esfuerzos
GSI	Geological Strength Index	Índice Geológico de Resistencia
UCS	Uniaxial Compressive Strength	Resistencia a la Compresión Uniaxial
RMR	Rock Mass Rating	Clasificación del Macizo Rocoso
RMi	Rock Mass Index	Índice del Macizo Rocoso
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis	Análisis de Modos y Efectos de Falla
FTA	Fault Tree Analysis	Análisis de Árbol de Fallas
Q	Quality (Rock Mass Classification)	Clasificación de calidad del macizo rocoso en minería y geotecnia

Tabla de contenido

1.	Introducción	13
1.1.	Hipótesis de investigación.....	14
1.2.	Objetivos y alcances.....	15
1.2.1	Objetivo general.....	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.2.3	Alcances.....	15
2.	Marco teórico.....	16
2.1.	Definiciones de Pequeña Minería	16
2.2.	Peligro	17
2.3.	Peligro en Pequeña minería.....	17
2.4.	Caída de Roca	18
2.4.1	Evaluación de Caída de Roca	19
2.5.	Riesgo.....	20
2.5.1	Evaluación de Riesgo.....	20
2.5.1.1	Evaluación cualitativa	20
2.5.1.2	Evaluación cuantitativa	21
2.5.2	Mitigación de riesgos.....	22
2.6.	Metodología <i>Rock Engineering Systems</i> (RES).....	23
2.6.1	Codificación mediante <i>Expert Semi-Quantitative</i> (ESQ)	24
2.6.2	Parámetros de mayor interacción y parámetros más dominantes	24
2.6.3	Aplicaciones anteriores de la metodología (RES)	26
2.7.	Índice de Vulnerabilidad	34
2.8.	Parámetros de estabilidad del macizo rocoso.....	35
2.8.1	Dimensiones de excavación.....	36

2.8.2	Soporte del macizo rocoso	36
2.8.3	Profundidad de las excavaciones	37
2.8.4	Métodos de excavación.....	37
2.8.5	Calidad del macizo rocoso	38
2.8.6	Geometría de las discontinuidades	39
2.8.7	Estructura del macizo rocoso	40
2.8.8	Esfuerzo in situ del macizo rocoso	40
2.8.9	Calidad roca intacta	40
2.8.10	Comportamiento de la roca	41
2.8.11	Apertura de discontinuidades	41
2.8.12	Condición hidráulica	42
2.8.13	Otros parámetros aplicables	43
3.	Metodología.....	44
3.1.	Selección de parámetros.....	44
3.2.	Construcción de la matriz de interacción	44
3.3.	Análisis causa – efecto	45
3.4.	Categorización de parámetros	45
3.5.	Cálculo del índice de vulnerabilidad.....	45
3.6.	Validación en casos de estudio	45
3.7.	Limitaciones de la metodología	45
4.	Resultados y Análisis	46
4.1.	Construcción de la Matriz de Interacción RES	49
4.2.	Codificación Semicuantitativa de las Interacciones.....	50
4.3.	Análisis Causal: Tabla y Gráfico de Causa-Efecto.....	52
4.4.	Categorización y cálculo del Índice de Vulnerabilidad (VI).....	54
4.5.	Validación con casos de estudio	62
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	69
5.1.	Conclusiones	69

5.2.	Recomendaciones.....	70
6.	Referencias	71
7.	Anexos	76

Índice de figuras

Figura 1	Estadística personas fallecidas por tipo de accidente Pequeña minería 2000-2004 (SERNAGEOMIN, 2024).	14
Figura 2	Definición de Pequeña minería según entidad (COCHILCO, 2022).	16
Figura 3	Matriz de riesgo ejemplo más claro de una evaluación cualitativa (AlertMedia, 2024).	21
Figura 4	Jerarquía de controles de mayor a menor eficacia (OSHA, 2023).	22
Figura 5	Explicación construcción matriz mediante metodología RES (Vilches, 2022).	23
Figura 6	Explicación matriz Causa-Efecto mediante RES (Santander, 2019).	24
Figura 7	Nivel de interacción en base a puntaje asociado de codificación ESQ (Vilches, 2022).	24
Figura 8	Ejemplo de grafico Causa-Efecto (Hudson et al., 2015).	25
Figura 9	Matriz de ejemplo mediante método RES, con codificación ESQ (Harrison & Hudson, 2000). ..	25
Figura 10	Tabla de Intensidad de interacción y dominancia en base a la figura 9 (Harrison & Hudson, 2000).	26
Figura 11	Cuarto superior izquierdo de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).	28
Figura 12	Cuarto inferior izquierdo de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).	29
Figura 13	Cuarto superior derecho de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).	30
Figura 14	Cuarto inferior derecho de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).	31
Figura 15	a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa–efecto para el 12 × 12 (Hudson et al., 2015).	32
Figura 16	a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa–efecto para el 10 × 10 (Santander, 2019).	33
Figura 17	a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa–efecto para el 18 × 18 (Salmi & Sellers, 2022).	34

Figura 18 Representación gráfica de los niveles de peligro geotécnico (Benardos & Kaliampakos, 2004).	35
Figura 19 Definición de span “S” dentro de la excavación (Hoek & Brown, 1980).	36
Figura 20 Métodos de minería subterránea en jerarquía según soporte y calidad del macizo rocoso (Brady & Brown, 2004).	38
Figura 21 Estimación del GSI, en base a descripción del macizo rocoso (Hoek & Brown, 2007).	39
Figura 22 Estimación y clasificación del UCS en base a pruebas de campo (ISRM, 1981).	41
Figura 23 Tipos de apertura y clasificación de las rugosidades según apreciación (ISRM, 1978).	42
Figura 24 Procedimiento de la metodología.	44
Figura 25 Influencias entre parámetros P1 y P2 en base a la dirección de las flechas.	49
Figura 26 Influencias entre parámetros P11 y P12 en base a la dirección de las flechas.	49
Figura 27 Codificación ESQ en base a la interacción entre los parámetros P1 y P2.	50
Figura 28 Codificación ESQ en base a la interacción entre los parámetros P11 y P12.	51
Figura 29 Matriz de codificación y obtención de valores de Causa-Efecto para cada parámetro.	51
Figura 30 Categorización del Índice de vulnerabilidad (VI) (bajo/medio bajo/ medio/ medio alto/ /alto) según el valor obtenido en la ecuación 3.	61
Figura 31 Distribución de las calidades y estabilidad en base a la Q de Barton (Cisterna, 2018).	65
Figura 32 QR Excel con tablas de categorización e influencias.	68

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros propuestos por Hudson (1992) para excavaciones subterráneas.	27
Tabla 2 Parámetros propuestos por Santander (2019) para minería a cielo abierto.	32
Tabla 3 Parámetros propuestos por Salmi & Sellers (2022), para excavación subterránea abandonada.	33
Tabla 4 Parámetros propuestos por Hudson en excavaciones subterráneas (Hudson, 1992).	35
Tabla 5 Parámetros aplicables en base a su relación y análisis en pequeña minería.	46
Tabla 6 Parámetros aplicables en base a su relación y análisis en pequeña minería.	47
Tabla 7 Parámetros seleccionados para la evaluación de estabilidad.	48
Tabla 8 Valores asociados a la intensidad de interacción mediante ESQ (Hudson, 1992).	50
Tabla 9 Causa y Efecto con su nivel de interacción y dominancia.	53
Tabla 10 Parámetros seleccionados y su peso dentro del sistema.	54
Tabla 11 Condición de estabilidad en base a un valor.	55
Tabla 12 Categorización del parámetro P1 en base a requerimientos de la pequeña minería.	55
Tabla 13 Categorización del parámetro P2 en base a requerimientos de la pequeña minería.	55
Tabla 14 Categorización del parámetro P3 en base a requerimientos de la pequeña minería.	56

Tabla 15 Categorización del parámetro P4 en base a requerimientos de la pequeña minería.	56
Tabla 16 Categorización del parámetro P5 en base a requerimientos de la pequeña minería.	56
Tabla 17 Categorización del parámetro P6 en base a requerimientos de la pequeña minería.	57
Tabla 18 Categorización del parámetro P7 en base a requerimientos de la pequeña minería.	57
Tabla 19 Categorización del parámetro P8 en base a requerimientos de la pequeña minería.	58
Tabla 20 Categorización del parámetro P9 en base a requerimientos de la pequeña minería.	58
Tabla 21 Categorización del parámetro P10 en base a requerimientos de la pequeña minería.	58
Tabla 22 Categorización del parámetro P11 en base a requerimientos de la pequeña minería.	59
Tabla 23 Categorización del parámetro P12 en base a requerimientos de la pequeña minería.	59
Tabla 24 Categorización del parámetro observado o medido en terreno.	60
Tabla 25 Categoría y su interpretación práctica.	62
Tabla 26 Valores parámetros de Q de Barton obtenidos por Cisterna (2018).	63
Tabla 27 Valores parámetros de Q de Barton obtenidos por Cuervas-Mons et al. (2015).....	63
Tabla 28 Análisis e interpretación de los parámetros en base a la Q de Barton Cisterna (2018).	64
Tabla 29 Análisis e interpretación de los parámetros en base a la Q de Barton Cuervas-Mons et al. (2015).	64
Tabla 30 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en Cisterna (2018).	65
Tabla 31 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en Cuervas-Mons et al. (2015).	66
Tabla 32 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en minera “La Fortuna”.	68

Índice de gráficos

Gráfico 1 Causa y Efecto de parámetros que afectan al macizo rocoso.....	53
Gráfico 2 Distribución de las calidades y estabilidad en base a la Q de Barton (Cuervas-Mons et al., 2015).	67

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Peso de cada parámetro (Benardos & Kaliampakos, 2004).	34
Ecuación 2 Índice de vulnerabilidad (Benardos & Kaliampakos, 2004).	34
Ecuación 3 Formula VI simplificada con los α i establecidos para su aplicación.....	61

1. Introducción

La pequeña minería en Chile ha existido desde la llegada de los españoles, dado que uno de los motivos para la exploración y descubrimiento del territorio chileno era la búsqueda de yacimientos minerales preciosos (Villalobos, 1983), por lo que siempre ha estado ligada al desarrollo del país.

Esta actividad se caracteriza por su bajo nivel de mecanización, menor escala productiva y limitada capacidad de inversión, lo que conlleva condiciones de operación muchas veces precarias y expuestas a riesgos significativos. Actualmente, aproximadamente el 82,3% de las faenas de pequeña minería en Chile se desarrollan en labores subterráneas, lo que se explica por la naturaleza vetiforme y de alta ley de los yacimientos, así como por restricciones económicas y geográficas que dificultan la implementación de explotaciones a cielo abierto (Varas, 2023).

Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), en 2022 la pequeña minería generó más de 500 millones de dólares en producción de cobre, oro y plata, y empleó directa e indirectamente a más de 25.000 trabajadores, lo que representa cerca del 9% del empleo del sector minero nacional (COCHILCO, 2023). Estos indicadores reflejan el rol fundamental que esta actividad cumple en la economía de numerosas comunidades, muchas de las cuales se organizan en torno a la explotación de yacimientos minerales con el objetivo de mejorar sus condiciones de vida.

A pesar de su menor escala, la accidentabilidad en este segmento es considerablemente mayor que en la mediana y gran minería. Una de las razones más relevantes es la escasa implementación de estudios geotécnicos o evaluaciones sistemáticas de peligro, debido al costo que estos implican. COCHILCO (2022) señala que, en términos generales, las faenas de pequeña minería se caracterizan por una producción limitada, fragilidad financiera, alta dependencia de las fluctuaciones del precio del cobre, baja eficiencia operativa y condiciones laborales más exigentes.

En esta misma línea, Cadiz & Javia (2017) destacan que la pequeña minería metálica opera frecuentemente con información mineralógica y geotécnica limitada, priorizando zonas de alta ley, y con inversiones mínimas tanto en capital como en tecnología. Esta precariedad técnica y operativa contribuye a una mayor exposición frente a eventos geotécnicos peligrosos, como las caídas de roca, que constituyen una de las principales causas de accidentes fatales en el sector.

1.1. Hipótesis de investigación

La pequeña minería representa aproximadamente el 9% del empleo en el sector minero chileno; sin embargo, concentra una proporción desproporcionadamente alta de accidentes fatales. Entre los años 2019 y 2023, de los 64 trabajadores fallecidos en faenas mineras, 34 pertenecían a operaciones de pequeña minería o minería artesanal (SERNAGEOMIN, 2023). Esta tendencia no es reciente: entre 2000 y 2014, el 50% de los accidentes fatales también se concentraron en este segmento (SERNAGEOMIN, 2015).

Uno de los principales factores que explican esta alta accidentabilidad es la inestabilidad del macizo rocoso, que se manifiesta principalmente en forma de caídas de roca. Estas situaciones son especialmente críticas en faenas subterráneas, donde el carácter artesanal de muchas labores y la baja mecanización limitan la implementación de medidas preventivas eficaces. La contención del macizo suele realizarse de forma manual, en condiciones precarias y con escasa caracterización geotécnica, lo que incrementa considerablemente el riesgo para los trabajadores (Pantoja, 2024).

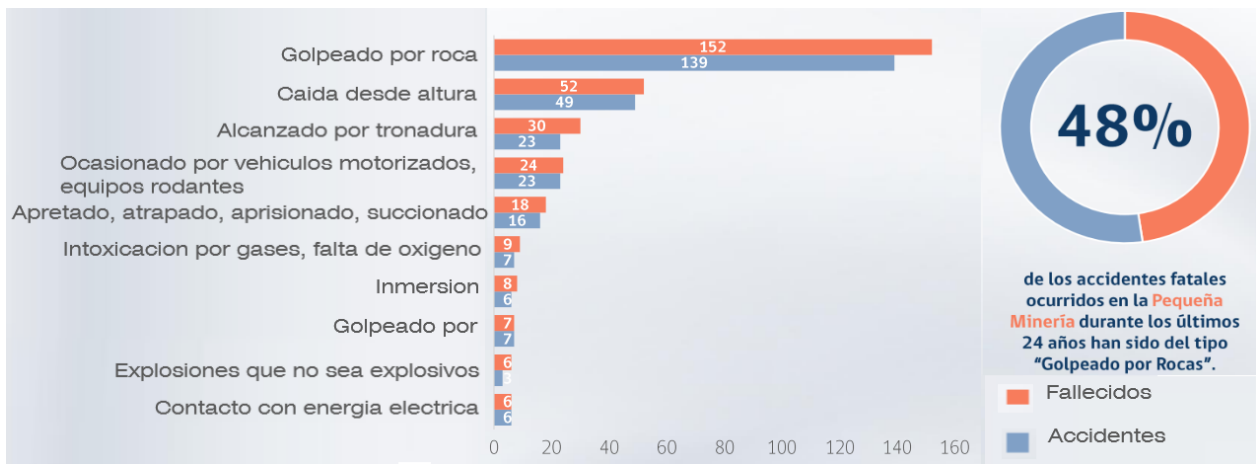


Figura 1 Estadística personas fallecidas por tipo de accidente Pequeña minería 2000-2004 (SERNAGEOMIN, 2024).

Como se aprecia en la Figura 1, el tipo de accidente más frecuente corresponde a golpeado por roca, originado principalmente por desprendimientos desde el macizo rocoso. Esta alta incidencia refleja la ausencia o insuficiencia de estudios de estabilidad en las labores subterráneas de pequeña minería, evidenciando una correlación directa entre la falta de análisis geotécnico y la ocurrencia de eventos peligrosos en este sector.

Uno de los grandes obstáculos que enfrenta la Pequeña Minería es la falta de tecnología por parte de ENAMI, esto agregado a su compleja situación financiera, la cual le impide proporcionar tecnologías para explotar leyes más bajas, alejando el rol de fomento hacia la pequeña minería. Como también discordancias entre el reglamento de seguridad para la pequeña minería el que exige un proyecto de explotación basado en proyecciones de estructuras minerales y reservas, el cual es muy distante con lo que realmente se encuentra en el terreno, dificultando cumplir con esta exigencia. Esta desalineación genera sanciones que

no son proporcionales al tamaño ni a la capacidad operativa de los pequeños mineros, aumentando la carga regulatoria y limitando su capacidad de formalización (Varas, 2023).

Ante este escenario, se hace necesario contar con una herramienta práctica, de bajo costo, que permita evaluar de forma sistemática y racional la vulnerabilidad asociada a la inestabilidad del macizo rocoso en contextos con información geotécnica limitada.

Por ello, se plantea la posibilidad de zonificar cualitativamente el peligro geotécnico por caída de roca en faenas de pequeña minería subterránea mediante una metodología práctica basada en Rock Engineering Systems (RES) y codificación Expert Semi-Quantitative (ESQ), incluso en contextos con información geotécnica limitada.

1.2. Objetivos y alcances

1.2.1 Objetivo general

Proponer una metodología práctica para evaluación del peligro geotécnico por caída de roca en faenas de pequeña minería subterránea.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar parámetros geotécnicos relevantes para fundamentar una herramienta de evaluación de la estabilidad del macizo rocoso.
- Desarrollar una herramienta de categorización que permita zonificar cualitativamente áreas de peligro geotécnico.
- Validar la metodología propuesta mediante su comparación con métodos empíricos consolidados para comprobar su consistencia técnica.

1.2.3 Alcances

El presente trabajo se enfoca en la identificación del peligro geotécnico asociado a la inestabilidad en faenas de pequeña minería subterránea en Chile, con énfasis en condiciones de operación donde la caracterización geomecánica es limitada. El objetivo es diseñar una herramienta práctica y accesible, que permita zonificar tramos vulnerables sin necesidad de estudios sofisticados ni software especializado.

La metodología propuesta está diseñada para ser utilizada durante la fase operativa en tramos de la faena, no en etapas de diseño ni cierre. Se considera aplicable a labores manuales o semimecanizadas, típicas de la pequeña minería, y su desarrollo se validará mediante comparación con casos de estudio real, analizando su factibilidad y fácil uso.

2. Marco teórico

2.1. Definiciones de Pequeña Minería

Pequeña minería se asocia a operaciones de extracción de minerales que, en muchos casos, carecen de tratamiento o lo realizan de forma limitada, dependiendo de terceros para el procesamiento y la continuidad de la cadena de valor. Su aporte económico, destaca por su relevancia social, especialmente por su papel en la generación de empleo y el impulso al desarrollo de las comunidades donde se lleva a cabo esta actividad (CESCO, 2024).

En la actualidad no existe una definición global para lo que es Pequeña minería comprendiendo muchas veces lo que es Minería Artesanal y ambas siéndose consideradas Pequeña minería. Obteniendo así variadas definiciones dependiendo de la entidad que lo realice, a continuación, se mostraran las definiciones más reconocidas dentro de la industria en base a legislaciones y entidades, diferenciándose por distintas funciones establecidas por los organismos.

Normativa	Definición
Sernageomin Resolución N° 796 del 2001	Definición en base a Horas Trabajadas (trabajadores) Pequeña Minería: Menos a 200.000 horas/persona en un año (entre 12 y 80 trabajadores aproximadamente). Minería Artesanal: Menos de 27.000 horas/persona en un año (menos de 12 trabajadores aproximadamente)
CÓDIGO DE MINERÍA Ley 18248	Definición en base a Trabajadores Minería artesanal: Menos de 12 trabajadores
LEY DE IMPUESTO A LA RENTA DECRETO LEY 824	Definición en base a Trabajadores Minería artesanal: Menos de 5 trabajadores
ENAMI	Definición en base a Producción Pequeña Minería: Productores que en forma individual venden o benefician mensualmente hasta 10.000 toneladas de minerales o su equivalente en productos mineros.
Ley de cierre de faenas Ley 20.551	Definición en base a Producción Capacidad de extracción menor a 10.000 ton/mes.
Decreto 40 Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental	Definición en base a Producción Acciones u obras cuyo fin es la extracción o beneficio de uno o más yacimientos mineros y cuya capacidad de extracción de mineral es inferior a 5.000 ton/mes.
Ley 20.469 Modificaciones a la tributación de la actividad minera	Definición en base a Producción Explotadores mineros con ventas anuales hasta 12.000 toneladas métricas

Figura 2 Definición de Pequeña minería según entidad (COCHILCO, 2022).

2.2. Peligro

El peligro se refiere a toda fuente, condición o acción que posee la capacidad de ocasionar un daño, ya sea en forma de lesiones o enfermedades, afectación a la propiedad, impacto ambiental, o una combinación de estos efectos (ISO International Organization for Standardization, 2018).

Según MacCollum (2007) existen diversas formas en que un peligro puede presentarse o evolucionar, dependiendo de su estado y del grado de exposición de personas, infraestructura o el medio ambiente:

- Latente: La amenaza existe, pero aún no hay elementos expuestos en riesgo.
- Potencial: La amenaza está presente y hay elementos susceptibles a ser afectados. Requiere una evaluación de riesgos detallada, ya que la posibilidad de daño es considerable.
- Activo: El peligro ya ha generado consecuencias negativas y se encuentra fuera de control. En este punto, solo es posible responder a la emergencia, no prevenirla.
- Mitigado: El peligro ha sido identificado y se han implementado acciones para reducir significativamente su probabilidad de ocurrencia o impacto. Aunque el riesgo no se elimina por completo, la intervención permite mantenerlo dentro de márgenes aceptables.
- Público: Se refiere a amenazas que afectan directamente a la comunidad o sociedad, como desastres naturales, epidemias o situaciones violentas.

Esta clasificación permite comprender que el peligro no es estático, y que su gestión oportuna puede evitar que evolucione hacia una situación de emergencia.

2.3. Peligro en Pequeña minería

La pequeña minería en Chile enfrenta condiciones técnicas y operativas que la hacen más susceptible a accidentes, particularmente debido a la disminución de las leyes de los minerales, yacimientos más profundos y la necesidad de mejorar la capacitación del personal. Muchas labores se realizan de forma manual, lo que empeora la seguridad y las condiciones laborales. Además, la falta de formación en Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y soluciones tecnológicas limita la eficiencia económica, productiva y ambiental de los pequeños productores. Esto contribuye a un entorno de trabajo más peligroso, donde la falta de seguridad aumenta los riesgos para los trabajadores (COCHILCO, 2024).

Según SERNAGEOMIN (2020) seis tipos de accidentes en la pequeña minería representan el 91% de las fatalidades en el sector. Cada accidente está asociado a un peligro correspondiente.

- Golpeado por roca → Peligro: Caída de roca
Este accidente ocurre cuando los trabajadores son alcanzados por rocas que caen debido a la inestabilidad del macizo rocoso, que generalmente es el resultado de una acuñadura incorrecta o falta de soporte adecuado en las excavaciones.
- Caída desde altura → Peligro: Caídas de altura
Este peligro está relacionado con las caídas de los trabajadores que realizan tareas en alturas sin las medidas de seguridad adecuadas, como el uso de arneses, cuerdas de vida o líneas de vida.
- Alcanzado por tronadura → Peligro: Manipulación de explosivos
El peligro aquí es la manipulación inadecuada de explosivos, lo que puede resultar en una explosión no controlada y causar graves accidentes, a menudo por falta de permisos o personal no capacitado.
- Accidentes ocasionados por vehículos motorizados → Peligro: Tránsito inadecuado en faena
Este tipo de accidente se asocia al peligro relacionado con la circulación de vehículos dentro de la faena minera sin el respeto a las normas de seguridad, como las velocidades permitidas y las condiciones del camino.
- Atrapamiento → Peligro: Equipos en movimiento
El peligro de atrapamiento está asociado al uso de maquinaria o equipos en movimiento dentro de las faenas mineras, lo cual puede causar accidentes graves si no se siguen los protocolos de seguridad o si los trabajadores no están debidamente capacitados.
- Intoxicación por gases → Peligro: Gases tóxicos en el aire
La intoxicación por gases es el resultado del peligro de la acumulación de gases tóxicos, como monóxido de carbono o metano, en espacios confinados de trabajo. Este peligro puede ser mitigado con una ventilación adecuada.

2.4. Caída de Roca

Uno de los peligros más significativos que se puede considerar un riesgo en las faenas mineras subterráneas es el desprendimiento de rocas desde los techos o costados de las galerías y túneles (Caída de Roca), cuando se realizan excavaciones subterráneas, se extrae un volumen de roca que altera el equilibrio natural del terreno. Este proceso genera vacíos en los cuales las superficies expuestas quedan sometidas a fuerzas que no tienen soporte, provocando grietas en los techos y costados, lo que puede llevar al desprendimiento de

rocas sueltas o grandes bloques. Este fenómeno puede ser causado por varias condiciones, tales como las características y condiciones específicas del macizo rocoso, la forma y dimensiones de las excavaciones, el debilitamiento de la roca, y la presencia de agua en el macizo rocoso (SONAMI, 2016).

2.4.1 Evaluación de Caída de Roca

Para evaluar la caída de rocas en minería subterránea, existen métodos cualitativos y cuantitativos que se aplican de acuerdo con los recursos disponibles y la necesidad de precisión.

La Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (2004) , expone los siguientes métodos para evaluar la caída de roca:

- Mapeo y clasificación geomecánica (RMR, GSI, Q): levantamiento de parámetros (RQD, espaciamiento/condición de juntas, agua) para calcular índices y asignar calidad del macizo, en el cual a partir del porcentaje de tipos de roca (buena/regular/mala) se determina un grado de desprendimientos. Fácil de aplicar con datos básicos de campo, ideal para operaciones con pocos recursos, necesidad de experiencia.
- Monitoreo/instrumentación: medición de convergencias (extensómetro de cinta), desplazamientos (estación total) y vibraciones por voladura (sismógrafo) para cuantificar cambios y evaluar daño o necesidad de refuerzo. Costoso y requiere mantenimiento.
- Inspección visual e IPER en terreno: observa techos, frentes y hastiales; busca grietas, tacos, filtraciones, huellas de caídas, daños o deformaciones en el sostenimiento, es la base diaria. Económico y fácil de realizar.
- Evaluación estructural–cinemática simple: considerara orientación del principal sistema de discontinuidades respecto al avance de la excavación y corregir la calidad estimada. Útil para condiciones geológicas simples, pero limitada en terrenos complejos.

Por otra parte, Fernandez (2023) expone métodos más numéricos evaluar la caída de roca, como lo son:

- Método de Celda Unitaria: evalúa la probabilidad de caída de rocas en excavaciones subterráneas calculando el riesgo de formación de bloques críticos. Se basa en la intersección de tres planos estructurales que forman un bloque que puede caer por gravedad. La probabilidad de que esto ocurra se calcula comparando el volumen de formación del bloque con el volumen total de la celda unitaria. Simplificación de geometría de los bloques y dependencia de datos precisos.
- Determinación de volúmenes de bloques: es un proceso para evaluar la estabilidad del macizo rocoso y el riesgo de caída de rocas. Este método se basa en la identificación y cálculo del tamaño de los bloques formados por discontinuidades estructurales en la roca. Para determinar el volumen de un bloque, se considera el espaciamiento, la orientación, la persistencia y el número de

discontinuidades (fallas, diaclasas, etc.) que afectan el macizo. Requiere datos precisos sobre discontinuidades.

- Modelo de estimación de probabilidad de ocurrencia de bloques: utiliza el Índice de Resistencia Geológica (GSI) para predecir la probabilidad de formación de bloques en el contorno de excavaciones subterráneas. Este modelo tiene en cuenta el espaciamiento y la persistencia de las discontinuidades estructurales, así como la fricción y cohesión de las estructuras que forman los bloques. Requiere información detallada.

2.5. Riesgo

El concepto de riesgo ha sido ampliamente desarrollado en diversas disciplinas de la ingeniería, la seguridad industrial, la gestión organizacional y las ciencias aplicadas. Según la norma ISO 31000:2018, el riesgo se define como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos, destacando que este puede tener consecuencias tanto negativas como positivas (ISO, 2018).

Desde una perspectiva técnica, el riesgo puede conceptualizarse como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso y la severidad de sus consecuencias, considerando además el nivel de exposición de los elementos vulnerables (Zafirovski et al., 2019).

En el ámbito de la ingeniería y la gestión de seguridad, es fundamental establecer una distinción clara entre los conceptos de peligro y riesgo, ya que esta diferencia constituye la base para una adecuada gestión preventiva. El peligro se entiende como cualquier situación, condición o elemento con capacidad inherente de generar daños a las personas, al ambiente, a las instalaciones o a los procesos. Sin embargo, la sola existencia de un peligro no implica automáticamente un riesgo elevado, ya que el riesgo surge al incorporar en el análisis la probabilidad de que ese peligro se materialice, junto con la severidad de las consecuencias que podrían derivarse de dicho evento (UNIR, 2024).

2.5.1 Evaluación de Riesgo

Este proceso es esencial para priorizar peligros, asignar recursos y definir estrategias de mitigación adaptadas a cada situación específica (SAALG GEOMECHANICS, 2023).

Existen diferentes enfoques metodológicos para la evaluación de riesgos, los cuales pueden clasificarse en dos grandes categorías: evaluación cualitativa y evaluación cuantitativa.

2.5.1.1 Evaluación cualitativa

Se basa principalmente en el juicio experto y la percepción de los profesionales, quienes, mediante herramientas como listas de verificación, matrices de riesgo o análisis de causa raíz, estiman la probabilidad y la severidad de los eventos peligrosos, clasificándolos en niveles como bajo, medio o alto. Este método

resulta especialmente útil en contextos donde la información numérica es escasa o inexistente, brindando una aproximación práctica y eficiente para la toma de decisiones en entornos con recursos limitados (SafetyCulture, 2024).

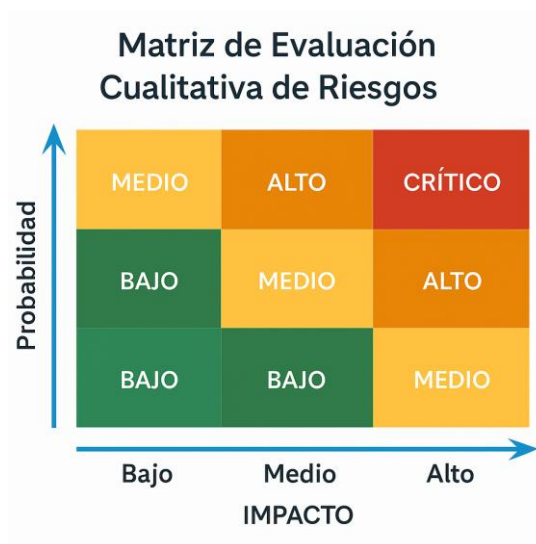


Figura 3 Matriz de riesgo ejemplo más claro de una evaluación cualitativa (AlertMedia, 2024).

2.5.1.2 Evaluación cuantitativa

Esta utiliza datos numéricos, modelos estadísticos y simulaciones para calcular con mayor precisión la probabilidad y el impacto de los riesgos identificados. Este enfoque proporciona una evaluación objetiva y detallada, siendo recomendado cuando se dispone de información fiable y suficiente sobre los peligros y sus consecuencias (AlertMedia, 2024). Algunos métodos de evaluación cuantitativa son:

- **Análisis de árboles de decisión:** Herramienta eficaz en la gestión de riesgos, ya que permite visualizar gráficamente distintas alternativas y sus posibles consecuencias. A través de nodos y ramas, se representan decisiones, probabilidades y resultados, facilitando así una evaluación estructurada de los riesgos y apoyando la elección de la opción más adecuada frente a la incertidumbre (Miro, 2025).
- **Análisis de modos y efectos de falla (FMEA):** Metodología preventiva utilizada para identificar y evaluar posibles fallas en un proceso, producto o sistema, determinando sus causas, efectos y la criticidad de cada modo de falla. Su objetivo es anticiparse a los problemas antes de que ocurran, priorizando acciones de mejora en función del riesgo asociado. Esta herramienta resulta clave en la gestión de riesgos, ya que permite reducir la probabilidad de fallos críticos, mejorar la confiabilidad de los procesos y fortalecer la toma de decisiones informadas (PiraniRisk, 2025).
- **Análisis de Monte Carlo:** Técnica estadística que permite predecir resultados potenciales mediante simulaciones repetidas, considerando múltiples variables e incertidumbres. Su fortaleza radica en la capacidad de mostrar escenarios realistas y probabilidades asociadas, facilitando una mejor toma de decisiones ante la incertidumbre (Asana, 2025).

- Análisis de árbol de fallas (FTA): Técnica lógica y visual que permite identificar las causas raíz de fallos o eventos no deseados. A través de un diagrama que parte de un evento principal y se descompone en eventos secundarios mediante puertas lógicas, esta herramienta facilita la identificación de vulnerabilidades críticas en un sistema (Infraspeak, 2023).

2.5.2 Mitigación de riesgos

La mitigación del riesgo constituye una etapa fundamental dentro del ciclo de gestión de riesgos, orientada a reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos, la severidad de sus consecuencias o ambas (ISO 31000, 2018).

Dentro de los principios internacionales de gestión de riesgos, se establece la jerarquía de controles, la cual ordena las acciones de mitigación en función de su eficacia. Este modelo establece como primera prioridad la eliminación del peligro, seguida de la sustitución por métodos, materiales o tecnologías menos riesgosas, posteriormente la implementación de controles de ingeniería, los controles administrativos y, finalmente, el uso de equipos de protección personal (EPP) como última línea de defensa (OSHA, 2023).



Figura 4 Jerarquía de controles de mayor a menor eficacia (OSHA, 2023).

Adicionalmente, autores como Hopkin (2017) destacan la importancia de que las medidas de mitigación estén integradas dentro de un sistema formal de gestión de riesgos, sujeto a procesos de seguimiento, revisión y mejora continua. Esto permite no solo reducir el riesgo residual, sino también adaptarse a cambios en las condiciones operacionales, tecnológicas y regulatorias.

2.6. Metodología *Rock Engineering Systems* (RES)

La metodología RES es precisa cuando se tiene que estudiar un riesgo asociado a la ingeniería de rocas, dado que la metodología corresponde a un análisis de estudio del problema, mediante el estudio propio de la interacción de diversos parámetros y como estos pueden afectar y afectarse entre sí, en este sistema se debe descomponer estas variables y evaluar su interacción con las demás, para definir su importancia dentro del conjunto y así construir un modelo adecuado. Este método como tal contribuye a reducir la incertidumbre epistémica dado que la misma interacción entre los factores nos indica que parámetros que tienen una contribución mayor y menor (Hudson & Feng, 2015).

La forma en que se representa es mediante una matriz donde los parámetros principales se ubican en la diagonal principal, logrando así compilar la manera en que cada factor influye sobre los otros (Vilches, 2022). En la figura 6 se representa la construcción de la matriz, identificando A, B y C como parámetros.

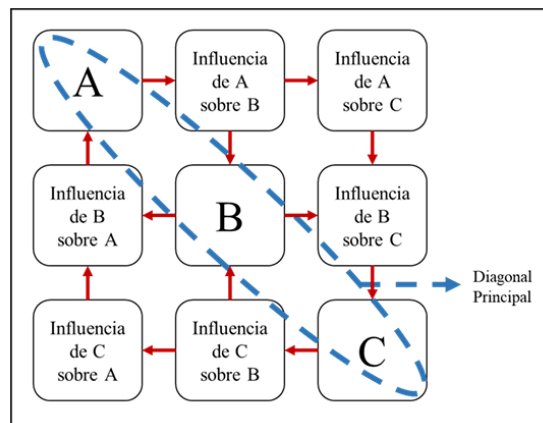


Figura 5 Explicación construcción matriz mediante metodología RES (Vilches, 2022).

La forma en que se identifican y califican las influencias de los parámetros se realiza mediante el análisis de expertos para su codificación, una de las cualidades que posee la matriz es que evalúa Causa y Efecto de cada parámetro sobre otro, logrando identificar el impacto generado por cada parámetro y la influencia que ejercen otros parámetros sobre este (Hudson, 1992). Como se muestra en la figura 6, donde la sumatoria de la fila que pasa en cada parámetro indica la influencia de este sobre los demás y se le denomina causa, mientras que las columnas que pasan por cada parámetro indican la influencia de otros parámetros sobre este y se le denomina efecto.

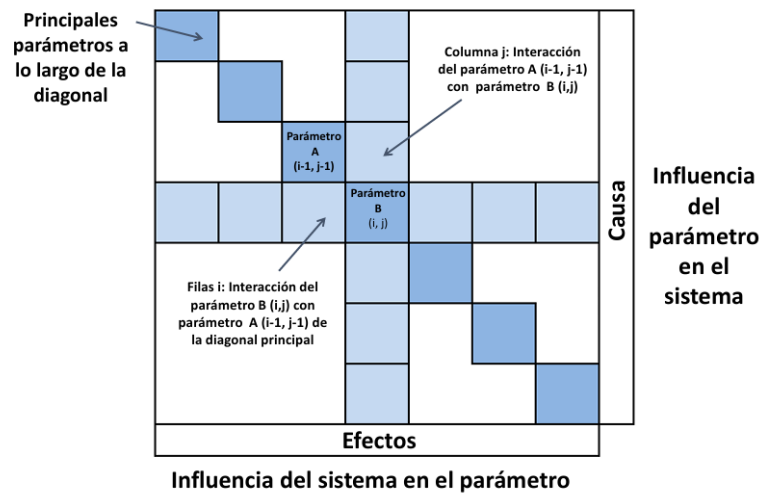


Figura 6 Explicación matriz Causa-Efecto mediante RES (Santander, 2019).

2.6.1 Codificación mediante *Expert Semi-Quantitative* (ESQ)

Con el fin de asignar un valor a las influencias de los parámetros, se codifica cada casilla y así se obtiene un resultado matemático de la matriz, posterior al análisis. Existen cinco métodos para esta codificación siendo el más recurrente el método Experto Semicuantitativo (ESQ) donde se asigna un número del 0 al 4 según la interacción entre parámetros, como muestra la Figura 7, esto dado que el método es lo suficientemente discriminador, y la asignación de valores puede ser acordada por un grupo de expertos en cuestión siendo de gran veracidad (Hudson 1992).

Valor de Interacción	Nivel de Interacción
0	No Existe
1	Débil
2	Media
3	Fuerte
4	Crítica

Figura 7 Nivel de interacción en base a puntaje asociado de codificación ESQ (Vilches, 2022).

2.6.2 Parámetros de mayor interacción y parámetros más dominantes

A través del establecimiento de las influencias y posterior codificación de la matriz, se logra apreciar las características de los parámetros, en base a su intensidad de interacción y dominancia. Aquello se realiza de dos maneras, mediante un gráfico con los valores de Causa-Efecto y/o una tabla en base a los valores

(Hudson et al., 2015). El grafico se realiza posicionando cada parámetro de acuerdo con su causa y efecto, obteniendo direcciones hacia donde aumenta la intensidad de interacción y dominancia. Como se muestra en la Figura 8.

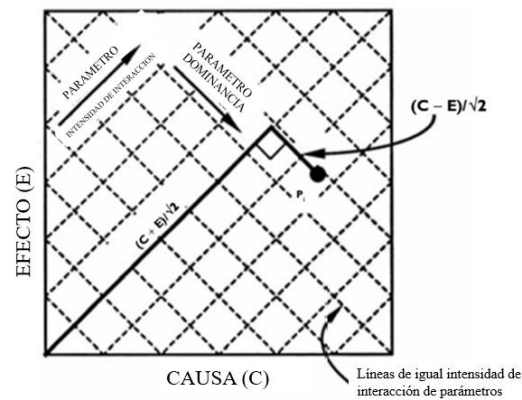


Figura 8 Ejemplo de grafico Causa-Efecto (Hudson et al., 2015)

La tabla corresponde a la asignación de los valores obtenidos de cada parámetro respecto a las columnas de causa (C) y efecto (E), donde la diferencia entre causa y efecto (C-E) indicara el valor con respecto a la dominancia del parámetro, correspondiendo un mayor valor una mayor dominancia. Mientras que para obtener el valor de intensidad interacción, se suman los valores de causa y efecto (C+E), siendo los de mayor valor de mayor intensidad (Hudson & Feng, 2015). Tal como muestra para efectos de ejemplo la Figura 9 y Figura 10.

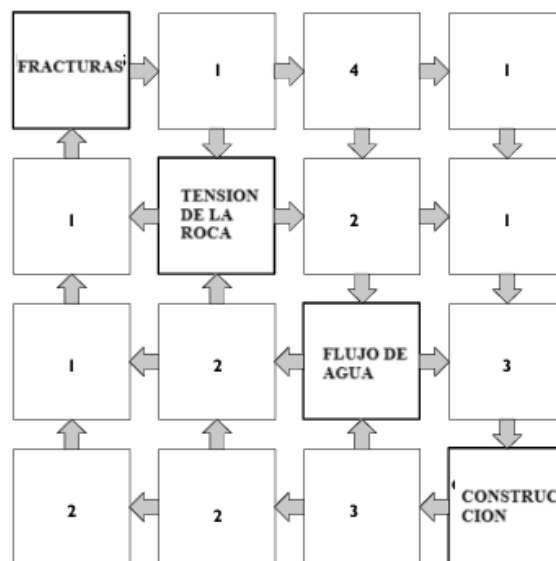


Figura 9 Matriz de ejemplo mediante método RES, con codificación ESQ (Harrison & Hudson, 2000).

PARAMETRO	C	E	C + E INTENSIDAD DE INTERACCION	C - E DOMINANCIA
FRACTURAS, F	6	4	10	2
TENSION, S	4	5	9	-1
FLUJO DE AGUA, W	6	9	15	-3
CONSTRUCCION, C	7	5	12	2
SUMA	23	23		
PROMEDIO	5.75	5.75		

Figura 10 Tabla de Intensidad de interacción y dominancia en base a la figura 9 (Harrison & Hudson, 2000).

2.6.3 Aplicaciones anteriores de la metodología (RES)

Desde su publicación hasta la actualidad la metodología RES ha abarcado una gran variedad de problemas asociado a la ingeniería de rocas, ya sea en estabilidad, métodos de excavación subterráneos, superficiales, etc. Llegando incluso a abarcar problemas ambientales, debido a su caracterización de los riesgos (Hudson & Feng, 2015).

J. A. Hudson (1992), Santander (2019) y Salmi & Sellers (2022) mencionan el uso de la metodología RES, en sus análisis de excavaciones con codificación en base a ESQ.

Hudson (1992) fue el pionero en proponer este método en su libro *Rock Engineering Systems: Theory and Practice* con el enfoque interdisciplinario de abarcar diferentes aspectos en las obras de ingeniería, para aquello postulo interacciones tanto para obras de superficie como para subterráneas, abarcado 12 parámetros para cada tipo, definidos por el como factores primarios en excavaciones, ver Tabla 1.

P	Hudson 1992
P1	Dimensiones de excavación
P2	Soporte del macizo rocoso
P3	Profundidad de las excavaciones
P4	Métodos de excavación
P5	Calidad del macizo rocoso
P6	Geometría de las discontinuidades
P7	Estructura del macizo rocoso
P8	Esfuerzo in situ del macizo rocoso
P9	Calidad de la roca intacta
P10	Comportamiento de la roca
P11	Apertura de las discontinuidades
P12	Condición hidráulica

Tabla 1 Parámetros propuestos por Hudson (1992) para excavaciones subterráneas.

Luego de definir los 12 parámetros que consideró relevantes para excavaciones subterráneas, Hudson estructuró la matriz de interacción RES (Figura 11, 12, 13 y 14) aplicando una codificación semicuantitativa que permitiera representar la influencia entre factores. A partir de dicha matriz, generó un gráfico de causa-efecto que permitió visualizar el comportamiento relativo de cada parámetro dentro del sistema. Este enfoque estableció la base para evaluar la dominancia o sensibilidad de cada factor, y se presenta en la figura Figura 15.

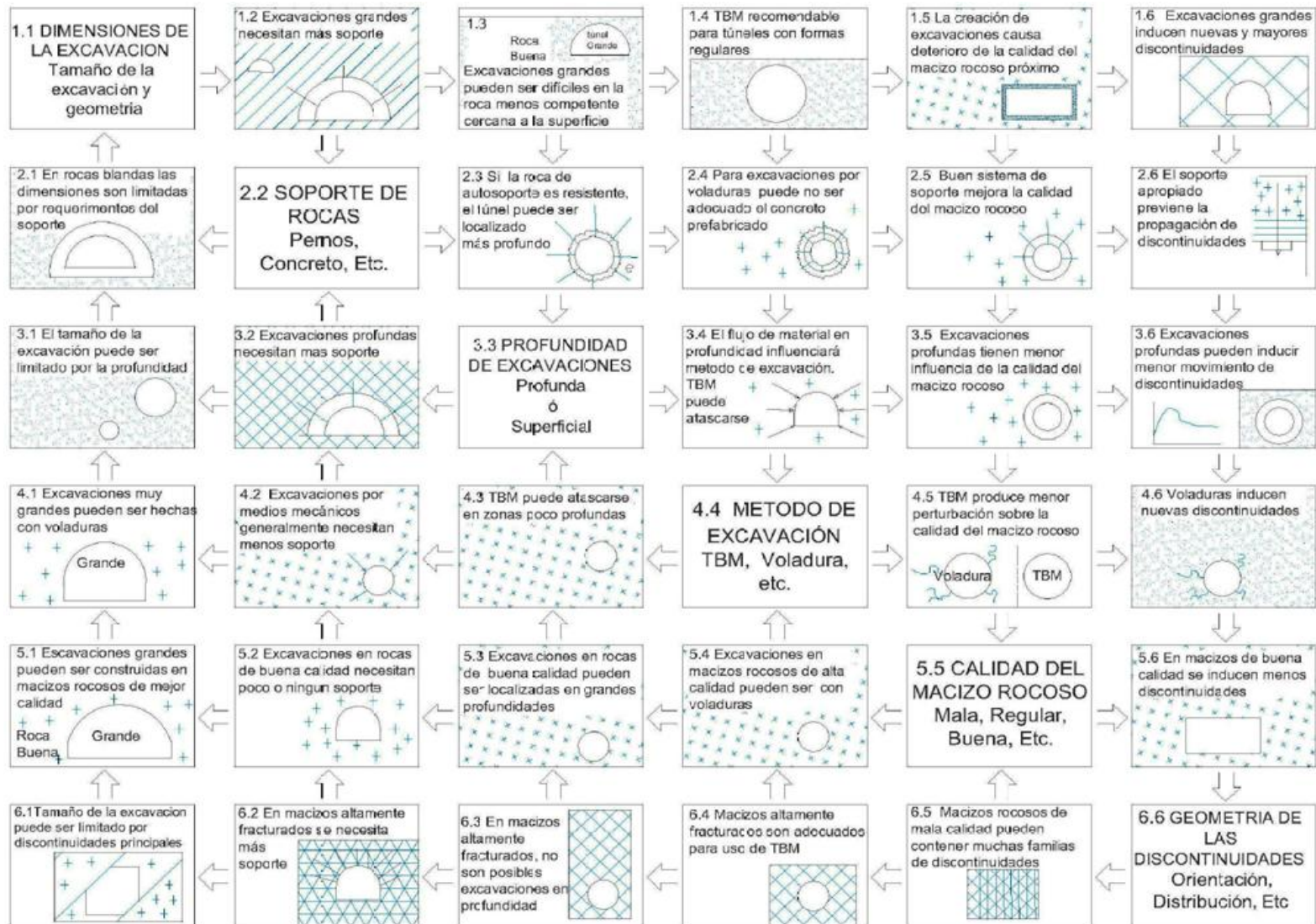


Figura 11 Cuarto superior izquierdo de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).

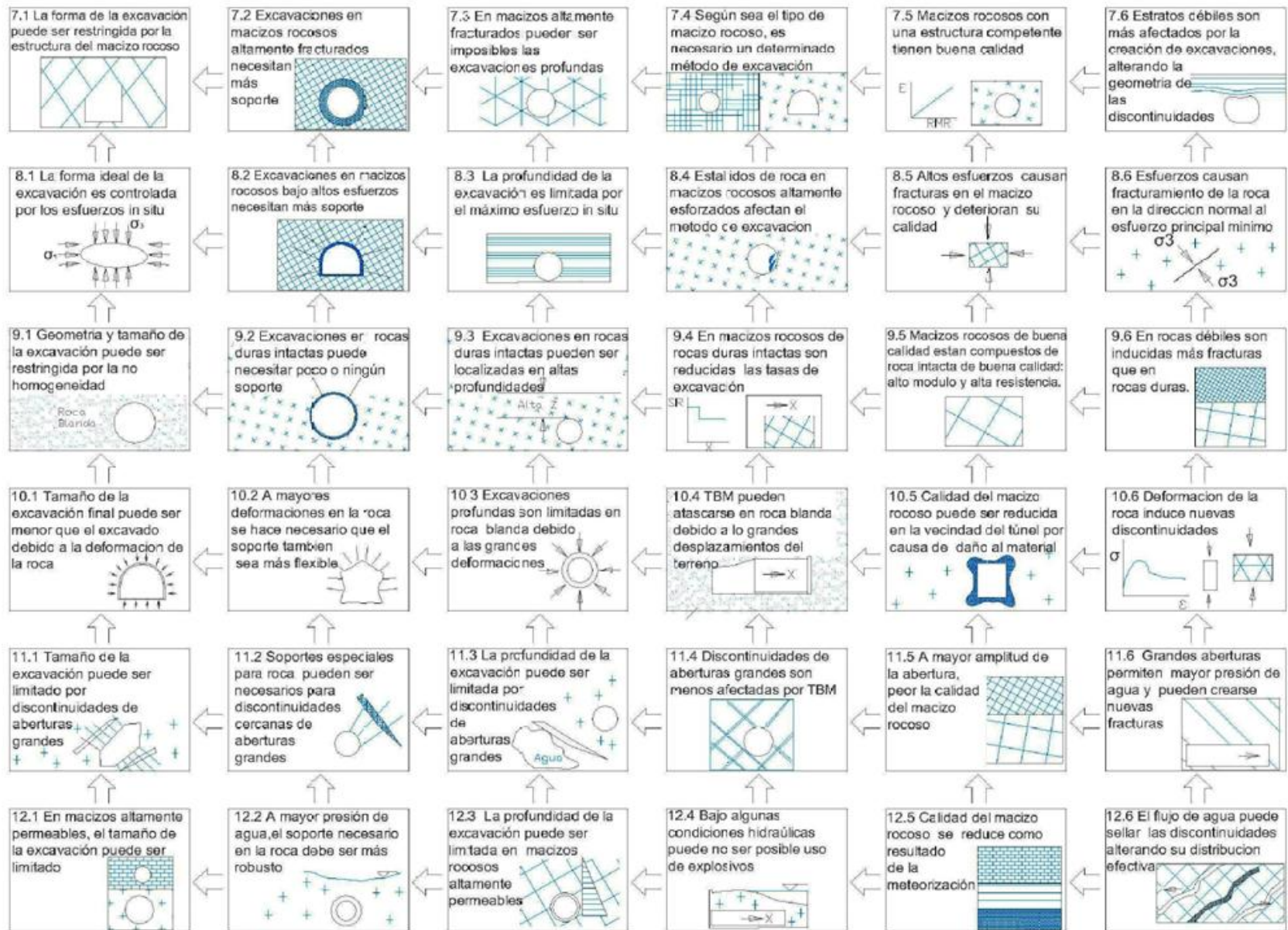


Figura 12 Cuarto inferior izquierdo de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).

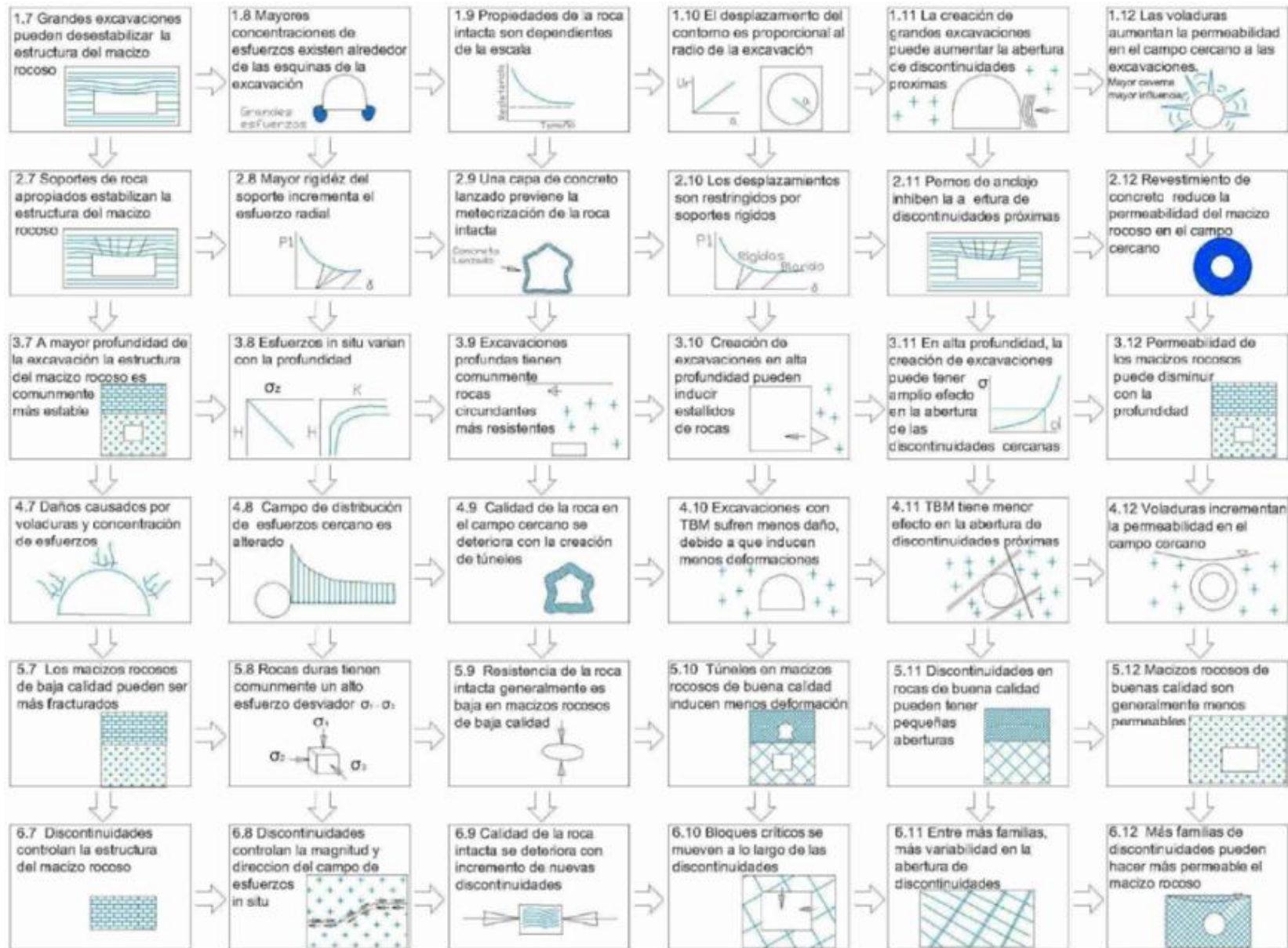


Figura 13 Cuarto superior derecho de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).

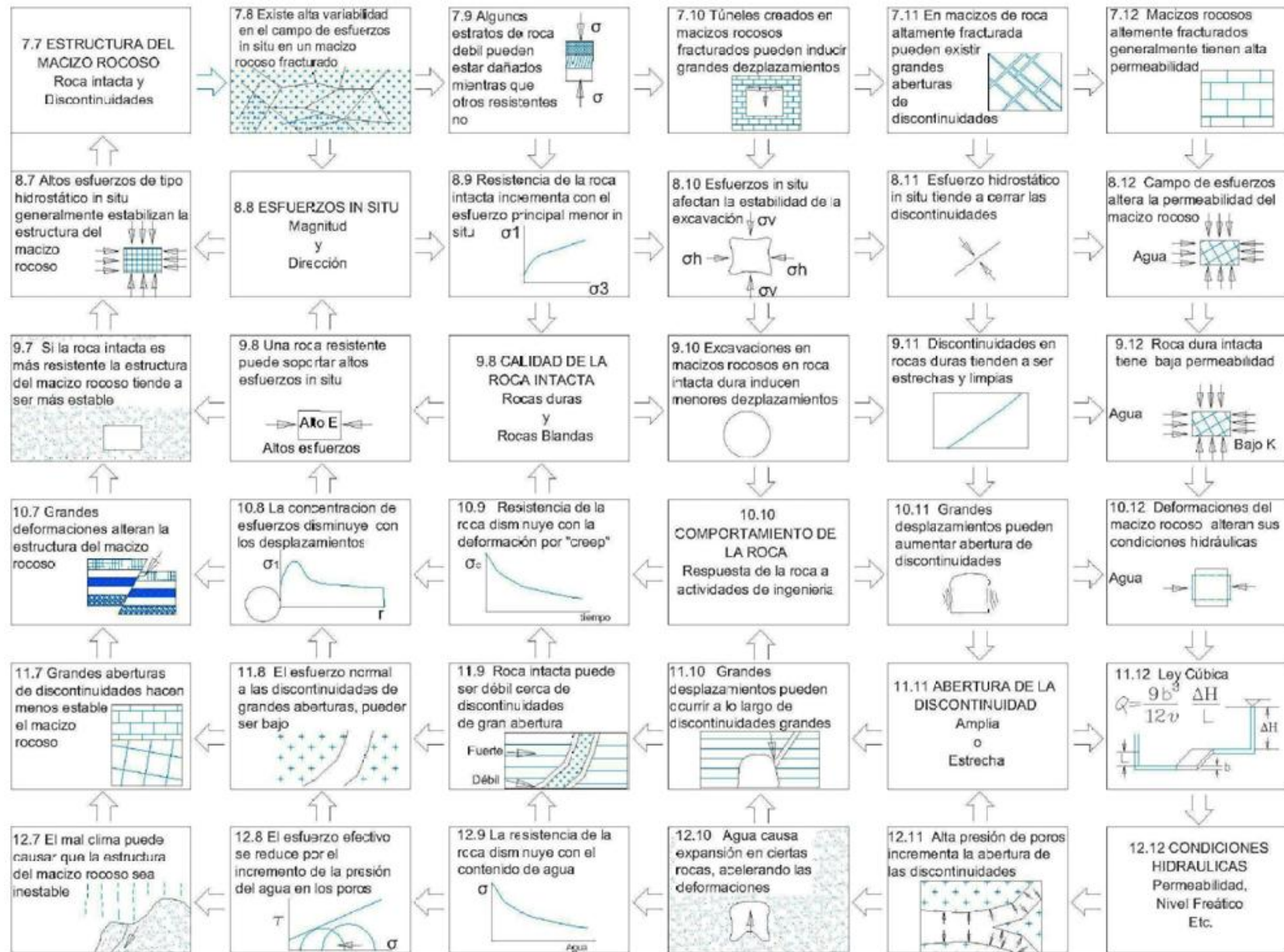


Figura 14 Cuarto inferior derecho de la matriz de interacción compuesta de 12 x 12 (J. Hudson & Castro-Caicedo, 2010).

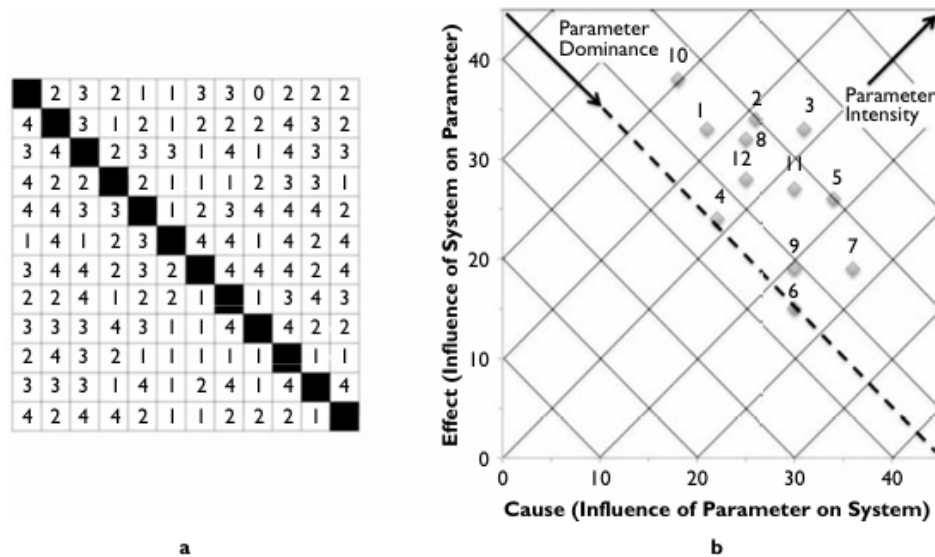


Figura 15 a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa–efecto para el 12 × 12 (Hudson et al., 2015).

Santander (2019) propuso la utilización de la metodología RES en una situación de mina cielo abierto en su tesis denominada *Metodología Rock engineering systems para determinar estabilidad geomecánica en taludes mineros*, en la cual con la definición de 10 parámetros, ver Tabla 2, formulo una metodología en base a RES para evaluar la estabilidad de taludes, los resultados obtenidos fueron comparados con resultados de otra metodología que considera el factor condición, además de una verificación mediante georradars, logrando resultados de poca diferencia entre ambos métodos.

P	Santander 2019
P1	Propiedades de Roca Intacta
P2	Propiedades de discontinuidades
P3	Orientación estructural
P4	Clasificación de macizo rocoso
P5	Condiciones sísmicas coeficientes horizontal
P6	Condiciones hidráulicas
P7	Perforación de pozos que definen berma
P8	Tronaduras a línea de diseño
P9	Vibraciones de tronaduras
P10	Carguo a línea de diseño

Tabla 2 Parámetros propuestos por Santander (2019) para minería a cielo abierto.

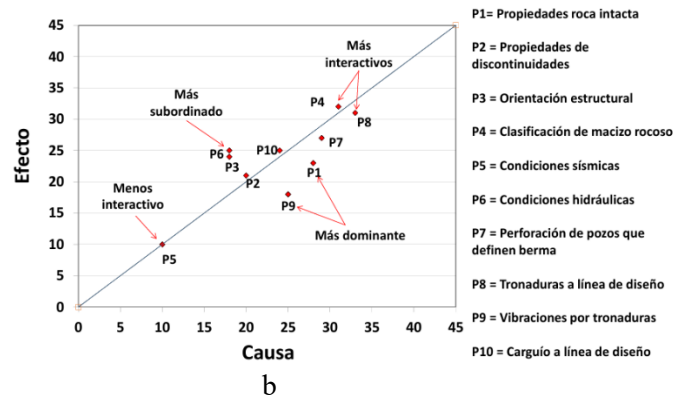


Figura 16 a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa-efecto para el 10 x 10 (Santander, 2019).

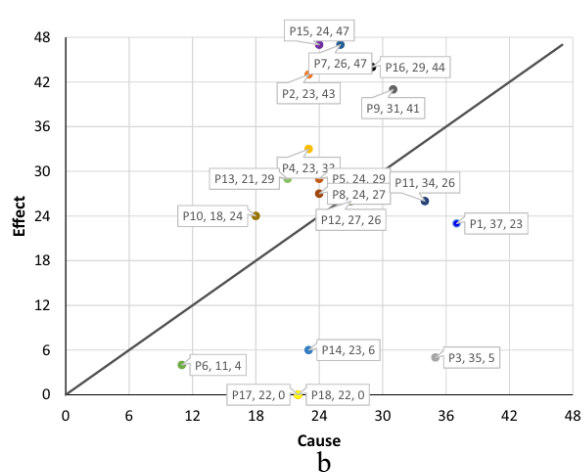
Salmi & Sellers (2022) en su publicación de nombre *A Rock Engineering System Based Abandoned Mine Instability Assessment Index with Case Studies for Waihi Gold Mine* realizaron una evaluación de los peligros geotécnicos asociados a minería subterránea abandonada, también bajo el método RES utilizaron 18 parámetros, ver Tabla 3, siendo estos la conclusión de alrededor de 27 factores considerados por los autores, su publicación observo de que es posible aplicarla con éxito, pero se necesitan casos de estudios de otras regiones con la evaluación de esta metodología para verificarla con mayor veracidad.

P	Salmi & Sellers 2022		
P1	Método de minería	P13	Cargas sísmicas
P2	Geometría de excavación	P14	Peso unitario
P3	Profundidad de las excavaciones	P15	Estado del muro de pie, muro de suspensión y piso
P4	Calidad del soporte	P16	Competencia e integridad del macizo rocoso
P5	Proximidad a otras excavaciones	P17	Efectos climáticos
P6	Cargas superficiales	P18	Edad de las excavaciones
P7	Estreses inducidos por excavaciones		
P8	Estado del agua subterránea		
P9	Estado de tensión previo a la minería		
P10	Topografía		
P11	Estructuras rocosas		
P12	Intemperización y mineralogía		

Tabla 3 Parámetros propuestos por Salmi & Sellers (2022), para excavación subterránea abandonada.

P1	4	0	2	4	2	3	4	2	3	3	2	3	0	2	3	0	0	37
0	P2	0	1	1	0	4	1	2	3	2	1	2	0	4	2	0	0	23
3	4	P3	2	2	0	4	2	4	4	1	1	2	1	3	2	0	0	35
1	2	0	P4	3	0	4	0	3	0	1	1	2	0	4	2	0	0	23
1	3	0	1	P5	0	4	1	3	2	1	1	2	0	4	1	0	0	24
0	1	2	1	0	P6	1	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	11
1	3	1	2	1	0	P7	2	4	2	2	1	3	0	1	3	0	0	26
2	2	1	2	2	0	1	P8	1	1	1	3	1	1	2	4	0	0	24
2	3	1	4	2	0	4	1	P9	0	3	1	3	0	4	3	0	0	31
3	0	0	0	1	1	2	2	4	P10	1	1	1	0	1	1	0	0	18
1	3	0	4	2	0	3	2	4	1	P11	3	4	0	3	4	0	0	34
1	2	0	4	3	0	2	0	0	2	2	P12	1	2	4	4	0	0	27
0	1	0	2	1	0	3	2	4	1	2	1	P13	0	3	1	0	0	21
1	3	0	2	2	0	3	1	4	0	2	0	0	P14	2	3	0	0	23
3	3	0	3	3	0	3	1	2	0	1	0	1	0	P15	4	0	0	24
4	4	0	2	2	0	4	2	2	1	1	4	1	0	2	P16	0	0	29
0	1	0	1	0	1	1	4	0	0	1	4	0	1	4	4	P17	0	22
0	4	0	0	0	0	1	1	0	3	1	2	2	1	4	3	0	P18	22
23	43	5	33	29	4	47	27	41	24	26	26	29	6	47	44	0	0	

a



b

Figura 17 a) Matriz ESQ con la codificación asignada, b) Gráfico de causa-efecto para el 18 x 18 (Salmi & Sellers, 2022).

2.7. Índice de Vulnerabilidad

En el marco de la evaluación geotécnica de peligro para túneles, es fundamental identificar no solo los factores que inciden en la inestabilidad del macizo, sino también su peso relativo dentro del sistema. Para ello, Benardos & Kaliampakos (2004) desarrollaron una metodología cuantitativa basada en los principios del sistema Rock Engineering Systems (RES), complementada con codificación semicuantitativa (ESQ), que permite estimar la vulnerabilidad del entorno subterráneo.

El proceso parte de una matriz de interacción entre parámetros geotécnicos, donde se evalúan las relaciones causa-efecto con una escala de intensidad. A partir de dicha matriz se calcula un peso para cada parámetro (α_i) mediante la expresión:

$$\alpha_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum_i C_i + \sum_i E_i)} (\%)$$

Ecuación 1 Peso de cada parámetro (Benardos & Kaliampakos, 2004).

Donde C_i es la causa del parámetro, y E_i es el efecto del parámetro evaluado.

Posteriormente, el Índice de Vulnerabilidad (VI) se calcula como:

$$VI = \left(100 - \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{P_i}{P_{max}} \right)$$

Ecuación 2 Índice de vulnerabilidad (Benardos & Kaliampakos, 2004).

Donde α_i corresponde al peso del parámetro, P_i a su puntuación discreta, y P_{max} al valor máximo de esa escala. El VI se normaliza en una escala de 0 a 100, lo que permite clasificar las zonas evaluadas según su nivel de peligro geotécnico: baja (0–33), media (34–66) o alta (67–100), ver Figura 18.

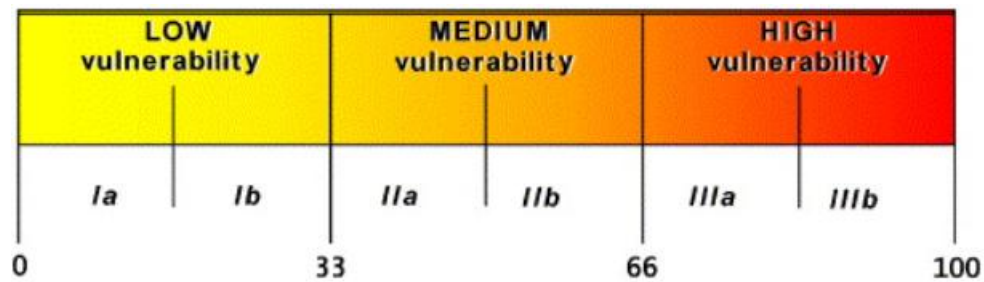


Figura 18 Representación gráfica de los niveles de peligro geotécnico (Benardos & Kaliampakos, 2004).

2.8. Parámetros de estabilidad del macizo rocoso

John A. Hudson mediante su publicación *Rock Engineering Systems: Theory and Practice* buscó establecer de manera formal las interacciones de aspectos como la geología, las propiedades de la roca intacta, las discontinuidades, los esfuerzos y las condiciones hidráulicas, entre otros, mantienen con la ingeniería geotécnica, con el objetivo de promover un enfoque interdisciplinario de una forma innovadora y comprensible (Castro, 2010).

Para aquello propuso que existen 12 factores primarios asociados con respecto a excavaciones subterráneas, y que influyen en esta. Mencionando que hay espacios en blanco para parámetros que se pueden agregar.

	Parámetros Fundamentales Subterráneos
2.4.1	Dimensiones de excavación
2.4.2	Soporte del macizo rocoso
2.4.3	Profundidad de las excavaciones
2.4.4	Métodos de excavación
2.4.5	Calidad del macizo rocoso
2.4.6	Geometría de las discontinuidades
2.4.7	Estructura del macizo rocoso
2.4.8	Esfuerzo in situ del macizo rocoso
2.4.9	Calidad roca intacta
2.4.10	Comportamiento de la roca
2.4.11	Apertura de discontinuidades
2.4.12	Condición hidráulica

Tabla 4 Parámetros propuestos por Hudson en excavaciones subterráneas (Hudson, 1992).

2.8.1 Dimensiones de excavación

Dimensiones de excavación se refiere al tamaño o *span* de la excavación, el *span* es el ancho entre soportes o al ancho del túnel, es decir, la distancia máxima entre las paredes opuestas de una excavación subterránea (Hoek & Brown, 1985). Ver Figura 19.

Lang (1994), define por *span* la medida correspondiente al diámetro del mayor círculo que puede inscribirse completamente dentro del contorno de una excavación.

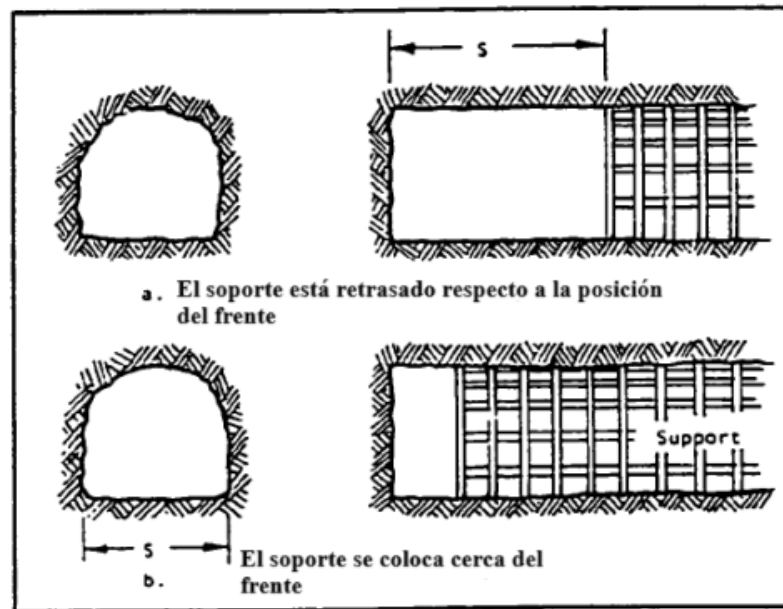


Figura 19 Definición de *span* "S" dentro de la excavación (Hoek & Brown, 1980).

Este parámetro es crucial, ya que en gran medida determina las exigencias estructurales del soporte requeridas para mantener la estabilidad de la excavación.

El tamaño del *span* afecta directamente los esfuerzos inducidos en el macizo rocoso. A medida que aumenta el tramo, los esfuerzos se redistribuyen concentrándose más en otros puntos de la excavación, aumentando el riesgo de colapso o deformación (Hoek & Brown, 1980).

2.8.2 Soporte del macizo rocoso

Uno de los principales riesgos en la minería subterránea es la caída de rocas desde el techo o los costados de las galerías. Durante trabajos subterráneos, se altera el equilibrio natural del macizo rocoso, dejando caras libres expuestas a fuerzas no contrarrestadas. Esto puede causar grietas y desprendimientos de rocas o planchones. El objetivo de los soportes es estabilizar trabajos no autosoportantes, garantizar la seguridad, prevenir desmoronamientos y limitar los movimientos del macizo rocoso. Los métodos de fortificación pueden ser fortificación con madera, marcos de madera, marcos en chimeneas de traspaso, pernos de anclaje

de rocas, pernos de fricción, mallas, sistema de hormigón proyectado con malla, pernos y acuanaduras (SONAMI, 2016).

2.8.3 Profundidad de las excavaciones

La estabilidad influenciada por la profundidad de las excavaciones es analizada mediante su influencia sobre la subsidencia, Whittaker & Reddish (1989) indican que la profundidad influye en la probabilidad de que ocurra hundimiento superficial, dado que si el túnel es profundo, colapsos en el techo del túnel tienden a disiparse antes de llegar a la superficie, debido a que las deformaciones son mayores en rocas superficiales, mientras que en menores profundidades cualquier deformación o colapso tiene más probabilidad de propagarse hacia la superficie, esto aumenta cuando también se considera el factor de los esfuerzos in situ dado que estas tensiones normalmente laterales pueden propagarse hasta la superficie, provocando hundimientos.

Gomez (2014) menciona que cuando se desarrollan labores en zonas con rocas competentes o en yacimientos de poco espesor ubicados a gran profundidad, los efectos en superficie tienden a ser mínimos o incluso inexistentes.

2.8.4 Métodos de excavación

Cuando se menciona el método de excavación se indica la influencia de la explotación en el macizo rocoso según el método y su impacto en la alteración de este durante el desarrollo de la faena. Los métodos de explotación implican secuencias de operaciones de producción repetitivas dentro de los yacimientos. Las operaciones comunes son la movilización, extracción y transporte del mineral, mientras que otras dependen del método específico utilizado. Las diferencias entre métodos surgen de las variaciones en las propiedades geométricas, geomecánicas y geológicas del yacimiento y del macizo rocoso (Brady & Brown, 2004).

Los métodos de explotación subterránea habitualmente se clasifican con las condiciones del macizo rocoso para sostener el método, empleando así una clasificación según calidad y tamaño del yacimiento. Ver figura 20.

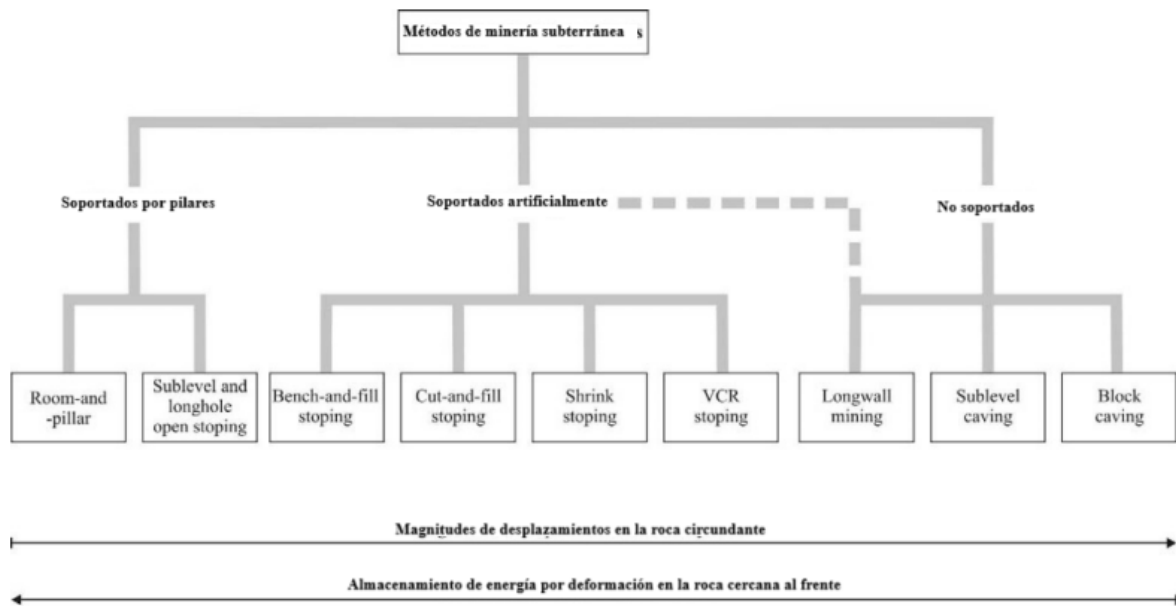


Figura 20 Métodos de minería subterránea en jerarquía según soporte y calidad del macizo rocoso (Brady & Brown, 2004)

2.8.5 Calidad del macizo rocoso

La calidad del macizo rocoso para efectos de este parámetro se realiza en base a la medición de las propiedades geomecánicas una vez definidos las propiedades de la roca intacta y definida la calidad geotécnica.

La calidad o resistencia que posee un macizo rocoso fracturado es influenciada tanto por las propiedades de los bloques de roca intacta como por su capacidad para moverse bajo diferentes tipos de esfuerzo. Esta capacidad está determinada por la geometría de los bloques y por el estado de las superficies que los separan. Bloques, con caras lisas y abruptas, generan un macizo más competente en comparación con aquellos rodeados completamente por material alterado (Hoek & Brown, 2007).

El Índice Geológico de Resistencia (GSI) es uno de los parámetros utilizables para medir este parámetro, proporcionando un sistema que estima cómo varía la resistencia de un macizo rocoso bajo diferentes condiciones geológicas (Hoek & Brown, 2007). Ver Figura 21.

INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA		CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES	
De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (en Tabla 4), seleccione el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia, GSI , de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para GSI , por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.		MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)	
		BUENA Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro	
		REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas	
		MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes	
		MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos	
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES	
	FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SI.		
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.		
	FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.		
	DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS		
		DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA	
		80	
		70	
		60	
		50	
		40	
		30	
		20	
		10	

Figura 21 Estimación del GSI, en base a descripción del macizo rocoso (Hoek & Brown, 2007).

2.8.6 Geometría de las discontinuidades

La gran mayoría de los macizos rocosos se definen como conjuntos de bloques de roca intacta delimitados por un conjunto de discontinuidades. Estas pueden presentarse con orientaciones aleatorias o como elementos repetitivos dentro de un conjunto. Esto se conoce como tejido estructural del macizo rocoso. La gran mayoría de las propiedades están más influenciadas por la naturaleza del tejido estructural que por las propiedades de la roca intacta. Por ello, se utilizan parámetros específicos para describir las discontinuidades, entre las principales se encuentran orientación, persistencia y espaciamiento (Norrish & Wyllie, 1996).

2.8.7 Estructura del macizo rocoso

La estructura del macizo rocoso se ve influenciada tanto por discontinuidades como por la propiedad de la roca. El macizo rocoso es el que se encuentra in situ que incluye planos de estratificación, fallas, diaclasas y otras estructuras, caracterizándose por su discontinuidad y propiedades. La estructura es un parámetro dominante con respecto al comportamiento de este en operaciones mineras. A poca profundidad, las fallas controladas por la estructura son clave en el diseño, mientras que en zonas profundas o de alta concentración de tensiones, aspectos como la liberación de energía pueden ser más relevantes (Brady & Brown, 2004).

2.8.8 Esfuerzo in situ del macizo rocoso

El estado de los esfuerzos in situ dentro del macizo rocoso influyen de gran manera, las tensiones acumuladas en el macizo y los cambios de tensión deben ser identificadas en gran detalle. Esto debido a que concentraciones de tensión en discontinuidades o túneles pueden sobrepasar el límite de la resistencia propia del macizo, conllevando a colapsos, grandes fallas y por ende accidentes dentro del macizo. Los esfuerzos in situ en la mayoría de los casos la tensión aumenta con la profundidad en la corteza. Y dentro del macizo rocoso se pueden manifestar, en general por perturbación estructural, discontinuidades, distribución de las tensiones y esfuerzos propios del terreno (Zang & Stephansson, 2010).

2.8.9 Calidad roca intacta

La calidad de la roca intacta nos permite evaluar la resistencia que tendrá la roca frente a un esfuerzo influyente. La forma de medirlo es mediante la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), la cual nos entrega información sobre la roca y sus propiedades para lograr clasificar su calidad, se define como el máximo esfuerzo que admite la roca cuando es sometida a la compresión uniaxial (González de Vallejo, 2002).

Para parámetros de campo existe una clasificación del UCS según su identificación, ver Figura 22.

Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo			
Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S_1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
S_2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
S_3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0,1
S_4	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1-0,25
S_5	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
S_6	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
R_0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
R_1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0-5,0
R_2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
R_3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R_4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R_5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R_6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Figura 22 Estimación y clasificación del UCS en base a pruebas de campo (ISRM, 1981).

2.8.10 Comportamiento de la roca

El parámetro comportamiento de la roca está directamente asociado a las influencias de excavaciones mineras en el macizo rocoso. Esterhuizen (2006) identifica que cargas elevadas en los pilares generan desconchado y fracturas que impulsan la inestabilidad, como también que mientras a mayor profundidad, mayor también es la tensión, generando fracturamiento en las paredes de los túneles. Define también que inestabilidades asociadas al encorvamiento del piso genera nuevas inestabilidades en pilares que se consideraban estables.

2.8.11 Apertura de discontinuidades

Dentro de las propiedades principales de las discontinuidades se encuentra la apertura. Brady & Brown (2004) explican que el parámetro se refiere a la separación entre las caras de roca en una discontinuidad abierta, donde el espacio entre ellas puede estar lleno de aire o agua.

Tanto como la apertura influyen directamente en la resistencia al corte de la discontinuidad, también influye la rugosidad, la cual mide la ondulación e irregularidades de la superficie en cada discontinuidad, sobre todo en discontinuidades sin relleno. La rugosidad pierde su influencia del aumento de la apertura o el espesor del relleno (Brady & Brown, 2004). Ver figura 23.

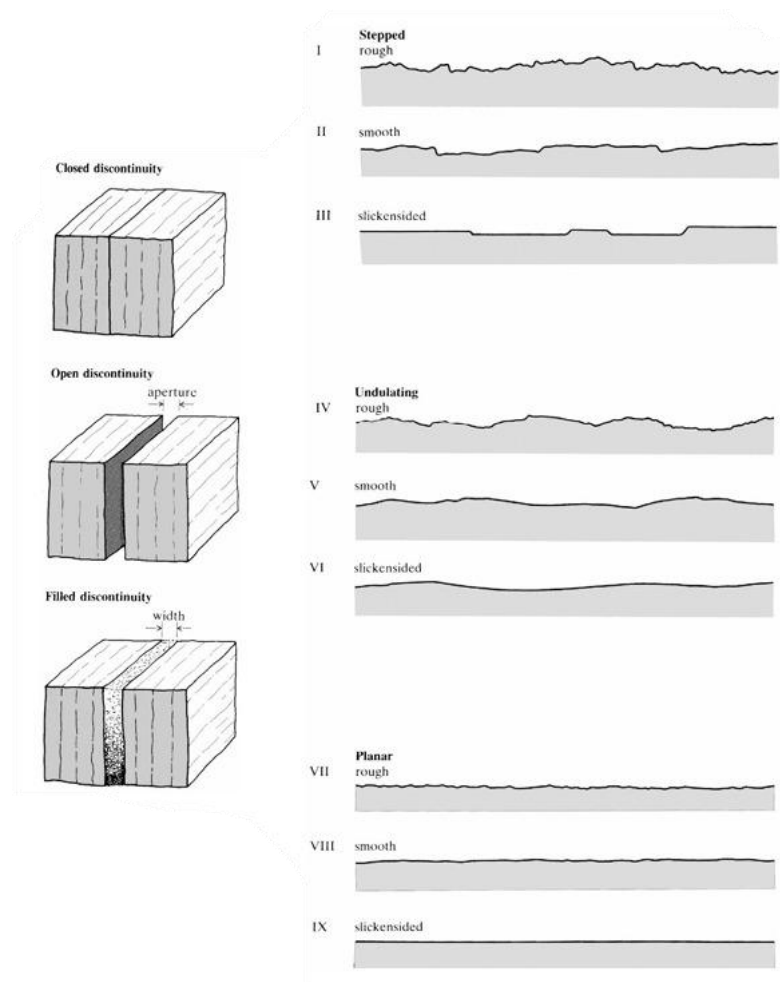


Figura 23 Tipos de apertura y clasificación de las rugosidades según apreciación (ISRM, 1978).

2.8.12 Condición hidráulica

El parámetro de condición hidráulica se refiere a la aparición de agua en la excavación. El agua subterránea genera influencias sobre el comportamiento del macizo rocoso ya sea reduciendo la resistencia al corte debido a su influencia en discontinuidades o rocas porosas, debido a disminución del esfuerzo normal, como a la reducción de la resistencia al ablandar la roca con su presencia, conllevando a un aumento en la deformidad del macizo rocoso (Brady & Brown, 2004).

2.8.13 Otros parámetros aplicables

- Meteorización, litología y mineralogía: Este parámetro evalúa la resistencia de la roca frente a procesos de meteorización, especialmente por ciclos de humectación y secado, utilizando el índice de durabilidad (DI). Rocas con alta sensibilidad a la humedad y bajo índice de durabilidad ($DI < 25$) presentan un comportamiento susceptible a la desintegración rápida, mientras que aquellas con DI alto ($DI > 90$) se consideran muy durables y resistentes al deterioro. La escala permite clasificar la roca desde 0 (muy durable) hasta 5 (altamente meteorizable), aportando una medida objetiva de su comportamiento frente a agentes climáticos (Franklin & Chandra, 1972).
- Competencia e integridad del macizo rocoso: Este parámetro evalúa la competencia del *hanginwall* y *footwall* con la condición del *floor* mediante el índice R_{Mi}, el cual combina la resistencia a compresión de la roca intacta con un factor reductor asociado a la fracturación del macizo. Este índice permite clasificar el macizo como extremadamente débil ($RMi < 0.01$), débil ($0.01-0.1$), moderadamente resistente ($0.1-1$), resistente ($1-10$), muy resistente ($10-100$) o extremadamente resistente ($RMi > 100$). Esta clasificación es útil para anticipar el comportamiento estructural de techos y pisos, así como para orientar decisiones sobre el tipo y nivel de soporte requerido (Palmström, 1995).

3. Metodología

Este estudio adopta una metodología cuantitativa y descriptiva, orientada a la evaluación del peligro geotécnico por inestabilidad en contextos de pequeña minería subterránea. Se emplea un modelo estructurado basado en la metodología Rock Engineering Systems (RES), complementada con codificación Expert Semi-Quantitative (ESQ), para jerarquizar factores y construir un índice de vulnerabilidad. Este enfoque permite analizar de manera sistemática la interacción entre variables geomecánicas, incluso en escenarios donde se dispone de información limitada.

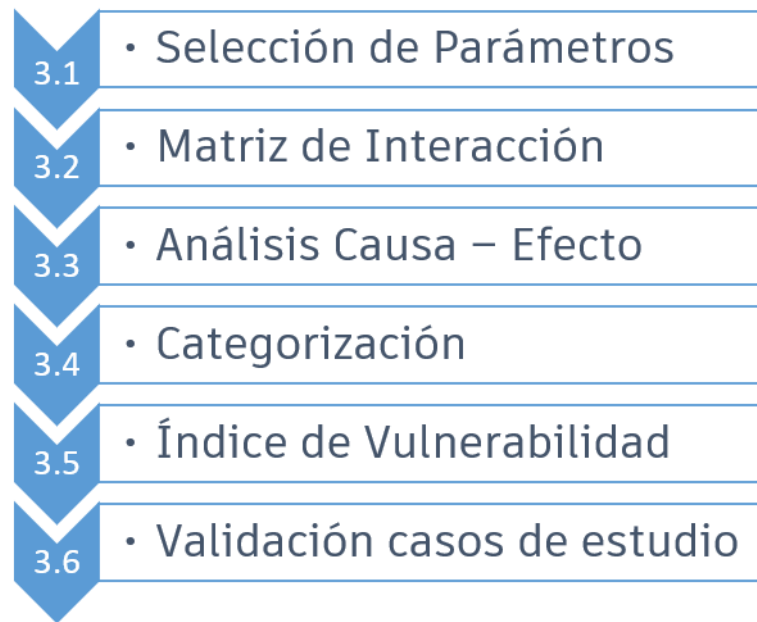


Figura 24 Procedimiento de la metodología.

3.1. Selección de parámetros

Se definirán los parámetros geotécnicos más relevantes que influyen en la estabilidad del macizo rocoso según bibliografía estudiada. Esta selección se realizará considerando criterios técnicos y operacionales asociados a la pequeña minería subterránea.

3.2. Construcción de la matriz de interacción

Una vez definidos los parámetros, se elaborará una matriz RES que permitirá representar la interacción entre ellos. Se evaluará el grado de influencia causal entre cada par de parámetros, en base a bibliografía encontrada y estudios con aplicaciones similares, asignando valores comprobados a base de juicio de expertos que reflejen la intensidad de dicha relación. Esta matriz será la base para el análisis estructural del sistema.

3.3. Análisis causa – efecto

Mediante el procesamiento de la matriz de interacción, se calcularán los índices de causalidad (C) y efecto (E) de cada parámetro. Esto permitirá identificar cuáles factores tienen mayor influencia en el sistema (causas) y cuáles son más afectados (efectos), estableciendo así sus respectivos pesos dentro del modelo.

3.4. Categorización de parámetros

Cada parámetro será asociado a una tabla de evaluación cualitativa con cinco niveles (de 0 a 4), diseñada para facilitar su aplicación en terreno. Estas tablas se utilizarán para recolectar datos en las faenas seleccionadas, asignando una puntuación que refleje el nivel de peligrosidad asociado a cada variable.

3.5. Cálculo del índice de vulnerabilidad

Los valores obtenidos para cada parámetro serán ponderados por sus respectivos pesos derivados del análisis causa-efecto. Con esto se calculará un índice compuesto de vulnerabilidad, que reflejará el nivel de exposición al peligro geotécnico por caída de roca para cada frente evaluado.

3.6. Validación en casos de estudio

Finalmente, se aplicará la herramienta desarrollada en una o más faenas reales de pequeña minería subterránea. Los resultados obtenidos se contrastarán con observaciones de terreno y con evaluaciones empíricas existentes, con el fin de verificar la consistencia, aplicabilidad y utilidad de la metodología propuesta en contextos de baja caracterización geotécnica.

3.7. Limitaciones de la metodología

Pese a su estructura sistemática, esta metodología puede presentar limitaciones, si bien se seleccionaran variables relevantes para la estabilidad geotécnica en pequeña minería, el proceso depende de criterios bibliográficos y juicio experto, lo que puede introducir sesgos o excluir factores importantes que emergen en casos particulares. Continuando en esta línea la construcción de la matriz RES se basará en juicios expertos o referencias previas, lo que introduce cierto grado de subjetividad. La falta de datos cuantitativos o estudios experimentales que respalden la magnitud exacta de las interacciones entre variables puede generar un modelo dependiente de supuestos no verificables empíricamente. Agregado a aquello, aunque las tablas de clasificación permitirán una aplicación operativa directa, existe el riesgo de ambigüedad en la interpretación visual de algunos parámetros, lo que puede generar variabilidad según el observador, además la simplificación en cinco niveles puede no captar adecuadamente zonas de transición o comportamientos intermedios.

4. Resultados y Análisis

A través de la información obtenida en las etapas previas de caracterización del macizo rocoso, se procedió a definir los parámetros geotécnicos más representativos para la evaluación del peligro por caída de roca en minería subterránea, correspondiente a pequeña minería. La selección de estos parámetros consideró criterios propuestos por Hudson (1992) en su metodología *Rock Engineering Systems* (RES), junto con aportes de autores como Salmi & Sellers (2022) y Santander (2019), quienes destacan la relevancia de factores estructurales, hidrogeológicos y mecánicos en la estabilidad de excavaciones, siendo los utilizados mostrados en la tabla.

Parámetro	¿Es observable?	¿Es medible con instrumentos simples?	¿Es aplicable en pequeña minería subterránea?	Fundamentación
Dimensiones de Excavación	Sí	Sí (medición directa de ancho y altura)	Sí	Las dimensiones de la excavación son fáciles de observar y medir con herramientas simples. Son fundamentales para asegurar estabilidad y acceso, sobre todo en faenas pequeñas.
Soporte del Macizo Roco	Sí	No (es visible)	Sí	Aunque es observable, evaluar su efectividad requiere más que solo observación visual. Es fundamental en pequeña minería, donde la falta de soporte adecuado aumenta el riesgo de accidentes.
Profundidad de la Excavación	No	Sí (se puede estimar)	Sí	La profundidad no es directamente observable sin herramientas. Sin embargo, puede estimarse con medición. En pequeña minería, la profundidad es relevante para evaluar la estabilidad de las excavaciones.
Método de Excavación	Sí	No (requiere clasificación de métodos)	No	Aunque se puede observar el método utilizado, en pequeña minería se sigue principalmente la veta sin necesidad de un análisis exhaustivo del impacto geotécnico del método.
Calidad del Macizo Roco	Sí	Sí (pruebas de compresión en campo)	Sí	La calidad del macizo rocoso se puede evaluar visualmente y con pruebas de compresión. Es crucial en pequeña minería para conocer la resistencia del macizo rocoso.
Geometría de las Discontinuidades	Sí	No	Sí	Aunque observable, las discontinuidades requieren mapeo detallado o herramientas especializadas para medir su impacto en la estabilidad del macizo. Es esencial en pequeña minería, pero difícil de medir sin equipo avanzado.
Estructura del Macizo Roco	Sí	Sí	Sí	Es observable en campo, pero requiere un análisis más detallado. La estructura geológica del macizo rocoso es fundamental para la estabilidad en pequeña minería.
Esfuerzo in situ	Sí	No	Sí	No es observable directamente, pero se puede inferir a través de las fracturas, aperturas y comportamiento de la roca. El esfuerzo se calcula mediante otros parámetros relacionados. Es importante para evaluar la estabilidad y el riesgo de colapso.
Calidad de la Roca Intacta	No	Sí (mediante pruebas de golpes con martillo)	Sí	La calidad de la roca intacta no es observable directamente, pero se mide mediante pruebas simples, como el golpe con martillo. Es un parámetro clave para determinar la resistencia del macizo.

Tabla 5 Parámetros aplicables en base a su relación y análisis en pequeña minería.

Comportamiento de la Roca	Sí, a largo plazo	No	Sí	Es observable a largo plazo, ya que los comportamientos como fracturas o deformaciones se hacen evidentes. Sin embargo, es un parámetro difícil de medir sin un equipo adecuado. Es relevante para prever inestabilidades.
Apertura de Discontinuidades	Sí	Sí, midiendo el ancho de la junta	Sí	La apertura de las discontinuidades es fácil de observar y medir, lo que la hace un parámetro clave para la estabilidad del macizo.
Condición Hidráulica	Sí	Sí	Sí	Aunque se necesita equipos avanzados para mediciones precisas, se puede observar y medir el flujo de agua en el macizo. Su influencia es importante para la estabilidad, aunque en pequeña minería no siempre se mide.
Proximidad a otras Excavaciones	No	No (requiere observación directa y mapeo)	No	En pequeña minería, las faenas suelen ser aisladas, por lo que la proximidad a otras excavaciones no suele ser un factor de riesgo.
Cargas Superficiales	No	No	No	Las cargas superficiales no son fáciles de medir ni observar en pequeña minería, y no son un parámetro relevante para la estabilidad de las excavaciones.
Topografía	Sí	No	No	La topografía no se puede visualizar fácilmente en el terreno de la pequeña minería. Aunque es importante para el diseño de rampas, su medición en pequeñas faenas es limitada.
Meteorización y Mineralogía	Sí	Sí	Sí	La meteorización es observable con el tiempo, es importante para prever el comportamiento de las rocas frente a otros agentes.
Cargas Sísmicas	No	No (requiere equipos especializados)	No	Las cargas sísmicas son poco relevantes para la pequeña minería, ya que las faenas suelen operar en zonas con menor actividad sísmica y sin equipos para medirlo.
Peso Unitario	No	No	No	El peso unitario no se mide fácilmente en pequeña minería, ya que requiere pruebas de laboratorio y equipos más avanzados. Es relevante, pero no se mide con instrumentos simples.
Competencia e Integridad del Hangingwall/Footwall y condicion del Floor.	Sí	No (requiere observación detallada y un conocimiento previo)	No	Aunque observable, requiere un análisis más detallado y conocimiento técnico para evaluar la integridad de los muros.
Competencia e Integridad del Overburden y Crown pilar	Sí	No	No	Aunque observable, requiere un análisis más detallado y conocimiento técnico para evaluar la integridad de la sobrecarga y crown pilar
Efectos Climáticos	Sí	No (requiere modelado o análisis detallado)	No	Los efectos climáticos son un factor relevante a largo plazo, pero no se miden fácilmente en pequeña minería y no son un riesgo inmediato.
Edad de Excavaciones	No	No (requiere estimación de tiempo)	No	La edad de las excavaciones no es relevante ni se mide en pequeña minería, donde las faenas son más cortas y sin registros detallados.

Tabla 6 Parámetros aplicables en base a su relación y análisis en pequeña minería.

Los parámetros seleccionados para la evaluación del peligro geotécnico en la pequeña minería subterránea fueron elegidos debido a su relevancia directa en la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad operativa de las faenas, en base a un análisis del contexto de la pequeña minería como de bibliografía mencionada en los puntos anteriores. En el contexto de la pequeña minería, donde las condiciones operativas son más limitadas en términos de recursos y equipos, es fundamental elegir parámetros que sean observables y medibles con herramientas accesibles. Los parámetros como las dimensiones de la excavación, el soporte del macizo rocoso, la profundidad de las excavaciones y la calidad del macizo rocoso son clave, ya que permiten evaluar la estabilidad de las excavaciones y la resistencia del material con el que se trabaja, factores esenciales para prevenir colapsos y accidentes fatales.

Por otro lado, se optó por no incluir parámetros como las cargas sísmicas o la competencia e integridad, ya que no son factores de peligro relevantes en la pequeña minería, dada su baja frecuencia de ocurrencia y la falta de equipos especializados para su medición en este tipo de faenas. Además, parámetros como la proximidad a otras excavaciones y la topografía, aunque relevantes en grandes operaciones mineras, son menos aplicables en la pequeña minería, donde las faenas son generalmente aisladas y de menor escala.

Así, se priorizó la selección de parámetros que sean fáciles de observar, medir y aplicar en faenas con limitaciones operativas y técnicas, garantizando que la metodología propuesta sea práctica, accesible y efectiva para mejorar la seguridad en este tipo de minería.

	Parametros
P1	Dimensiones de la excavación
P2	Soporte de rocas
P3	Profundidad de excavaciones
P4	Calidad del macizo rocoso
P5	Geometría de discontinuidades
P6	Estructura del macizo rocoso
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso
P8	Calidad de la roca intacta
P9	Comportamiento de la roca
P10	Abertura de la discontinuidad
P11	Condicion hidráulica
P12	Meteorización litología y mineralogica

Tabla 7 Parámetros seleccionados para la evaluación de estabilidad.

4.1. Construcción de la Matriz de Interacción RES

La matriz de interacción fue elaborada siguiendo la metodología e interacciones propuestas por Hudson (1992) para el sistema *Rock Engineering Systems* (RES), considerando un total de doce parámetros relevantes para la evaluación de la estabilidad geotécnica en minería subterránea, y en menor medida a Salmi & Seller (2022). Cada parámetro fue codificado como P1 a P12, según se detalla en la Tabla 7, abarcando aspectos estructurales, geomecánicos e hidrogeológicos del macizo rocoso.

Previo a la codificación formal en la matriz RES, se elaboró una representación gráfica en una matriz de 12x12 de las principales relaciones, esta figura busca evidenciar cómo cada parámetro influye directamente sobre otros dentro del sistema geotécnico, permitiendo visualizar la direccionalidad y naturaleza de las interacciones antes de su cuantificación (Ver Anexo 1, 2, 3 y 4).

A continuación, en la Figura 25 se presentan ejemplos representativos de interacciones significativas entre parámetros, sustentadas en la bibliografía técnica y el juicio de experto.

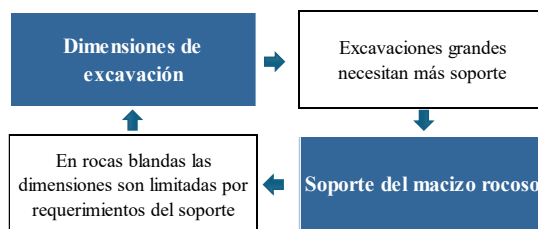


Figura 25 Influencias entre parámetros P1 y P2 en base a la dirección de las flechas.

En base a la Figura 25, según Hoek & Brown (1985), las excavaciones grandes requieren más soporte debido a la redistribución de los esfuerzos en el macizo rocoso. Mientras que Hudson (1992) y Salmi & Sellers (2022) mencionan que, en el diseño de la excavación, la calidad del soporte y la estructura geotécnica juegan un papel importante en la prevención de colapsos, especialmente en lugares con poca capacidad técnica.

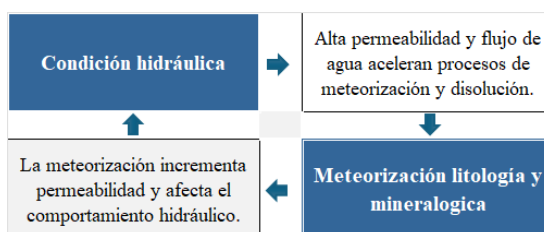


Figura 26 Influencias entre parámetros P11 y P12 en base a la dirección de las flechas.

Fundamentando la Figura 26, la condición hidráulica del macizo rocoso influye directamente en la intensidad y velocidad de los procesos de meteorización, ya que la presencia de agua promueve la disolución y alteración de minerales, acelerando la degradación del macizo (Brady & Brown, 2004). Por otro lado, según Franklin & Chandra (1972) la meteorización progresiva altera la estructura interna del macizo, incrementando la porosidad y desarrollando microfisuras esta retroalimentación puede generar un aumento

sostenido de la permeabilidad, disminuyendo la resistencia del terreno y afectando negativamente su estabilidad.

4.2. Codificación Semicuantitativa de las Interacciones

Una vez establecidas las relaciones lógicas entre parámetros, se procedió a la codificación semicuantitativa de la matriz de interacción RES. Este proceso consistió en asignar valores numéricos entre 0 y 4 a cada interacción parámetro–parámetro, de acuerdo con su grado de influencia relativa. La escala utilizada sigue y se basa en la propuesta original de Hudson (1992), donde 0 representa una ausencia de interacción y 4 indica una influencia muy alta.

Valor interaccion	Descripción
0	No existe interaccion
1	Debil interaccion
2	Media interaccion
3	Fuerte interaccion
4	Critica interaccion

Tabla 8 Valores asociados a la intensidad de interacción mediante ESQ (Hudson, 1992).

La codificación fue realizada en base a la información y codificación obtenida en Hudson (1992) y Salmi & Sellers (2022), quienes codificaron relacionando en su mayoría los mismos parámetros con base de juicio en expertos, considerando tanto criterios teóricos como evidencia empírica sobre el comportamiento del macizo rocoso en contextos subterráneos. Se priorizaron interacciones que representan relaciones físicas o mecánicas comprobadas, tales como el efecto de la geometría de discontinuidades sobre la estructura del macizo, o el impacto de la calidad del macizo rocoso en el tipo de soporte requerido.

A continuación, se presenta un ejemplo de la evaluación de la codificación ESQ aplicada a las interacciones anteriormente mostradas.

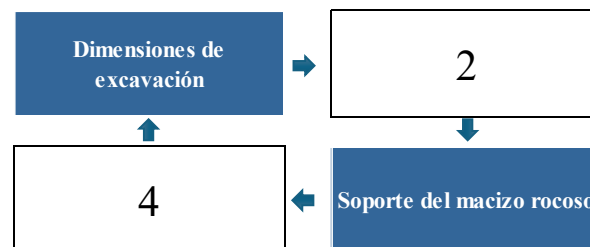


Figura 27 Codificación ESQ en base a la interacción entre los parámetros P1 y P2.

- La Figura 27, dimensiones de la excavación y soporte del macizo rocoso: Aunque las dimensiones de la excavación afectan la necesidad de soporte, su influencia es media, ya que otros factores como la competencia de la roca o el comportamiento de las discontinuidades también desempeñan un papel

relevante. Según Brady & Brown (2004), el soporte adecuado es crítico para definir el tamaño y la estabilidad de la excavación. Si el soporte es insuficiente, las dimensiones de la excavación deben reducirse, lo que justifica la interacción crítica en esta dirección.

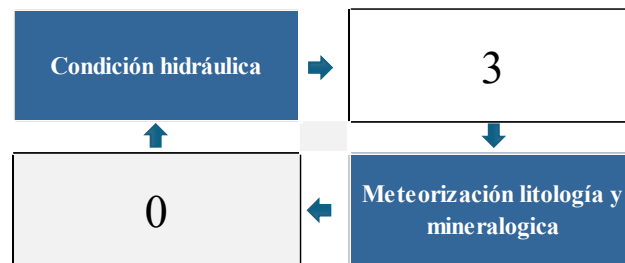


Figura 28 Codificación ESQ en base a la interacción entre los parámetros P11 y P12.

- En base a la Figura 28, la codificación de la condición hidráulica y meteorización: Se asignó una interacción fuerte desde la condición hidráulica hacia la meteorización debido a que un alto flujo de agua favorece procesos de disolución y alteración química de los minerales, acelerando la degradación del macizo rocoso (Brady & Brown, 2004). Por otro lado, la meteorización no tiene una influencia directa significativa sobre la condición hidráulica, ya que este proceso es lento y progresivo, afectando la permeabilidad de la roca más que modificando directamente las condiciones hidráulicas iniciales.

Estas interacciones, derivadas del juicio experto de las metodologías previas, proporcionan una base sólida para la jerarquización y evaluación de los factores críticos que afectan la estabilidad de las excavaciones subterráneas. A continuación, se presenta la tabla general de codificación obtenida, que resume las interacciones y los valores asignados para cada parámetro evaluado.

1	2	3	1	1	3	3	0	2	2	2	1	20	CAUSA
4	2	3	2	1	2	2	2	4	3	2	1	26	
3	4	3	3	3	1	4	1	4	3	3	1	30	
4	4	3	4	1	2	3	4	4	4	2	3	34	
1	4	1	3	5	4	4	1	4	2	4	4	32	
3	4	4	3	2	6	4	4	4	2	4	4	38	
2	2	4	2	2	1	7	1	3	4	3	1	25	
3	3	3	3	1	1	4	8	4	2	2	4	30	
2	4	3	1	1	1	1	1	9	1	1	1	17	
3	3	3	4	1	2	4	1	4	10	4	4	33	
4	2	4	2	1	1	2	2	2	1	11	3	24	
2	4	0	2	4	4	0	4	2	4	0	12	26	
31	36	31	26	18	22	31	21	37	28	27	27	EFECTO	

Figura 29 Matriz de codificación y obtención de valores de Causa-Efecto para cada parámetro.

En la matriz resultante que se muestra en la Figura 29, se cuantificó el grado de influencia entre los doce parámetros (celda en azul) definidos mediante una escala discreta de valores entre 0 y 4. Las filas corresponden al rol de cada parámetro como causa (influencia ejercida), mientras que las columnas reflejan su efecto (influencia recibida). La diagonal principal se ha omitido, ya que un parámetro no se evalúa contra sí mismo. A partir de esta matriz, se calcularon las sumas horizontales y verticales para cada parámetro, obteniendo así los valores de causa y efecto, respectivamente. Estos resultados permiten identificar parámetros altamente influyentes, como la estructura del macizo rocoso y la calidad del macizo rocoso, así como aquellos más susceptibles, entre los que destaca el soporte del macizo rocoso. Esta codificación constituye la base para los análisis de causa-efecto y ponderación que se presentan en los apartados siguientes.

4.3. Análisis Causal: Tabla y Gráfico de Causa-Efecto

A partir de los valores de Causa y Efecto obtenidos en la matriz codificada, se elaboró un análisis causa-efecto con el objetivo de caracterizar el rol funcional de cada parámetro dentro del sistema. Este análisis se basa en dos indicadores clave:

- Nivel de interacción, obtenido como la suma ($\text{Causa} + \text{Efecto}$), representa el grado de participación global del parámetro en el sistema.
- Nivel de dominancia, calculado como la diferencia ($\text{Causa} - \text{Efecto}$), indica si el parámetro actúa predominantemente como causante (positivo) o como receptor (negativo).

Los resultados se presentan en la Tabla 9 y en el Gráfico 1. En el gráfico causa-efecto, los parámetros se distribuyen respecto a la línea de equilibrio ($\text{Causa} = \text{Efecto}$). Los puntos situados por debajo de la diagonal corresponden a parámetros dominantes, es decir, ejercen mayor influencia sobre el sistema que la que reciben. En cambio, los puntos la parte superior derecha de la diagonal corresponden a parámetros interactivos.

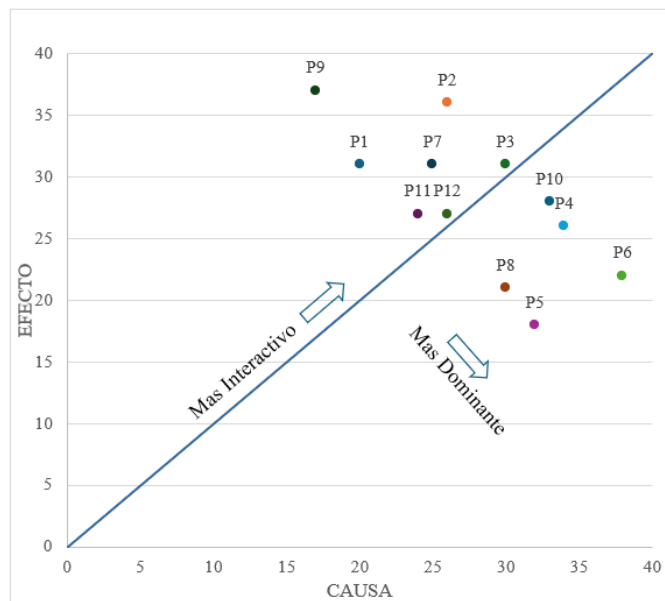


Gráfico 1 Causa y Efecto de parámetros que afectan al macizo rocoso.

Entre los parámetros más dominantes destacan la estructura del macizo rocoso (P6), geometría de las discontinuidades (P5) y calidad de la roca intacta (P8). Mientras que los más interactivos son profundidad de excavaciones (P3), soporte del macizo rocoso (P2), abertura de discontinuidad (P10). Se aprecia que la distribución de los datos nos dice que en su mayoría son parámetros que interactúan bastante, pero hay una diferencia clara entre el nivel de dominancia entre ellos.

Esta diferenciación permite establecer estrategias de intervención más eficaces. Los parámetros dominantes deben ser priorizados en el diseño y control de las excavaciones, ya que modificarlos puede generar efectos sistémicos significativos. Por otro lado, los parámetros interactivos requieren monitoreo continuo, dado su carácter reactivo ante variaciones en el entorno geotécnico.

	Parametro	Causa	Efecto	Causa + Efecto (Nivel de Interaccion)	Causa-Efecto (Nivel de dominancia)
P1	Dimensiones de la excavación	20	31	51	-11
P2	Soporte de rocas	26	36	62	-10
P3	Profundidad de excavaciones	30	31	61	-1
P4	Calidad del macizo rocoso	34	26	60	8
P5	Geometría de discontinuidades	32	18	50	14
P6	Estructura del macizo rocoso	38	22	60	16
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	25	31	56	-6
P8	Calidad de la roca intacta	30	21	51	9
P9	Comportamiento de la roca	17	37	54	-20
P10	Abertura de la discontinuidad	33	28	61	5
P11	Condicion hidráulica	24	27	51	-3
P12	Meteorización litología y mineralógica	26	27	53	-1

Tabla 9 Causa y Efecto con su nivel de interacción y dominancia.

Esta distribución se complementa con el análisis del peso relativo α_i , obtenido mediante la aplicación de la Ecuación 1 (Benardos & Kaliampakos, 2004), que cuantifica el grado de participación de cada parámetro en el sistema. Este indicador permite comparar la importancia estructural de cada variable y priorizar aquellas que concentran mayor influencia en la estabilidad global del macizo rocoso. Así, la tabla no solo permite clasificar los parámetros según su rol funcional (dominante o interactivo), sino que, al integrarlo con los valores de α_i , aporta una visión más completa para la jerarquización técnica de los factores críticos del sistema geotécnico. Se observa de la Tabla 10, que los valores que se consideran más interactivos son los que poseen un mayor peso dentro del sistema, y llama la atención que el parámetro geometría de las discontinuidades tenga un bajo nivel de interacción, pero sea altamente dominante, esto se puede explicar debido a que actúa como un parámetro estructurador del comportamiento del entorno rocoso, pero no es fácilmente modificada ni afectada por otros factores, lo que explica su bajo efecto.

	Parametro	α_i
P1	Dimensiones de la excavación	7.6%
P2	Soporte de rocas	9.3%
P3	Profundidad de excavaciones	9.1%
P4	Calidad del macizo rocoso	9.0%
P5	Geometría de discontinuidades	7.5%
P6	Estructura del macizo rocoso	9.0%
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	8.4%
P8	Calidad de la roca intacta	7.6%
P9	Comportamiento de la roca	8.1%
P10	Abertura de la discontinuidad	9.1%
P11	Condicion hidráulica	7.6%
P12	Meteorización litología y mineralogica	7.9%

Tabla 10 Parámetros seleccionados y su peso dentro del sistema.

4.4. Categorización y cálculo del Índice de Vulnerabilidad (VI)

Para evaluar la condición de cada parámetro y el índice de vulnerabilidad entorno al macizo rocoso en excavaciones subterráneas, se emplea un sistema de categorización basado en parámetros geotécnicos establecidos que describen las condiciones físicas y mecánicas del terreno. Estos parámetros se clasifican en una escala discreta que refleja desde condiciones críticas (0) hasta situaciones óptimas (4) para la estabilidad.

Valor situacion ante estabilidad	Descripcion
0	Condiciones críticas
1	Condiciones muy desfavorables
2	Moderadamente desfavorables
3	Condiciones favorables
4	Situaciones óptimas

Tabla 11 Condición de estabilidad en base a un valor.

- P1: El tamaño de la excavación (*span*) es clave para la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Según Hoek y Brown (1980), las excavaciones más grandes generan mayores tensiones en el macizo rocoso, lo que aumenta el riesgo de colapsos y requiere soportes avanzados. Salmi & Sellers (2022) coinciden en que excavaciones con $span \geq 25$ metros deben recibir un análisis exhaustivo y soporte robusto debido a la alta vulnerabilidad asociada. Excavaciones más pequeñas (< 10 m) presentan menor vulnerabilidad, pero aún requieren un análisis geotécnico de las condiciones locales.

0	1	2	3	4
Muy ancho: más de 20 metros	Entre 15 y 20 metros	Entre 10 y menos de 15 metros	Entre 5 y menos de 10 metros	Estrecho: menos de 5 metros

Tabla 12 Categorización del parámetro P1 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P2: El Soporte depende directamente de la calidad y tipo de soporte previo implementado, tal como se describe en Salmi & Sellers (2022). Excavaciones con soporte de baja calidad o sin soporte presentan un peligro elevado de inestabilidad y colapsos. Por otro lado, las excavaciones con soporte adecuado y de alta calidad ofrecen una mayor seguridad, ya que las tensiones dentro del macizo rocoso se distribuyen de manera más eficiente, reduciendo los riesgos de fallas.

0	1	2	3	4
No hay soporte o la roca es mala.	Hay algo de soporte, pero muchas zonas sin refuerzo.	La mayor parte del túnel tiene soporte, pero hay zonas con grietas o pequeñas caídas.	Casi todo está bien reforzado, con pernos o malla en buen estado.	No se necesita soporte o el soporte está perfecto.

Tabla 13 Categorización del parámetro P2 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P3: Según Hoek y Brown (1980) y Salmi & Sellers (2022), las excavaciones profundas requieren soportes avanzados debido a los fenómenos que pueden ocurrir cuando la energía acumulada en el macizo rocoso se libera repentinamente. Por otro lado, en excavaciones con menos de 30 metros de profundidad, la vulnerabilidad es más baja, ya que las tensiones en la roca son menores, permitiendo el uso de soportes más livianos. Las categorías seleccionadas para cada rango de profundidad reflejan estas consideraciones, donde las excavaciones superficiales (< 10 m) presentan los menores peligros, mientras que las de mayor profundidad requieren un análisis geotécnico más riguroso.

0	1	2	3	4
Muy profundo: más de 100 metros desde la superficie.	Profundo: entre 50 y 100 metros.	Moderado: entre 30 y 50 metros.	Poco profundo: entre 10 y 30 metros.	Muy superficial: menos de 10 metros.

Tabla 14 Categorización del parámetro P3 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P4: La calidad del macizo rocoso fue determinada mediante una relación con el Índice Geológico de Resistencia (GSI), que evalúa la cohesión y el estado de fracturación del macizo rocoso. Según Hoek y Brown (1980), el GSI proporciona una medida del comportamiento de la roca bajo condiciones de excavación, basado en la presencia de discontinuidades y el grado de fracturación de la roca. Las rocas con bajo GSI (menor a 20) son muy inestables y altamente fracturadas, mientras que las rocas con alto GSI (mayor a 80) son compactas, masivas y muy estables. A medida que el GSI aumenta, la cohesión y la resistencia de la roca mejoran, reduciendo la necesidad de refuerzos complejos.

0	1	2	3	4
La roca está muy fracturada, suelta o deshecha. Se cae fácilmente. Alta inestabilidad.	Hay muchas juntas o planos de falla. Solo al golpear, la roca se desprende en bloques pequeños o se desmenuza.	Se ven algunas fracturas o planos de separación, pero la roca se mantiene y no se cae sola.	La roca está en su mayoría firme, hay pocas fracturas y no se ve debilitada.	La roca es compacta y masiva, sin fracturas visibles. Se ve y se siente firme. Muy estable.

Tabla 15 Categorización del parámetro P4 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P5: La geometría de las discontinuidades en el macizo rocoso juega un papel fundamental en la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Grietas cruzadas o planos de falla que se alinean con el túnel pueden facilitar la formación de bloques inestables que se desprenden con facilidad. Por otro lado, las discontinuidades que no se cruzan y las fracturas poco significativas tienden a ser menos problemáticas, permitiendo una excavación más estable. Las rocas con pocas fracturas o sin discontinuidades visibles se consideran más seguras y estables. Estos comportamientos se alinean con estudios previos que han demostrado cómo la orientación y distribución de las grietas afectan directamente la estabilidad del macizo rocoso. (Barton et al., 1974; Hoek & Brown, 1980; Hoek & Marinos, 2014).

0	1	2	3	4
Las Juntas o fracturas se cruzan, están inclinadas hacia la excavación y se forman bloques sueltos fácilmente. Se ven 4 o más familias de juntas, muy inestable.	Hay tres familias de juntas o fallas alineadas con el túnel y puede facilitar caídas de roca en techos o paredes.	2 familias de juntas o grietas existen pero no se cruzan, ni forman bloques inestables.	Una familia de juntas, no hay muchas grietas, y las que hay no generan peligro inmediato. Roca estable.	La roca se ve compacta, sin planos de separación. Muy segura.

Tabla 16 Categorización del parámetro P5 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P6: La estructura del macizo rocoso se ha clasificado utilizando el sistema de clasificación RMR propuesto por Bieniawski (1989), el cual evalúa la resistencia del macizo rocoso en función de la presencia de discontinuidades y la cohesión de la roca. Las rocas con $RMR \leq 20$ están muy alteradas o fracturadas, lo que genera una alta inestabilidad y requiere un soporte avanzado. Entre 20 y 40, la roca muestra discontinuidades grandes, lo que aumenta el riesgo de caídas de bloques, las rocas con $RMR > 80$ son compactas y masivas, sin fracturas visibles, y se consideran muy estables. Además, Salmi & Sellers (2022) también utilizan una clasificación geotécnica similar, evaluando el comportamiento de la roca en función de su fracturación y la presencia de discontinuidades.

0	1	2	3	4
Hay mezcla de materiales, se ven huecos, rellenos de arcilla, zonas blandas entre la roca. Parece terreno "maltratado" o que ya se ha movido antes.	Se ven líneas grandes que cortan la roca (fallas), y algunos bloques ya se están desprendiendo o mineral arcilloso expansivo.	Tiene capas o planos, pero están torcidos, cortados o no se siguen bien. Algunas zonas están firmes, otras no.	Las capas de roca se ven parejas y se mantienen iguales por varios metros. No hay muchas interrupciones ni partes sueltas o ligeras alteraciones.	Es como un solo bloque, casi sin líneas, sin grietas grandes, sin zonas blandas. Se siente firme al picar y no se rompe fácil.

Tabla 17 Categorización del parámetro P6 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P7: El parámetro de Esfuerzos in situ del macizo rocoso se clasifica según los esfuerzos horizontales y el patrón de fallas presentes en el área, tal como se detalla en la tabla de Salmi y Sellers (2022). En zonas con muy altos esfuerzos horizontales, como en las topografías complejas, el empuje tectónico genera una alta inestabilidad que requiere soportes avanzados para evitar desprendimientos y colapsos (Categoría 0). Las áreas con esfuerzos horizontales altos, pero con fallas normales presentan una inestabilidad moderada. En zonas con esfuerzos moderados, donde las grietas y los ajustes son menores, el uso de soportes ligeros es suficiente. Finalmente, en terrenos con esfuerzos bajos, sin fallas dominantes, la excavación es estable. Esta clasificación se basa en relación con los esfuerzos in situ y, tal como lo proponen Zang y Stephansson (2010).

0	1	2	3	4
La roca se rompe sola, se escuchan ruidos o estallidos, los marcos se doblan, y el túnel parece cerrarse. Suelen estar profundo y con mucha fractura.	Hay empuje visible en los marcos, grietas nuevas, o deformación de las paredes. No llega a romper sola, pero claramente hay presión.	Algunas señales de movimiento leve, o pequeños ajustes en el soporte. Puede pasar si estás algo profundo o la roca está algo cortada.	No se ven cambios en la excavación, el soporte no se deforma, hay algunas juntas y estas en zona mas profunda >50m.	La excavación no cambia nada con el tiempo. No hay grietas nuevas, ni empuje, ni ruido. Suelen estar en zonas poco profundas y con roca sana y sin fracturas.

Tabla 18 Categorización del parámetro P7 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P8: Esta clasificación está alineada con los principios establecidos en la tabla de resistencia a la compresión (ISRM, 1981), que asocia la dureza con la necesidad de soporte en las excavaciones. Las rocas blandas (menos de 25 MPa) son fácilmente fracturables. Las rocas moderadamente resistentes (25-50 MPa) son más difíciles de romper, mientras que las rocas muy resistentes (100-250 MPa) Y rocas extremadamente resistentes (>250 MPa) son muy estables y no requieren soporte adicional.

0	1	2	3	4
Roca blanda (<25 MPa), puede ser rayada con una navaja.	Moderadamente resistente (25–50 MPa), no se puede tallar con navaja pero se fractura con martillo	Roca resistente (50–100 MPa), necesita más de un golpe fuerte para fracturarse.	Roca muy resistente (100–250 MPa), requiere numerosos golpes de martillo para fracturarse.	Roca extremadamente resistente (>250 MPa), difícil de dañar incluso con herramientas de impacto.

Tabla 19 Categorización del parámetro P8 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P9: El comportamiento de la roca después de la excavación depende de los esfuerzos inducidos y la presencia de discontinuidades. Cuando las grietas grandes y la formación de bloques inestables son evidentes, como en condiciones de alta presión, el macizo rocoso se vuelve altamente inestable y necesita soporte avanzado (Esterhuizen, 2006). En el caso de fracturas largas o deformaciones leves, la excavación sigue siendo moderadamente estable, requiriendo soporte moderado. Según Salmi & Sellers (2022), estos esfuerzos inducidos están directamente relacionados con la geometría de las grietas y cómo afectan la cohesión de la roca. Las rocas con fracturas menores o sin grietas nuevas presentan un comportamiento estable y pueden excavarse con soporte ligero o mínimo. Finalmente, en condiciones de baja presión o sin fracturas, la excavación es muy estable.

0	1	2	3	4
La roca se cae sola, se rompe en bloques grandes, se pierde la forma del túnel o galería. Peligro alto.	Aparecen fracturas largas, más de 1 metro, o se ven zonas que ya se están cerrando o hundiendo.	La roca tiene grietas pequeñas, de algunos centímetros. Se desprenden esquinas o capas finas.	La excavación se mantiene, hay algunas grietas pequeñas de milímetros. Nada grave, sin desprendimiento aun.	No hay grietas nuevas, no se cae nada, el túnel sigue igual desde que se excavó. Muy estable.

Tabla 20 Categorización del parámetro P9 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P10: Las propiedades de las discontinuidades del macizo rocoso, especialmente su rugosidad y el tipo de relleno, influyen directamente en la estabilidad de la excavación. Las grietas rugosas y sin relleno ofrecen mayor fricción entre superficies, lo que mejora la cohesión y favorece la estabilidad. Por el contrario, las grietas lisas o con relleno blando y espeso facilitan el desplazamiento entre bloques, aumentando el riesgo de inestabilidad. Esta categorización, que se alinea con lo propuesto por Santander (2019), permite clasificar las discontinuidades en cinco niveles, desde condiciones muy adversas (grietas suaves con relleno blando > 5 mm) hasta condiciones muy favorables (grietas muy rugosas sin relleno), lo que resulta útil para estimar la calidad geomecánica de la roca y su respuesta ante la excavación.

0	1	2	3	4
Grietas lisas y abiertas sin relleno.	Grietas onduladas con relleno blando < 5 mm o lisas con relleno > 5 mm.	Grietas onduladas con relleno duro > 5 mm.	Grietas rugosas con relleno duro < 5 mm.	Grietas cerradas, rugosas y sin espacio visible.

Tabla 21 Categorización del parámetro P10 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P11: La presencia de flujos intensos de agua a través de fracturas o discontinuidades puede generar desestabilización por lavado de materiales finos, incremento de presión intersticial o erosión interna, afectando negativamente la sostenibilidad estructural del túnel. En este contexto, clasificaciones como la de Salmi & Sellers permiten categorizar desde condiciones secas (donde no hay humedad ni filtraciones) hasta casos críticos con salidas de agua a presión difíciles de controlar mediante técnicas de inyecciones.

0	1	2	3	4
Sale agua como una llave abierta. El túnel o galería puede inundarse o tener charcos grandes. Muy riesgoso.	Hay flujo constante por algunas fracturas o materiales lavados. Se forman hilos o escurrimientos.	En algunas grietas cae agua de vez en cuando, pero no es continuo ni abundante.	La roca se ve oscura o húmeda al tacto, pero no gotea ni chorrea.	La roca está seca, clara, sin marcas de agua. No hay humedad ni filtraciones.

Tabla 22 Categorización del parámetro P11 en base a requerimientos de la pequeña minería.

- P12: La meteorización litológica y mineralógica del macizo rocoso influye significativamente en su comportamiento estructural, especialmente en condiciones subterráneas. Según el índice de durabilidad (DI), propuesto por Franklin y Chandra (1972), los macizos con bajo DI son altamente sensibles a la humedad y presentan una fuerte tendencia a la degradación. A medida que el DI aumenta, las rocas muestran menor sensibilidad a la intemperie y mejor resistencia estructural, siendo clasificadas como moderada o ligeramente meteorizadas. Solo aquellos macizos con un DI superior a 90 pueden considerarse duraderos y poco propensos a la alteración, ofreciendo condiciones favorables para excavaciones sin soporte intensivo.

0	1	2	3	4
La roca se vuelve barro o se rompe fácilmente con la mano. Cambia de color al mojarla. Tiene minerales que se degradan rápido.	Se ve descompuesta o blanda, especialmente si ha estado expuesta al aire o al agua.	Tiene partes blandas o zonas que cambiaron de color. Se nota degradación superficial, pero aún se puede trabajar con cuidado.	Solo en las esquinas o zonas viejas se nota algo de alteración. La roca aún es firme y se mantiene con buen comportamiento.	No cambia con la humedad ni con el tiempo. No tiene minerales blandos ni zonas degradadas. Muy confiable para excavar.

Tabla 23 Categorización del parámetro P12 en base a requerimientos de la pequeña minería.

			Categorización				
	Parametro	Pregunta	0	1	2	3	4
P1	Dimensiones de la excavación (span)	¿Qué tan ancho es el túnel o galería?	Muy ancho: más de 20 metros	Entre 15 y 20 metros	Entre 10 y menos de 15 metros	Entre 5 y menos de 10 metros	Estrecho: menos de 5 metros
P2	Soporte de rocas	¿La roca está sostenida o reforzada? ¿Se ve segura o suelta?	No hay soporte o la roca es mala.	Hay algo de soporte, pero muchas zonas sin refuerzo.	La mayor parte del túnel tiene soporte, pero hay zonas con grietas o pequeñas caídas.	Casi todo está bien reforzado, con pemos o malla en buen estado.	No se necesita soporte o el soporte está perfecto.
P3	Profundidad de excavaciones	¿Estima qué tan profundo estás trabajando?	Muy profundo: más de 100 metros desde la superficie.	Profundo: entre 50 y 100 metros.	Moderado: entre 30 y 50 metros.	Poco profundo: entre 10 y 30 metros.	Muy superficial: menos de 10 metros.
P4	Calidad del macizo rocoso	¿Cómo se ve la roca donde estás excavando? ¿Está sana o muy fracturada?	La roca está muy fracturada, suelta o deshecha. Se cae fácilmente. Alta inestabilidad.	Hay muchas juntas o planos de falla. Solo al golpear, la roca se desprende en bloques pequeños o se desmenuza.	Se ven algunas fracturas o planos de separación, pero la roca se mantiene y no se cae sola.	La roca está en su mayoría firme, hay pocas fracturas y no se ve debilitada.	La roca es compacta y masiva, sin fracturas visibles. Se ve y se siente firme. Muy estable.
P5	Geometría de discontinuidades	¿Cómo son las grietas que ves en la roca? ¿Están muy juntas? ¿Se cruzan? ¿Tienen espacio entre si?	Las Juntas o fracturas se cruzan, están inclinadas hacia la excavación y se forman bloques sueltos fácilmente. Se ven 4 o mas familias de juntas, muy inestable.	Hay tres familias de juntas o fallas alineadas con el túnel y puede facilitar caídas de roca en techos o paredes.	2 familias de juntas o grietas existen pero no se cruzan, ni forman bloques inestables.	Una familia de juntas, no hay muchas grietas, y las que hay no generan peligro inmediato. Roca estable.	La roca se ve compacta, sin planos de separación. Muy segura.
P6	Estructura del macizo rocoso	¿Cómo se ve el terreno completo donde estás trabajando?	Hay mezcla de materiales, se ven huecos, rellenos de arcilla, zonas blandas entre la roca. Parece terreno "maltratado" o que ya se ha movido antes.	Se ven liacas grandes que cortan la roca (fallas), y algunos bloques ya se están desprendiendo o mineral arcilloso expansivo.	Tiene capas o planos, pero están torcidos, cortados o no se siguen bien. Algunas zonas están firmes, otras no.	Las capas de roca se ven parejas y se mantienen iguales por varios metros. No hay muchas interrupciones ni partes sueltas o ligeras alteraciones.	Es como un solo bloque, casi sin líneas, sin grietas grandes, sin zonas blandas. Se siente firme al picar y no se rompe fácil.
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	¿Notas que la roca está empujando sola? ¿Se deforma, cruje o rompe sin tocarla?	La roca se rompe sola, se escuchan ruidos o estallidos, los marcos se doblan, y el túnel parece cerrarse. Suelen estar profundo y con mucha fractura.	Hay empuje visible en los marcos, grietas nuevas, o deformación de las paredes. No llega a romper sola, pero claramente hay presión.	Algunas señales de movimiento leve, o pequeños ajustes en el soporte. Puede pasar si estás algo profundo o la roca está algo cortada.	No se ven cambios en la excavación, el soporte no se deforma, hay algunas juntas y estas en zona mas profunda >50m.	La excavación no cambia nada con el tiempo. No hay grietas nuevas, ni empuje, ni ruido. Suelen estar en zonas poco profundas y con roca sana y sin fracturas.
P8	Calidad de la roca intacta	¿Qué tan dura es la roca cuando no tiene grietas ni fallas?	Roca blanda (<25 MPa), puede ser rayada con una navaja.	Moderadamente resistente (25–50 MPa), no se puede tallar con navaja pero se fractura con martillo	Roca resistente (50–100 MPa), necesita más de un golpe fuerte para fracturarse.	Roca muy resistente (100–250 MPa), requiere numerosos golpes de martillo para fracturarse.	Roca extremadamente resistente (>250 MPa), difícil de dañar incluso con herramientas de impacto.
P9	Comportamiento de la roca	¿Qué pasa con la roca después de que la excavas? ¿Se mantiene firme o empieza a romperse?	La roca se cae sola, se rompe en bloques grandes, se pierde la forma del túnel o galería. Peligro alto.	Aparecen fracturas largas, más de 1 metro, o se ven zonas que ya se están cerrando o hundiendo.	La roca tiene grietas pequeñas, de algunos centímetros. Se desprenden esquinas o capas finas.	La excavación se mantiene, hay algunas grietas pequeñas de milímetros. Nada grave, sin desprendimiento aun.	No hay grietas nuevas, no se cae nada, el túnel sigue igual desde que se excavó. Muy estable.
P10	Abertura de la discontinuidad	¿Qué tan abiertas están las grietas o juntas en la roca?	Grietas lisas y abiertas sin relleno.	Grietas onduladas con relleno blando < 5 mm o lisas con relleno > 5 mm.	Grietas onduladas con relleno duro > 5 mm.	Grietas rugosas con relleno duro < 5 mm.	Grietas cerradas, rugosas y sin espacio visible.
P11	Condicion hidráulica	¿Hay agua saliendo de la roca? ¿Está húmeda, chorrea o está completamente seca?	Sale agua como una llave abierta. El túnel o galería puede inundarse o tener charcos grandes. Muy riesgoso.	Hay flujo constante por algunas fracturas o materiales lavados. Se forman hilos o escurrimientos.	En algunas grietas cae agua de vez en cuando, pero no es continuo ni abundante.	La roca se ve oscura o húmeda al tacto, pero no gotea ni chorrea.	La roca está seca, clara, sin marcas de agua. No hay humedad ni filtraciones.
P12	Meteorización litología y mineralógica	¿La roca está meteorizada por el paso del tiempo, el agua o los minerales que tiene?	La roca se vuelve barro o se rompe fácilmente con la mano. Cambia de color al mojarla. Tiene minerales que se degradan rápido.	Se ve descompuesta o blanda, especialmente si ha estado expuesta al aire o al agua.	Tiene partes blandas o zonas que cambiaron de color. Se nota degradación superficial, pero aún se puede trabajar con cuidado.	Solo en las esquinas o zonas viejas se nota algo de alteración. La roca aún es firme y se mantiene con buen comportamiento.	No cambia con la humedad ni con el tiempo. No tiene minerales blandos ni zonas degradadas. Muy confiable para excavar.

Tabla 24 Categorización del parámetro observado o medido en terreno.

La cuantificación global de la vulnerabilidad se realiza mediante el cálculo del Índice de Vulnerabilidad (VI), que considera la influencia relativa de cada parámetro mediante un peso asignado α_i y la puntuación categórica como muestra la ecuación 2 (Benardos & Kaliampakos, 2004). Se muestra a continuación la formula con respecto a estos parámetros con los pesos ya establecidos:

$$VI = 100 - \left(7,6 * \left(\frac{P1}{4}\right)\right) + \left(9,3 * \left(\frac{P2}{4}\right)\right) + \left(9,1 * \left(\frac{P3}{4}\right)\right) + \left(9,0 * \left(\frac{P4}{4}\right)\right) + \left(7,5 * \left(\frac{P5}{4}\right)\right) + \left(9,0 * \left(\frac{P6}{4}\right)\right) \\ + \left(8,4 * \left(\frac{P7}{4}\right)\right) + \left(7,6 * \left(\frac{P8}{4}\right)\right) + \left(8,1 * \left(\frac{P9}{4}\right)\right) + \left(9,1 * \left(\frac{P10}{4}\right)\right) + \left(7,6 * \left(\frac{P11}{4}\right)\right) + \left(7,9 * \left(\frac{P12}{4}\right)\right)$$

Ecuación 3 Formula VI simplificada con los α_i establecidos para su aplicación.

Como se aprecia en la ecuación 3 los ponderadores de peso para cada parámetro ya fue estimado, y a modo de simplificación para el cálculo de VI se dispuso de la manera en que P1, P2, P3, ..., P12, corresponden a los valores otorgados a cada parámetro según la tabla 24 de categorización.

Este índice permite clasificar la vulnerabilidad en cinco niveles claramente definidos, facilitando la interpretación y toma de decisiones operativas, tal como muestra la figura 30. Esta metodología de categorización y evaluación simplifica la complejidad técnica, haciendo posible que personal no especializado pueda aplicarla directamente en terreno.

INDICE DE VULNERABILIDAD	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	0 - 19	20 - 39	40 - 59	60 - 79	80 - 100

Figura 30 Categorización del Índice de vulnerabilidad (VI) (bajo/medio bajo/ medio/ medio alto/ /alto) según el valor obtenido en la ecuación 3.

La escala se ha subdividido en cinco categorías, con su respectivo significado operacional como muestra la tabla.

Rango de VI	Categoría	Interpretación práctica
0 - 19	Muy Bajo	El entorno presenta condiciones óptimas de estabilidad. Peligro insignificante.
20 - 39	Bajo	La mayoría de los parámetros son favorables. Se recomienda monitoreo general.
40 - 59	Medio	Se observan algunas condiciones críticas. Se requiere atención específica.
60 - 79	Alto	Existen factores relevantes que comprometen la estabilidad. Se recomienda intervención.
80 - 100	Muy Alto	Condiciones altamente desfavorables y requiere acciones inmediatas.

Tabla 25 Categoría y su interpretación práctica.

4.5. Validación con casos de estudio

Con el objetivo de evaluar la consistencia y aplicabilidad de la herramienta de categorización geotécnica RES–ESQ desarrollada en este trabajo, se implementó un proceso de validación comparativa utilizando dos fuentes técnicas con información geomecánica real, la tesis *Caracterización geomecánica en faenas subterráneas de pequeña minería: caso de estudio Mina Los Pequeños, Región de Coquimbo, Chile* (Cisterna, 2018) y el estudio *Evaluación de la estabilidad de excavaciones mineras de pequeño diámetro mediante clasificaciones geomecánicas y análisis empíricos: el caso de la mina de San Juan, Ecuador* (Cuervas-Mons et al., 2015). La elección de ambas referencias no fue aleatoria, sino que responde a criterios técnicos que garantizan la pertinencia del ejercicio de validación frente a las condiciones operacionales que busca representar la herramienta RES–ESQ.

Ambas investigaciones abordan contextos de minería subterránea a pequeña escala, caracterizados por excavaciones de sección reducida, uso limitado de instrumentación geotécnica y presencia de métodos de sostenimiento tradicionales o incluso artesanales. Estas condiciones son representativas del dominio de

aplicación previsto para RES–ESQ, lo cual permite contrastar su estructura con datos reales, no idealizados, y bajo escenarios donde la incertidumbre geomecánica suele ser elevada.

Tanto Cisterna (2018) como Cuervas-Mons et al. (2015) fundamentan sus análisis geomecánicos en el uso de la clasificación Q de Barton, uno de los sistemas empíricos más reconocidos a nivel mundial para la caracterización de macizos rocosos en excavaciones subterráneas. Esta clasificación se basa en la evaluación cuantitativa de parámetros clave como el índice RQD, el número de familias de fractura (Jn), la rugosidad de juntas (Jr), el grado de alteración (Ja), la condición hidráulica (Jw) y el factor de reducción por esfuerzos (SRF). Estos seis parámetros permiten estimar un valor de Q que define la calidad del macizo y, por ende, su estabilidad.

Tramo	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q Tramo	Valorización Q
tramo 1	65.5	9	2	2	1	1	2.09	Mala
			2	2	1	1		
			3	2	1	2.5		
tramo 11	25	15	1	9	1	7	0.026	Ex. Mala
tramo 18	91.9	4	2	2	1	1.25	73.52	Muy buena
			2	0.875	1	1		

Tabla 26 Valores parámetros de Q de Barton obtenidos por Cisterna (2018).

EGM (estaciones geomecánicas) #	#1	#2	#3	#4	#5
RQD (%)	91	77,25	93,85	93,85	77,25
Jn (diacласas volumétricas)	12	18	9	12	9
Jr (rugosidad diacласas)	3	2	2	3	2
Ja (alteración diacласas)	1	2	1	1	2
Jw (presencia de agua)	0,66-1	1	1	1	1
SRF (tensiones confinantes)	1	1	1	1	1
Q	15,02-22,75	4,3	20,9	23,46	8,6
Ancho de excavación	1,2	1,94-2,21	1,35-1,6	1,3	1,05
ESR	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Diámetro equivalente	-1	1,2-1,4	-1	-1	-1

Tabla 27 Valores parámetros de Q de Barton obtenidos por Cuervas-Mons et al. (2015).

Lo anterior resulta altamente relevante, ya que la herramienta RES–ESQ se articula en torno a una estructura de 12 parámetros, permitiendo una traducción directa entre registros técnicos empíricos y las escalas de categorización de RES–ESQ. Este alineamiento conceptual justifica que ambos estudios puedan ser utilizados como marco de validación razonado.

Para efectos de esta validación, se seleccionaron tramos o estaciones geomecánicas representativas y con información completa dentro de cada estudio. En el caso de Cisterna (2018), se trabajó con los tramos t1, t11 y t18, mientras que en el caso de Cuervas-Mons et al. (2015) se seleccionaron las estaciones EGM #1,

#2 y #4. A partir de los valores reportados, se asignaron puntajes según los criterios de RES–ESQ, respetando los rangos, escalas y ponderaciones establecidas en la herramienta de categorización.

Parámetro	Tramo t1	Tramo t11	Tramo t18
P1: Dimensiones de la excavación	3x3 m (favorable para estabilidad)	3x3 m (favorable para estabilidad)	3x3 m (favorable para estabilidad)
P2: Tipo de soporte	Soporte artesanal, sin sostenimiento activo	Soporte artesanal, sin sostenimiento activo	Soporte artesanal, sin sostenimiento activo
P3: Profundidad de la excavación	11 m (poca sobrecarga, profundidad baja)	17 m (profundidad intermedia)	48 m (mayor profundidad, sin colapsos)
P4: Calidad del macizo	RQD = 65.5% (calidad regular de macizo)	RQD = 25% (macizo extremadamente fragmentado)	RQD = 91.9% (macizo de muy buena calidad)
P5: Geometría de discontinuidades	Jn = 9 (estructura fracturada, moderadamente compleja)	Jn = 15 (estructura altamente fracturada, poco estable)	Jn = 4 (estructura simple, más estable)
P6: Estructura del macizo	Ja = 2 indica leve alteración (estructura relativamente competente)	Ja = 9 (alta alteración de juntas, estructura debilitada)	Ja = 2-0.875 indica alteración leve (estructura competente)
P7: Esfuerzos in situ	SRF = 1-2.5 (esfuerzos moderados sin evidencias de spalling)	SRF = 7 (tensiones elevadas, riesgo mecánico latente)	SRF = 1.25-1 (condiciones mecánicas aceptables)
P8: Calidad de la roca intacta	Diorita, Andesita y Granodiorita, UCS alto	Diorita, Andesita y Granodiorita, UCS alto	Diorita, Andesita y Granodiorita, UCS alto
P9: Comportamiento post-excavación	Sin colapsos visibles, fracturamiento leve	Sin colapsos visibles, pero alteración severa	Sin colapsos, fracturamiento superficial leve
P10: Abertura de discontinuidades	Jr = 2-3, Ja = 2 (rugosidad moderada, alteración leve)	Jr = 1, Ja = 9 (rugosidad baja, alteración severa)	Jr = 2, Ja = 2-0.875 (juntas trabadas, poca alteración)
P11: Condición hidráulica	Jw = 1 (ambiente seco)	Jw = 1 (ambiente seco)	Jw = 1 (ambiente seco)
P12: Meteorización	Ja = 2 (mínima meteorización)	Ja = 9 (meteorización severa del macizo)	Ja = 2 (mínima meteorización)

Tabla 28 Análisis e interpretación de los parámetros en base a la Q de Barton Cisterna (2018).

Parámetro	EGM #1	EGM #2	EGM #4
P1: Dimensiones de la excavación	1.05–2.2 m (excavación pequeña, favorable)	1.05–2.2 m (excavación pequeña, favorable)	1.05–2.2 m (excavación pequeña, favorable)
P2: Tipo de soporte	Sin soporte activo	Sin soporte activo	Sin soporte activo
P3: Profundidad de la excavación	SRF = 1 (profundidad baja, sin colapsos)	SRF = 1 (profundidad baja, sin colapsos)	SRF = 1 (profundidad baja, sin colapsos)
P4: Calidad del macizo	RQD = 91% (muy buena calidad del macizo)	RQD = 77.25% (buena calidad, aunque con más fracturas)	RQD = 93.85% (excelente calidad del macizo)
P5: Geometría de discontinuidades	Jn = 12 (estructura compleja con varias familias de fractura)	Jn = 18 (estructura muy compleja, alta densidad de fracturas)	Jn = 12 (estructura compleja, pero menos crítica que t2)
P6: Estructura del macizo	Ja = 1 (pared sana, buena cohesión entre bloques)	Ja = 2 (alteración leve, pero menor cohesión estructural por fracturación)	Ja = 1 (pared sana, buena cohesión entre bloques)
P7: Esfuerzos in situ	SRF = 1 (sin tensiones elevadas, comportamiento estable)	SRF = 1 (condiciones mecánicas estables)	SRF = 1 (condiciones estables, sin fenómenos de presión)
P8: Calidad de la roca intacta	Granodiorita, UCS alto	Granodiorita, UCS alto	Granodiorita, UCS alto
P9: Comportamiento post-excavación	Sin colapsos visibles	Sin colapsos visibles	Sin colapsos visibles
P10: Abertura de discontinuidades	Jr = 3, Ja = 1 (juntas rugosas y poco alteradas, muy favorables)	Jr = 2, Ja = 2 (rugosidad moderada y alteración leve)	Jr = 3, Ja = 1 (juntas trabadas, excelente condición estructural)
P11: Condición hidráulica	Jw = 1 (ambiente seco, sin agua libre)	Jw = 1 (ambiente seco, sin agua libre)	Jw = 1 (ambiente seco, sin agua libre)
P12: Meteorización	Ja = 1 (pared sana)	Ja = 2 (alteración leve, pero menos estable por Jn alto)	Ja = 1 (pared sana)

Tabla 29 Análisis e interpretación de los parámetros en base a la Q de Barton Cuervas-Mons et al. (2015).

Tras aplicar la herramienta RES–ESQ a los tramos seleccionados del estudio de Cisterna (2018), se obtuvo una clasificación cualitativa de la vulnerabilidad geotécnica en cada caso, considerando tanto condiciones estructurales como litológicas e hidráulicas.

El tramo t1 fue clasificado con una vulnerabilidad media, asociada a una calidad de roca regular (RQD = 65,5%) y una fracturación moderada ($J_n = 9$). Aunque no se observaron colapsos ni condiciones críticas, la estructura del macizo justifica un enfoque preventivo. Este resultado es coherente con la tesis original, que lo describe como una zona en el límite inferior de estabilidad.

Por su parte el tramo t11 presentó vulnerabilidad alta, producto de una combinación de factores críticos: baja calidad de roca (RQD = 25%), alta fracturación ($J_n = 15$), alteración severa ($J_a = 9$) y esfuerzos activos (SRF = 7). El macizo se encuentra debilitado y con poca cohesión, por lo que RES–ESQ lo posiciona como zona prioritaria de inestabilidad, en línea con lo planteado por el autor original.

Finalmente, el tramo t18 fue evaluado como de vulnerabilidad baja, gracias a una muy buena calidad de macizo (RQD = 91,9%), baja densidad de fracturas ($J_n = 4$) y condiciones secas. A pesar de no contar con soporte formal, la roca se mantiene estable de forma natural. Esto coincide con lo descrito en la tesis, donde se considera el tramo más estable del conjunto.

	Parametro	t1		t11		t18	
P1	Dimensiones de la excavación (span)	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P2	Soporte de rocas	1	1.9%	1	1.9%	1	1.9%
P3	Profundidad de excavaciones	3	5.7%	3	5.7%	2	3.8%
P4	Calidad del macizo rocoso (GSI)	2	3.8%	0	0.0%	4	7.6%
P5	Geometría de discontinuidades	1	1.9%	0	0.0%	2	3.8%
P6	Estructura del macizo rocoso	3	5.7%	1	1.9%	3	5.7%
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	3	5.7%	1	1.9%	3	5.7%
P8	Calidad de la roca intacta	3	5.7%	3	5.7%	3	5.7%
P9	Comportamiento de la roca	2	3.8%	2	3.8%	3	5.7%
P10	Abertura de la discontinuidad	2	3.8%	1	1.9%	3	5.7%
P11	Condicion hidráulica	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P12	Meteorización litología y mineralógica	3	5.7%	1	1.9%	3	5.7%
			41		60		33

Tabla 30 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en Cisterna (2018).

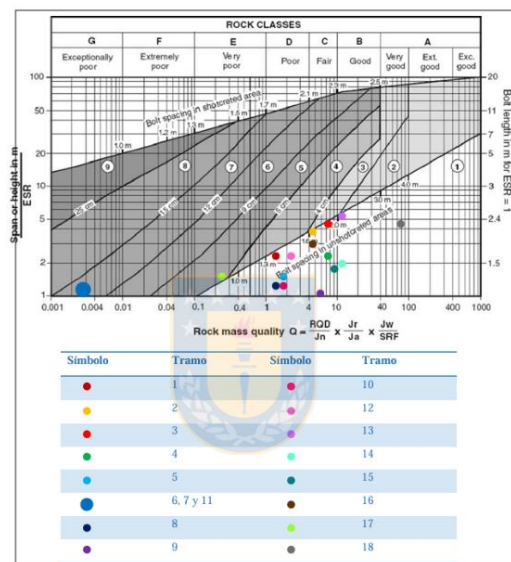


Figura 31 Distribución de las calidades y estabilidad en base a la Q de Barton (Cisterna, 2018).

Se realizó la misma aplicación de la herramienta RES–ESQ a los tramos seleccionados del estudio de Cuervas-Mons et al. (2015).

La estación EGM #1 fue clasificada con vulnerabilidad baja, gracias a una alta calidad de roca (RQD = 91%), una fracturación compleja pero controlada ($J_n = 12$), y condiciones secas sin presión hidráulica. Aunque no se observan sostenimientos activos, la estructura del macizo se mantiene estable, lo cual coincide con lo señalado en la tesis, donde se lo clasifica como un sector sin necesidad de fortificación.

La estación EGM #2 mostró una vulnerabilidad media, producto de una estructura muy fracturada ($J_n = 18$), un RQD intermedio (77,25%) y mayor incertidumbre estructural. Si bien la litología no presenta grandes alteraciones, la combinación de fracturas y falta de soporte la hace menos estable. Esto concuerda con el diagnóstico original, que advierte sobre su bajo índice Q ($Q = 4.3$) y necesidad de atención.

Mientras que la estación EGM #4 fue clasificada con vulnerabilidad baja, destacando por su excelente calidad de roca (RQD = 93,85%), baja alteración ($J_a = 2$), y condiciones secas. Aunque comparte el mismo nivel de fracturación que t1 ($J_n = 12$), la calidad estructural compensa la ausencia de sostenimiento. El resultado es coherente con la tesis, que lo considera un sector estable y sin requerimientos de soporte.

	Parametro	t1		t2		t4	
P1	Dimensiones de la excavación (span)	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P2	Soporte de rocas	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
P3	Profundidad de excavaciones	2	3.8%	2	3.8%	2	3.8%
P4	Calidad del macizo rocoso (GSI)	4	7.6%	3	5.7%	4	7.6%
P5	Geometría de discontinuidades	1	1.9%	0	0.0%	1	1.9%
P6	Estructura del macizo rocoso	4	7.6%	3	5.7%	4	7.6%
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P8	Calidad de la roca intacta	3	5.7%	3	5.7%	3	5.7%
P9	Comportamiento de la roca	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P10	Abertura de la discontinuidad	2	3.8%	1	1.9%	3	5.7%
P11	Condición hidráulica	4	7.6%	4	7.6%	4	7.6%
P12	Meteorización litología y mineralógica	4	7.6%	2	3.8%	4	7.6%
		31		43		30	

Tabla 31 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en Cuervas-Mons et al. (2015).

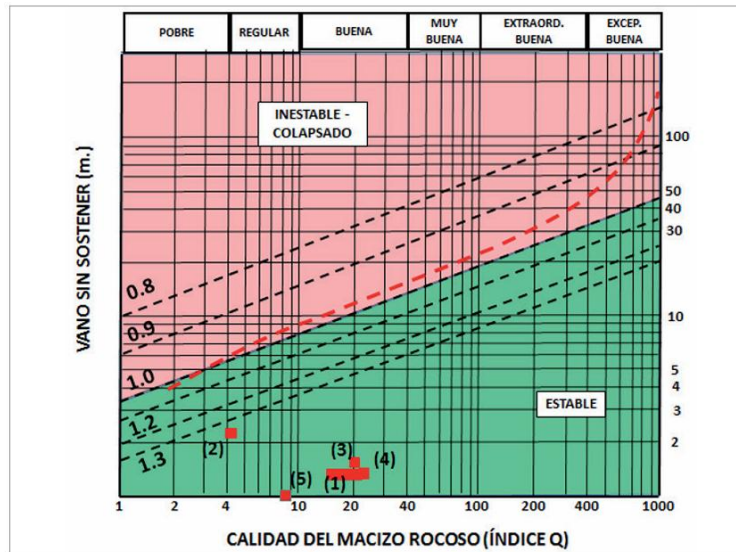


Gráfico 2 Distribución de las calidades y estabilidad en base a la Q de Barton (Cuervas-Mons et al., 2015).

En resumen, este análisis cuantitativo confirma que la herramienta RES–ESQ es consistente con el diagnóstico de vulnerabilidad, y que permite anticipar con claridad qué zonas deben priorizarse para monitoreo o intervención, sobre todo cuando se identifican sectores con estructuras fracturadas y sin soporte activo.

Con el objetivo de evaluar la aplicabilidad y comprensión de la herramienta desarrollada (RES–ESQ) en contextos reales de pequeña minería, se realizó una prueba en una operación subterránea de pequeña minería “La Fortuna”, ubicada en la región de Atacama. Para ello, se contactó a un pequeño productor minero, a quien se le entregó la tabla de categorización e indicó que marcara según la opción, en conjunto de las fórmulas, aplicando la metodología directamente sobre su faena, sin asistencia técnica directa. Esta evaluación tuvo como propósito determinar si un usuario no experto en geotecnia avanzada, pero con conocimiento operativo, era capaz de identificar la vulnerabilidad del tramo utilizando la herramienta.

En el tramo t1, la aplicación de la herramienta RES–ESQ arrojó un Índice de Vulnerabilidad (VI) de 39 puntos, clasificado como una condición media según la escala propuesta. Al revisar los aportes individuales de los parámetros al VI, se observa que el soporte de rocas (P2) presenta el porcentaje más bajo (1.9%), lo cual indica una condición crítica en cuanto a sostenimiento, ya sea por ausencia, deterioro o ineficacia del soporte existente. También se identifican condiciones desfavorables en parámetros como la calidad de la roca intacta, el comportamiento del macizo y la apertura de las discontinuidades, con valores cercanos al 5.7%. Por el contrario, la meteorización litológica y mineralógica (P12) y la condición hidráulica (P11) exhiben los porcentajes más altos (7.6% y 6.7% respectivamente), lo que refleja un buen estado relativo en esos aspectos.

	Parametro	t1	
P1	Dimensiones de la excavación (span)	3	5.7%
P2	Soporte de rocas	1	1.9%
P3	Profundidad de excavaciones	2	3.8%
P4	Calidad del macizo rocoso (GSI)	2	3.8%
P5	Geometría de discontinuidades	2	3.8%
P6	Estructura del macizo rocoso	2	3.8%
P7	Esfuerzos in situ del macizo rocoso	3	5.7%
P8	Calidad de la roca intacta	3	5.7%
P9	Comportamiento de la roca	3	5.7%
P10	Abertura de la discontinuidad	3	5.7%
P11	Condicion hidráulica	4	7.6%
P12	Meteorización litología y mineralógica	4	7.6%
			39

Tabla 32 Índices de vulnerabilidad obtenido para los tramos en la categorización en minera “La Fortuna”.

Se evidenció un uso adecuado de la metodología, validando que la herramienta es comprensible, accesible y aplicable para usuarios con conocimientos operativos, incluso en contextos con recursos limitados o sin asesoría profesional directa.



Figura 32 QR Excel con tablas de categorización e influencias.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

La metodología demostró ser una herramienta útil para la evaluación preliminar del peligro geotécnico de caída de roca en pequeña minería subterránea, especialmente en contextos con escasa o nula información geomecánica. Su estructura permite obtener una visión general del estado del macizo de forma rápida, utilizando únicamente una tabla guía y una calculadora. Los resultados del análisis de interacción RES–ESQ evidenciaron que el soporte de rocas fue el parámetro con mayor nivel de interacción dentro de la matriz, presentando conexiones significativas con las variables. Esta alta intensidad de interacción indica que la presencia del soporte instalado influye de forma decisiva en la respuesta del macizo rocoso frente a condiciones de inestabilidad. Su rol como parámetro altamente interconectado refuerza la idea de que el soporte no solo es una medida correctiva, sino también un factor que modifica activamente la condición geomecánica del entorno. Los resultados obtenidos muestran coincidencias parciales con metodologías empíricas consolidadas, como Q de Barton. Sin embargo, su nivel de precisión es limitado, ya que entrega una categorización general de la inestabilidad y no parámetros numéricos específicos. Por tanto, debe considerarse como una herramienta complementaria, útil para una primera impresión, pero no sustitutiva de análisis geotécnicos más rigurosos. Esto debido a que la codificación utilizada en la matriz RES–ESQ se basa en un análisis semi- cuantitativo, que representa la intensidad de interacción entre parámetros geotécnicos. Esta asignación se determina a partir del juicio de expertos, lo que permite incorporar experiencia técnica acumulada. No obstante, esta característica también introduce subjetividad y variabilidad, ya que distintos evaluadores podrían otorgar puntuaciones diferentes ante las mismas condiciones, en ausencia de criterios estrictamente normados. Esto representa una fortaleza en contextos de alta incertidumbre, pero también una limitación cuando se requiere precisión y trazabilidad técnica.

A diferencia de otros métodos que se enfocan exclusivamente en definir el tipo de soporte requerido, la metodología aplicada permite una evaluación más general del comportamiento del macizo, incorporando múltiples parámetros estructurales, hidráulicos, mecánicos y litológicos. Esto entrega una visión más holística del entorno rocoso, aunque no proporciona valores de diseño específicos como el tipo de sostenimiento o el ancho óptimo de excavación. Y al basarse en preguntas generales sobre el estado del macizo rocoso, con respuestas diseñadas para ser comprensibles por todo público, el método puede perder precisión técnica. Además, la asignación de puntajes depende del juicio del evaluador, lo que introduce variabilidad entre usuarios, especialmente si no cuentan con experiencia geotécnica formal.

Pese a sus limitaciones, la metodología desarrollada aporta valor estratégico para la toma de decisiones preliminares en faenas con baja mecanización y recursos limitados. Su bajo costo, aplicabilidad directa en terreno y rapidez de implementación la convierten en una herramienta viable para elevar el estándar mínimo de seguridad en la pequeña minería chilena.

5.2. Recomendaciones

Dado lo anterior se recomienda aplicar la metodología RES–ESQ como una herramienta exploratoria para evaluar peligros geotécnicos de forma inicial en faenas subterráneas de pequeña minería. Su simplicidad y bajo costo la hacen especialmente útil en fases tempranas de operación o cuando no se dispone de información geomecánica detallada. Ya que no entrega parámetros de diseño específicos, se sugiere que sus resultados sean complementados con métodos empíricos como RMR, Q o Bieniawski cuando se requiera mayor precisión en el diseño del soporte, geometría de excavaciones o evaluación estructural detallada.

Para minimizar la variabilidad asociada al juicio experto, se recomienda diseñar capacitaciones breves o guías de uso para operadores, supervisores o productores mineros, que incluyan ejemplos y criterios de interpretación estandarizados. Esto permitiría uniformar la aplicación y mejorar la confiabilidad de los resultados.

Se sugiere que toda evaluación preliminar del estado del macizo rocoso en pequeña minería subterránea incorpore de manera prioritaria la observación y registro del estado del soporte existente, dado que este parámetro presentó la mayor dominancia e influencia en la matriz RES–ESQ. Su alta conectividad con el resto de los factores evaluados demuestra que el soporte no solo reacciona ante condiciones geotécnicas, sino que también modifica activamente la estabilidad del entorno, afectando directamente la vulnerabilidad global.

Se propone utilizar esta metodología como herramienta de zonificación visual del peligro en terreno, empleando colores o categorías por tramo que faciliten la toma de decisiones para operadores sin formación geotécnica formal.

Se recomienda considerar el presente trabajo como una base metodológica inicial, desde la cual puedan desarrollarse futuras herramientas de evaluación geotécnica adaptadas a la realidad operativa de la pequeña minería. Si bien esta propuesta no pretende entregar soluciones de diseño detalladas, sí demuestra que es posible construir modelos de análisis simples, aplicables y con fundamentos técnicos claros, que ayuden a reducir la exposición al peligro en contextos con información limitada. La experiencia obtenida durante el desarrollo de este estudio confirma que el enfoque RES–ESQ es viable y replicable como insumo preliminar para una gestión de peligro asociado a la caída de roca, constituyendo un aporte a las faenas de menor escala.

6. Referencias

- AlertMedia. (2024). *Qualitative Risk Analysis & Other Types of Risk Assessment*.
<https://www.alertmedia.com/blog/qualitative-risk-analysis/>
- Asana. (2025). *Método de Montecarlo: cómo tomar decisiones más precisas con análisis de datos*.
<https://asana.com/es/resources/montecarlo-method>
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6, 189–236.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496>
- Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2004). A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling - Illustrated by the Athens Metro, Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), 987–999. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.007>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*.
- Brady, & Brown. (2004). *Rock Mechanics*. https://miningandblasting.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/09/rock-mechanics_for-underground-mining.pdf
- Cadiz, M., & Javia, C. (2017). *Análisis FODA de la pequeña minería metálica de Chile*.
<https://repositorio.udla.cl/xmlui/handle/udla/201>
- Castro. (2010). *Rock engineering mechanisms for slopes and underground excavations*.
<https://bit.ly/46At9KZ>
- CESCO. (2024). *La importancia de ENAMI para la pequeña y mediana minería en Chile*.
<https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2024/07/06-24-La-importancia-de-ENAMI-para-la-PyMM-en-Chile.pdf>
- Cisterna, C. (2018). *Caracterización geomecánica en faenas subterráneas de pequeña minería, caso de estudio mina Los Pequeños, Región de Coquimbo, Chile*.
- COCHILCO. (2022). *Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana y pequeña minería chilena i Comisión Chilena del Cobre*.
<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Monitoreo%20Indicadores%20relevantes%20de%20la%20peq.%20y%20med.%20miner%C3%ADa%20Chilena%20vf.pdf>
- COCHILCO. (2023). *Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana y pequeña minería chilena i Comisión Chilena del Cobre*.

<https://www.cochilco.cl/web/download/488/2023/11386/monitoreo-de-variables-e-indicadores-relevantes-de-la-mediana-y-pequena-mineria-chilena-5.pdf>

COCHILCO. (2024). *Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana y pequeña minería chilena*. <https://www.cochilco.cl/web/download/966/2024/12900/monitoreo-de-variables-e-indicadores-relevantes-de-la-mediana-y-pequena-mineria-chilena.pdf>

Cuervas-Mons, J., Jordá-Bordeshore, L., Nazareno, J. A., & Escobar, K. F. (2015). *Evaluación de la estabilidad de excavaciones mineras de pequeño diámetro mediante clasificaciones geomecánicas y análisis empíricos: el caso de la mina de San Juan, Ecuador*.

Esterhuizen. (2006). *cdc_161608_DS1*. https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9700/cdc_9700_DS1.pdf

Fernandez, F. (2023). *Modelo de estimación de probabilidad de caída de rocas en minería subterránea*. <https://hdl.handle.net/10651/72618>

Franklin, J. A., & Chandra, R. (1972). The slake-durability test. In *Int. J. Rock Mech. Min. Sci* (Vol. 9). Pergamon Press. In *Int. J. Rock Afech. Afin. Sci* (Vol. 9). Pergamon Press.

Gomez. (2014). *Universidad de León programa de doctorado subsidencia: Efectos sobre construcciones y medidas correctoras tesis doctoral Curso 2013/14*. <https://bit.ly/4eQvgMX>

Gonzalez, L. I., & Pearson, V. (2002). *Ingeniería Geológica*. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf

Harrison, J., & Hudson, J. (2000). *Engineering rock mechanics part 2: Illustrative worked examples*.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock* (1st ed.).

Hoek, E., & Brown, E. T. (1985). *Excavaciones Subterráneas en Roca Hoek B*.

Hoek, E., & Brown, E. T. (2007). *El criterio generalizado de Hoek-Brown*. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI46B/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D143138

Hopkin, P. (2017). *Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management* (4th ed.).

Hudson, J. A. (1992). *Rock Engineering Systems*.

Hudson, J. A., & Castro-Caicedo, A. (2010). Rock engineering mechanisms for slopes and underground excavations. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 95–104.

Hudson, J. A., & Feng, X.-T. (2015). *Rock Engineering Risk*.

- Infraspeak. (2023). *Análisis de árbol de fallos: Qué es, cómo se hace y cuándo usarlo*.
<https://blog.infraspeak.com/es/analisis-de-arbol-de-fallos/>
- ISO 31000:2018 - Risk Management — Guidelines (2018). <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- ISO International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*.
<https://www.iso.org/standard/63787.html>
- ISRM. (1978). *International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*.
- ISRM. (1981). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods* (E. T. Brown, Ed.). Pergamon Press.
- Lang, B. (1994). *SPAN design for entry-type excavations*.
<https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/831/1.0081176/1>
- MacCollum, D. (2007). *Construction Safety Engineering Principles (McGraw-Hill Construction Series): Designing and Managing Safer Job Sites McGraw-Hill construction series* (ilustrada).
<https://books.google.cl/books?id=IbLrmejZ2UMC>
- Miro. (2025). *Decision tree analysis in risk management*. <https://miro.com/diagramming/decision-tree-analysis-in-risk-management/>
- Norrish, N. I., & Wyllie, D. C. (1996). *Rock slope stability analysis I. Introduction*.
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-015.pdf>
- OSHA Safety, O., & Administration, H. (2023). *Identifying Hazard Control Options: The Hierarchy of Controls*. <https://www.osha.gov/safety-management>
- Palmström, A. (1995). *RMi – A rock mass characterization system for rock engineering purposes*.
- Pantoja, A. (2024). *nueva-mineria-octubre-2024. Nueva Minería y Energía*, 7–8.
<https://www.nuevamineria.com/revista/wp-content/uploads/2024/10/nueva-mineria-octubre-2024.pdf>
- PiraniRisk. (2025). *FMEA (Análisis de modos y efectos de falla) en la gestión de riesgos*.
<https://www.piranirisk.com/es/academia/escuela-de-gestion-de-riesgos/fmea-analisis-de-modos-y-efectos-de-falla-en-la-gestion-de-riesgos>
- SAALG GEOMECHANICS. (2023). *Evaluación de Riesgos Geotécnicos en Operaciones Mineras*.
<https://www.saalg.com/post/evaluaci%C3%B3n-de-riesgos-geot%C3%A9cnicos-en-operaciones-mineras?lang=es>

- SafetyCulture. (2024). *Análisis de riesgo cualitativo y cuantitativo*. <https://safetyculture.com/es/temas/analisis-cualitativo/>
- Salmi, E. F., & Sellers, E. J. (2022). A Rock Engineering System Based Abandoned Mine Instability Assessment Index with Case Studies for Waihi Gold Mine. *Engineering Geology*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106869>
- Santander, C. (2019). *Metodología Rock Engineering System para determinar estabilidad geomecánica en taludes mineros*. <https://bit.ly/44TnQFk>
- SERNAGEOMIN. (2015). *Accidentes fatales y graves en la minería chilena Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)*. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/05/Balancede_accidentabilidad.pdf
- SERNAGEOMIN. (2020). *Campana de seguridad minera*. <https://www.sernageomin.cl/campana-de-seguridad-minera/>
- SERNAGEOMIN. (2023). *Anuario de la minería*. https://www.sernageomin.cl/pdf/Anuario_de_la_mineria_de_chile_2023.pdf
- SERNAGEOMIN. (2024). *Estadísticas de Accidentabilidad Industria Extractiva Minera año 2024*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2024/05/Accidentabilidad-Minera-2024-31052024.pdf>
- Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2004). *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea*. <https://www.seguridad.com.pe/ssoma/docs/5-DocumentosExternos/08%20Manuales/ManualCaídaRocas.pdf>
- SONAMI. (2016). *Fortificación y acuñadura guía de operación para la pequeña minería*. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/7.fortificacion-acunadura.pdf>
- UNIR. (2024). *¿Cuál es la diferencia entre riesgo y peligro?* <https://chile.unir.net/revista/ingenieria/diferencia-riesgo-y-peligro/>
- Varas, R. (2023). *Caracterización de la Pequeña Minería Revisión del estado actual de la Pequeña Minería extractiva*. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2023/11/Caracterizacion-de-la-Pequeña-Mineria-noviembre-2023.pdf>
- Vilches. (2022). *Evaluación y ponderación de las potenciales interacciones entre los riesgos afectando túneles en roca*. <https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/77604895-6505-425a-81b0-459a4077a56e/content>

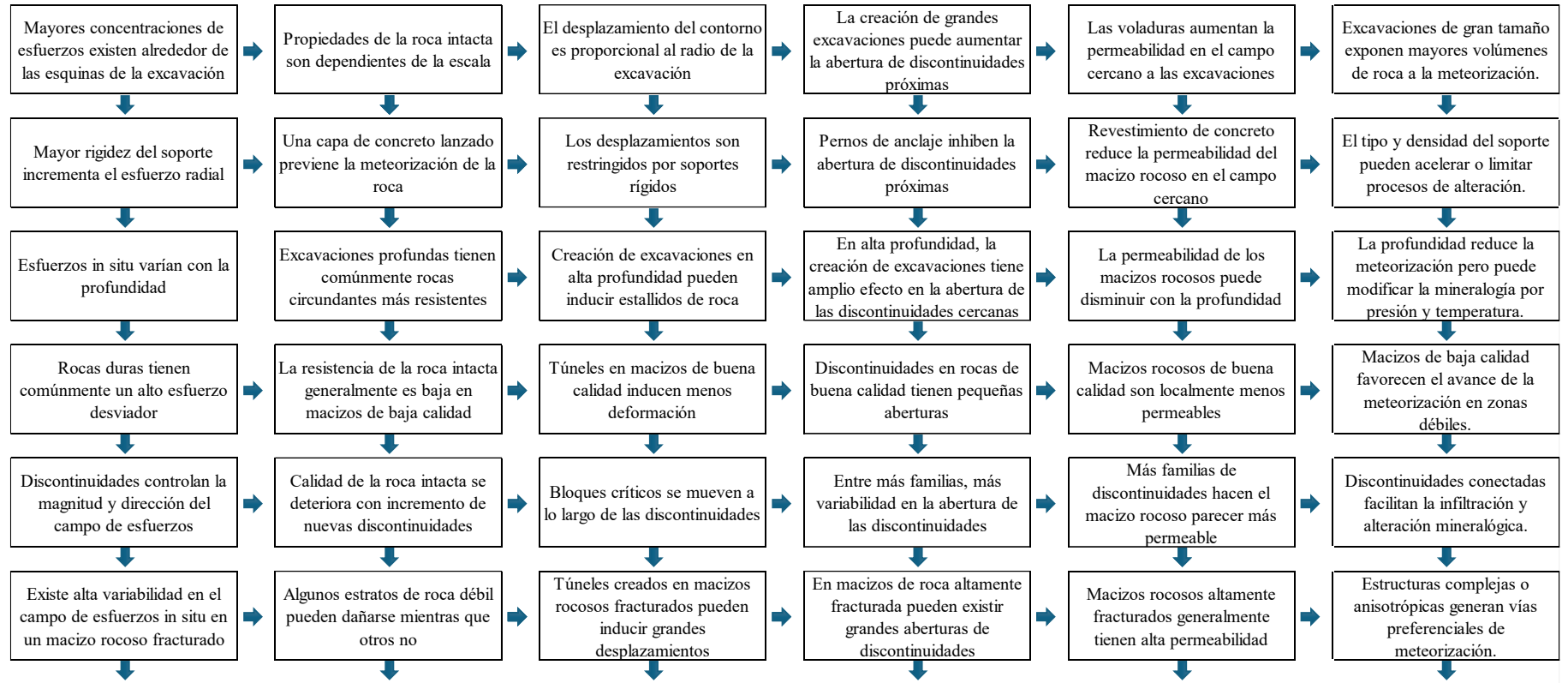
- Villalobos, S. (1983). *Breve historia de Chile*. https://books.google.hn/books?id=LHF_EAAAQBAJ
- Whittaker, B. N., & Reddish, D. J. (1989). *Subsidence Occurrence, Prediction and Control*. <http://www.saveballona.org>
- Zafirovski, Z., Gacevski, V., Lazarevska, M., & Ognjenovic, S. (2019). Procedures for risk analysis and management in tunnelling projects. *E3S Web of Conferences*, 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501001>
- Zang, A., & Stephansson, O. (2010). Stress field of the earth's crust. In *Stress Field of the Earth's Crust*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8444-7>

7. Anexos

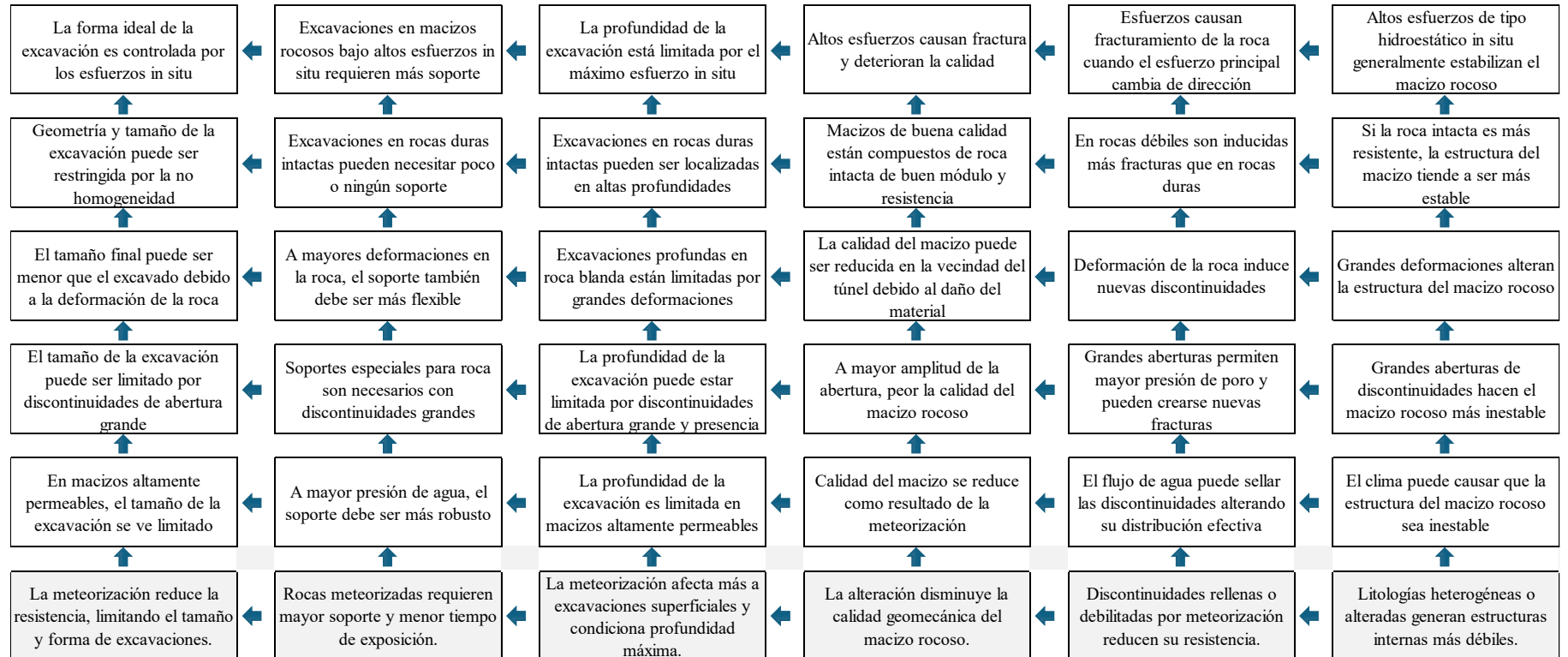
1. Esquina superior izquierda de la matriz de influencias



2. Esquina superior derecha de la matriz de influencias



3. Esquina inferior izquierda de la matriz de influencias



4. Esquina inferior derecha de la matriz de influencias

