UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE

EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN DE LAS POTENCIALES INTERACCIONES ENTRE LOS RIESGOS AFECTANDO TÚNELES EN ROCA

CONSTANZA RITA VILCHES ABARZÚA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS

Profesora guía:

Adeline Delonca

Profesor correferente:

Víctor Mendoza

MARZO 2022

Dedico este trabajo a mi familia, que siempre ha estado conmigo dándome fuerzas cuando más lo he necesitado y a todas las personas que me han estado apoyando en este camino.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, por ser un ejemplo de esfuerzo y que siempre estuvieron para mí en los momentos más difíciles, dándome ánimo y alentándome a salir adelante. A mi abuelita que me brinda todo su apoyo, cariño y confianza, haciéndome reír cuando más lo necesito. A mi hermano, que si bien no nos vemos muy seguido sé que siempre puedo contar con él.

Agradecer a mis amigos Humberto, Catalina, Christopher, Soledad, Osmar, Camilo, Brian, Bigote, Pascale y Diego por hacer de la universidad un lugar más grato y siempre estar presentes en las buenas y en las malas.

A la tía Leslie, que siempre me ayudó no sólo con temas académicos, sino que también personales. Por siempre estar preocupada por mí, apoyarme y brindarme buenos momentos. Una de las personas que sin duda el departamento no sería lo mismo sin ella. Agradecer a los profesores y funcionarios por no solo preocuparse de que aprendamos, sino que también de nuestro bienestar.

Quiero agradecer a mi profesora guía, Adeline Delonca, porque a pesar de no conocernos en persona debido a la pandemia, ha sido muy paciente y comprensiva con las situaciones que se han dado durante el año. Mis mejores deseos para ella y su familia.

A mis amigas Paulina, Anita, Claudia y Nahiara, que sé que puedo contar con ellas siempre. Estoy segura de que seguiremos formando hermosos recuerdos porque son de esas amistades de toda la vida. Me siento muy orgullosa de todo lo que hemos logrado.

Por último, mencionar a mi pareja y su familia, que me brindaron completo apoyo desde el primer día. Por darme alegría y tratarme como a una integrante más de la familia.

RESUMEN

La presente investigación consiste en estudiar los riesgos más comunes que ocurren dentro de los túneles en rocas y si existe interacción entre ellos, con la finalidad de comprender los factores desencadenantes y las consecuencias que puede traer. En otras palabras, estudiar si un evento puede dar paso a uno diferente. Esto se realiza puesto que trabajar en minería subterránea corresponde a una labor de alto riesgo y esta información puede ayudar a identificarlos a tiempo y así evitar accidentes fatales.

Para realizar lo anterior, se utilizaron las matrices de interacción donde se aplicará la metodología Rock Engineering System (RES), ya que, a diferencia de los modelos probabilísticos, permite comprender los fenómenos de estudio de mejor manera y como se comportan cuando interactúan con otras variables.

En primer lugar, se definieron los riesgos de estudio. Se consideraron en el estudio solo los cuatro riesgos mayores en túneles, los cuales corresponden a rockburst, spalling, squeezing y swelling, para luego identificar los factores que deben existir para que se desencadene cada uno de los riesgos. Una vez teniendo la información anterior se realizaron las matrices de interacción y se les asignó el nivel de interacción en caso de existir. Finalmente se obtuvo el comportamiento de cada evento dentro del sistema.

El riesgo de rockburst corresponde a una variable dominante, esto significa que afecta más a las otras variables que viceversa. Esto se debe a que corresponde a una gran liberación de energía de forma abrupta, por lo que puede ocasionar una deformación súbita en los sectores cercanos al evento y en consecuencia provocar riesgos diferentes.

Por el contrario, el riesgo de squeezing corresponde a una variable subordinada ya que no genera un riesgo diferente, sino que es más probable que otros riesgos como el swelling den paso a su ocurrencia.

PALABRAS CLAVE: Riesgo, matriz de interacción, RES, rockburst, spalling, squeezing, swelling, energía, túnel, esfuerzos.

ABSTRACT

The present research consists of studying the most common risks that occur inside rock tunnels and if there is any interaction between them, with the purpose of understanding the triggering factors and consequences they may bring. In other words, this work proposes to study whether one event can lead to the occurrence of a different one. This is done because working in underground mining corresponds to a high-risk job and this information can help to identify them in time and thus avoid fatal accidents.

To do the above, interaction matrices were used where the Rock Engineering System (RES) methodology is applied, since, unlike probabilistic models, it allows to understand the phenomena in a better way and how they behave when they interact with other variables.

First, the studied hazard were defined. Only the four main risk in tunneling are considered, which correspond to rockburst, spalling, squeezing and swelling. Then the factors that must exist for each of the risks to be triggered were identified. Once the information was available, the interaction matrices were made and the level of interaction was assigned, if any. Finally, the behavior of each event within the system was obtained.

The risk of rockburst corresponds to a dominant variable, this means that it affects the other variables more than vice versa. This is due to the fact that it corresponds to a large abrupt release of energy, which can cause a sudden deformation in the sectors close to the event and consequently cause different risks.

On the contrary, the risk of squeezing corresponds to a subordinate variable since it does not generate a different risk, but it is more likely that other risks such as swelling give way to its occurrence.

KEY WORDS: Risk, interaction matrix, RES, rockburst, spalling, squeezing, swelling, energy, tunnel, stress.

NOMENCLATURA

$\boldsymbol{\sigma_{cm}}$: Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso

$\boldsymbol{\sigma_{c}}$: Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta

$\boldsymbol{\sigma_{\theta}}$: Esfuerzo tangencial en el contorno de la excavación

$\boldsymbol{T}$: Resistencia a la tracción

$\boldsymbol{E_{s}}$: Módulo de Young de la roca

$\boldsymbol{H}$: Profundidad

$\boldsymbol{B}$: Diámetro o longitud del túnel

$\boldsymbol{Q}$: Calidad del macizo rocoso Q de Barton

$\boldsymbol{\rho_{0}}$: Esfuerzo in situ

$\boldsymbol{\gamma}$: Peso específico de la roca

$\boldsymbol{m}$: Umbral de daño

ABREVIATURAS

$\boldsymbol{ESQ}$: Expert Semi-Quantitative

$\boldsymbol{GSI}$: Geological Strength Index

$\boldsymbol{IC}$: Índice de Competencia

$\boldsymbol{PES}$: Potential Energy of Elastic Deformation of the Rock

$\boldsymbol{RES}$: Rock Engineering System

$\boldsymbol{RMR}$: Rock Mass Rating

$\boldsymbol{RQD}$: Rock Quality Designation

$\boldsymbol{SRF}$: Stress Reduction Factor

CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 13
1.1. General 13
1.2. Motivación 14
1.3. Objetivos 15
1.3.1. Objetivo general 15
1.3.2. Objetivos específicos 15
1.4. Alcances 15
2. MARCO TEÓRICO 16
2.1. Riesgos en túneles 16
2.1.1. Rockburst 18
2.1.1.1. Fault-Slip Burst 19
2.1.1.2. Pillar Burst 21
2.1.1.3. Strainburst 22
2.1.2. Spalling 24
2.1.3. Squeezing Ground 26
2.1.4. Swelling 27
2.2. Predicción de los riesgos 28
2.2.1. Predicción de rockburst 28
2.2.2. Predicción de spalling 33
2.2.3. Predicción de squeezing 35
2.2.3.1. Mecanismos empíricos 35
2.2.3.2. Mecanismos semi-empíricos 37
2.2.4. Predicción de swelling 39
2.3. Factores que afectan a túneles según el riesgo geotécnico 41
2.4. Casos de estudio y probabilidad de ocurrencia de riesgos 44

2.5. Evaluación del riesgo 45
2.5.1. Identificación de los riesgos 46
2.5.2. Registro de los riesgos 46
2.5.3. Evaluación del riesgo 47
2.5.3.1. Análisis cualitativos 47
2.5.3.2. Análisis cuantitativos 48
2.5.3.3. Límites de estos métodos de evaluación 49
2.5.4. Planificar respuestas a los riesgos 49
2.5.5. Medidas de mitigación al riesgo 49
2.6. Sistemas de ingeniería de rocas (RES) 50
2.6.1. Codificación de los elementos ubicados fuera de la diagonal principal 54
2.6.2. Método experto semicuantitativo (ESQ) 54
2.6.3. Lectura de la matriz de interacción 56
2.7. Diferencia entre el método RES y los métodos probabilísticos 60
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO 61
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 63
4.1. Creación de la matriz de interacción 63
4.1.1. Interacciones entre rockburst y spalling 66
4.1.2. Interacción entre rockburst y squeezing 66
4.1.3. Interacción entre squeezing y swelling 66
4.2. Codificación según el nivel de interacción entre los riesgos 68
4.3. Gráfico Causa y Efecto 72
4.3.1. Valores de causa y efecto de la matriz principal 72
4.3.2. Valores de causa y efecto de la matriz desglosada 76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82
7. TRABAJOS CITADOS 88

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Riesgos geotécnicos correspondientes a túneles profundos (Lunardi, 2008). 16
Ilustración 2: Gráfico de comportamiento del túnel (Marinos, 2020). 17
Ilustración 3: Evento de rockburst en mina El Teniente, Chile (Rojas, 2017). 18
Ilustración 4: Mecanismo de rockburst tipo fault-slip burst (Seguridad Minera, 2020). 20
Ilustración 5: Diferentes posiciones de la fuente (Seguridad Minera, 2020). 20
Ilustración 6: Ejemplo de pillar burst (P. K. Kaiser & Cai, 2012). 22
Ilustración 7: Diferentes tipos de strainburst (Li et al., 2019). 23
Ilustración 8: Transición de spalling progresivo no violento a rockburst (Loew et al., 2010). 25
Ilustración 9: Spalling en mina de Hongtoushan a 1197 metros de profundidad (Zhao et al., 2020). 25
Ilustración 10: Fenómeno de squeezing en el túnel de acceso a Saint Martin La Porte. 26
Ilustración 11: Fenómeno de Swelling afectando a túneles (Yan et al., 2019). 27
Ilustración 12: Estimación del comportamiento de la excavación (Russo, 2014). 28
Ilustración 13: Descripción y evaluación del factor de reducción de esfuerzo, (Barton, 2002). 32
Ilustración 14: Orientación de las fracturas según el valor de GSI (Diederichs, 2018). 33
Ilustración 15: Predicción de spalling según criterio de rotura bilineal (P. K. Kaiser et al., 2000). 34
Ilustración 16: Inestabilidades según GSI, esfuerzo principal mayor y resistencia a la compresión simple (Modificado por Hoek et al. 1995). 40
Ilustración 17: Procesos de la gestión de riesgos. 46
Ilustración 18: Ejemplo de matriz de riesgo (Humbert, 2017) 47
Ilustración 19: Elementos de una Matriz de interacción. 50
Ilustración 20: Matriz de interacción aplicada a los factores que afectan al macizo rocoso (Hudson, 1989). 51
Ilustración 21: Celdas relacionadas con la mecánica de rocas y las relacionadas con la ingeniería de rocas (Hudson, 1989). 52

Ilustración 22: Matriz de interacción del estudio de las fracturas naturales del macizo rocoso (Harrison et al., 2000). 53
Ilustración 23: Codificación de la matriz con sus niveles de interacción. 55
Ilustración 24: Demostración de valores de causa y efecto en la matriz de interacción. 56
Ilustración 25: Tipos de gráficos de causa y efectos según la distribución de los puntos (Hudson, 1992). 59
Ilustración 26: Metodología empleada en la realización de la investigación. 62
Ilustración 27: Disposición de los riesgos dentro de la matriz de interacción. 63
Ilustración 28: Matriz de interacción de los riesgos principales que afectan a los túneles en rocas. 64
Ilustración 29: Matriz de interacción de los riesgos con sus respectivos niveles de peligrosidad. 65
Ilustración 30: Codificación de la matriz de interacción de los riesgos principales. 68
Ilustración 31: Codificación de la matriz de interacción de los riesgos principales con su nivel de peligrosidad. 70
Ilustración 32: Valores de causa y efecto de los riesgos principales. 72
Ilustración 33: Valores de causa y efecto de los riesgos según su nivel de peligro. 76

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1: Potencial de rotura por astillado en roca intacta según la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción (Diederichs, 2007). 29
Gráfico 2: Enfoque para predecir condiciones de squeezing (Singh et al. 1992). 35
Gráfico 3: Enfoque para predecir condiciones de compresión (Goel et al. 1995, 2000). 36
Gráfico 4: Clasificación del comportamiento squeezing (Hoek et al., 2000). 38
Gráfico 5: Representación del gráfico causa - efecto. 57
Gráfico 6: Causa y efecto de los principales riesgos en túneles. 74
Gráfico 7: Causa y efecto de los riesgos según su nivel de peligrosidad. 78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valoración del riesgo de rockburst según los valores de RQD (Jorda et al., 2013). 30
Tabla 2: Valoración del riesgo de rockburst según la energía de deformación elástica (Kwasniewski et al., 1994). 31
Tabla 3: Valoración del riesgo de rockburst según el criterio de la tensión tangencial (Wang et al., 1998). 32
Tabla 4: Transición de shear a spall según la relación de fuerza y GSI (Diederichs, 2018).33
Tabla 5: Clasificación del comportamiento de squeezing (Jethwa et al. 1984). 37
Tabla 6: Grado de squeezing según el porcentaje de convergencia (Hoek et al., 2000). 39
Tabla 7: Parámetros que controlan la probabilidad de la ocurrencia de los distintos riesgos. 41
Tabla 8: Factores que facilitan la ocurrencia de los riesgos según su nivel de peligrosidad. 43
Tabla 9: Casos de reales en donde se produjo interacción de riesgos. 44
Tabla 10: Niveles de interacción con su puntaje asociado. 55
Tabla 11: Valores de causa y efecto para cada variable de estudio junto con la suma y diferencia entre ellos. 58
Tabla 12: Valores de causa y efecto para cada riesgo en estudio junto con la suma y diferencia de ellos. 73
Tabla 13: Valores de causa y efecto para cada riesgo según su nivel de peligrosidad junto con la suma y diferencia de ellos. 77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. General

La minería ha tenido una gran importancia a través de los siglos, contribuyendo a que las civilizaciones puedan desarrollarse. Sin embargo, su desarrollo genera desafíos importantes, y actualmente uno de ellos tiene que ver con la sustentabilidad, que corresponde a una gran responsabilidad con el medio ambiente, el ámbito social y económico. Por lo anterior y además de que también se ha encontrado que la ubicación de los recursos de mayor interés se encuentra cada vez más profundos, es esperable que en un futuro próximo la minería sea principalmente subterránea. Esto trae muchos beneficios económicos, debido a que, al aplicar métodos de explotación subterránea, que son reconocidos por tener una alta selectividad, se disminuye la extracción de material que no es de interés, es decir, se reduce la cantidad de estéril y, por ende, disminuye la razón de estéril – mineral. Además, se disminuyen los impactos contaminantes en las zonas aledañas a la mina y no se altera de forma considerable el paisaje.

Actualmente, ya existe un acontecimiento en Chile donde se prefirió continuar la explotación de los minerales con métodos subterráneos, realizando una transición de minería a cielo abierto a minería subterránea. Este es el caso de Chuquicamata, que optó por esta transformación debido a que es más económico y eficiente que seguir ampliando el rajo, esto permitió que la vida útil de la mina se extendiera en otros 40 años.

Por el crecimiento actual y futuro de la minería subterránea, se asume que la cantidad y la extensión de los túneles están y van a ir creciendo igualmente. Este es el caso de “El Nuevo Nivel Mina El Teniente” que busca ampliar la mina llegando a los 1.800 metros de profundidad con más de 4.500 km de largo en túneles (Codelco, 2014).

Trabajar en túneles mineros corresponde a una labor que posee un alto riesgo. Si estos no son identificados, evaluados y controlados de manera correcta pueden poner peligro la viabilidad de un proyecto o simplemente llevarlo a su anulación, pero lo más importante, es que se coloca en peligro la integridad de las personas y en el peor caso llegando a ser fatal.

Los riesgos en los túneles se deben identificar antes y durante la etapa de construcción, de esta forma se pueden aplicar mediciones para mitigarlos en caso de que no puedan ser eliminados. Si no son identificados a tiempo, pueden causar daños en equipos, afectar la planificación y por consecuencia aumentar los costos en un proyecto, colocando en peligro su viabilidad. Cabe destacar que el riesgo es inevitable, debido a que este siempre se encuentra presente, pero se puede controlar su nivel de peligro si son estudiados.

1.2. Motivación

En la actualidad, existen variados métodos para evaluar el riesgo en los túneles en roca, pero todos estos no toman en cuenta la interacción que poseen estos riesgos. La metodología Rock Engineering System (RES), que toma como base las matrices de interacción, posibilita visualizar dicha interacción, ya que estas son una herramienta de gestión del riesgo que permiten obtener y presentar información relevante de una manera más visual debido a su estructura, además de poder analizar como todos los factores de estudios interactúan entre sí. Estas son utilizadas en diferentes áreas de especialización, tales como economía, ambiental, geomecánica, perforación y tronadura, etc.

La presente memoria tiene como finalidad identificar los riesgos geotécnicos que son más probables en los túneles e identificar la interacciones entre ellos mediante un estudio de casos de las condiciones geomecánicas que dieron paso a la ocurrencia del riesgo.

1.3. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de esta investigación.

1.3.1. Objetivo general

Evaluar las interacciones de los riesgos geotécnicos más probables que puedan afectar a los túneles y estimar el impacto de estas interacciones sobre el diseño de los túneles.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los riesgos más comunes que se encuentran en los túneles.
- Analizar las condiciones geomecánicas de la roca que dan lugar a la ocurrencia de los riesgos.
- Elaborar una matriz de interacción de los riesgos.
- Realizar un análisis cualitativo de las interacciones.
- Determinar el nivel de interacción entre los riesgos existentes.

1.4. Alcances

- Los factores de la diagonal principal de la matriz de interacción a realizar corresponderán a los riesgos geotécnicos que tienen mayor probabilidad en la minería subterránea.
- La información se obtendrá mediante estudios de casos reales obtenidos por revisión bibliográfica, los cuales se detallarán a lo largo de la presente memoria.
- Además de realizar un estudio de parámetros geotécnicos, se tomará en cuenta la geología de los diferentes casos para poder realizar el cruce de información. Esto se hará con el fin de disminuir el sesgo de información.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Riesgos en túneles

A la hora de construir un túnel en minería subterránea, se hace fundamental realizar un estudio de los riesgos geotécnicos que puedan afectar la viabilidad del proyecto por riesgos de inversión, la continuidad de las operaciones y la seguridad ocupacional de los trabajadores.

Lunardi (2008), indica que la geología imprevista provoca fenómenos negativos tanto para las excavaciones como para el funcionamiento de las obras. Algunos de estos fenómenos son los siguientes:

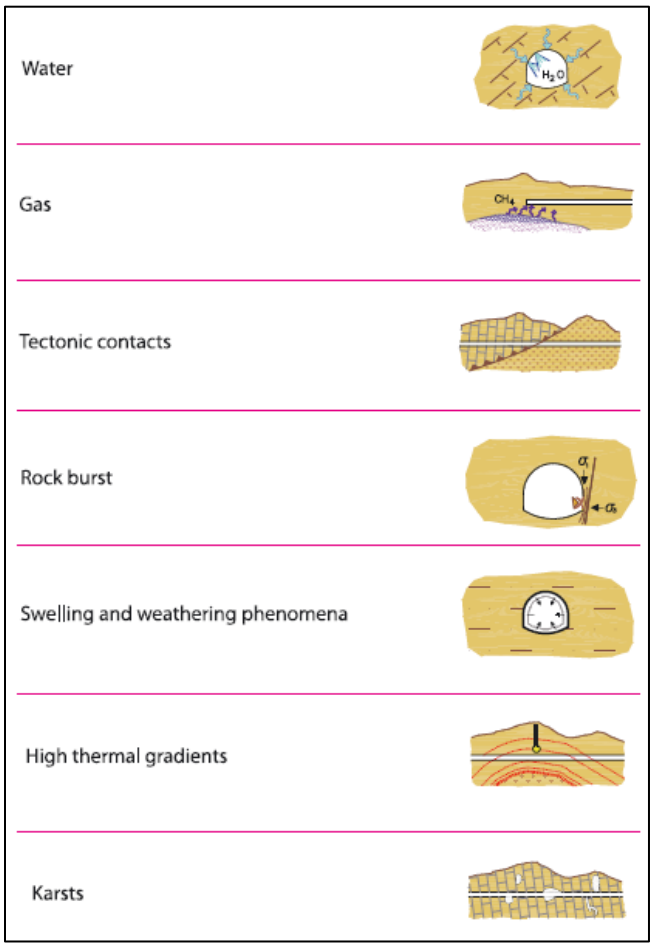

Ilustración 1: Riesgos geotécnicos correspondientes a túneles profundos (Lunardi, 2008).

Por otra parte, Marinos (2020), evalúa el comportamiento del macizo rocoso en la excavación de túneles, basándose en la estructura del macizo rocoso, la resistencia de la roca intacta y la profundidad de sobrecarga.

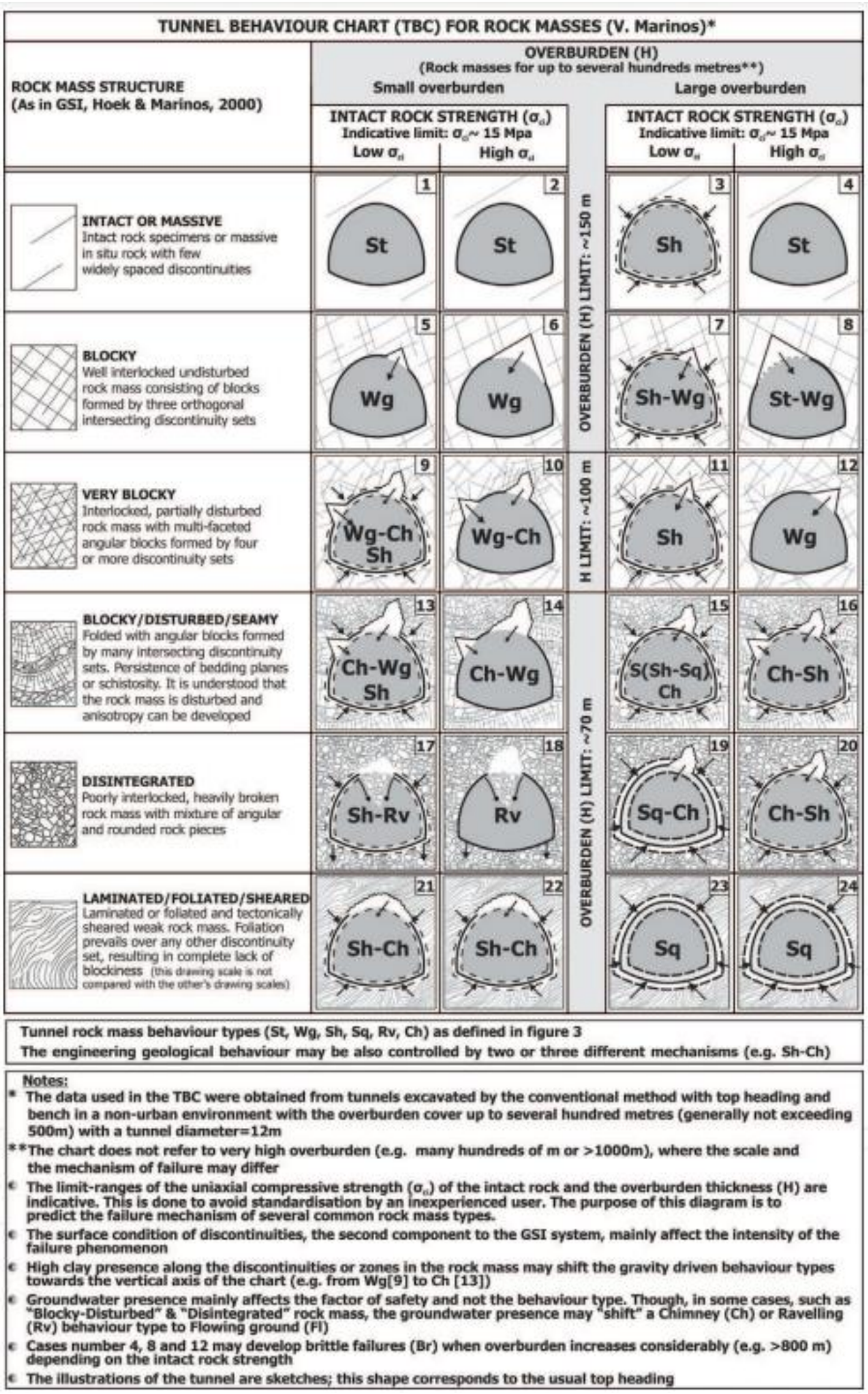

Ilustración 2: Gráfico de comportamiento del túnel (Marinos, 2020).

Además, Diederichs (2007) indica que las rocas que presentan daño por spalling pueden ocurrir antes de la ocurrencia de un rockburst, ya que es la inestabilidad creada por el lajamiento es lo que proporciona la liberación repentina de energía. Debido a esto y por lo mencionado con anterioridad se consideraron los siguientes riesgos geotécnicos para la presente investigación:

- Rockburst.
- Spalling.
- Squeezing ground.
- Swelling.

2.1.1. Rockburst

Rockburst, se define como el daño a una excavación que ocurre de manera repentina o violenta que se puede asociar con un evento sísmico (P. K. Kaiser et al., 1995).

Ilustración 3: Evento de rockburst en mina El Teniente, Chile (Rojas, 2017).

Este fenómeno es impredecible de magnitud variable llegando a ser fatal, debido a que puede producir la expulsión de pequeños fragmentos de las paredes de túneles mineros por cientos de metros llegado a provocar derrumbe completo de la excavación. A medida que la minería se hace más profunda, el esfuerzo in situ crece en relación con la resistencia de la roca y la probabilidad de explosión de la roca aumenta drásticamente.

Existen diferentes tipos de rockburst que son:

1. Fault-slip burst (explosión de deslizamiento de fallas).
2. Pillar burst (estallido de pilares causados por el colapso completo de los pilares de soporte).
3. Strainburst (estallido de roca de tensión).

Para la presente memoria, se tomará en cuenta únicamente los rockburst tipo strainburst, debido a que son más comunes en minería profunda (P. K. Kaiser & Cai, 2012).

Independiente del tipo de rockburst, este riesgo se asocia a los siguientes factores:

- Alto RMR (Russo, 2014).
- Alto UCS (Diederichs, 2007).
- GSI medio a alto (Diederichs, 2018).
- Anisotropía del macizo rocoso (singularidad geológica o por efecto topográfico).

2.1.1.1. Fault-Slip Burst

Según Seguridad Minera (2020) existen tres etapas que componen el mecanismo de los rockburst de tipo fault-slip burst, los cuales se mencionan a continuación:

- Etapa 1: Debido a la liberación de esfuerzos desde la fuente, se transmiten ondas de compresión a través de la roca, generando grietas radiales.
- Etapa 2: La onda de compresión se propaga por la roca, al llegar a una cara libre, la onda se refleja como una onda de tracción.
- Etapa 3: Si las ondas de compresión son mayores que las de tracción, se forman grietas, generándose el rockburst tipo fault-splip burst.

Las tres etapas se pueden visualizar en la siguiente ilustración:

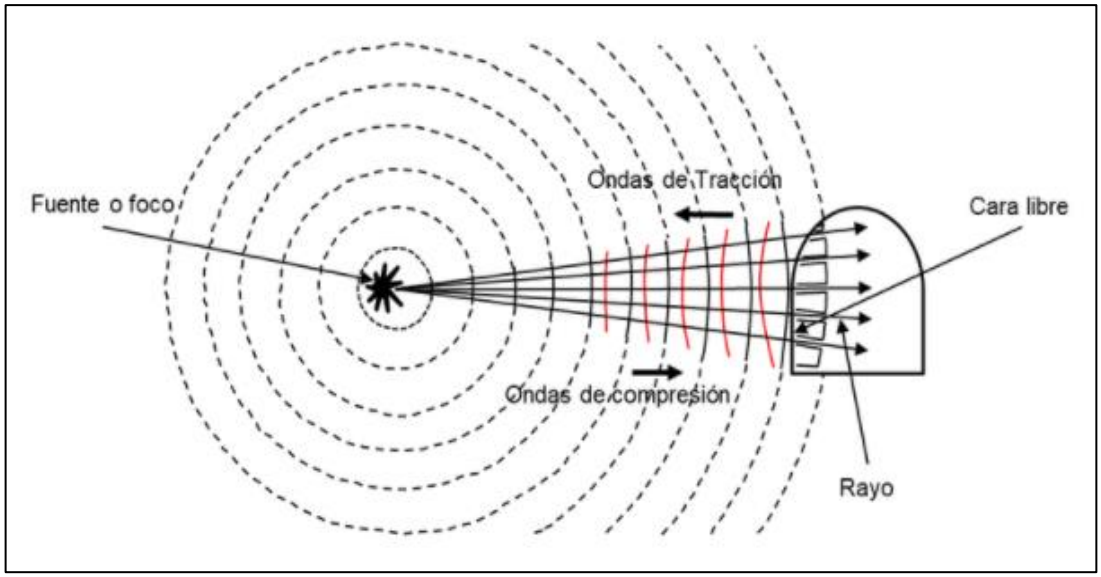

Ilustración 4: Mecanismo de rockburst tipo fault-slip burst (Seguridad Minera, 2020).

Se debe mencionar que la ubicación de la fuente se puede originar desde cualquier posición e instante como se muestra en la Ilustración 3.

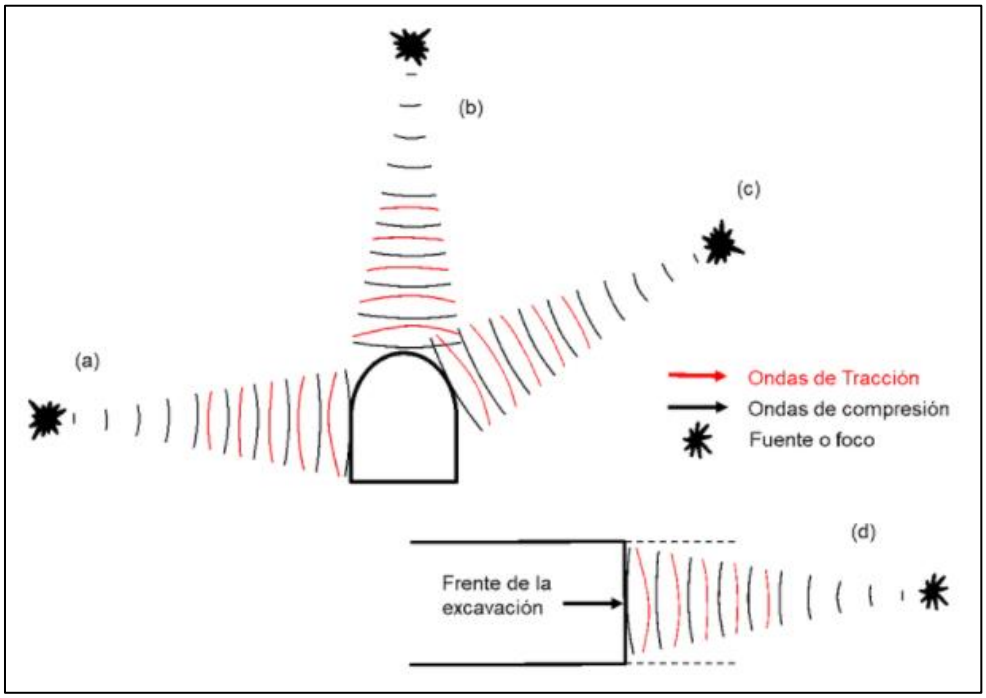

Ilustración 5: Diferentes posiciones de la fuente (Seguridad Minera, 2020).

Por otra parte, Alviña, (2008) indica que cuando se realiza una excavación, se genera una modificación de la rigidez en el perímetro circundante al túnel, ya que al utilizarse explosivos y producto a la plastificación del macizo rocoso, esto genera una pérdida de resistencia mecánica del macizo es decir, que la rigidez será menor que las que se tendrían en un terreno inalterado. Esto genera que la velocidad de partícula se amplifique al cambiar de medio de una zona más rígida a una de menor rigidez, similar a los efectos de sitio de los sismos tectónicos. Es indispensable tener esto en cuenta a la hora de evaluar las medidas de mitigación para los rockburst.

2.1.1.2. Pillar Burst

El pillar burst se define como una falla violenta en el núcleo del pilar o el colapso completo de este. Ocurren a menudo en minas profundas cuando la tasa de extracción es alta en una etapa posterior de la extracción. El volumen de roca fallada y la masa rocosa circundante afectada suele ser mayor que el involucrado en el strainburst, por lo tanto, la energía sísmica liberada es mucho mayor.

Se puede clasificar en un pillar burst inducido por minería o inducida dinámicamente. La primera es causada por un aumento de la tensión estática debido al aumento de la luz de la cavidad o la extracción de rebajes cercanos. La fuente sísmica está en el núcleo confinado del pilar y el daño por la explosión se ubica en el mismo lugar. Por otro lado, un pillar burst inducido dinámicamente, es causado por un aumento de la tensión dinámica de un evento sísmico remoto. En este caso, el daño y la fuente sísmica no se ubican en la misma zona (P. K. Kaiser & Cai, 2012).

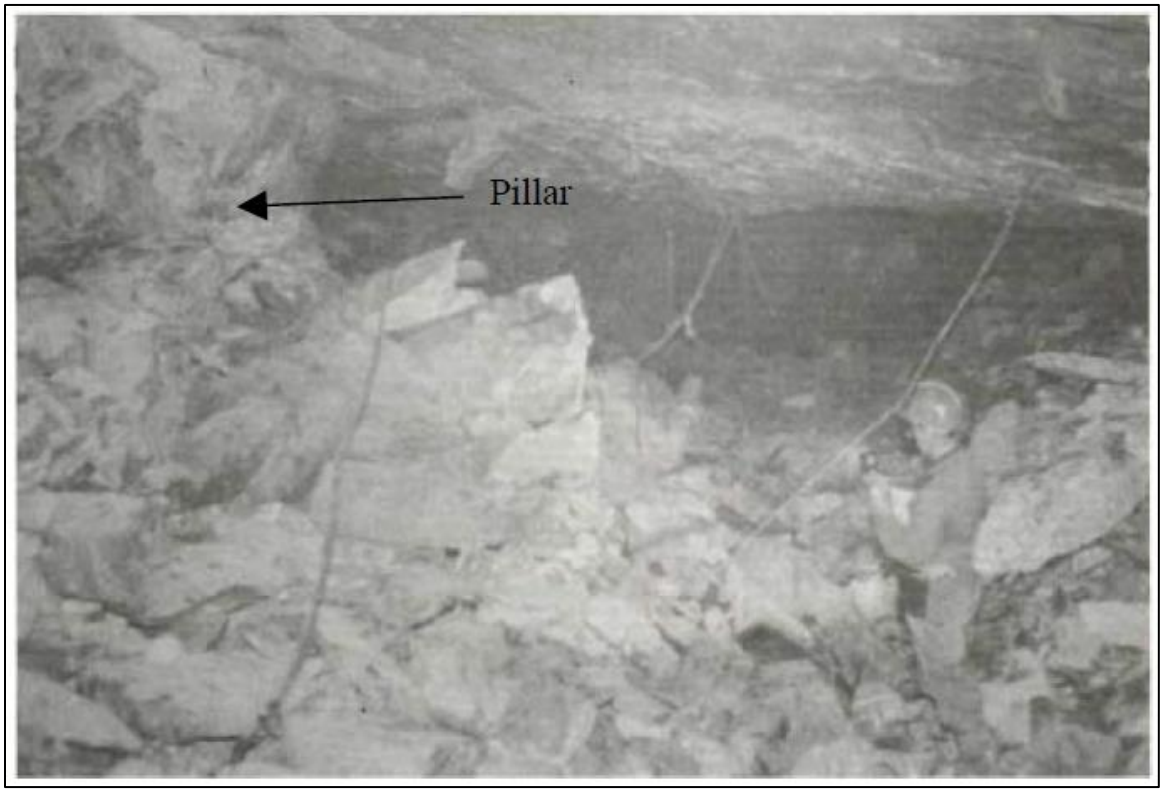

Ilustración 6: Ejemplo de pillar burst (P. K. Kaiser & Cai, 2012).

2.1.1.3. Strainburst

Según P. Kaiser & Cai (2013) un strainburst es una falla repentina y violenta de rocas cerca de un límite de excavación, con la fuente sísmica y el daño que se ubican en el mismo lugar. La mayoría de las explosiones son inducidas por la minería, es decir, es causada por cambios en la tensión local y/o la rigidez del sistema de la mina debido al avance del túnel o la excavación.

El daño que puede producir está ligado a la energía en deformación almacenada cerca de la excavación o afectado por la energía de un evento sísmico asociado. Si el daño solo se relaciona con la energía almacenada, el evento sísmico se encuentra en el mismo lugar donde se produce la explosión debido a que es consecuencia de esta última. Por el contrario, si se produce por un evento sísmico remoto, el daño se relaciona vagamente o no con el cambio de tensión o la energía del evento desencadenante.

P. K. Kaiser & Cai (2012) indican que se deben cumplir dos condiciones para que se produzca un strainburst. Primero, la tensión tangencial se debe poder acumular en la “piel” inmediata de la excavación y segundo, el macizo rocoso que rodea la roca que se fractura debe crear un entorno relativamente suave, para que la roca falle localmente de manera inestable y violenta.

Existen diferentes tipos de strainburst, en la Ilustración 4 se puede observar que se produce en superficies rocosas expuestas en forma de aplastamiento de rocas intactas (a y b), pandeo de losas (c) y expulsión de bloques de roca (d). Estas dos últimas se pueden deber también a fallas de asperezas en discontinuidades preexistentes (Li et al., 2019).

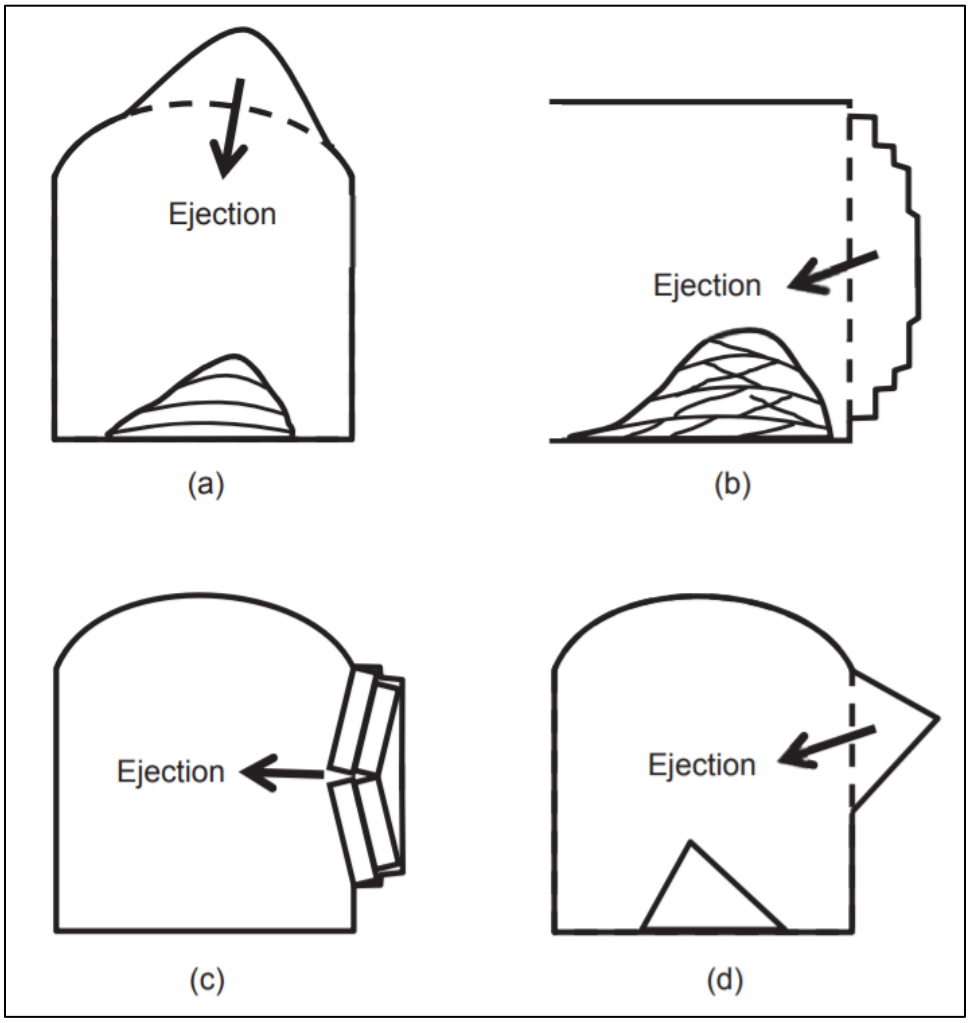

Ilustración 7: Diferentes tipos de strainburst (Li et al., 2019).

2.1.2. Spalling

Martin & Christiansson (2009) indican que spalling se define como la formación de losas inducidas por esfuerzos en el límite de una excavación subterránea. Este comienza en las zonas de tensiones tangenciales máximas y da como resultado un corte en forma de “V” al límite de la abertura. El espesor de las losas puede variar desde unos milímetros hasta algunos centímetros.

El spalling de las galerías en roca dura es una función de las magnitudes del esfuerzo inducido y la resistencia del macizo rocoso. Este proceso puede producir el colapso completo de la galería, es por esto que se debe evaluar la gravedad de las fallas por spalling que afectarán la estabilidad.

Esto ocurre cuando el macizo rocoso está sometido a un gran esfuerzo inducido y una alta resistencia del macizo, el cual se desencadena por una detención del proceso en una mina subterránea a gran profundidad. A medida que las labores mineras se profundizan, el riesgo de spalling se vuelve más severo (Zhao et al., 2020).

Loew et al., (2010) indican que a diferencia del riesgo de squeezing, presentado en la próxima parte, el spalling genera fracturas paralelas a los límites de la excavación. En caso de que estas se encuentran restringidas, las fracturas pueden doblarse de manera violenta. Si la profundidad es suficiente, el modo de falla puede pasar a un cizallamiento por dilatación en la punta de la muesca creando aumento de volumen y una presión hacia afuera que puede superar la capacidad de soporte en un strainburst violento. Esto se puede observar a continuación:

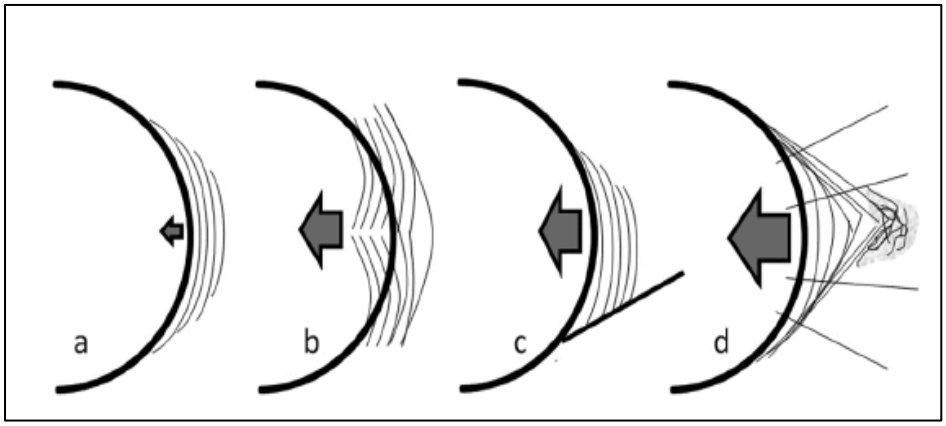

Ilustración 8: Transición de spalling progresivo no violento a rockburst (Loew et al., 2010).

Este riesgo se asocia a los siguientes factores:

- Alto RMR (Russo, 2014).
- Alto UCS (Diederichs, 2007).
- GSI medio a alto (Diederichs, 2018).

Ilustración 9: Spalling en mina de Hongtoushan a 1197 metros de profundidad (Zhao et al., 2020).

2.1.3. Squeezing Ground

El riesgo de squeezing corresponde a una gran convergencia que es dependiente del tiempo durante la excavación del túnel. Ocurre cuando una combinación particular de esfuerzos inducidos y propiedades del material empuja algunas zonas alrededor del túnel que supera el esfuerzo cortante límite donde comienza la fluencia. La deformación puede finalizar durante la construcción o continuar durante todo el tiempo (Barla, 1995).

Los factores que controlan la magnitud de la convergencia, deformación y la zona afectada son:

- Bajo RMR (Russo, 2014).
- Bajo UCS (Diederichs, 2007).
- Bajo GSI (Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (LOM), 2015).

Este fenómeno generalmente se encuentra en macizos rocosos dúctiles y alterados, pudiendo variar en distancias cortas debido a que sus propiedades suelen ser heterogéneas. Si no es controlado debidamente, puede llegar a afectar los costos y el cronograma de construcción, con los reclamos de los contratistas y los sobrecostos asociados.

Ilustración 10: Fenómeno de squeezing en el túnel de acceso a Saint Martin La Porte.

2.1.4. Swelling

El swelling corresponde a una roca o material de suelo que contiene mayormente minerales arcillosos los cuales son sensibles a los cambios naturales de cantidad de agua y humedad del suelo. Estos tienden a aumentar significativamente de volumen asociado al contenido de humedad pudiendo llegar a aumentar a más de un 30%.

Este fenómeno puede dar lugar a graves daños en las estructuras civiles como lo son los túneles como se muestra en la siguiente ilustración (Yan et al., 2019):

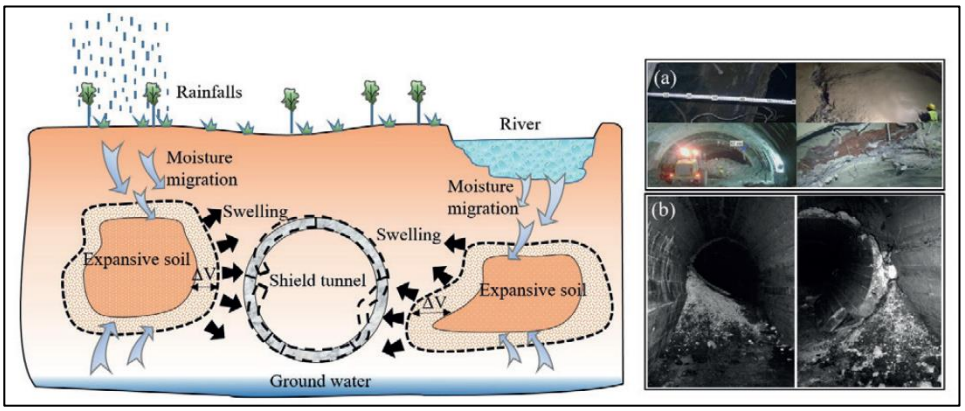

Ilustración 11: Fenómeno de Swelling afectando a túneles (Yan et al., 2019).

El aumento de volumen está estrechamente ligado al tiempo de absorción de agua en las zonas cercanas a la excavación, esto lleva al movimiento hacia adentro del perímetro del túnel. Es importante mencionar que este fenómeno es complejo distinguirlo del squeezing en el largo plazo debido a que estos fenómenos pueden ocurrir al mismo tiempo y provocar efectos similares (Einstein, 1996).

Piaggio (2018) indica que el swelling es un fenómeno que puede desarrollarse durante varios meses o años después de la construcción, comprometiendo la utilidad de la obra durante su vida operativa.

Este riesgo se asocia a factores:

- Bajo GSI (Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (LOM), 2015).
- Presencia de agua.

2.2. Predicción de los riesgos

Se han desarrollado diversas maneras de predecir la ocurrencia de los riesgos en la minería profunda, algunas de estas, separados por tipos de riesgos, se detallan a continuación.

Cabe destacar, que el grado de precisión de la metodología predictiva debe ser asociada al nivel de ingeniería del proyecto y la fase de ejecución del proyecto (ingeniería preliminar, ingeniería de construcción, licitación, construcción y operación) donde se está desarrollando la gestión de los riesgos.

2.2.1. Predicción de rockburst

Russo (2014), estima el comportamiento de excavaciones basado en la competencia del macizo rocoso y el RMR, donde el índice de competencia se refiere a la relación entre la resistencia del macizo rocoso (σ_{cm}) y la tensión tangencial en el contorno de la excavación (σ_θ). Este comportamiento se puede observar mediante el siguiente gráfico:

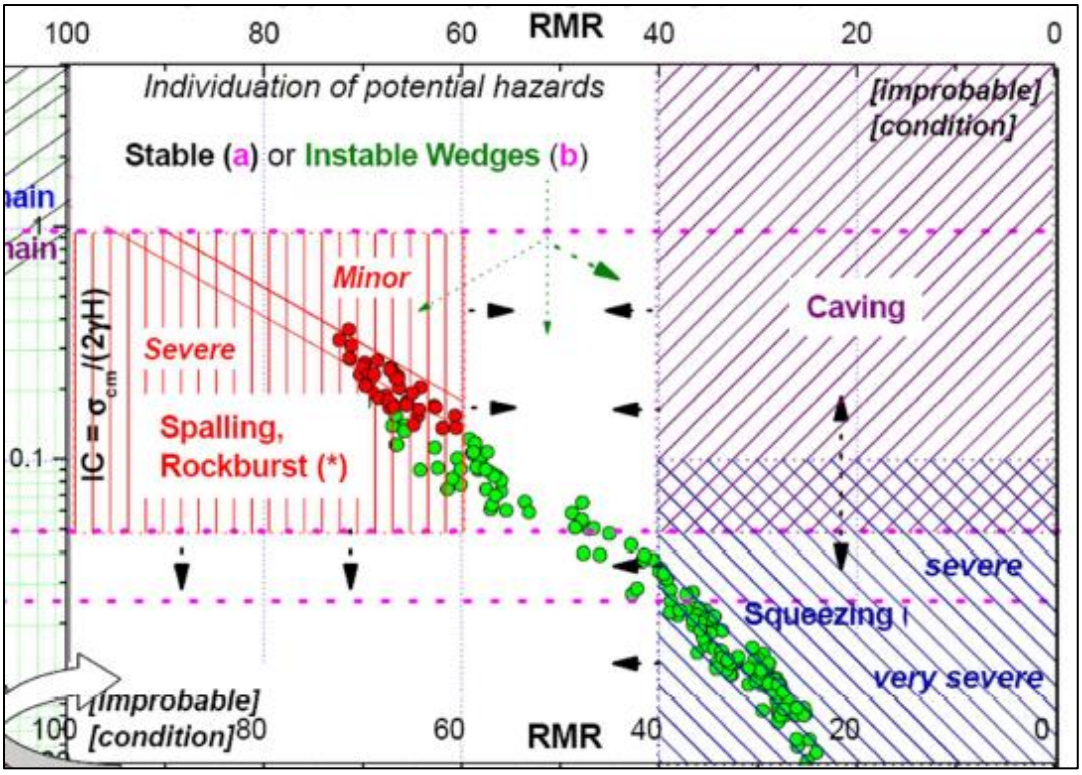

Ilustración 12: Estimación del comportamiento de la excavación (Russo, 2014).

Este gráfico indica que el riesgo de rockburst se puede originar para valores de RMR mayores a 60, es decir, para macizos rocosos de clase I, y II (buena y muy buena calidad) y para un rango de índice de competencia que va desde 0,05 hasta 1.

Por otro lado, Diederichs (2007) expone por medio de un gráfico, una forma de predecir el riesgo de strainburst, según la resistencia a la compresión (UCS) y la resistencia a la tracción (T).

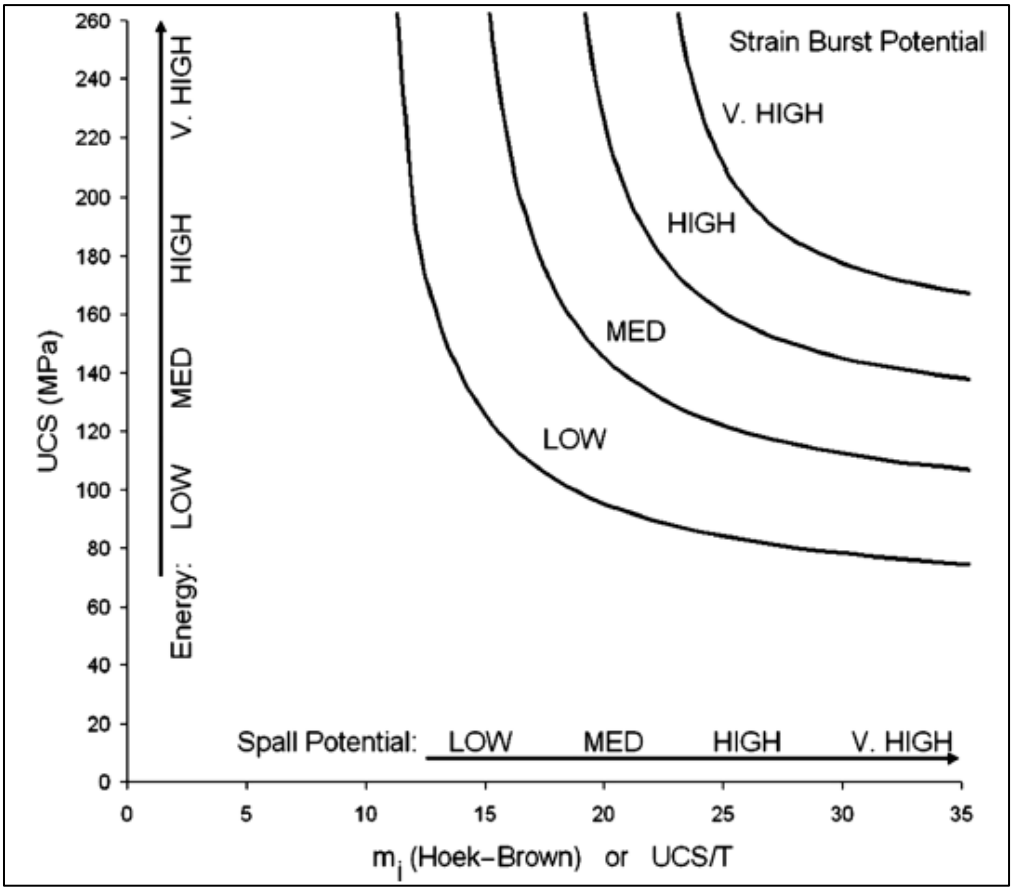

Gráfico 1: Potencial de rotura por astillado en roca intacta según la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción (Diederichs, 2007).

Este gráfico indica que un strainburst se puede desencadenar desde un UCS de 70 [MPa] y sobre un UCS/T de 11 aproximadamente. Según la variación de estos valores, se obtienen distintos potenciales de este riesgo.

Otra forma de predecir el riesgo de strainburst son mediante criterios como RQD, energía de deformación elástica y la tensión tangencial (Jorda et al., 2013). Debido a que el RQD permite valorar el grado de fracturación del macizo rocoso, se puede afirmar que el riesgo de rockburst aumenta junto con el RQD, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1: Valoración del riesgo de rockburst según los valores de RQD (Jorda et al., 2013).

RQD	**Valoración del riesgo de rockburst**
RQD < 25	No existe riesgo
25 < RQD < 50	Riesgo bajo
50 < RQD < 75	Riesgo moderado
RQD > 75	Riesgo alto

El criterio de la deformación elástica (PES) según Kwasniewski et al., (1994) toma en cuenta la resistencia a la compresión uniaxial de la roca y el módulo de Young. En consecuencia, no valora el estado tensional del terreno, sino que la capacidad que posee la roca para almacenar la suficiente energía de deformación para que se desarrolle un rockburst. Si la roca no tiene capacidad de almacenar energía, no se producirá rockburst. El valor de la energía potencial de deformación se obtiene de la siguiente forma:

$$PES = \frac{\sigma_c^2}{2 \cdot E_s}$$

Donde:

PES: Energía potencial de deformación elástica de la roca $[kJ/m^3]$.

σ_c: Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta obtenida en laboratorio [MPa].

E_s: Módulo de Young de la roca obtenido en laboratorio $[GPa]$.

Con esto, el riesgo de rockburst según el valor de PES se clasifica en:

Tabla 2: Valoración del riesgo de rockburst según la energía de deformación elástica (Kwasniewski et al., 1994).

Energía potencial de deformación elástica $[kJ/m^3]$	**Valoración del riesgo de rockburst**
PES ≥ 50	Riesgo muy bajo
100 ≥ PES > 50	Riesgo bajo
150 ≥ PES > 100	Riesgo moderado
200 ≥ PES > 150	Riesgo alto
PES > 200	Riesgo muy alto

Wang et al., (1998) formula el criterio de tensión tangencial, el cual toma en consideración tanto el estado tensional del macizo como las propiedades mecánicas de la roca. El valor de T_s se puede obtener de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_{cm}}$$

Donde σ_θ corresponde a la tensión tangencial en la roca ubicada en la periferia de la excavación y σ_{cm} es la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso.

El valor de σ_θ se puede considerar como la tensión que es provocada por el peso de la columna litostática suprayacente, como indicaba Hoek (1980), quedando de la siguiente forma:

$$\sigma_\theta = \gamma \cdot z$$

Donde γ es peso específico de la roca y z la profundidad. El riesgo de rockburst según el parámetro de T_s corresponde al siguiente:

Tabla 3: Valoración del riesgo de rockburst según el criterio de la tensión tangencial (Wang et al., 1998).

Ts	Valoración del riesgo de rockburst
< 0,3	No existe riesgo
0,3 - 0,5	Riesgo débil
0,5 - 0,7	Riesgo fuerte
> 0,7	Riesgo violento

Por otro lado, Barton (2002) indica que un rockburst de bajo grado posee un valor de σ_1/σ_c entre 0,2 y 0,4, mientras que cuando es mayor a 0,4 es considerado un rockburst de alta peligrosidad.

Stress reduction factor		SRF		
(a) *Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated*				
A	Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	10		
B	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation ⩽50 m)	5		
C	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)	2.5		
D	Multiple shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)	7.5		
E	Single shear zones in competent rock (clay-free), (depth of excavation ⩽50 m)	5.0		
F	Single shear zones in competent rock (clay-free), (depth of excavation > 50 m)	2.5		
G	Loose, open joints, heavily jointed or 'sugar cube', etc. (any depth)	5.0		
		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
(b) *Competent rock, rock stress problems*				
H	Low stress, near surface, open joints	> 200	<0.01	2.5
J	Medium stress, favourable stress condition	200–10	0.01–0.3	1
K	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability, may be unfavourable for wall stability	10–5	0.3–0.4	0.5–2
L	Moderate slabbing after >1 h in massive rock	5–3	0.5–0.65	5–50
M	Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3–2	0.65–1	50–200
N	Heavy rock burst (strain-burst) and immediate dynamic deformations in massive rock	<2	>1	200–400
		σ_θ/σ_c	SRF	
(c) *Squeezing rock: plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressure*				
O	Mild squeezing rock pressure	1–5	5–10	
P	Heavy squeezing rock pressure	>5	10–20	
		SRF		
(d) *Swelling rock: chemical swelling activity depending on presence of water*				
R	Mild swelling rock pressure	5–10		
S	Heavy swelling rock pressure	10–15		

Ilustración 13: Descripción y evaluación del factor de reducción de esfuerzo, (Barton, 2002).

2.2.2. Predicción de spalling

Según Diederichs (2018), el riesgo de spalling es un proceso frágil de daño y fluencia que no necesariamente conduce a un strainburst. Para que ocurra lo anteriormente mencionado, se deben cumplir dos cosas, almacenamiento de energía y liberación de esta de forma instantánea.

Como se puede observar en el gráfico 1, el potencial de spalling crece a medida que la relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción aumenta (UCS/T). Diederichs relaciona esto con el GSI de la siguiente forma:

Tabla 4: Transición de shear a spall según la relación de fuerza y GSI (Diederichs, 2018).

Relación de Fuerza	**GSI < 55**	**GSI = 55 - 65**	**GSI = 65 - 80**	**GSI > 80**
UCS/T < 8	Shear	Shear	Shear	Shear
UCS/T = 9 - 15	Shear	Shear	Shear / Spall	Shear / Spall
UCS/T = 15 - 20	Shear	Shear / Spall	Shear / Spall	Spall
UCS/T > 20	Shear	Shear / Spall	Spall	Spall

Donde la ocurrencia de spalling es en estructuras fracturadas y perturbadas. La representación de las fracturas según el rango de valor del GSI se orientan de la siguiente manera:

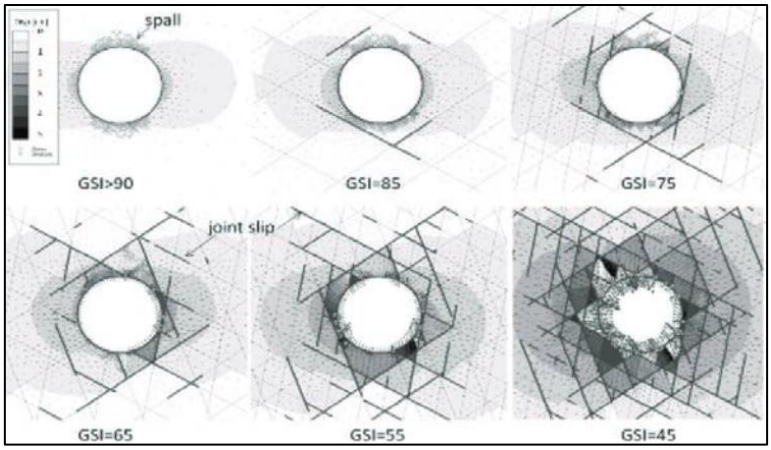

Ilustración 14: Orientación de las fracturas según el valor de GSI (Diederichs, 2018).

Por otra parte, P. K. Kaiser et al., (2000) indica que cuando el estado tensional tenga un bajo confinamiento y se sobrepase el umbral de daño (m=0), se producirá inestabilidad por spalling con fracturas orientadas preferentemente paralelas a la tensión principal mayor.

La rotura frágil de excavaciones profundas en macizos rocosos de buena calidad se puede predecir utilizando el criterio de la rotura bilineal como se muestra a continuación.

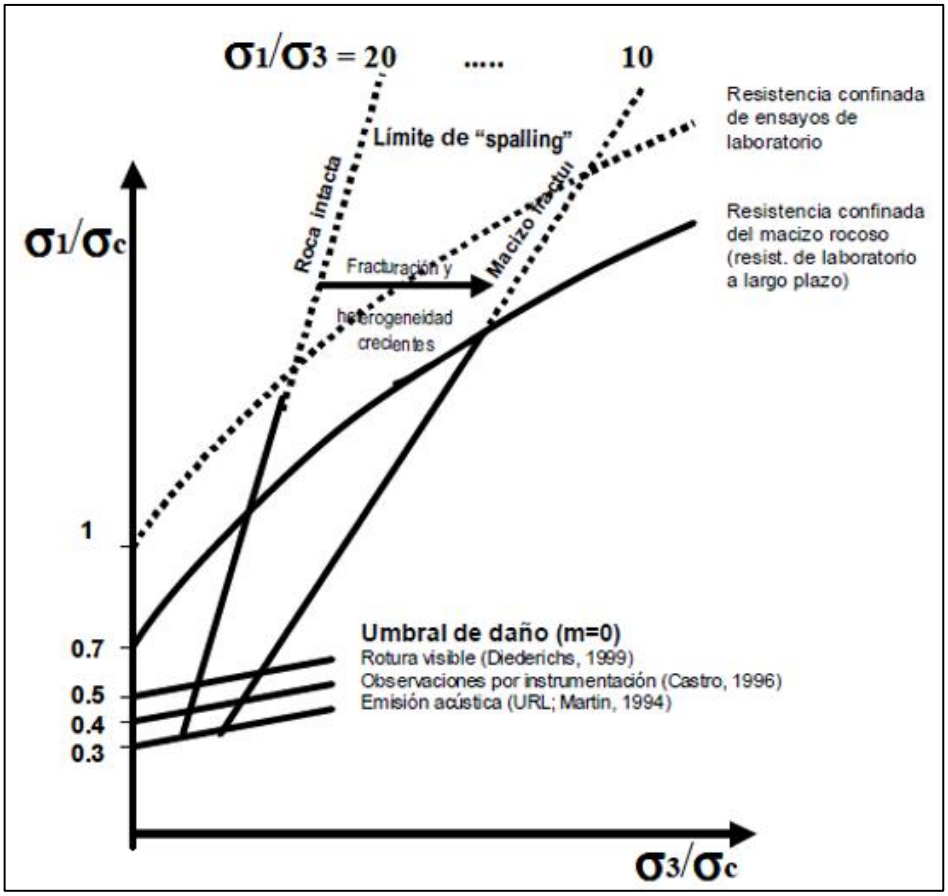

Ilustración 15: Predicción de spalling según criterio de rotura bilineal (P. K. Kaiser et al., 2000).

Como se puede observar, el límite de spalling corresponde a cuando se sobrepasa el umbral de daño (m=0) y el valor de la pendiente posee un valor entre 10 y 20. Cabe destacar que la pendiente corresponde a la relación entre los esfuerzos principales.

2.2.3. Predicción de squeezing

Barla (2001) explica que existen mecanismos empíricos y semi-empíricos para predecir el riesgo de squeezing. Los mecanismos empíricos se basan en esquemas de clasificación que permiten identificar problemas de compresión en el túnel, mientras que los semi-empíricos buscan no solo identificar el comportamiento, sino que también estimar las deformaciones alrededor del túnel y la presión necesaria para soportar la presión radial ejercida por el macizo rocoso. Algunos de estos se explicarán a continuación:

2.2.3.1. Mecanismos empíricos

- <u>Singh et al. (1992):</u>

  Se basa en 39 casos, mediante la recopilación de datos sobre la calidad del macizo rocoso Q (Barton et al. 1974) y la sobrecarga H que define el límite para diferenciar los casos de squeezing de los que no. Ocurre fenómeno de squeezing si se cumple lo siguiente:

$$H \gg 350 \cdot Q^{\frac{1}{3}} \, [m] \tag{1}$$

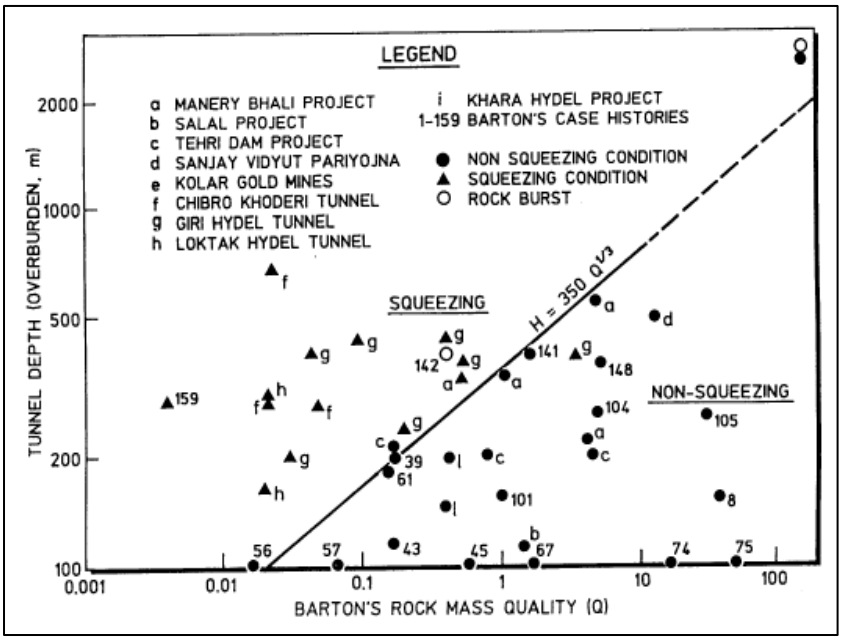

Gráfico 2: Enfoque para predecir condiciones de squeezing (Singh et al. 1992).

Con esto se puede obtener la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso estimada utilizando la siguiente fórmula:

$$\sigma_{cm} = 0{,}7 \cdot \gamma \cdot Q^{\frac{1}{3}}\,[MPa] \tag{2}$$

Donde γ corresponde al peso específico del macizo rocoso.

- <u>Goel et al. (1995):</u>

Utiliza el número de macizo rocoso N, el cual se define de la siguiente manera:

$$N = (Q)_{SRF=1} \tag{3}$$

Considerando lo anterior, junto con la profundidad del túnel (H), el diámetro o su longitud (B), se trazan los datos en un diagrama log-log entre N y $H \cdot B^{0.1}$. La línea que separa los casos de squeezing de los que no, posee la siguiente ecuación:

$$H = (275 \cdot N^{0{,}33}) \cdot B^{-1}[m] \tag{4}$$

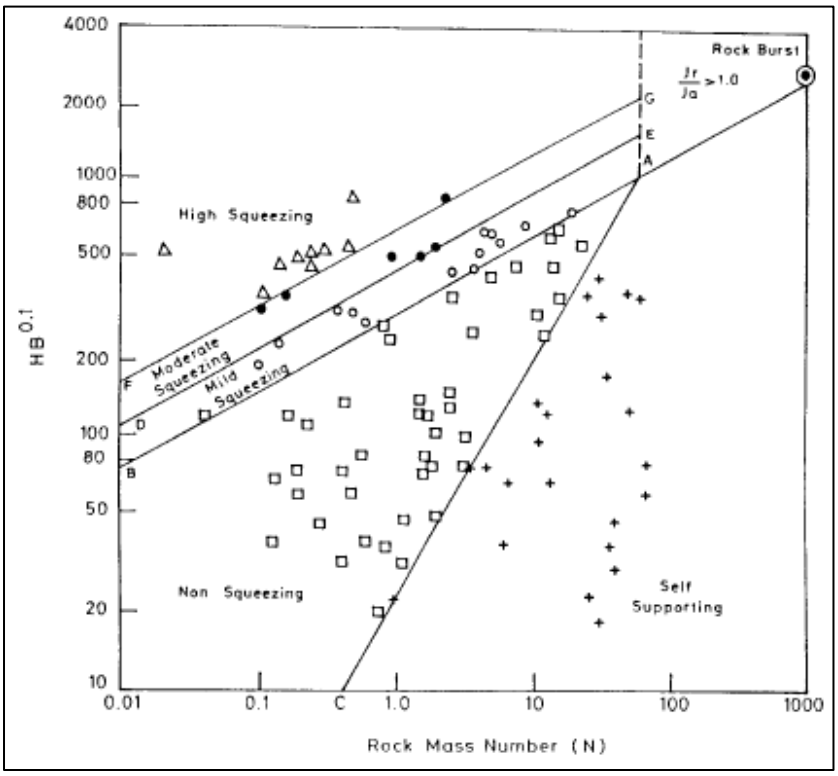

Gráfico 3: Enfoque para predecir condiciones de compresión (Goel et al. 1995, 2000).

El grado de squeezing se puede utilizar para ambos enfoques empíricos mencionados con anterioridad, siendo representado de la siguiente manera:

- Squeezing leve: convergencia 1-3% del diámetro del túnel.
- Squeezing moderado: convergencia 3-5% del diámetro del túnel.
- Squeezing alto: convergencia mayor al 5% del diámetro del túnel.

2.2.3.2. Mecanismos semi-empíricos

- Jethwa et al. (1984):

El grado de compresión se define en base a lo siguiente:

$$N_C = \frac{\sigma_{cm}}{\rho_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H} \tag{5}$$

Donde:

σ_{cm}: Esfuerzo de compresión uniaxial.

ρ_0: Esfuerzo in situ.

γ: Peso específico de la roca.

H: Profundidad del túnel.

Con lo anterior, se puede clasificar el comportamiento de squeezing de la siguiente forma:

Tabla 5: Clasificación del comportamiento de squeezing (Jethwa et al. 1984).

$\frac{\sigma_{cm}}{\rho_0}$	**Nivel de squeezing**
< 0,4	Alto
0,4 – 0,8	Moderado
0,8 – 2,0	Leve
> 2,0	No existe

- <u>Hoek & Marinos (2000):</u>

Hoek (1998) utiliza la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso (σ_{cm}) y la tensión in situ (ρ_0) como indicador de posibles problemas en el túnel de compresión.

Hoek & Marinos (2000) muestran que una gráfica de deformación del túnel (ε) definida como la relación porcentual del desplazamiento radial de la pared del túnel con respecto al radio del túnel en función a la relación $\frac{\sigma_{cm}}{\rho_0}$ se puede utilizar de forma eficaz para evaluar los problemas de túneles en condiciones de presión. Esto se puede apreciar en la siguiente gráfica:

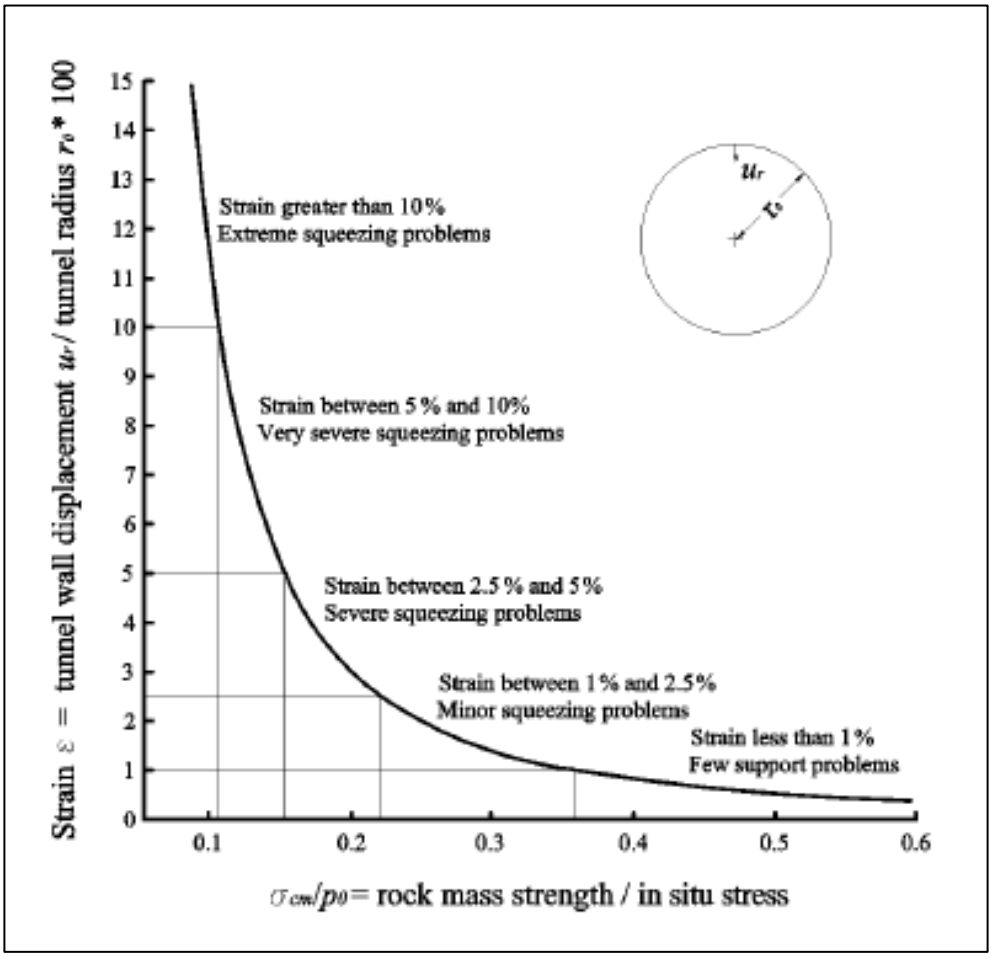

Gráfico 4: Clasificación del comportamiento squeezing (Hoek et al., 2000).

Con esto, se puede obtener la siguiente información con respecto a la ocurrencia del riesgo de squeezing:

Tabla 6: Grado de squeezing según el porcentaje de convergencia (Hoek et al., 2000).

Convergencia [%]	Grado de squeezing
< 1	No se desarrolla squeezing
1 - 2,5	Squeezing ligero
2,5 - 5	Squeezing moderado
5 - 10	Squeezing severo
> 10	Squeezing extremo

2.2.4. Predicción de swelling

Numerosas investigaciones indican que el riesgo de swelling es una de las causas principales de las grandes deformaciones que se producen en los túneles. Lo cual está directamente relacionado por el aumento de humedad en suelo o roca de muy mala calidad o aparición del nivel freático en macizos rocosos.

Según el Laboratorio Oficial J. M. Madariaga, (2015), indica que para que se desencadene el riesgo, se debe tener un GSI menor a 50 con un valor mayor a 0.4 entre la relación del esfuerzo principal mayor y la resistencia a la compresión simple como se puede observar a continuación:

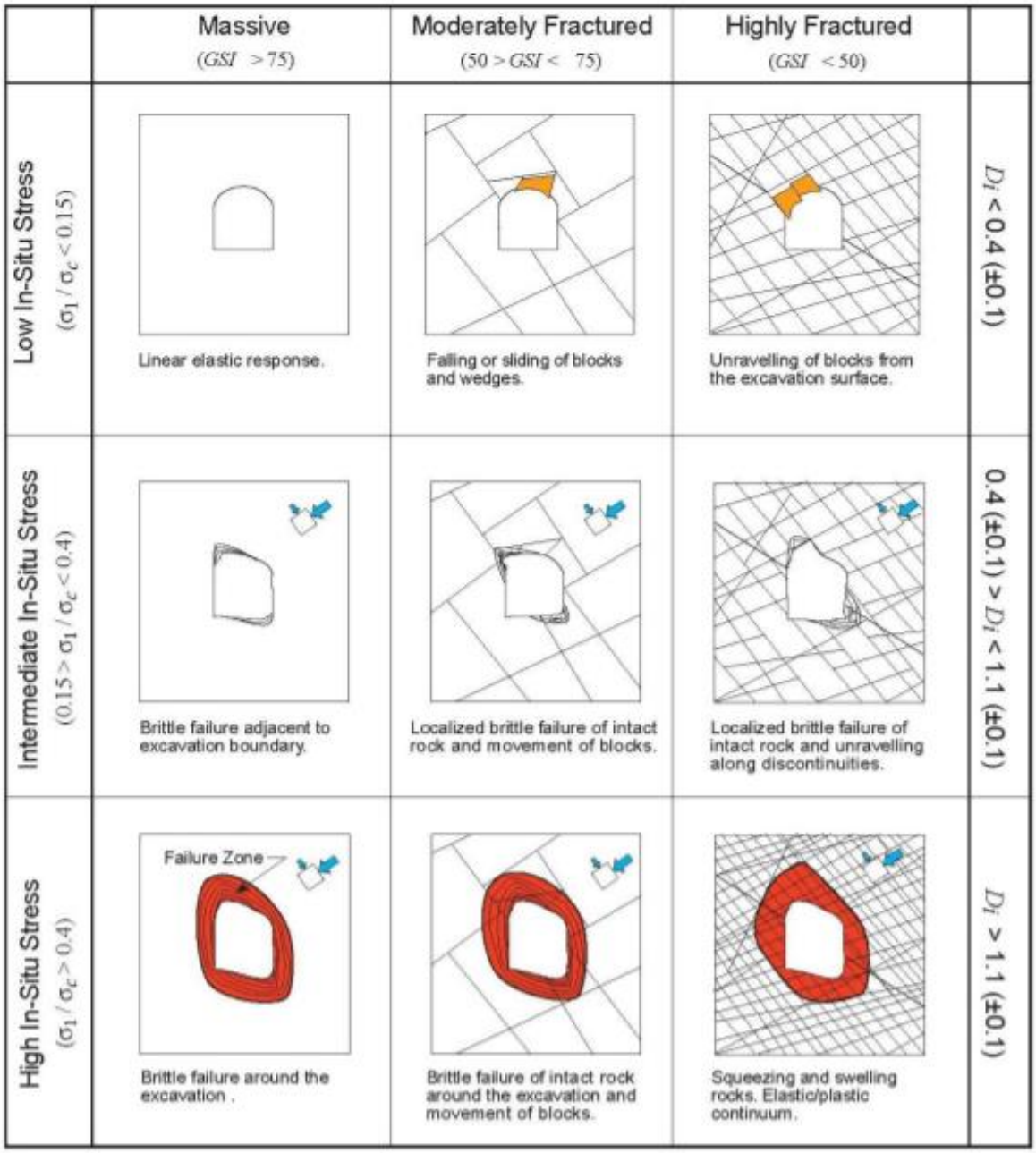

Ilustración 16: Inestabilidades según GSI, esfuerzo principal mayor y resistencia a la compresión simple (Modificado por Hoek et al. 1995).

2.3. Factores que afectan a túneles según el riesgo geotécnico

Como se pudo apreciar anteriormente, los riesgos se pueden desencadenar por distintos factores, a continuación, se presentará de manera visual los riesgos que existen en los túneles mineros y los factores que los afectan.

Tabla 7: Parámetros que controlan la probabilidad de la ocurrencia de los distintos riesgos.

Factores \ Riesgos	Rockburst	Spalling	Squeezing Ground	Swelling
GSI	≥ 50 [1]	≥ 55 [2]	< 50 [3]	< 50 [3]
RMR	≥ 60 [4]	≥ 60 [4]	≤ 70 [5]	No determinante
UCS	≥ 70 [6]	No determinante	≤ 40 [7]	No determinante
RQD	≥ 50 [8]	No determinante	No determinante	No determinante
$\frac{UCS}{T}$	> 11 [6]	> 9 [2]	No determinante	No determinante
$IC = \frac{\sigma_{cm}}{2 * \gamma * H}$	$0{,}05 - 1$ [4]	$0{,}05 - 1$ [4]	$\leq 0{,}05$ [4]	No determinante
$Ts = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$	$> 0{,}3$ [9]	$> 0{,}3$ [10]	> 1 [10]	No determinante
$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	No determinante	$10 - 20$ [11]	No determinante	No determinante
$\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$	$\geq 0{,}2$ [10]	$0{,}1 - 0{,}5$ [10]	$> 0{,}4$ [3]	$> 0{,}4$ [3]
$PES = \frac{{\sigma_c}^2}{2 * Es}$	≥ 50 [12]	No determinante	No determinante	No determinante
H	No determinante	No determinante	$\gg 350 * Q^{\frac{1}{3}}$ [13] $\gg (275 * N^{0.33}) * B^{-1}$ [13]	No determinante
$N_C = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma * H}$	No determinante	No determinante	≤ 2 [13]	No determinante

Un factor es considerado “no determinante” cuando su valor no tiene influencia estudiada sobre la aparición o la intensidad del riesgo.

Como se puede apreciar en la tabla, la calidad geotécnica del macizo rocoso es la que controla mayormente la probabilidad de ocurrencia de estos.

Estos parámetros son los que inciden mayormente en la intensidad del riesgo, llegando a afectar sectores específicos de los túneles, como también varios kilómetros, que pueden provocar pérdidas materiales y accidentes laborales dentro de la obra subterránea.

Los elementos influyentes con los rangos de valores se ordenaron según su importancia, es decir, desde los factores que controlan más el potencial de riesgo hasta los que podrían considerarse secundarios, pero no por eso, menos importantes.

A continuación, se puede observar un desglose de la tabla anterior. De esta forma se puede apreciar con mayor detalle los factores que pueden desencadenar un riesgo con sus respectivos niveles de peligrosidad. Esto también ayudará a ver las conexiones entre los distintos niveles de los riesgos con sus respectivas interacciones.

Tabla 8: Factores que facilitan la ocurrencia de los riesgos según su nivel de peligrosidad.

Factores \ Riesgos	**Rockburst Alto**	**Rockburst Medio**	**Rockburst Bajo**	**Spalling Alto**	**Spalling Medio**	**Spalling Bajo**	**Squeezing Alto**	**Squeezing Medio**	**Squeezing Bajo**	**Swelling**
UCS [MPa]	≥140	≥110	≥70	-	-	-	-	-	-	-
RQD	>70	60-70	50-60	-	-	-	-	-	-	-
$\frac{UCS}{T}$	20-35	15-35	11-35	≥15	9-20	>9	-	-	-	-
$Ts = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$	>0,7	0,5-0,7	0,3-0,5	>0,65	0,5-0,65	0,3-0,4	>5	-	1-5	-
$PES = \frac{{\sigma_c}^2}{2 \cdot Es}$	≥150	100-150	50-100	-	-	-	-	-	-	-
$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	-	-	-	10-20	-	-	-	-	-	-
$\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$	>0,4	0,2-0,4	-	0,3-0,5	0,2-0,3	0,1-0,2	-	-	-	>0,4
Convergencia [%]	-	-	-	-	-	-	>5	2,5-5	1-2,5	-
$Nc = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H}$	-	-	-	-	-	-	<0,4	0,4-0,8	0,8-2	-

2.4. Casos de estudio y probabilidad de ocurrencia de riesgos

Del estudio bibliográfico realizado, se define una tabla con casos reales encontrados donde se puede observar que un evento produjo otro diferente o que ocurrieron de forma simultánea. También, se pueden observar breves descripciones de bibliografías halladas que indican la posibilidad que bajo ciertas circunstancias se podría dar una interacción entre los riesgos que se consideran relevantes para esta investigación.

Tabla 9: Casos de reales en donde se produjo interacción de riesgos.

Casos de Reales de Interacción de Riesgos.			
Riesgos Involucrados	País	Información y Características	Fuente Bibliográfica
Rockburst y Spalling	China	Cavernas Hidroeléctricas. Rockburst durante la exploración geológica de ingeniería, causaron un spalling en la roca circundante y afectó su estabilidad. Litología: Granito. σ_1 = 115 [MPa] ; σ_3 = 53 [MPa] E Mín = 21,9 ; E Máx = 59 (Hudson & Feng, 2015).	Hudson, J. A., & Feng, X.-T. (2015). *Rock engineering risk*. CRC Press/Balkema.
Swelling y Squeezing	Etiopia	Proyecto hidroeléctrico Gigel Gibe II. Swelling podría haber ocurrido en simultáneo con el squeezing con grandes deformaciones dependientes del tiempo y una carga muy significativa del soporte rocoso. Presencia de agua con minerales con basalto alterado, 85%; brecha de basalto, 70%; traquita alterada, 45%. Contenido en esmectita de minerales arcillosos entre el 70 y el 90% (Barla, 2018).	Barla, G. (2018). *Challenges in the Understanding of rBM Excavation in Squeeztng Conditions.* 16.

2.5. Evaluación del riesgo

Todo trabajo, sea del ámbito minero o no está expuesto a riesgos que pueden afectar al cumplimiento de los plazos, los costos estimados en un comienzo o derechamente a la continuidad de un proyecto, debido a que una mala gestión de los riesgos que se pueden producir durante el desarrollo de una labor puede significar el aumento de la inversión en un 300% de lo que se tenía presupuestado inicialmente (Grasso & Soldo, 2017).

El riesgo se puede definir de muchas maneras: Al-Bahar & Crandall (1990) definen el riesgo como la exposición a la posibilidad de que ocurran eventos que afecten adversa o favorablemente los objetivos del proyecto como consecuencia de la incertidumbre. Tarcisio B (2017) define el riesgo como la combinación de las consecuencias (o la gravedad) de un peligro y su probabilidad.

Tradicionalmente, los riesgos son gestionados de forma indirecta mediante decisiones de ingeniería tomadas durante el desarrollo del proyecto. Para esto es fundamental el uso de la gestión de riesgos desde el inicio del proyecto, donde se resuelven las decisiones importantes como la elección de la disposición general de las obras y la selección de los métodos de construcción.

Se define como gestión de riesgos al término general que incluye identificación, evaluación, análisis eliminación/mitigación y control de riesgos. Para que la gestión de riesgos sea eficaz, ya sea de un proyecto de construcción de túneles o cualquier obra, es importante que esta inicie lo más pronto posible, de preferencia durante la viabilidad del proyecto y la planificación temprana de las etapas (Degn Eskesen et al., 2004).

La gestión de riesgos son procesos necesarios que se deben realizar para poder llevar a cabo una implementación de respuesta y monitoreo de los riesgos, estos procesos son los siguientes:

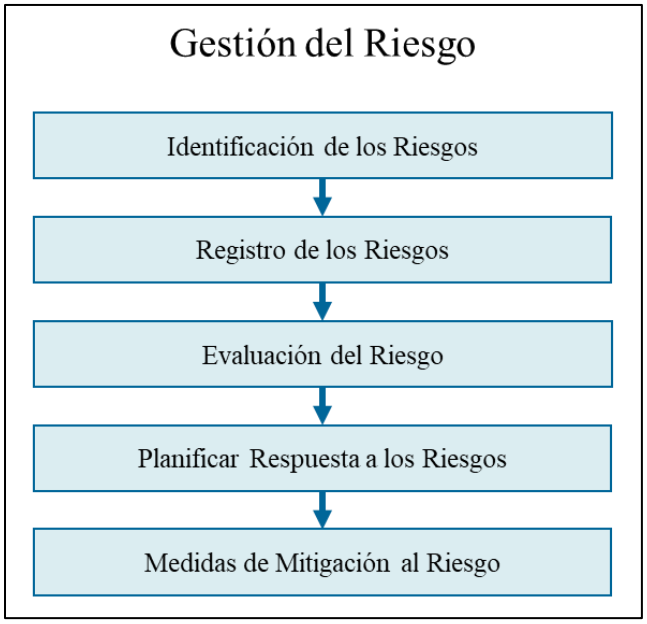

Ilustración 17: Procesos de la gestión de riesgos.

2.5.1. Identificación de los riesgos

Es el proceso más importante y se lleva a cabo durante el desarrollo de todo el proyecto, ya que la respuesta al riesgo se realizará sobre los riesgos potenciales identificados que afectan al proyecto y se deben tomar en cuenta tanto los riesgos individuales como generales del proyecto. Es por esto que en esta etapa se deben investigar los posibles riesgos, sus características y las consecuencias que pueden causar (Project Management Institute, 2017).

2.5.2. Registro de los riesgos

Esta etapa comienza durante la identificación de los riesgos pueden cambiar de forma periódica a medida que los riesgos que fueron identificados se vayan respondiendo a la estrategia de mitigación. El registro a grandes rasgos debe incluir (Humbert, 2017):

- Identificación de cada riesgo.
- Descripción de la incertidumbre de la fuente de riesgo.
- Descripción del evento peligroso.
- Descripción de las consecuencias que se podrían ocasionar.

2.5.3. Evaluación del riesgo

Actualmente, existen principalmente dos formas de evaluar el riesgo, la primera corresponde al análisis cualitativo y la segunda al análisis cuantitativo.

2.5.3.1. Análisis cualitativos

El análisis cualitativo es el proceso de priorizar los riesgos individuales del proyecto, evaluando su probabilidad e impacto, además de otras características, esto se realiza con la finalidad de planificar una respuesta a los riesgos. Es llevado a cabo de manera regular a lo largo de todo el desarrollo del proyecto. A continuación, se pueden observar dos formas de realizar un análisis cualitativo:

- Evaluación por expertos: Consiste en la evaluación del riesgo por experto basado sobre la consideración de los parámetros asociados al riesgo evaluado. Se busca evaluar la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y su tiempo probable. Clásicamente, se evalúa el riesgo como bajo, medio, alto y muy alto.
- Matriz de riesgos: Consiste en determinar los riesgos relativos considerando su probabilidad de ocurrencia y el impacto que tendrá. Los valores dentro de la matriz equivalen la severidad del riesgo, este puede ser bajo, medio, alto y muy alto. Para cada clasificación se utiliza un color distintivo, lo que se puede observar a continuación.

Risk matrix					
Likelihood	Possible	4	8	12	16
	Not likely	3	6	9	12
	Very Unlikely	2	4	6	8
	Improbable	1	2	3	4
		Slight	Medium	Significant	High
		Consequences			

Ilustración 18: Ejemplo de matriz de riesgo (Humbert, 2017)

2.5.3.2. Análisis cuantitativos

El análisis cuantitativo de los riesgos es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos individuales junto con otras fuentes de incertidumbre que afecten al proyecto. Por lo general requiere de softwares especializados en riesgos (Project Management Institute, 2017).

- Análisis de árbol de fallas: Se pueden utilizar para identificar fallas antes de que ocurran, por lo que permite que estas puedan ser corregidas. Este se construye a partir de la falla identificada y se continua con las posibles causas.

  Esta herramienta permite entender de mejor forma el sistema y la manera en la que puede fallar determinando los riesgos asociados. Es por lo anterior que se pueden tomar medidas para mitigar el riesgo con anticipación.
- Análisis de árbol de eventos: Describe la evolución de un suceso y se realiza colocando los factores condicionantes en la cabecera horizontal de la estructura. Comenzando con el iniciador, se sigue con las respuestas, siendo de éxito las líneas verticales superiores y los fallos las líneas verticales inferiores.

  Utilizar esta herramienta, permite ver que tan favorables o desfavorables son los resultados del suceso inicial.
- Análisis de árbol de decisiones: Se construye a partir de una decisión, desde donde nacen ramas para representar acciones posibles, con esto le siguen los posibles resultados a obtener. Con esto, se puede identificar la decisión que conlleve a obtener el mejor resultado.
- Diagrama de influencia: Permite identificar como las variables claves impactan entre ellas y también como estas impactan al resultado final. Se diferencia del árbol de decisión debido a que una situación se puede representar con muchos factores involucrados sin que el tamaño del diagrama crezca de forma considerable.
- Simulación Monte Carlo: Su objetivo es representar el comportamiento de variables reales para poder predecir su evolución. Es un método no determinista que entrega soluciones aproximadas y que se puede aplicar a problemas que sean estocásticos.
- Sistema DAT: Es un software para realizar estimaciones probabilísticas del rango de tiempo y costo probable de construir un túnel, o una red de túneles, teniendo en

cuenta la variabilidad e incertidumbre en las variables geológicas, de construcción y los impactos de los riesgos residuales que podrían conducir a la desaceleración o incluso a la paralización de las obras a lo largo de determinados tramos del trazado del túnel. Consiste en simular los ciclos de construcción de un túnel siguiendo una secuencia de construcción propuesta a lo largo de un perfil geológico probabilístico que cambia estocásticamente para cada proceso de simulación completo, para un número de corridas probabilísticamente significativo.

2.5.3.3. Límites de estos métodos de evaluación

Las técnicas mencionadas anteriormente, permiten evaluar y representar cada riesgo de forma independiente sin tomar en cuenta las potenciales interacciones entre ellos. Es decir, no representan la realidad en donde un riesgo puede generar otro según las condiciones geológicas de la roca.

La utilización de estas técnicas al representar una aproximación de la realidad podría llevar a un aumento significativo de los costos y plazos de un proyecto debido a que no se consideraron todos los casos posibles de la ocurrencia de los riesgos.

2.5.4. Planificar respuestas a los riesgos

Este proceso consiste en desarrollar opciones, seleccionar estrategias y acordar acciones para abordar la exposición del proyecto a los riesgos existentes. Si estas son efectivas frente a los riesgos, se puede llegar a minimizar al máximo las consecuencias individuales y maximizar las oportunidades de desarrollo. Las respuestas a los riesgos deben ser consistentes con la importancia del riesgo (Project Management Institute, 2017).

2.5.5. Medidas de mitigación al riesgo

Consiste en implementar los planes acordados en el proceso anterior para proceder con el monitoreo de los riesgos, evaluando la efectividad de los procesos permitiendo la gestión de riesgos a lo largo del proyecto.

2.6. Sistemas de ingeniería de rocas (RES)

El enfoque Rock Engineering System (RES) utiliza como base una matriz de interacción en donde se consideran las interacciones entre los principales parámetros a estudiar. Esto permite reducir la incertidumbre debido a que entrega los parámetros que son más interactivos y dominantes, es decir, los que afectan más al proyecto en estudio.

La metodología RES corresponde a un modelo de mecánica/ingeniería de rocas que no se construye asumiendo que ciertas variables deben incluirse de forma automática, sino que se debe estudiar el problema dividiendo el problema en variables constituyentes y evaluando su importancia para construir un modelo apropiado (Hudson & Feng, 2015).

La matriz de interacción proporciona una estructura que permite obtener y presentar información que es relevante de un problema particular, es decir, reducir la incertidumbre. La forma en la que se construye deja visualizar como un factor del sistema afecta a todos los demás factores del sistema, de forma complementaria en la que todos los factores del sistema afectan a ese factor en particular.

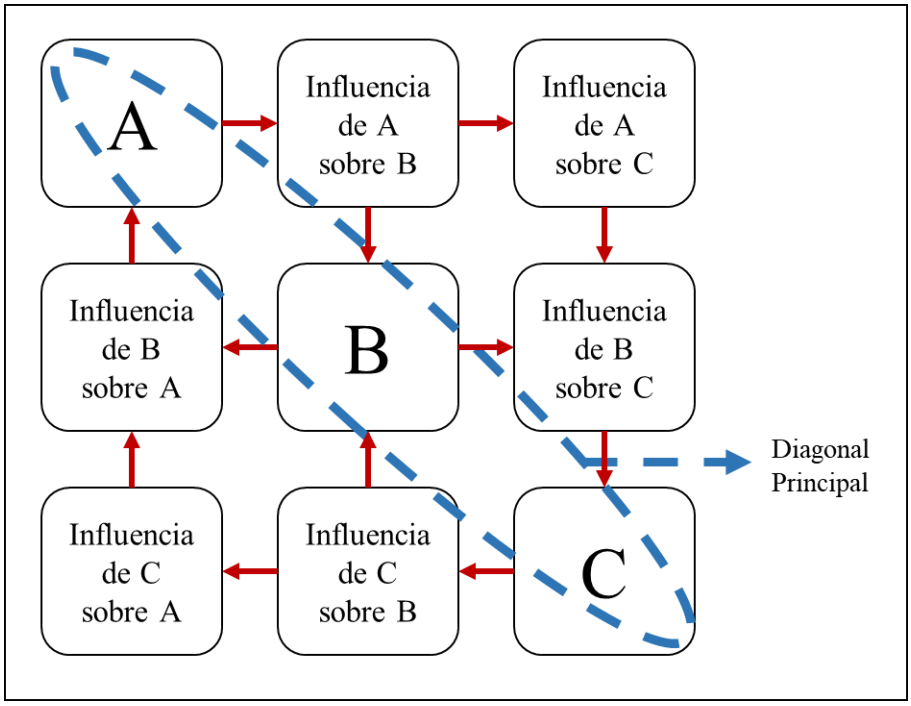

Ilustración 19: Elementos de una Matriz de interacción.

Los factores por estudiar se colocan en la diagonal principal, la cual va de la esquina superior izquierda de la matriz hasta la esquina inferior derecha. Luego se asigna la interacción existente entre ellos en sentido horario, como se muestra en la Ilustración 2. Cuando la influencia del factor A sobre el factor B es la misma que la influencia del factor B sobre el factor A se dice que corresponde a una matriz simétrica.

Para la realización de una matriz de interacción es recomendable establecer primero los parámetros que se ubican en la diagonal principal y luego completar los recuadros restantes con las interacciones existentes entre las variables de estudio.

J. A. Hudson (1989) indica que existen ciertos factores que deben tenerse en cuenta al decidir el enfoque de ingeniería correcto. En la mayoría de los casos son la estructura del macizo rocoso, tensión in-situ, flujo de agua y el aspecto constructivo (incluye el costo, métodos constructivos, plazos de construcción y las operaciones de trabajo individuales). La representación de las interacciones de los factores mencionados anteriormente se puede observar a continuación:

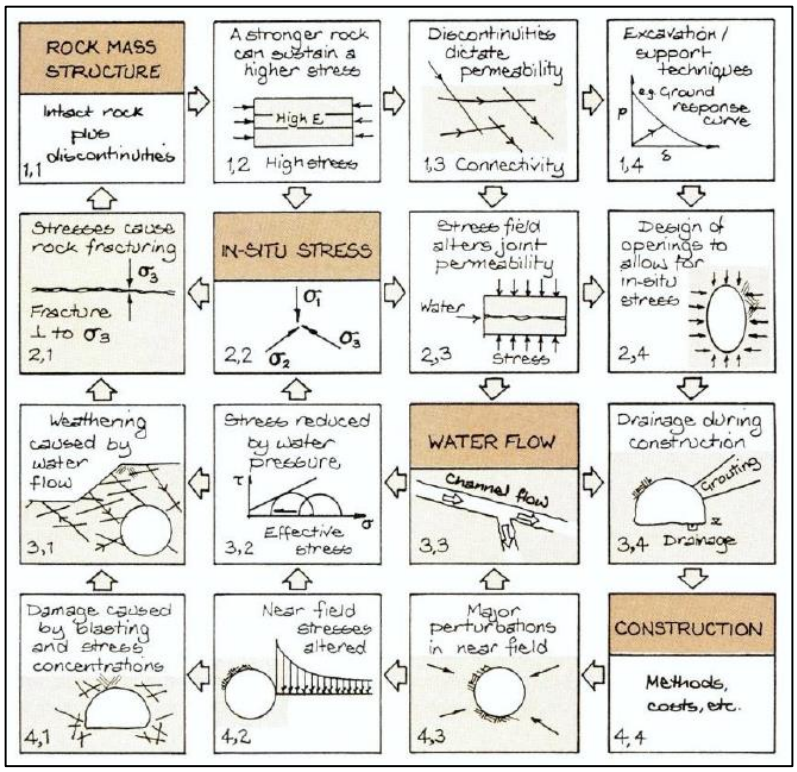

Ilustración 20: Matriz de interacción aplicada a los factores que afectan al macizo rocoso (Hudson, 1989).

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, la matriz está dividida en celdas que corresponden a la mecánica de rocas y en celdas que son parte de la ingeniería de rocas, la primera se refiere al estudio de las propiedades y el comportamiento mecánico de los materiales rocosos, mientras que la ingeniería de roca corresponde a la extracción de material provocando los mínimos daños posibles en la estructura que debe quedar. La división de la matriz se puede observar a continuación:

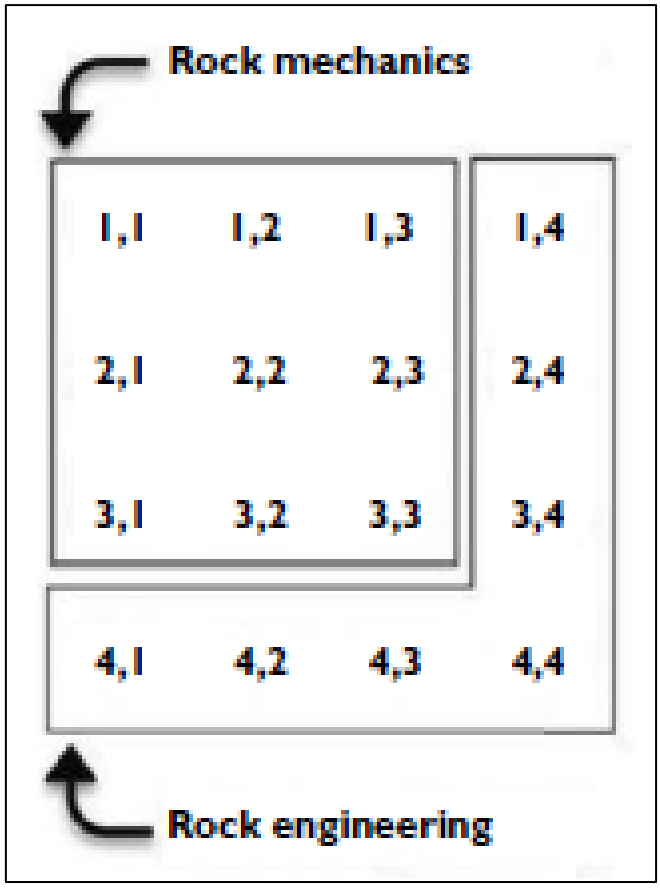

Ilustración 21: Celdas relacionadas con la mecánica de rocas y las relacionadas con la ingeniería de rocas (Hudson, 1989).

Otro ejemplo del uso de las matrices de interacción es entregado por Harrison et al. (2000), en donde esta herramienta se utiliza para estudiar las fracturas naturales presentes en el macizo rocoso. En este caso, los parámetros que componen la diagonal principal corresponden a orientación, espaciado, extensión y rugosidad.

En la siguiente ilustración, se pueden apreciar los elementos mencionados anteriormente con sus respectivas interacciones.

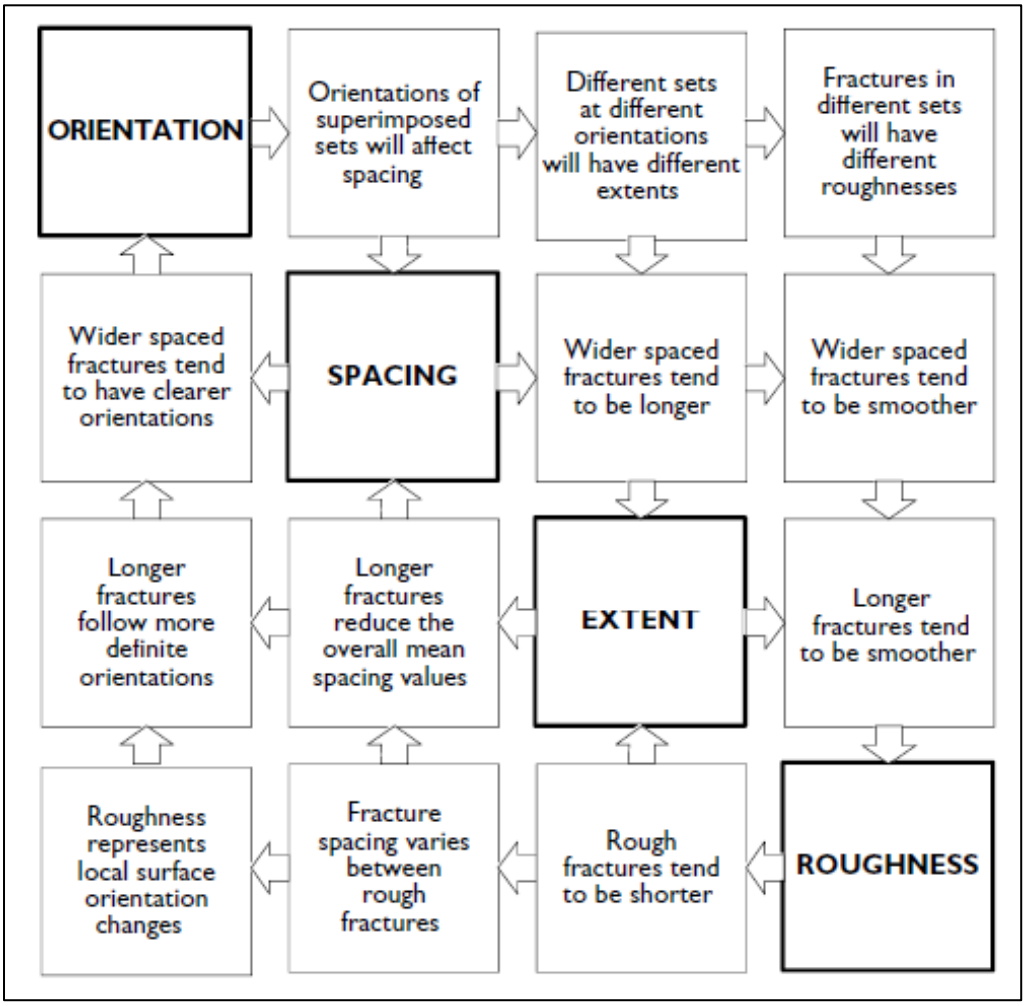

Ilustración 22: Matriz de interacción del estudio de las fracturas naturales del macizo rocoso (Harrison et al., 2000).

2.6.1. Codificación de los elementos ubicados fuera de la diagonal principal

Una vez construida la matriz de interacción, se procede a codificar los elementos que se encuentran fuera de la diagonal principal. Esto se realiza con el objetivo de poder manipular la matriz de forma matemática. Hudson (1992) indica que existen cinco formas principales para codificar las interacciones:

1. Binario: Se le asigna el valor de 1 si los recuadros fuera de la diagonal principal se encuentran activado, en caso contrario tienen valor 0.
2. Experto semicuantitativo (ESQ): Corresponde a la evaluación según el nivel de interacción, donde el valor 0 es cuando no existe interacción y el valor 4 es cuando existe una interacción crítica.
3. Según la pendiente de una relación lineal asumida.
4. De forma más numérica según una relación diferencial parcial.
5. Mediante análisis numérico completo del mecanismo.

El método más utilizado actualmente es el método experto semicuantitativo (ESQ), debido a que es el método que entrega más clasificaciones y porque no siempre existe la información suficiente para emplear los demás métodos.

2.6.2. Método experto semicuantitativo (ESQ)

Corresponde a la evaluación cuantitativa de la interacción que poseen las variables de estudio. La evaluación según el nivel de interacción puede ser establecida por una persona o de preferencia un grupo de personas que estén familiarizadas con el estudio (Hudson, 1992).

Esto se realiza considerando lo siguiente:

Tabla 10: Niveles de interacción con su puntaje asociado.

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

Teniendo en cuenta lo anterior, se le asigna el puntaje correspondiente según el nivel de interacción que se tenga para todos los factores de estudio. De esta forma, la matriz de interacción quedaría de la siguiente forma:

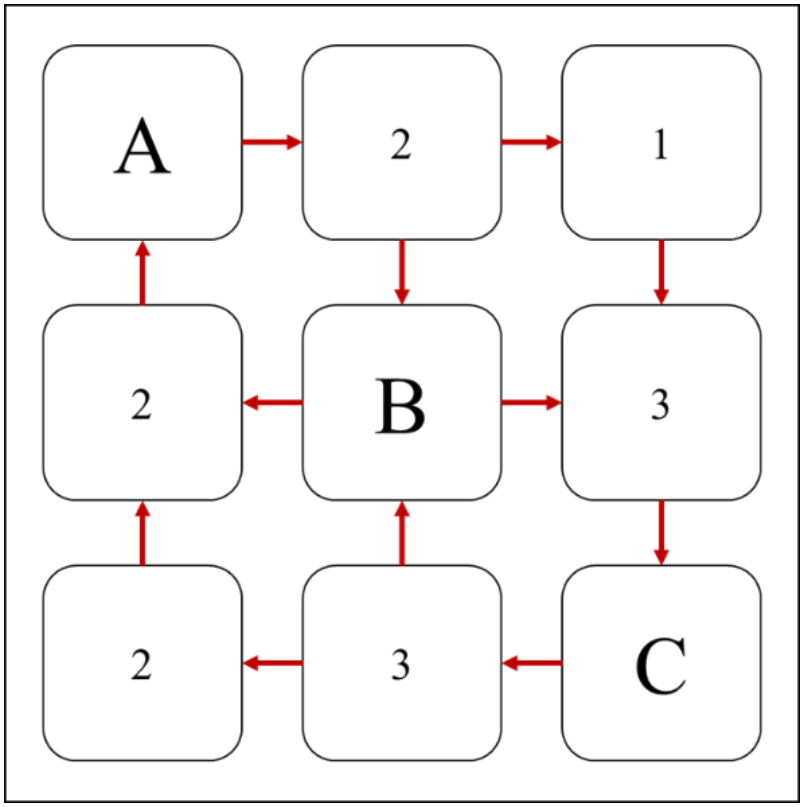

Ilustración 23: Codificación de la matriz con sus niveles de interacción.

2.6.3. Lectura de la matriz de interacción.

Se denomina causa (C) a la sumatoria de los niveles de interacciones para cada fila debido a que representa como la primera variable afecta a todas las demás, por otro lado, se designa como efecto (E) al total de los valores de las columnas porque muestra como el sistema afecta a la primera variable como se muestra a continuación:

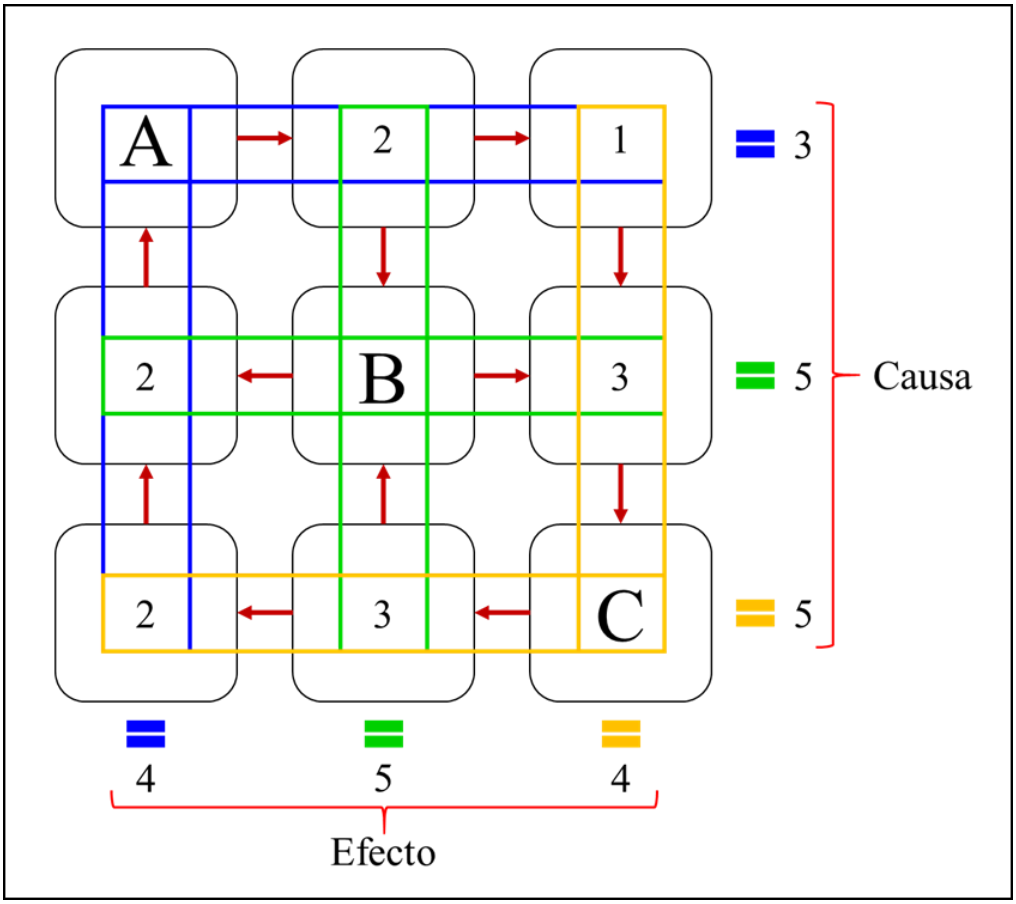

Ilustración 24: Demostración de valores de causa y efecto en la matriz de interacción.

El siguiente paso es tomar los pares de causa y efecto y plotearlos en un gráfico de causa y efecto. En este gráfico además se traza una diagonal para los valores donde la causa es igual al efecto, esta representa la interacción de los parámetros, es decir, que tan activa es la variable dentro de la matriz. Por otra parte, la diagonal perpendicular a la diagonal de C=E, permite visualizar los parámetros dominantes, en otras palabras, como la variable afecta al sistema y viceversa.

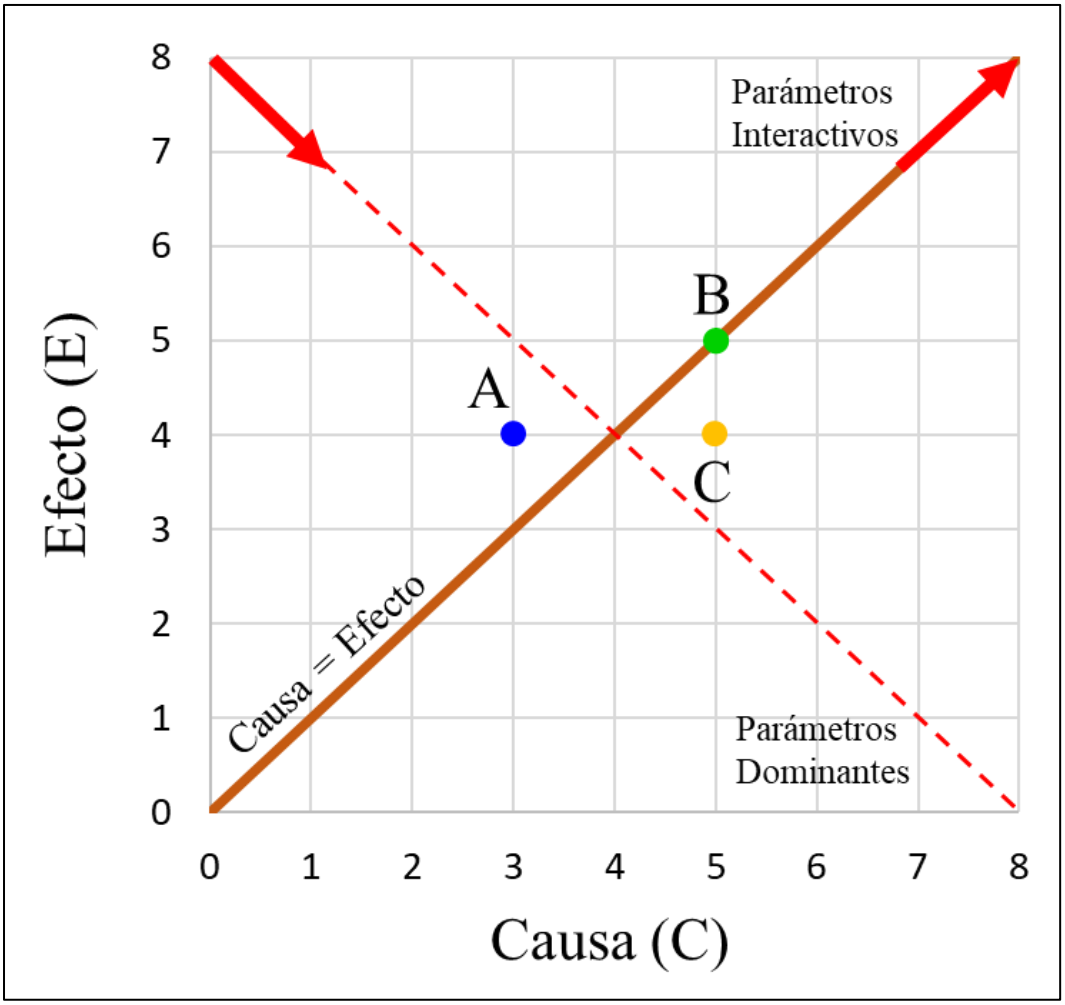

Gráfico 5: Representación del gráfico causa - efecto.

En el gráfico 1 se puede observar que el parámetro B es más interactivo mientras que el parámetro C es el más dominante, esto quiere decir que C afecta de mayor forma en los demás parámetros que ellos a él.

En otras palabras, B es más interactivo que C y a la vez este último es más interactivo que A. Por otra parte, C es más dominante que B y B es más dominante que A.

Otra forma de visualizar lo mencionado anteriormente es construyendo una tabla en donde se indique el valor de causa y efecto para cada variable de la diagonal principal de la matriz, junto con la suma y la diferencia entre estos, en donde la causa + efecto indicaría la intensidad de interacción y causa - efecto indica la dominancia de los parámetros de estudio como se muestra la Tabla 2.

Tabla 11: Valores de causa y efecto para cada variable de estudio junto con la suma y diferencia entre ellos.

Variable en Diagonal Principal	**Causa**	**Efecto**	**Causa + Efecto (Intensidad de Interacción)**	**Causa – Efecto (Dominancia/Subordinación)**
A	3	4	7	-1
B	5	5	10	0
C	5	4	9	1

Es importante mencionar que un valor positivo de causa - efecto significa que la variable está afectando al sistema en mayor medida que el sistema a la variable, mientras que un valor negativo de causa – efecto representa a una variable subordinada, es decir, la variable es más afectada por el sistema de lo que ella lo afecta.

Existen cuatro principales tipos de gráficos de causa y efecto, los cuales se distingues según la constelación formada alrededor de la diagonal causa = efecto, las cuales corresponden a:

- Tipo 1: Agrupados alrededor del centro de gravedad de los puntos.
- Tipo 2: Dispersas alrededor del centro de gravedad de los puntos.
- Tipo 3: En una zona elíptica alrededor de la diagonal causa = efecto.
- Tipo 4: En una zona elíptica alrededor de la diagonal perpendicular a la de causa = efecto.

Esto se puede apreciar en la siguiente ilustración:

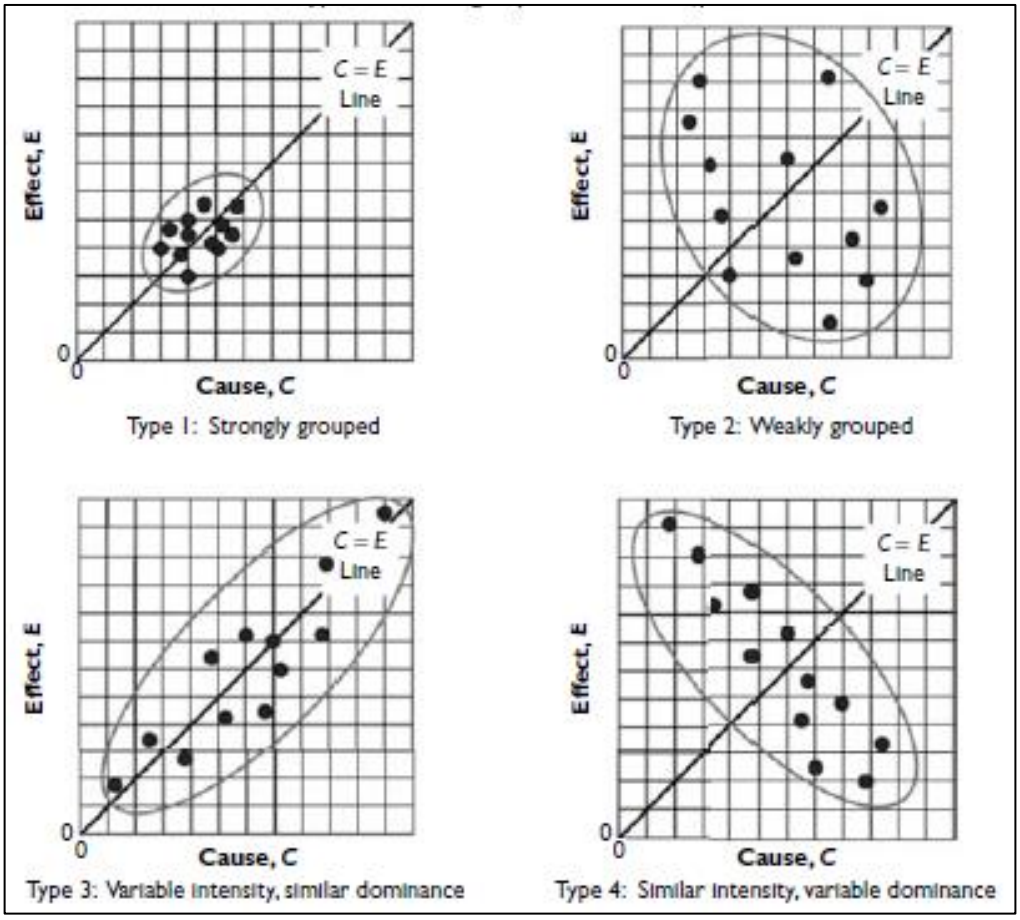

Ilustración 25: Tipos de gráficos de causa y efectos según la distribución de los puntos (Hudson, 1992).

2.7. Diferencia entre el método RES y los métodos probabilísticos

Los métodos probabilísticos consisten generalmente en simulaciones computacionales que finalmente forman parte del proceso de construcción de modelos que buscan representar la situación real de las condiciones que posee un proyecto.

En minería, es imposible conseguir un modelo que represente de manera exacta el comportamiento del macizo rocoso antes y después de la construcción de un túnel. Esto implica que exista una incertidumbre que afectará a la gestión de riesgos de un proyecto, que en caso de que no sea controlada, pueda afectar tanto a los plazos como a los costos del desarrollo del proyecto.

La metodología RES, al no ser un método probabilístico, sino que corresponde a un método más analítico, el cual es desarrollado por una persona con experiencia o un grupo de personas. Permite tener una visión más amplia de las consecuencias que los riesgos puedan producir, además, la forma en la que se construye deja visualizar y analizar de mejor forma la interacción entre los riesgos que han sido identificados.

Si bien el resultado final no es un modelo que busque representar aproximadamente la realidad, el método entrega condiciones reales que se podrían generar tomando en cuenta las variables de estudio y, por ende, se puede llegar a planificar de forma eficiente las respuestas a los riesgos y con foco en las interconexiones de los riesgos.

La práctica actual de la ingeniería de costos y programación de los proyectos mineros omite en sus evaluaciones este tipo de análisis, ya que solo estiman y maneja la incertidumbre de la estimación de costos directos e indirectos para cada riesgo específico, y no evalúa la interacción entre ellos.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para poder cumplir con los objetivos de la presente memoria de título, se debe comenzar con el análisis de los rangos de magnitud de cada parámetro que pueda generar cada riesgo en los túneles, junto con los casos encontrados donde se produjo una interacción entre riesgos. Esto se realizará con la finalidad de ver las coincidencias entre los índices que dieron paso a la ocurrencia de los riesgos tanto analíticamente como cuantitativamente.

Posterior a esto, se realizará una matriz de interacción de los riesgos principales, donde estos se dispondrán en la diagonal principal de la matriz debido a que son las variables de estudio y el principal enfoque de esta investigación. Luego, se rellenarán los recuadros fuera de la diagonal con la descripción de cada interacción. En caso de no existir se dejará la casilla en blanco. Para esto último se tomará en cuenta la información teórica descrita a lo largo del marco teórico, ya que corresponde a un desarrollo que es más analítico.

Después se utilizará la metodología RES para codificar la interacción descrita, de esta forma se tendrá niveles de interacción, basándose en el método del experto semicuantitativo, la cual entrega más niveles de interacción y así ver el comportamiento de las variables en estudio. De esta forma se sabrá el comportamiento que posee cada riesgo dentro de la matriz de interacción, es decir, como afecta o es afectada por las demás variables de la diagonal. Para realizar lo anteriormente descrito, se tomará en cuanta directamente los parámetros que desencadenaron los riesgos, puesto que se trata mayormente de un resultado cuantitativo.

Luego de obtener la matriz con los riesgos principales junto con la aplicación de la metodología RES, se procederá a repetir lo realizado para una segunda matriz, la cual tendrá los riesgos según su nivel de peligrosidad.

Finalmente, se realizarán conclusiones y recomendaciones acerca de los resultados obtenidos con los pasos mencionados anteriormente.

En la siguiente ilustración se puede observar la metodología empleada.

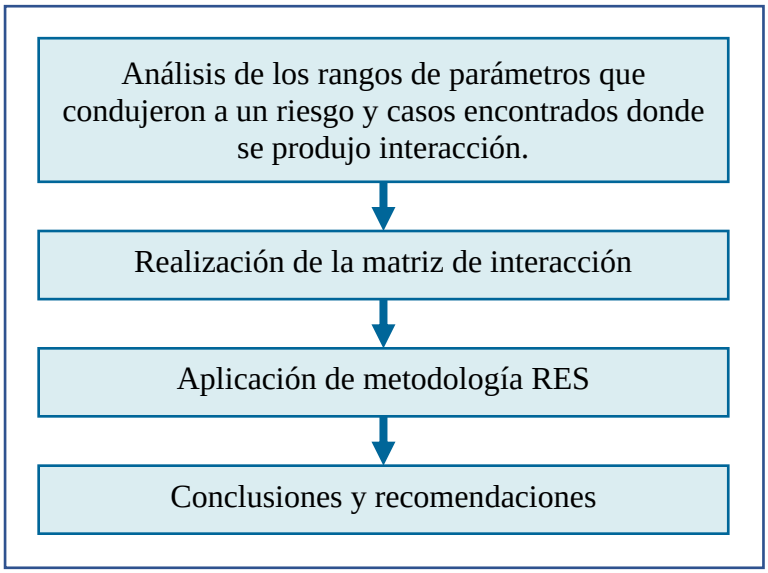

Ilustración 26: Metodología empleada en la realización de la investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con la información recopilada, se puede comenzar con la metodología RES para observar las interacciones que se producen entre los riegos estudiados a lo largo de los capítulos anteriores. Para ello es necesario la creación de la matriz de interacción la cual se realizará de la siguiente forma.

4.1. Creación de la matriz de interacción

Debido a que lo que se quiere estudiar es la interacción entre los riesgos, estos irán ubicados en la diagonal principal como se muestra a continuación:

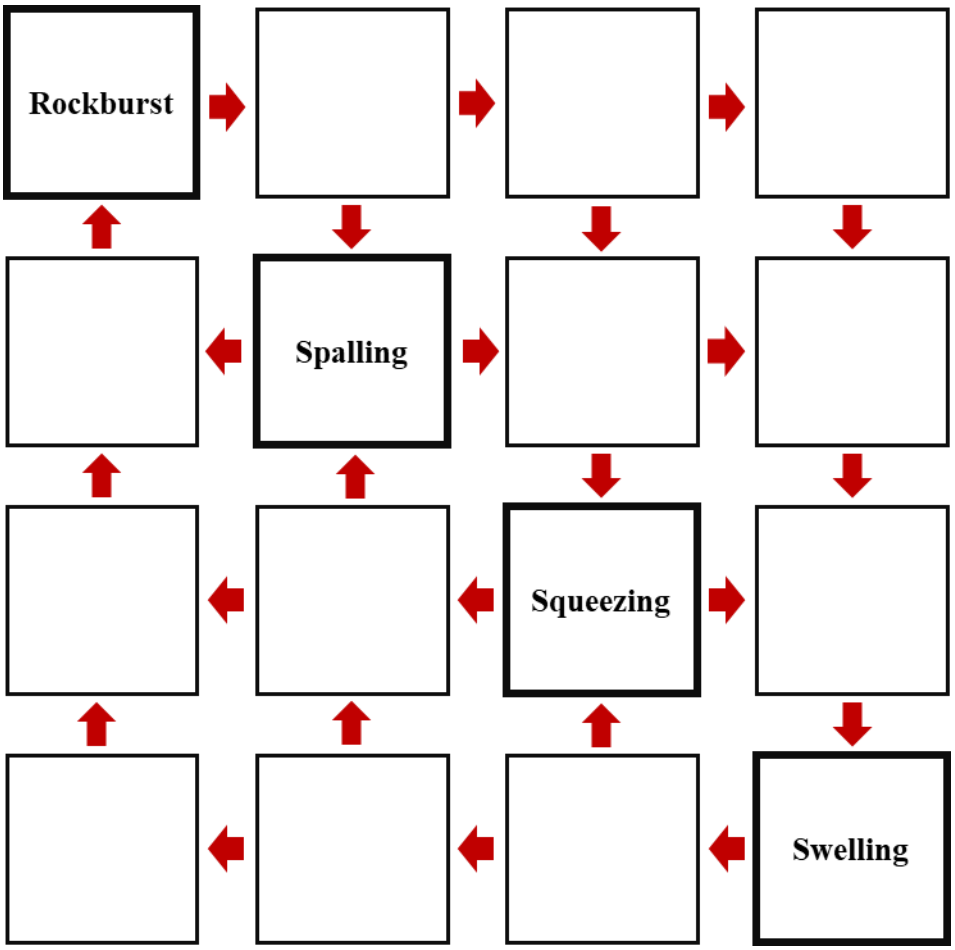

Ilustración 27: Disposición de los riesgos dentro de la matriz de interacción.

Posterior a esto, se comienzan a rellenar los cuadrados en blanco con las interacciones existentes entre los riesgos de forma analítica. En caso de no existir alguna interacción, el o los recuadros quedarán vacíos como se muestra en la siguiente matriz.

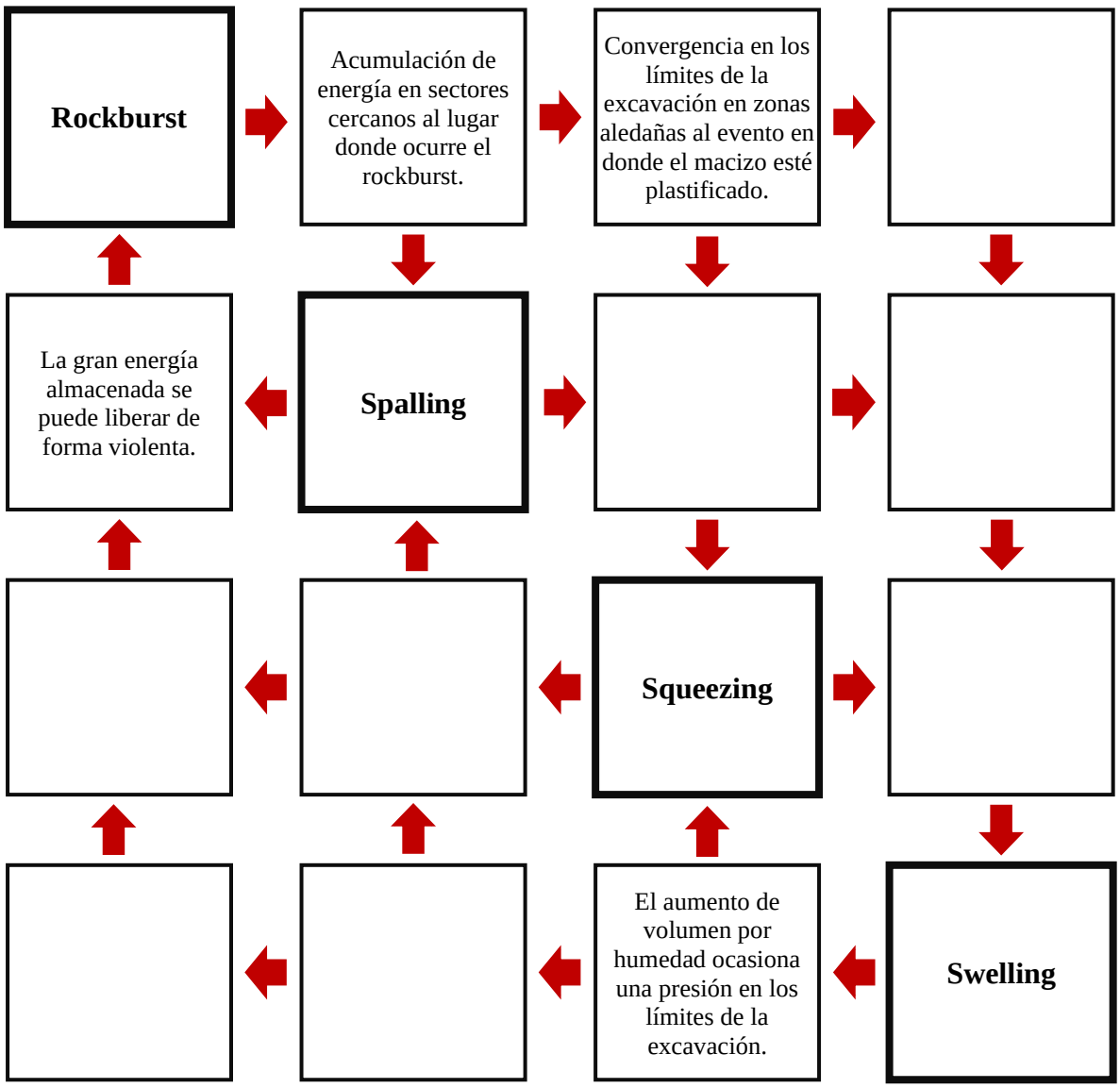

Ilustración 28: Matriz de interacción de los riesgos principales que afectan a los túneles en rocas.

Para realizar lo anterior, se tomó en cuenta la información teórica de la ocurrencia de los riesgos y casos ocurridos anteriormente.

A continuación, se muestra la matriz más detallada, es decir, con cada nivel de riesgo a excepción del riesgo de swelling debido a la falta de información.

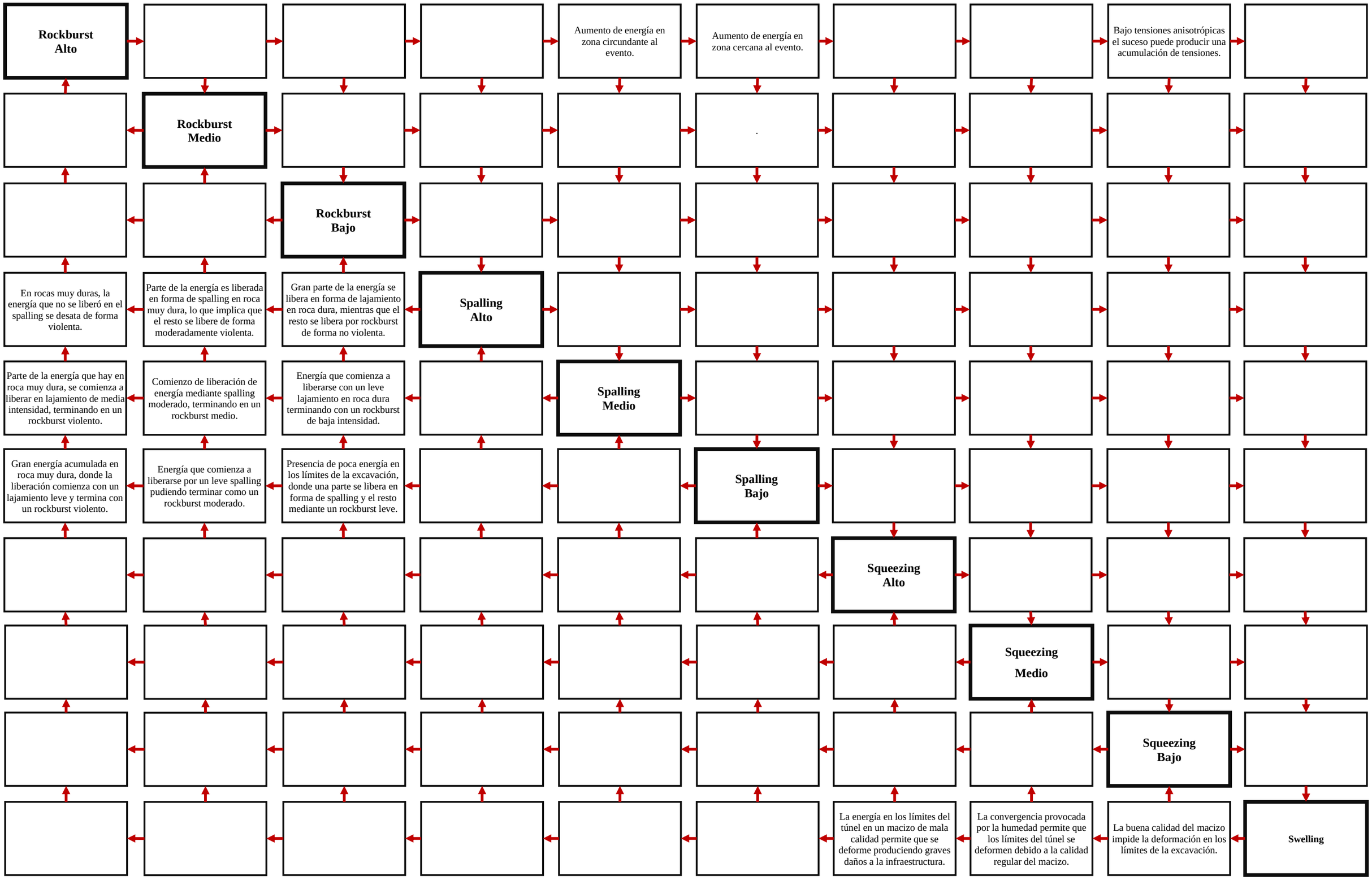

Ilustración 29: Matriz de interacción de los riesgos con sus respectivos niveles de peligrosidad.

4.1.1. Interacciones entre rockburst y spalling

Debido al rockburst, las ondas de propagación harán que en otro espacio del túnel se genere una acumulación de esfuerzos, que a medida que el tiempo transcurre estos se irán acumulando en mayor medida, provocando el riesgo de spalling. Esto no quiere decir que cada vez que ocurra un rockburst se producirá un spalling, ya que debe pasar una cantidad de tiempo suficiente para que exista una acumulación de energía en condiciones que faciliten la ocurrencia de un lajamiento.

Por otra parte, debido a que el spalling es una acumulación de esfuerzos en los alrededores de la excavación, estos si son acumulados en gran medida puede llevar a la liberación violenta de la energía mediante un rockburst, siendo el lajamiento la primera señal de la existencia de almacenamiento de tensiones. Esto se hace más probable a medida que aumenta la profundidad de las labores mineras.

4.1.2. Interacción entre rockburst y squeezing

Un rockburst puede provocar en otro sector del túnel cercano al lugar del evento una deformación súbita que puede terminar con un squeezing de baja intensidad o provocar una inestabilidad de la bóveda en el frente de la excavación. Esto posee mayor probabilidad en donde el macizo rocoso sea heterogéneo, es decir, en donde el evento principal se desarrolle en roca competente, dando paso a una acumulación de tensiones en un sector cercano donde la roca sea incompetente.

4.1.3. Interacción entre squeezing y swelling

El riesgo de swelling puede ocasionar un squeezing en el largo plazo debido a la convergencia provocada por el agua en sectores donde existen rocas con propiedades expansivas. Es complejo distinguirlos entre sí cuando se manifiesta alguno de los fenómenos, esto se debe principalmente a que pueden ocurrir al mismo tiempo.

Cabe destacar que lo que conecta a ambos riesgos es la presencia de agua, por lo que a mayor paso del tiempo, el agua comienza a penetrar más en la roca, produciendo que la convergencia aumente. A su vez, esta comienza a almacenarse hasta cuando se superan los esfuerzos cortantes límites produciendo deformidades en los extremos de las excavaciones, ya sea como squeezing y/o swelling.

4.2. Codificación según el nivel de interacción entre los riesgos

Una vez asignada la interacción entre los riesgos, se procese a darle un valor al nivel de interacción, para esto se utiliza la metodología ESQ, la cual permite dar valores entre 0 y 4, donde 0 significa que no existe interacción y 4 que existe una interacción crítica.

Para realizar lo anteriormente mencionado, se vieron los parámetros en común que tiene cada riesgo según la Tabla 7 y así obtener la codificación para la matriz de los riesgos principales y la Tabla 8 para la matriz desglosada, logrando como resultado lo siguiente:

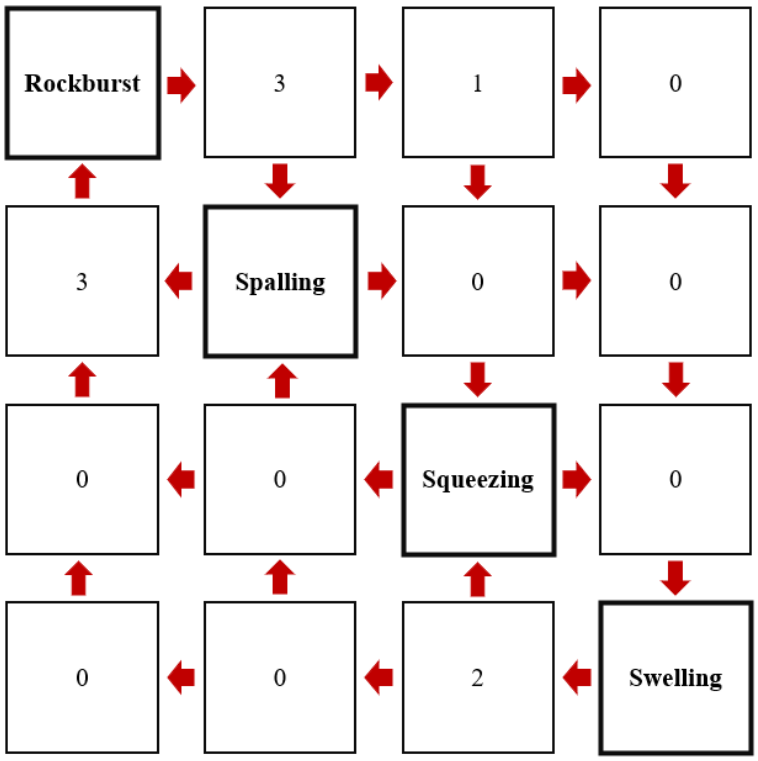

Ilustración 30: Codificación de la matriz de interacción de los riesgos principales.

Se le asigna el valor de 3 al nivel de interacción en donde un rockburst puede provocar un spalling, esto se debe a que existe un caso en donde ocurrió esta situación la cual se puede ver en la

Tabla 9. Además, es más probable que la roca circundante tenga las mismas propiedades que donde se produjo el evento. Se debe mencionar que esto en la realidad es muy común observarlo, ya que el terreno después de la ocurrencia de rockburst queda con la acumulación de energía que posteriormente se desencadena en un spalling.

Debido a que no existe un caso publicado que diga que un rockburst provocó un squeezing, a la interacción se le asigna el valor de 1. Esto no hace descartable que pueda ocurrir, ya que el macizo es heterogéneo y un evento violento puede alterar las condiciones del túnel en un sector cercano al suceso. Además, en la Tabla 7, se puede observar que poseen factores en común.

Las condiciones de la roca que provocan un rockburst son similares a las que produce un spalling. Generalmente este último se produce antes que el rockburst, es por lo anterior que a este nivel de interacción se le asigna el valor de 3, ya que no siempre un spalling termina en un strainburst.

Un swelling puede ocasionar un squeezing sólo en el largo plazo y bajo condiciones similares como se puede observar en la

Tabla 9, es por esto que se le asigna un nivel de interacción de 2. En caso contrario no existe interacción debido a que el swelling necesita la presencia de agua para que ocurra, lo que no sucede con el riesgo de squeezing.

Por otra parte, los niveles de interacción asignados anteriormente se pueden ver de forma más detallada en la codificación de la matriz desglosada, junto con los distintos niveles de peligrosidad de cada riesgo, como se muestra a continuación:

Rockburst Alto	0	0	0	2	3	0	0	1	0
0	**Rockburst Medio**	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	**Rockburst Bajo**	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	**Spalling Alto**	0	0	0	0	0	0
1	3	2	0	**Spalling Medio**	0	0	0	0	0
1	2	2	0	0	**Spalling Bajo**	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	**Squeezing Alto**	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	**Squeezing Medio**	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	**Squeezing Bajo**	0
0	0	0	0	0	0	2	2	2	**Swelling**

Ilustración 31: Codificación de la matriz de interacción de los riesgos principales con su nivel de peligrosidad.

Los niveles de interacción entre el riesgo de spalling a rockburst, ya sea bajo, medio o alto se decidieron según la cantidad de factores en común que se pueden observar en la Tabla 8 y tomando en consideración que son riesgos que ocurren bajo condiciones similares.

La interacción de rockburst a spalling se decidió por el caso mencionado en la

Tabla 9 y que fue el mismo que se consideró para la primera matriz de interacción.

- Debido a que solo se encontró un caso, se decidió que la interacción era entre 2 y 3. Dejando un 3 para rockburst alto a spalling bajo debido a que la cantidad de la energía que puede desencadenarse en un sector aledaño es más probable que sea baja a que llegue a desencadenarse como un spalling medio.
- Se le asignó un valor de 2 para el caso de que un rockburst alto produzca un spalling medio, ya que debería tener una mayor cantidad de energía inducida por el evento en un sector aledaño en un corto tiempo.
- Para el caso en que un rockburst medio cause un spalling bajo también se le asignó el valor de 1, puesto que es poco probable que la energía liberada por el rockburst de mediana intensidad llegue a provocar un lajamiento, y si llegara a pasar sería un spalling de bajo ímpetu.

El caso de rockburst alto a squeezing bajo se le asignó el valor de 1, debido a que no se encontraron casos, pero como pudo ocurrir que un rockburst generó un spalling en otro sector del túnel, también bajo ciertas condiciones podría ocurrir un squeezing de menor grado.

La interacción desde swelling a squeezing, se les asignó a todos los niveles de peligrosidad del squeezing un valor de interacción de 2, esto a que generalmente ocurren juntos o es muy difícil distinguir uno de otro siempre y cuando sea en el largo plazo.

Una vez definidos los niveles de interacción entre las distintas variables, se continúa con la metodología RES, donde se deben ver los valores de causa y efecto para cada riesgo investigado.

4.3. Gráfico Causa y Efecto

Con lo anteriormente realizado, se procede a calcular los valores de causa y efecto de cada variable. En donde la suma de los valores ponderados de izquierda a derecha corresponde a la causa y de arriba abajo es el efecto, como se muestra a continuación.

4.3.1. Valores de causa y efecto de la matriz principal

La Ilustración 32 muestra que la suma de los valores ponderados de izquierda a derecha corresponde a la causa, mientras que la sumatoria de los valores de arriba hacia abajo corresponden a los valores de efecto.

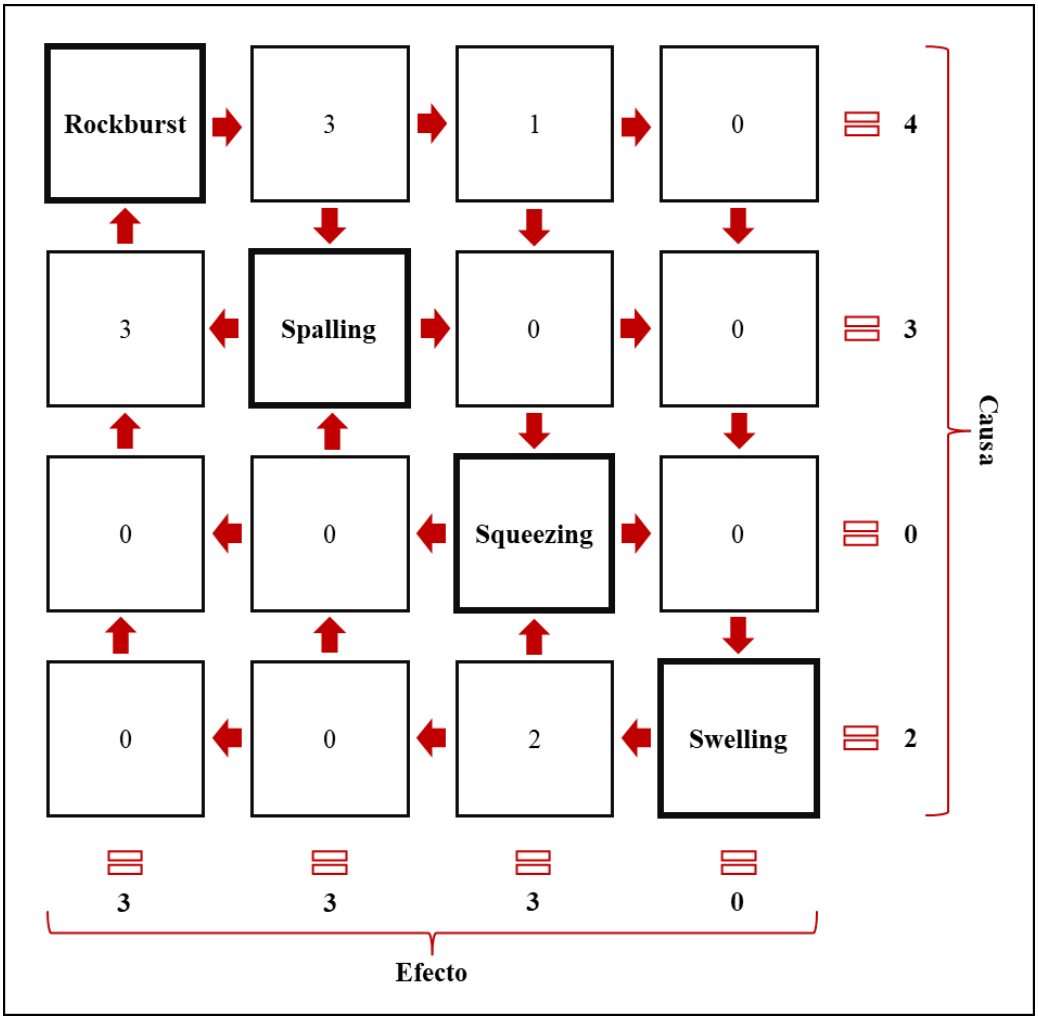

Ilustración 32: Valores de causa y efecto de los riesgos principales.

Posterior a esto, para cada variable se realiza el procedimiento con la finalidad de saber si corresponde a un riesgo que se comporta de manera subordinada o dominante, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 12: Valores de causa y efecto para cada riesgo en estudio junto con la suma y diferencia de ellos.

Variable en Diagonal	**Causa**	**Efecto**	**Causa + Efecto (Intensidad de interacción)**	**Causa - Efecto (Dominancia/Subordinación)**
Rockburst	4	3	7	1
Spalling	3	3	6	0
Squeezing	0	3	3	-3
Swelling	2	0	2	2

A medida que el resultado de la suma entre la causa más el efecto es más grande, significa que la variable tiene una mayor intensidad de interacción. Mientras que cuando el valor de la causa menos el efecto toma un valor negativo implica que la variable es subordinada, en caso contrario, se dice que es dominante.

Con los resultados de la matriz principal, se tiene que el riesgo de squeezing corresponde a una variable subordinada, es decir, el sistema afecta más a este riesgo que el mismo al sistema. Por otra parte, el rockburst y el swelling son variables dominantes, los cuales ellos afectan más al sistema que viceversa.

El rockburst a su vez, es el riesgo con mayor intensidad de interacción, puesto que un solo riesgo lo puede desencadenar y a su vez él puede provocar dos más, es decir, interactúa de una u otra forma con dos de los riesgos dentro de la matriz.

El spalling corresponde a una variable neutra, esto se debe principalmente porque es un riesgo que produce otros, pero que a la vez y en la misma medida otros eventos pueden hacer que se desarrolle.

La dominancia del riesgo de swelling es debido a que ningún otro riesgo lo puede provocar, ya que necesita agua para poder desarrollarse y eso puede deberse a condiciones

preexistentes o por el agua utilizada en la operación. Esto también afecta a su intensidad de interacción, ya que el valor de efecto que tiene es nulo.

Finalmente, el squeezing posee un comportamiento subordinado porque no es capaz de provocar un riesgo distinto de él. Contrariamente, dentro de la matriz, existen dos variables que pueden provocar un squeezing, esto hace que su efecto aumente, superando el valor de la causa.

Esto también se puede ver de forma gráfica, en donde se traza una línea en donde los valores de causan tienen el mismo valor que el efecto, para luego graficar los valores de cada riesgo y según como estén dispuestos en torno a la línea es cómo se comportan las variables, como se muestra a continuación:

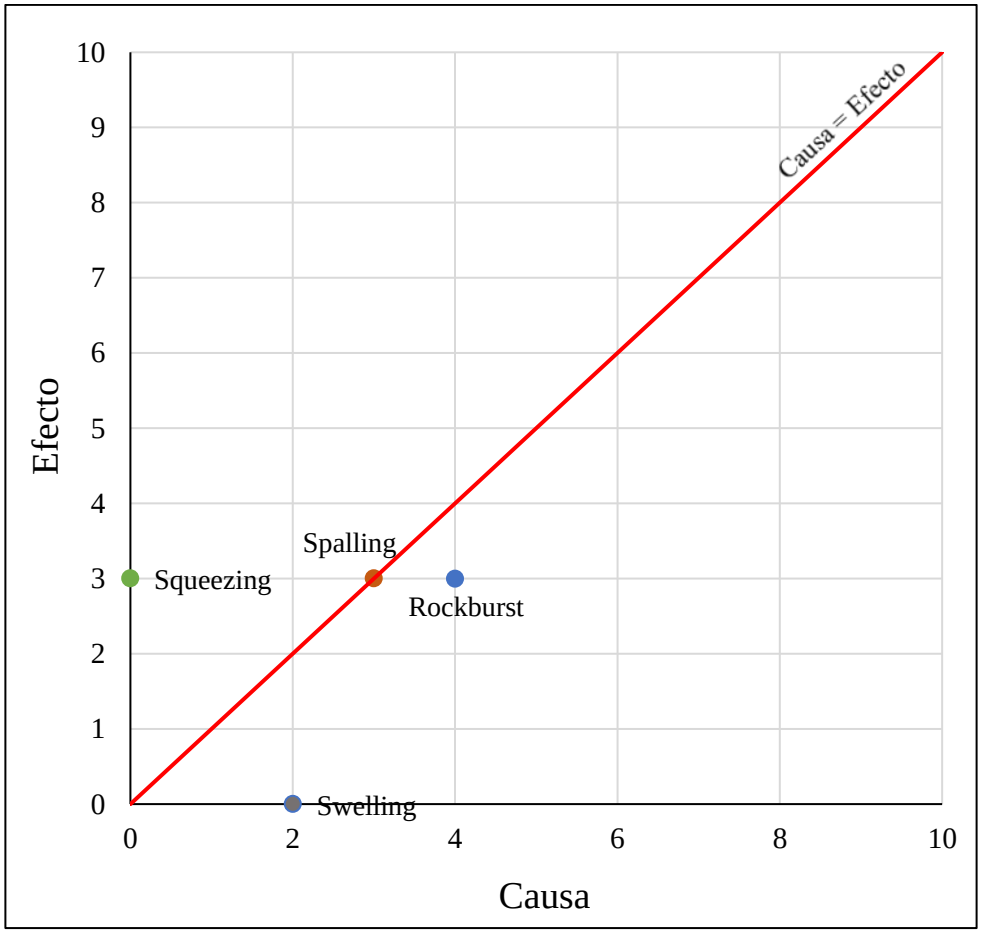

Gráfico 6: Causa y efecto de los principales riesgos en túneles.

Como se puede observar en el Gráfico 6, las variables que el riesgo más interactivo corresponde al rockburst, mientras que el más dominantes es el swelling. Por el contrario, se da que el parámetro con mayor grado de subordinación es el squeezing y el más dominante es el swelling.

Si esto se asocia con el tipo de gráfico como se muestra en la Ilustración 25, se puede decir que corresponde a un gráfico tipo 2, puesto a que los puntos están dispersos alrededor de la línea de causa igual efecto, lo que indica que son riesgos débilmente agrupados.

4.3.2. Valores de causa y efecto de la matriz desglosada

Rockburst Alto	0	0	0	2	3	0	0	1	0	6
0	Rockburst Medio	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	Rockburst Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	Spalling Alto	0	0	0	0	0	0	7
1	3	2	0	Spalling Medio	0	0	0	0	0	6
1	2	2	0	0	Spalling Bajo	0	0	0	0	5
0	0	0	0	0	0	Squeezing Alto	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	Squeezing Medio	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	Squeezing Bajo	0	0
0	0	0	0	0	0	2	2	2	Swelling	6
5	8	5	0	2	3	2	2	3	0	

Causa

Efecto

Ilustración 33: Valores de causa y efecto de los riesgos según su nivel de peligro.

Una vez obtenida la matriz con las ponderaciones, se procede a realizar la tabla de los valores de causa y efecto para poder ver el comportamiento de los riesgos según su nivel de peligrosidad, obteniendo lo siguiente:

Tabla 13: Valores de causa y efecto para cada riesgo según su nivel de peligrosidad junto con la suma y diferencia de ellos.

Variable en Diagonal	**Causa**	**Efecto**	**Causa + Efecto (Intensidad de interacción)**	**Causa - Efecto (Dominancia/Subordinación)**
Rockburst Alto	6	5	11	1
Rockburst Medio	0	8	8	-8
Rockburst Bajo	0	5	5	-5
Spalling Alto	7	0	7	7
Spalling Medio	6	2	8	4
Spalling Bajo	5	3	8	2
Squeezing Alto	0	2	2	-2
Squeezing Medio	0	2	2	-2
Squeezing Bajo	0	3	3	-3
Swelling	6	0	6	6

La diferencia entre el rockburst generalizado y el rockburst con sus distintos niveles de peligrosidad, es que para los de nivel medio y bajo aumentó el grado de subordinación producto de que un rockburst leve es poco probable que provoque algún otro riesgo, al igual que como ocurre con el rockburst de nivel medio. No obstante, la probabilidad aumenta en casos contrarios, es decir, que otras variables de la matriz lleguen a producir los rockburst ya mencionados. Esto no ocurre con el rockburst alto, ya que corresponde a la variable con mayor intensidad de interacción y que a la vez presenta un comportamiento dominante al igual que en la matriz principal.

Por otra parte, los riesgos que presentan un menor grado de interacción son los squeezing, que a la vez poseen un comportamiento subordinado dentro del sistema, siendo el de mayor grado de subordinación el de peligrosidad baja.

Los niveles de spalling aumentaron sus valores de causa, lo que los hizo pasar de una variable neutra a una dominante debido a su estrecha relación con el rockburst que, al ser categorizados según su peligrosidad, se tienen más relaciones entre sí, aumentando los valores de causa considerablemente. Esto a su vez hace que aumente su intensidad de interacción.

El swelling aumento su dominancia y su intensidad de interacción, esto se debe a que esta relacionado con los riesgos de squeezing, por lo que aumentan sus valores de causa manteniéndose nulo su efecto.

Como se realizó en el caso de la matriz principal, los resultados anteriormente obtenidos se visualizarán de otra forma mediante el siguiente gráfico:

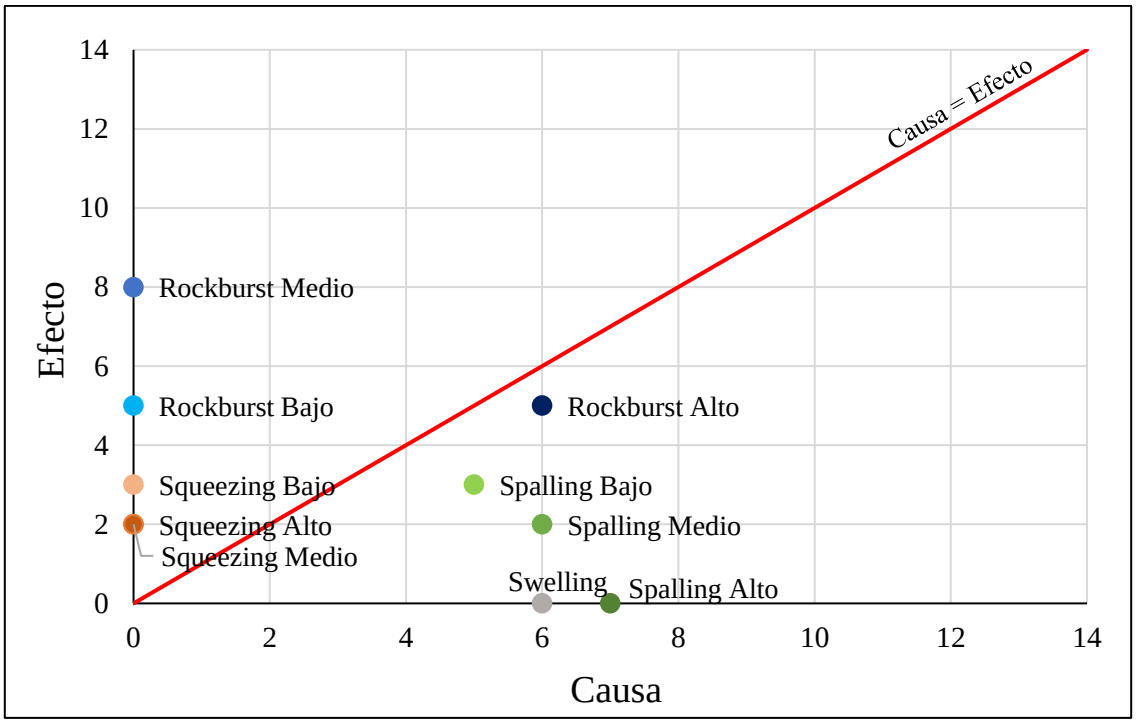

Gráfico 7: Causa y efecto de los riesgos según su nivel de peligrosidad.

Como se puede observar, la distribución de la mayoría de los riesgos es en forma elíptica perpendicular a la línea de causa igual efecto. En otras palabras, tienen dominancia variable e intensidades similares según lo que se indica en la Ilustración 25.

La diferencia entre el Gráfico 6 y Gráfico 7, es que, al ser más variables, provocan un cambio en las intensidades de interacción, aumentando mayormente para el swelling y rockburst, mientras que para el riesgo de spalling, se mantuvo similar el nivel de interacción y aumentó su dominancia. Esto hizo que pasara de ser un gráfico tipo 2 a uno tipo 4.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación con el riesgo de rockburst, debido a que corresponde a la liberación abrupta de una gran energía acumulada en los límites de la excavación, es probable que la onda en zonas aledañas provoque un riesgo diferente. Esto por esto que se considera una variable dominante.

En cuanto al swelling, puede ser catalogado como una variable netamente dominante similar a lo que ocurre con el rockburst, debido a que ningún otro riesgo puede generarlo puesto que el agua es el factor que controla este fenómeno.

Cabe destacar que el macizo rocoso no es homogéneo, por lo que la ocurrencia de riesgos depende de las condiciones de la roca en donde ocurran. Si en tramos cortos la calidad de la roca cambia drásticamente, se hace más probable que un riesgo desencadene otro con distintos factores controladores, por ejemplo, entre rockburst alto y squeezing bajo (inestabilidad de la bóveda).

Los riesgos estudiados no son definitivos en una matriz de interacción, ya que se puede adaptar a las distintas necesidades, en donde se pueden generar riesgos totalmente diferentes y la ponderación cambie en base a los datos recopilados de eventos que sucedieron en la zona a estudiar o en base a la experiencia. Esto también afecta a los niveles de interacción asignados, puesto que van a depender de cada persona que utilice esta metodología, ya que se puede utilizar una técnica diferente a lo que se empleó en esta investigación.

Esta investigación indica que bajo ciertas condiciones se puede producir más de un evento a la vez. Según el tipo de riesgo y las condiciones de la roca, un ingeniero puede determinar mediante las matrices si es probable que se desencadene otro de una magnitud diferente y luego observar las tablas con los parámetros que facilitan la ocurrencia de los riesgos relacionados, de esta forma, si las condiciones no se cumplen se puede descartar la interacción.

Con los resultados obtenidos, es importante mencionar que es indispensable tomar en cuenta las interacciones entre los riesgos a la hora de realizar el diseño de túneles. Al saber que un riesgo puede desencadenar otro diferente, se pueden tomar medidas preventivas y así evitar daños que podrían colocar en riesgo la continuidad de un proyecto.

Es por lo mencionado anteriormente que se recomienda evaluar este tipo de metodología en un caso real, para identificar, si conociendo las interacciones descritas se puede manejar de manera más optima el riesgo. Además, se puede realizar una matriz solo para eventos ligados a falla frágil y otra para los relacionados a falla dúctil, así se tendrán riesgos diferentes con los cuales se pueden obtener más interacciones.

También se debería

una comparación entre lo obtenido utilizando las matrices de interacción junto con la metodología RES y la utilización de los modelos probabilísticos. Esto con la finalidad de saber si se habría tenido un impacto diferente en el manejo de los riesgos.

Los resultados de esta investigación se pueden tomar en cuenta a la hora de desarrollar nuevos modelos probabilísticos, considerando la información de los factores de dieron paso a la ocurrencia de riesgos y las posibles interacciones.

Las conclusiones del presente estudio permiten mitigar el riesgo asociado a la deficiente planificación y el costo de los proyectos mineros actuales. Estos a la fecha no están considerando la interacción de los riesgos geomecánicos en la evaluación económica de los proyectos de inversión, generado sobrecostos importantes en proyectos públicos y privados de minería a gran escala en la cordillera de los Andes (por ejemplo, el Nuevo Nivel Mina, transformado en continuidad operacional “Canteras de proyecto El Teniente” como proyecto público y Pascualama de Barrick Gold ejemplo de proyecto privado).

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Bahar, J. F., & Crandall, K. C. (1990). Systematic Risk Management Approach for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, *116*(3), 533-546. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:3(533)

Alviña, N. (2008). *ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE TÚNELES ANTE EVENTOS SÍSMICOS, CASO DE ESTALLIDOS DE ROCA EN EL TENIENTE*. 183.

Aquino, N. (2014). *El Árbol de Decisiones en el Análisis de Riesgos del Proyecto*. https://www.eoi.es/blogs/madeon/2014/01/20/el-arbol-de-decisiones-en-el-analisis-de-riesgos-del-proyecto/

Barla, G. (1995). Squeezing rocks in tunnels. *ISRM News Journal*, *3/4*, 44-49.

Barla, G. (2001). Tunnelling under squeezing rock conditions. *Eurosummer-School in Tunnel Mechanics, Innsbruck.*, 169-268.

Barla, G. (2018). *Challenges in the Understanding of rBM Excavation in Squeeztng Conditions*. 16.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *39*(2), 185-216. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4

Cai, M. (2013). Principles of rock support in burst-prone ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *36*, 46-56. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.003

Cai, M., & Kaiser, P. K. (2014). In-situ Rock Spalling Strength near Excavation Boundaries. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *47*(2), 659-675. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0437-0

Codelco. (2014). *Nuevo nivel mina El Teniente*. CODELCO - Reporte de Sustentabilidad 2014. http://www.codelco.cl//reporte2014/proyectos/2015-05-18/101257.html

Cómo El Teniente, la mina subterránea de cobre más grande del mundo, busca extender su vida útil. (2018). https://www.mch.cl/2018/03/29/teniente-la-mina-subterranea-cobre-mas-grande-del-mundo-busca-extender-vida-util/

Degn Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Holst Veicherts, T. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *19*(3), 217-237. https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.01.001

Diederichs, M. S. (2007). The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, *44*(9), 1082-1116. https://doi.org/10.1139/T07-033

Diederichs, M. S. (2018). Early assessment of dynamic rupture hazard for rockburst risk management in deep tunnel projects. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *118*(3), 193-204. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a1

Einstein, H. H. (1996). Tunnelling in difficult ground—Swelling behaviour and identification of swelling rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *29*(3), 113-124. https://doi.org/10.1007/BF01032649

Esseiva, F. (s. f.). *Diagramas de influencia, una herramienta para comprender la incertidumbre y tomar decisiones*.

Grasso, P., & Soldo, L. (2017). Risk analysis-driven design in tunnelling: The state-of-the-art, learnt from past experiences, and horizon for future development. *Innovative Infrastructure Solutions*, *2*(1), 49. https://doi.org/10.1007/s41062-017-0087-2

Harrison, J. P., Hudson, J. A., & Hudson, J. A. (2000). *Engineering rock mechanics. Part 2, illustrative worked examples*. Pergamon.

Hatzor, Y. H., He, B.-G., & Feng, X.-T. (2017). Scaling rockburst hazard using the DDA and GSI methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *70*, 343-362. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.010

Hoek, E., Marinos, P., Hoek, E., & Marinos, P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*.

Hudson, J. A. (1989). *Rock Mechanics Principles in engineering practice*. Butterworths.

Hudson, J. A. (1992). *Rock engineering systems: Theory & practice*. Ellis Horwood.

Hudson, J. A., & Feng, X.-T. (2015). *Rock engineering risk*. CRC Press/Balkema.

Humbert, E. (2017, septiembre 6). *Risk Management in Tunnelling*.

Jorda, L., Rodriguez, M., Sanchez, A., & Jordá, R. (2013). Predicción empírica del Strainburst y Squeezing en galerías profundas. *Ingeopres*, *224*, 28-33.

Kaiser, P., & Cai, M. (2013). Critical review of design principles for rock support in burst-prone ground – time to rethink! *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*, 3-37. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_01_Kaiser

Kaiser, P. K., & Cai, M. (2012). Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *4*(3), 215-227. https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00215

Kaiser, P. K., Diederichs, M. S., Martin, C. D., Sharp, J., & Steiner, W. (2000, noviembre 19). *Underground Works In Hard Rock Tunnelling And Mining*.

Kaiser, P. K., Tannant, D. D., & McCreath, D. R. (1995). Drift support in burst-prone ground. *Proc. 97th CIM Annual General Meeting, Halifax, Canada*, 277-288.

Kaiser, P. K., Tannant, D. D., & McCreath, D. R. (1996). Canadian Rockburst Support Handbook. *Geomechanics Research Centre, Laurentian University, Sudbury, Ontario*, 314.

Kwasniewski, M., Szutkowski, I., & Wang, J. (1994). *Study of ability of coal from seam 510 for storing elastic energy in the aspect of assessment of hazard in Porabka-Klimontow Colliery*.

Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (LOM). (2015). *GUÍA SOBRE CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA*.

LaEdu.digital. (2020, marzo 8). Ánalisis árbol de fallas, qué es y cómo se utiliza. *Estudia en línea*. https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/

Li, C. C., Mikula, P., Simser, B., Hebblewhite, B., Joughin, W., Feng, X., & Xu, N. (2019). Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *11*(5), 1110-1118. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001

Loew, S., Barla, G., & Diederichs, M. (2010). *Engineering Geology of Alpine Tunnels: Past, Present and Future*. 35.

López, D. (2019, enero 8). ¿Qué es y cómo se hace un árbol de decisiones? | Administración. *Emprende Pyme*. https://www.emprendepyme.net/que-es-y-como-se-hace-un-arbol-de-decisiones.html

López, J. (2019). *Parámetros de diseño que definen la performance de un sistema de refuerzo, bajo condiciones de rockburst*.

Lunardi, P. (2008). *Design and Construction of Tunnels*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73875-6

Mahtab, M. A., Rossler, K., Kalamaras, C., & Grasso, P. (1997). *ASSESSMENT OF GEOLOGICAL OVERBREAK FOR TUNNEL DESIGN AND CONTRACTUAL CLAIMS*. *185*, 13.

Marinos, V. (2020). Engineering Geology and Tunnels. En M. Sakellariou (Ed.), *Tunnel Engineering—Selected Topics*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.90462

Martin, C. D., & Christiansson, R. (2009). Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *46*(2), 219-228. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.001

Mata, M. de la F. (2018). *Tunneling under squeezing conditions: Effect of the excavation method*. 232.

Medina, V., Rojas, A., & Reyna, I. (2015). *Prevención de accidentes por estallidos de rocas en la construcción de túneles y labores subterráneas*.

NTP 328: Análisis de riesgos mediante el árbol de sucesos. (s. f.). 7.

Piaggio, G. (2018). SWELLING ROCKS INVESTIGATION FOR TUNNEL PROJECTS – STATE OF THE ART IN CHARACTERIZATION, LABORATORY TESTS AND CONSTITUTIVE MODELS. *SASORE 2018 PROCEEDINGS*, 142.

Project Management Institute. (2017). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos: (Guía del PMBOK®)*.

Rojas, E. (2017). *Aspectos geotécnicos y desarrollo tecnológico en el control de la explosión de rocas en el desarrollo de Túneles. - PDF Descargar libre*. https://docplayer.es/53510369-Aspectos-geotecnicos-y-desarrollo-tecnologico-en-el-control-de-la-explosion-de-rocas-en-el-desarrollo-de-tuneles.html

Russo, G. (2014). An update of the “multiple graph” approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *41*, 74-81. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.006

Santander, C. (2019). *Metodología rock engineering system para determinar estabilidad geomecánica en taludes mineros*. Universidad de Chile.

Seguridad Minera. (2020, junio 12). Mitigación del estallido de roca en excavaciones subterráneas. *Revista Seguridad Minera*. https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/mitigacion-del-estallido-de-roca-en-excavaciones-subterraneas/

Tarcisio B, C. (2017, septiembre 6). *Risk Management in Tunnelling*.

The 13th International Congress of Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics. (2015).

Wang, Y., Li, W., Lee, P., & Tham, L. (1998). Method of fuzzy comprehensive evaluation for rockburst prediction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 17(5): 493−501.

Yan, Q., Zhang, C., Wu, W., Zhu, H., & Yang, W. (2019). 3D Numerical Simulation of Shield Tunnel Subjected to Swelling Effect Considering the Nonlinearity of Joint Bending Stiffness. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. https://doi.org/10.3311/PPci.13996

Zhao, X., Li, H., & Zhang, S. (2020). Analysis of the spalling process of rock mass around a deep underground ramp based on numerical modeling and in-situ observation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *11*(1), 1619-1637. https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1808085

Zhou, Q., Herrera, J., & Hidalgo, A. (2019). Development of a quantitative assessment approach for the coal and gas outbursts in coal mines using rock engineering systems. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *33*(1), 21-41. https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1326077

7. TRABAJOS CITADOS

[1] Y. Hatzor, B.-G. He y X.-T. Feng, «Scaling rockburst hazard using the DDA and GSI methods,» *Tunnelling and Underground Space Technology,* vol. 70, pp. 343-362, 2017.

[2] M. Diederichs, «Early assessment of dynamic rupture hazard for rockburst risk management in deep tunnel projects,» *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,* vol. 118, pp. 193-204, 2018.

[3] L. O. J. M. M. (LOM), «GUÍA SOBRE CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA,» 2015.

[4] G. Russo, «An update of the “multiple graph” approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling,» *Tunnelling and Underground Space Technology,* vol. 41, pp. 74-81, 2014.

[5] J. C. Chern, C. W. Yu y H. C. Kao, «Tunneling in Squeezing Ground,» 1998.

[6] M. S. Diederichs, «The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling,» *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 44, pp. 1082-1116, 2007.

[7] M. Bascuñán Medina, «Análisis de estabilidad y recomendaciones constructivas para riesgo de "squeezing ground" en túneles profundos,» 2019.

[8] D. U. Deere, «"Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years.",» 1989.

[9] Y. Wang, W. Li, P. Lee y L. Tham, «Method of fuzzy comprehensive evaluation for rockburst prediction [J].,» *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,* p. 17(5): 493−501, 1998.

[10] N. Barton, «Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* vol. 39, pp. 185-216, 2002.

[11] P. Kaiser, M. Diederichs, C. Martin, J. Sharp y W. Steiner, «Underground Works In Hard Rock Tunnelling And Mining,» 2000.

[12] L. Jorda, M. Rodriguez, A. Sanchez y R. Jordá, «Predicción empírica del Strainburst y Squeezing en galerías profundas,» *Ingeopres*, vol. 224, pp. 28-33, 2013.

[13] G. Barla, «Tunnelling under squeezing rock conditions,» *Eurosummer-School in Tunnel Mechanics, Innsbruck.*, pp. 169-268, 2001.