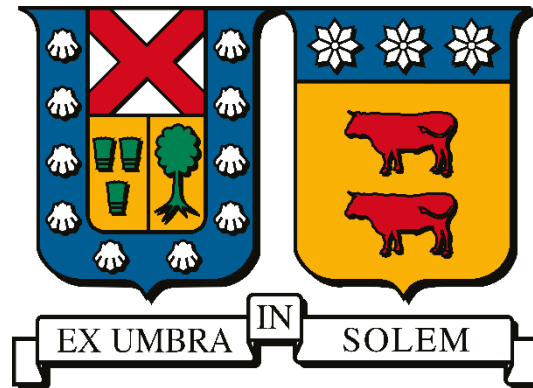


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**EVALUACIÓN DEL PELIGRO EN EVENTOS DE CAÍDA DE
ROCAS Y PROPUESTA PARA DEFINIR ZONAS DE
PELIGRO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

Presentado por

PABLO ARTURO ANDRADE TAPIA

Profesora Guía

Adeline Delonca

AGOSTO 2023

En memoria de
Rosa Adriana Navarrete Franco
Q.E.P.D

Agradecimientos

Quisiera comenzar por agradecer a mi familia. A mi madre, Rosa Tapia, que se ha sacrificado por sus hijos, por los valores transmitidos de la honradez, la verdad, la justicia, la perseverancia y muchos más, sin ella no hubiese logrado lo que he logrado. A mi hermana, Yesenia Andrade, que ha sido la mejor hermana mayor que el destino me pudo dar y que me protegió cuando la vida se nos puso difícil pero siempre con una sonrisa y risa explosiva para sortear los obstáculos. A mi sobrino, Agustín Mella quién con su personalidad, alegría y curiosidad llegó a cambiar mi mundo, creo que no hay mejor observador y cuestionador que él ya que siempre está buscando el porqué, el cómo, etc. de lo que observa a su alrededor. A mi tata, tíos, a mis primos y cuñado que siempre han estado presentes.

A mis amigos, tanto de dentro como de fuera de la universidad. A Nicole, Camila, Karina, Gerardo, Edward, Franco, Nicolás y muchos más simplemente agradecer siempre poder contar con ustedes sean cuales fueran las condiciones. A Los Finteros, Mike, Manterola, Deivid, Nacho, Hugo, Mamani y Giro que durante estos años de carrera fueron un soporte fundamental para este importante logro, con quienes pasamos innumerables noches de estudio en el NOAC y siempre preparados con comida, café y calefacción, o los cerritos donde resultaban tantas anécdotas.

También agradecer a la profesora Adeline Delonca por ser mi profesora guía que siempre estuvo disponible para mis consultas en nuestras, justas y suficientes, reuniones. También por depositar su confianza en mi trabajo para desarrollarlo de la forma más autónoma posible.

A los funcionarios de la universidad que a veces pasan desapercibidos pero cumplen un rol fundamental en el funcionamiento y hacen posible la vida dentro del campus como los auxiliares del aseo, del casino y muchos más.

Resumen

Las caídas de rocas son fenómenos repentinos que pueden ocurrir tanto en entornos naturales como antropogénicos. En la minería a cielo abierto, constituyen una parte importante de los accidentes fatales reportados, por lo que es fundamental estimar adecuadamente su peligro. En la actualidad no existe una metodología estándar o universal que se aplique en Chile, por esta razón para evaluar este peligro se propone considerar el potencial de actividad de rocas, donde se incluye la probabilidad de ocurrencia y su probabilidad propagación, y la intensidad. La probabilidad de ocurrencia se estima a partir de diversos parámetros, como el grado de fracturamiento del macizo rocoso, la calidad de la roca intacta, las propiedades y orientación de las discontinuidades, las condiciones hidráulicas, el método de excavación y el ajuste al diseño. Por otro lado, la probabilidad de propagación se evalúa considerando la geometría y propiedades tanto del talud como de los bloques de roca, utilizando el software Rocscience RocFall2 para analizar la trayectoria, el alcance y la intensidad. Cabe destacar que cada parámetro se categoriza y puntúa según su influencia en la magnitud del peligro. Conociendo la probabilidad de ocurrencia y propagación, se obtiene el potencial de actividad de rocas, y junto con la intensidad, se cuantifica el peligro y se definen zonas de exclusión en función de este.

Tabla de contenido

1.	Introducción	9
1.1	Introducción general.....	9
1.1	Motivación	9
2	Objetivos	11
2.1	Objetivo General	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3	Evaluación del peligro de caída de rocas en el mundo.....	12
3.1	Evaluación del riesgo de caídas de rocas para canteras (ROFRAQ).....	12
3.2	Envolving Rockfall Hazard Assesment (ERHA)	12
3.3	Uso de la metodología RES.....	13
3.4	Metodología basada en el riesgo para definir zonas de exclusión de deslizamiento en rajo abierto	15
3.5	Limitaciones de los métodos	15
4	Metodología	16
4.1	Potencial de actividad de rocas (PAR)	17
4.1.1	Probabilidad de ocurrencia.....	17
4.1.2	Probabilidad de propagación	19
4.2	Evaluación del peligro.....	22
5	Resultados	23
6	Interpretación y análisis	25
6.1	Aplicación de la herramienta.....	25
6.2	Influencia de la pendiente del banco	26
6.3	Influencia de la forma del bloque.....	27
6.4	Influencia de la rugosidad de la superficie.....	29
6.5	Influencia de la altura de banco y ancho de berma	31
6.6	Influencia del volumen y coeficiente de restitución.....	33
7	Conclusiones	38
8	Trabajo futuro.....	38
	Bibliografía	39

Índice de figuras

Figura 1: estadísticas de accidentes fatales durante el periodo 2000-2021	10
Figura 2: formulario de la metodología ROFRAQ creada por Alejano et al. (2008)	12
Figura 3: ejemplo de utilización de la metodología ERHA Ferrari et al. (2017).....	13
Figura 4: matriz causa-efecto para el uso de la metodología RES (Santander, 2019)	14
Figura 5: definición de zonas de exclusión una vez respondidas las seis preguntas de (Whittall et al., 2017).	15
Figura 6: categorización de los niveles de peligro considerando el desglose de la PAR y la intensidad	16
Figura 7: categorización de la rugosidad de la cara del talud.....	19
Figura 8: configuración de propiedades de material del talud	20
Figura 9: configuración de propiedades de la roca.....	21
Figura 10: montaje experimental en Rocfall2	21
Figura 11: matriz para definir los niveles de peligro	22
Figura 12: formulario para que el usuario ingrese la categorización de los parámetros para la predisposición.	23
Figura 13: formulario para que el usuario ingrese la categorización de los parámetros para la temporalidad.....	23
Figura 14: probabilidad de ocurrencia que se le entrega al usuario	23
Figura 15: formulario para que el usuario ingrese los parámetros para la propagación.....	23
Figura 16: ejemplo de uso de la herramienta para determinar el peligro	24
Figura 17: resultado de a) la probabilidad de propagación, b) potencial de actividad de rocas, c) intensidad y d) el peligro al hacer uso de la herramienta para determinar el peligro.....	25
Figura 18: código QR para acceder a la versión online de la herramienta creada	25
Figura 19: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la pendiente del banco en el peligro.	26
Figura 20: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 65°	26
Figura 21: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 75°	27
Figura 22: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 85°	27
Figura 23: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 65° y una forma de bloque irregular	28
Figura 24: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 75° y una forma de bloque irregular	28
Figura 25: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 85° y una forma de bloque irregular	28
Figura 26: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la rugosidad de la superficie en el peligro.	29
Figura 27: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como muy poca	30
Figura 28: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como media	30

Figura 29: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como muy alta	30
Figura 30: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la altura de banco y ancho de berma en el peligro.....	31
Figura 31: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 5 metros	32
Figura 32: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 11 metros	32
Figura 33: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 17 metros	32
Figura 34: parámetros seleccionados para analizar la influencia del volumen en el peligro.	33
Figura 35: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 0.1[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente.....	33
Figura 36: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 1[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente	34
Figura 37: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente	34
Figura 38: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.35 y 0.85, respectivamente	35
Figura 39: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.85, respectivamente	35
Figura 40: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente	35
Figura 41: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.53, respectivamente	36
Figura 42: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.85, respectivamente	36
Figura 43: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.98, respectivamente	36

Índice de tablas

Tabla 1: parámetros usados para el enfoque RES por los autores.	14
Tabla 2: probabilidad de ocurrencia	17
Tabla 3: clasificación de los parámetros seleccionados para la predisposición.	18
Tabla 4: nivel de predisposición a partir de los parámetros evaluados.	18
Tabla 5: clasificación de los parámetros seleccionado para la probabilidad temporal.	18
Tabla 6: probabilidad temporal	18
Tabla 7: factor de ajuste por experiencia según el criterio del evaluador.....	19
Tabla 8: parámetros utilizados para la probabilidad de propagación	19
Tabla 9: probabilidad de propagación y su categorización	20
Tabla 10: PAR y su categorización.....	22
Tabla 11: energía o intensidad y su categorización	22
Tabla 12: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el ángulo de talud.....	27
Tabla 13: comparación de resultados obtenidos cuando se varía la forma del bloque.....	29
Tabla 14: comparación de resultados obtenidos cuando se varía la rugosidad de la superficie del talud	31
Tabla 15: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el ancho de berma.....	33
Tabla 16: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el volumen del bloque.....	34
Tabla 17: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el coeficiente de restitución normal	37
Tabla 18: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el coeficiente de restitución tangencial	37

1. Introducción

1.1 Introducción general

La caída de rocas corresponde a un evento en donde se ven involucrados uno o más fragmentos del macizo rocoso, el cual es un hecho inevitable debido a la erosión que ocurre en entornos naturales (Pfeiffer & Bowen, 1989) y antropogénicos como puede ocurrir en la minería a cielo abierto. Autores como Alejano et al. (2008) y Ferrari et al. (2017) cuantifican el peligro como la probabilidad de ocurrencia que tiene el sitio, el cual lo definen en función de las condiciones del sitio. Mientras que Whittall et al. (2017) propone que el sea evaluado en función de la ubicación desde el pie del talud.

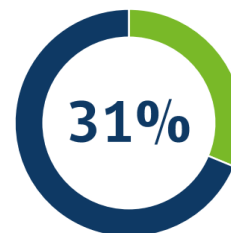
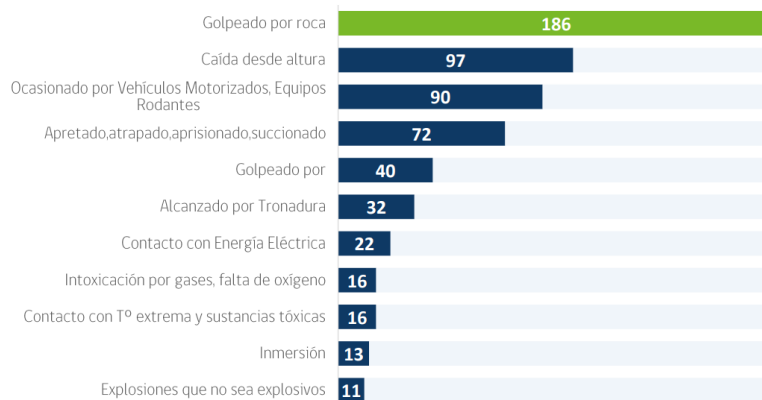
Los eventos de caída de rocas son procesos extremadamente rápidos (Ferrari et al., 2017) que puede constar de cuatro movimientos los cuales son caída libre, rebote, rodadura y deslizamiento, los cuales se produce por las condiciones del sitio que al irse erosionando la roca reduce su resistencia que luego por un factor desencadenante hace que ocurra. De acuerdo con Alejano & Oyanguren (2004), la caída libre se produce cuando no hay interferencia en la trayectoria, se desprecia la fricción con el aire, y se puede describir como una parábola. El rebote, se da cuando la roca que cae impacta contra la superficie del talud y está regido por la un coeficiente de restitución que indica la cantidad de energía disipada durante el impacto, este es un parámetro muy influyente en el modelamiento de trayectoria (Ma et al., 2021). Los movimientos de rodadura y deslizamiento dependerán de la forma del bloque y también de la superficie, cuando se tiene, por ejemplo, un bloque prismático y el impacto se da en una de sus caras, lo más probable es que se produzca deslizamiento, mientras que si impacta en una de sus aristas o vértices se dará el movimiento de rotación, también se puede producir por las irregularidades del terreno ya que si se está deslizando y se presenta una protuberancia se producirá su rotación.

1.1 Motivación

En Chile, de acuerdo con cifras del Servicio Nacional de Geología y Minería, en el periodo 2000-2021 las fatalidades a la categoría “golpeado por roca” corresponde al 31%, ver Figura 1, siendo la principal causa (SERNAGEOMIN, 2022). Por tal motivo, es importante el estudio de las caídas de rocas para prevenir fatalidades humanas, daños a equipos y pérdidas económicas. Por tal razón, es importante medir o cuantificar de alguna forma el nivel de peligro asociado a un evento de caída de rocas para que los tomadores de decisiones sean capaces de considerarlos.

Para evaluar el peligro, existen metodologías que se aplican para las condiciones particulares para las cuales fueron creadas, pero no existe una metodología definida para gestionar este peligro en Chile. Por tal motivo es necesario desarrollar una metodología para evaluar el peligro de caída de rocas en el contexto de la minería a cielo abierto en Chile, en donde se pueda (1) determinar la probabilidad que ocurra un evento, es decir, la probabilidad de ocurrencia, y (2) analizar y estimar la trayectoria que se pueda tener en función de los parámetros geométricos y las propiedades del material de la superficie del talud y el bloque rocoso para su probabilidad de propagación e intensidad. Por eso, en este trabajo, se propone una metodología para evaluar el peligro de las caídas de rocas enfocado en la minería en Chile.

PERSONAS FALLECIDAS POR TIPO DE ACCIDENTE



de los accidentes fatales ocurridos en la industria extractiva minera nacional durante los últimos 21 años han sido del tipo "Golpeado por Rocas".

Gobierno de Chile

Subdirección Nacional de Minería

Figura 1: estadísticas de accidentes fatales durante el periodo 2000-2021

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para evaluar el peligro de caída de rocas en el contexto de la minería a cielo abierto en Chile

2.2 Objetivos específicos

- i. Determinar la probabilidad de ocurrencia a partir de las condiciones del sitio
- ii. Analizar y estimar la trayectoria a partir de la variación de parámetros geométricos y las propiedades del talud y el bloque de roca
- iii. Proponer una metodología de evaluación del peligro en las diferentes áreas de trabajo, que considere las características del bloque y su posible alcance

3 Evaluación del peligro de caída de rocas en el mundo

Para poder cuantificar el peligro de caída de rocas, existen distintas metodologías que son aplicadas en diferentes partes del mundo, y que buscan estimar de forma cualitativa o semicuantitativa el peligro. Se presenta en las partes siguientes algunas de estas metodologías.

3.1 Evaluación del riesgo de caídas de rocas para canteras (ROFRAQ)

El método empírico desarrollado por Alejano et al. (2008) se aplica para canteras de roca con mucha dureza y región con clima templado, tiene un enfoque probabilístico en donde se asume que un accidente ocurre por consecuencia de una secuencia de eventos precedentes, tales como: a) existe un bloque rocoso desprendido sobre el talud; b) el bloque se encuentra cerca del equilibrio o metaestable; c) un fenómeno desencadenante puede hacer inestable el bloque; d) el bloque o su conjunto pueden llegar al pie del talud; y d) puede impactar a un trabajador. Para lo anterior, se necesita información para a) de los sets de discontinuidades, persistencia, fallas, cantidad de bloques, altura del talud, entre otros; para b) el tipo de mecanismo de falla ya sea plana, cuña o circular; para c) periodo de congelamiento, presencia de agua, entre otros; para d) características geométricas del talud; y para e) el tamaño de bloque, volumen, entre otros. A partir de esos parámetros, se obtiene un puntaje que definirá el nivel de peligro, como se muestra en la Figura 2.

Joint sets		Joint continuity		Faults		Observed overlying damage		Block & berm clemp		Blocks on slope		Slope height		A=([a]*b)+c+d+e	
Joint sets (a)		Joint continuity (b)		Faults (c)		Observed overlying damage (d)		Block & berm clemp (e)		Blocks on slope (f)		Slope height (g)		A=([a]*b)+c+d+e	
1	0.5	<1 m	0.5	10	0	Pre-split	-2	Very regular	-3	Many	1	7-10	<10 m	0.5	0<A<10
2	1	1-3 m	0.8	Small <1	0.5	Half broken	-0.5	Regular	-1	Several	3-7	50 m	0.8		
3	3	3-10 m	1	Large >1	1	None	0	Observed	0	Many	5-10	100 m	1		
4	6	10-30 m	1.2	2	1.5	Slight	1	Irregular	1	Few	6-10	100 m	1.3		
5	7	>30 m	1.4	>2	2	Excess overbreak	2.5	Irregular	2	Many	10-15	>100 m	1.5		

Geotechnical study + joint data interpretation + in situ observation/record of slope local and general instability mechanisms										Affected slope area (%)		Average (corrected) B/P	
Mechanism type (observed or estimated)										Affected slope area (%)		Average (corrected) B/P	
Mechanism type (observed or estimated)										Affected slope area (%)		Average (corrected) B/P	
Plane failure										Observed		Average	
Wedge failure										Observed		Average	
Circular failure										Observed		Average	
SP is a correction factor according to failure mechanism complexity										Observed		Average	

Max. 24h rainfall for a 50-year return period (mm)		Average 9°C frost-free period (days)		Slope water		Weathering/erosion		Blasting vibration (specific load)		C=abc+d+e	
<50 mm	0.1	<100	0.1	Dry	0	Unweathered	0	<250 g/m ³	0.1	0<C<10	
50 - 100 mm	0.5	100-200	0.4	Damp	0.1	Slightly weathered	0.1	250-400 g/m ³	0.5		
100 - 150 mm	1.5	200-250	1	Wet	0.3	Weathered	0.3	400-600 g/m ³	1		
150 - 180 mm	4	180-200	2	Drooping	0.7	Very weathered	0.7	600-1000 g/m ³	1.5		
>180 mm	6	>180	2.5	Flowing	1	Extremely weathered	1	>1000 g/m ³	2		

Block size (m)		Block volume (m ³)		Time spent at slope toe by machinery/workers		Space occupied by machinery/workers in relation to slope toe		Position of machinery/workers in relation to slope toe		E=10*[(10-E _{max})/P] ¹⁰	
SW	DL	SW	DL	SW	DL	SW	DL	SW	DL	E _{max} = (B/100) ¹⁰	0<E<10
1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	E _{min} = (B/100) ¹⁰	
1.5	15	1.5	15	1.5	15	1.5	15	1.5	15	E _{max} = (B/100) ¹⁰	
2	20	2	20	2	20	2	20	2	20	E _{min} = (B/100) ¹⁰	
2.5	25	2.5	25	2.5	25	2.5	25	2.5	25	E _{min} = (B/100) ¹⁰	

Block size (m)		Block volume (m ³)		Time spent at slope toe by machinery/workers		Space occupied by machinery/workers in relation to slope toe		Position of machinery/workers in relation to slope toe		E=10*[(10-E _{max})/P] ¹⁰	
SW	DL	SW	DL	SW	DL	SW	DL	SW	DL	E _{max} = (B/100) ¹⁰	0.00025<E<10
1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	E _{min} = (B/100) ¹⁰	
1.5	15	1.5	15	1.5	15	1.5	15	1.5	15	E _{max} = (B/100) ¹⁰	
2	20	2	20	2	20	2	20	2	20	E _{min} = (B/100) ¹⁰	
2.5	25	2.5	25	2.5	25	2.5	25	2.5	25	E _{min} = (B/100) ¹⁰	

SLOPE ROCKFALL HISTORY		SLOPE ROCKFALL HISTORY		SLOPE ROCKFALL HISTORY		SLOPE ROCKFALL HISTORY	
No recorded rockfalls	Very few rockfalls	No data	Occasional rockfalls	Several rockfalls	Some rockfalls	Frequent rockfalls	>2 reported accidents
0.75	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	

Figura 2: formulario de la metodología ROFRAQ creada por Alejano et al. (2008)

3.2 Envolving Rockfall Hazard Assesment (ERHA)

El método propuesto por Ferrari et al. (2017), es una herramienta que permite de manera rápida y con observaciones in situ poder identificar zonas de peligro, con tres niveles (bajo, medio y alto) que se definen en función de la frecuencia y la intensidad de las caídas de rocas. Se desarrolla para minas de carbón ubicadas en Australia que se caracteriza por tener grandes paredes verticales. La geología del lugar se caracteriza por roca sedimentaria que puede presentar una alta erosión, por tales motivos se consideran cinco factores para evaluar el nivel de actividad, los cuales son: grado de fracturamiento; socavamiento; posibilidad de deslizamiento debido a falla plana o cuña; deslizamiento por falla toppling; y el ajuste al diseño de la pared del talud, es decir, post tronadura cuan regular es su superficie. Cada parámetro tiene un rating de si se da la condición o no (0 o 1) y un respectivo peso

(1, 2 o 3), siendo el primero y el último los que mayor peso tienen, se pondera su rating con su peso dando lugar a un nivel de actividad preliminar el cual puede subir un nivel en caso de que en el sitio de evaluación se encuentre evidencia de bloques que han caído desde la pared. Para evaluar la intensidad se considera la resistencia que tienen distintos objetos y en caso de impacto protege a su usuario, así es como se tiene los EPP (Elementos de Protección Personal) como un casco, que resiste 50[kJ]; la estructura que protege contra caída de objetos (FOPS, por su sigla en inglés) que equivale a 11.6[kJ]; y la resistencia de las estructuras de concreto, como puede ser un portal de acceso, que resiste 300[kJ]. A partir de tener el estado de actividad y la intensidad se puede evaluar el nivel de peligro gracias al uso de una matriz de riesgo, ver Figura 3, además de poder estimar la distancia que puede alcanzar.

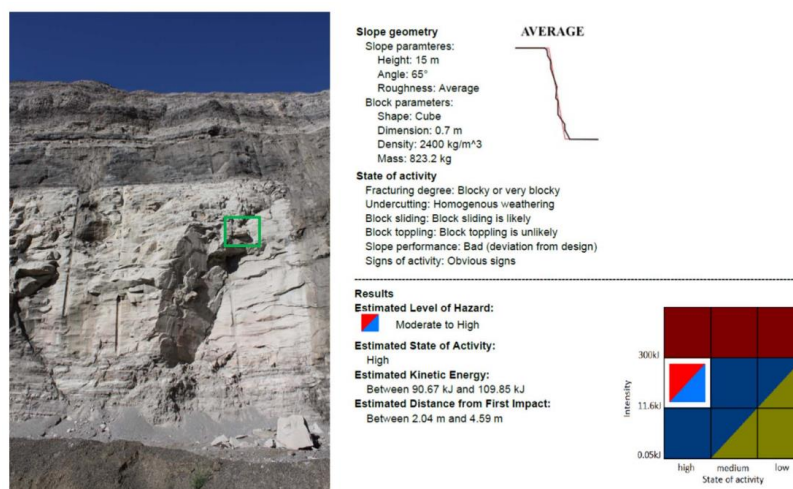


Figura 3: ejemplo de utilización de la metodología ERHA Ferrari et al. (2017)

3.3 Uso de la metodología RES

Naghadehi et al. (2013) y Santander (2019) ambos proponen el uso de la metodología RES (Rock Engineering System) para evaluar la estabilidad de taludes. La metodología RES es un enfoque causa-efecto que busca relacionar los distintos parámetros dentro de una matriz de interacción, evaluando como afecta un parámetro sobre los demás, y así sucesivamente hasta poder tener su influencia o peso en el sistema, ver Figura 4. Es así como Naghadehi, con su propuesta denominada “*A new open-pit mine instability index defined using the improved rock engineering system approach*” (MSII) hace uso de 18 parámetros y uso de red neuronal logra ponderar la influencia de cada parámetro y de esa forma definir niveles de inestabilidad. Mientras que Santander y su propuesta denominada “*Metodología Rock Engineering System para determinar estabilidad geomecánica en taludes mineros*” busca implementar y validar un índice de estabilidad geomecánica a nivel de banco, en este trabajo se establecen 10 parámetros para ser evaluados con la metodología RES pero para cuantificar las interacciones entre ellos se hace uso del método de codificación experto semicuantitativo (ESQ), por lo que se le puede categorizar y ponderar cada parámetro para obtener el índice de estabilidad que va desde muy malo a muy bueno. En la Tabla 1 se puede observar los parámetros seleccionados por cada autor, teniendo similitudes y diferencias.

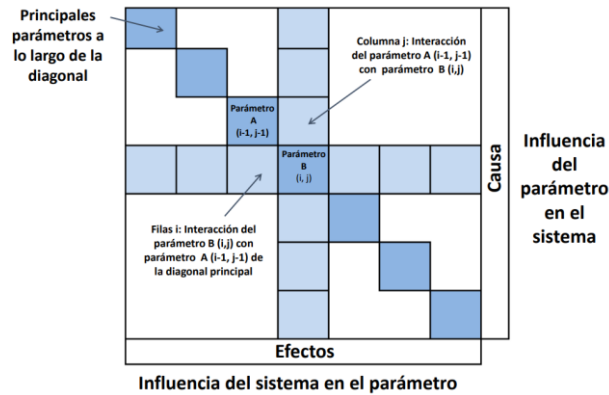


Figura 4: matriz causa-efecto para el uso de la metodología RES (Santander, 2019)

	Naghadehi et al. (2013)		Santander (2019)
P1	Tipo de roca	P1	Propiedades de roca intacta
P2	Resistencia de la roca intacta	P2	Propiedades de discontinuidades
P3	RQD	P3	Orientación estructural
P4	Meteorización	P4	Clasificación de macizo rocoso GSI
P5	régimen tectónico	P5	Condiciones sísmicas
P6	condición agua subterránea	P6	Condiciones hidráulicas
P7	Numero de set de discontinuidades mayores	P7	Perforación de pozos que definen berma
P8	Persistencia de discontinuidades	P8	Tronaduras a línea de diseño
P9	Espaciamiento de discontinuidades	P9	Vibraciones de tronaduras
P10	Orientación de discontinuidades	P10	Carguío a línea de diseño
P11	Apertura de discontinuidades		
P12	Rugosidad de discontinuidades		
P13	Relleno de discontinuidades		
P14	Angulo talud		
P15	Altura Talud		
P16	método de tronadura		
P17	Precipitación		
P18	Inestabilidades previas		

Tabla 1: parámetros usados para el enfoque RES por los autores.

3.4 Metodología basada en el riesgo para definir zonas de exclusión de deslizamiento en rajo abierto

La propuesta de Whittall et al. (2017) es una metodología que tiene un marco probabilístico para definir zonas de exclusión en donde podría existir la probabilidad de un deslizamiento y la probabilidad de que sea de muy rápido a extremadamente rápido, y el cual el enfoque está en la reducción del riesgo de pérdida de vidas. Para lo anterior, se define una malla en el fondo del pit, para cada celda se evalúa el riesgo, el cual consiste en responder a seis preguntas: ¿Cuál es la probabilidad que un deslizamiento ocurra en un intervalo de tiempo dado?; si el deslizamiento ocurre ¿Cuál es la probabilidad que sea de velocidad muy rápido a extremadamente rápido?; si el deslizamiento es rápido a extremadamente rápido ¿Cuál es la probabilidad que el deslizamiento alcance algún equipo?; si alcanza un equipo ¿Cuál es la probabilidad que el operador se encuentre operando el equipo?; si está operando el equipo ¿Cuál es la probabilidad que no alcance a evacuar antes de que el deslizamiento lo alcance?; y si el operador no alcanza a evacuar ¿Cuál es la probabilidad que resulte muerto? De esta forma se obtiene una zona de exclusión para cada punto de la malla, como se muestra en la Figura 5. Pero para responder estas preguntas se necesita hacer un análisis de cada sitio para poder trabajar en el marco probabilístico que funciona esta metodología

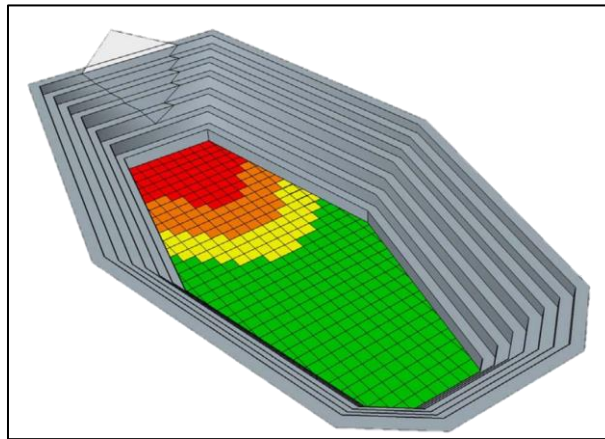


Figura 5: definición de zonas de exclusión una vez respondidas las seis preguntas de (Whittall et al., 2017).

3.5 Limitaciones de los métodos

Hay que tener en cuenta el conocimiento y la experiencia de quién está evaluando, es así como Delonca et al. (2016) estudia cómo es la evaluación del peligro según distintos grupos de evaluadores como estudiantes, investigadores y expertos. Se concluye que estos grupos de estudio no tienen diferencia al estimar el peligro, pero cuando se trata de un sitio en particular los expertos pueden desenvolver mejor, ya que los demás grupos de estudio, les es difícil estimar la probabilidad temporal por falta de experiencia.

Varios autores (Alejano et al., 2008; Ferrari et al., 2017; Pfeiffer & Bowen, 1989) consideran que la trayectoria está controlada por la geometría y propiedades del material del talud, y del tamaño, forma y propiedades del material del bloque rocoso. Una de las propiedades más importante es el coeficiente de restitución, tanto tangencial como normal, ya que este indica la disipación de energía de la colisión, es decir, el rebote que tendrá el bloque rocoso, por consiguiente, su alcance como lo indica Asteriou & Tsiambaos (2018). También la forma del bloque es un factor importante, ya que de acuerdo con Ma et al. (2021) que estudió la trayectoria con tres diferentes cuerpos (cuboide, cubo octaedro

regular), esta cambia en función del lugar de impacto del cuerpo, cambiando si es en una cara, vértice o arista.

Las metodologías analizadas, la mayoría, se basan en la predisposición del sitio y no estudian más allá de la trayectoria que puede tomar un bloque rocoso, en dos o tres dimensiones. Su aplicación puede ser exclusiva para sitios donde se estudiaron, como la metodología ERHA aplicada para Australia, pero la forma de comunicar el peligro de manera sencilla y clara hace que sea una guía para implementar en Chile.

Por tal razón, es necesario considerar las condiciones del sitio, que indica la predisposición que existe para la ocurrencia de estos eventos y el tiempo que puede transcurrir hasta que ocurran, a lo que se denomina probabilidad de ocurrencia. Por otra parte, si hay un potencial de caída de rocas, es necesario determinar su trayectoria, que depende de las propiedades y geometría tanto del sitio como del bloque rocoso, que se denomina probabilidad de propagación. Teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia y probabilidad de propagación, se define el “Potencial de actividad de rocas” el cual indica la probabilidad de que una caída de rocas ocurra y que este alcance cierta distancia al pie del talud. Para finalmente, en conjunto con la intensidad determinar niveles de peligro.

Por eso, en este trabajo se propone una metodología para evaluar el peligro de caída de rocas, basada en la en trabajos publicados, considerando tanto la probabilidad de ocurrencia como la propagación y la intensidad que pueda alcanzar, aplicado al caso de la minería en Chile ya que como se expuso anteriormente, es exclusivo para cada zona de estudio.

4 Metodología

Para evaluar el peligro se considera el potencial de caídas de rocas (PAR) y la intensidad, los cuáles dependen de diferentes parámetros como son las condiciones, geometría y propiedades del sitio. Se categoriza por su nivel de probabilidad e intensidad, de forma que sea una forma fácil de interpretar, como se muestra en la Figura 6.

Peligro		PAR								
		Probabilidad Ocurrencia								
		Bajo			Medio			Alto		
		Probabilidad Propagación			Probabilidad Propagación			Probabilidad Propagación		
		Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Intensidad	Bajo	B	B	M	B	M	M	M	A	A
	Medio	B	M	M	M	M	A	A	A	A
	Alto	M	M	A	M	A	A	A	A	A

Figura 6: categorización de los niveles de peligro considerando el desglose de la PAR y la intensidad

4.1 Potencial de actividad de rocas (PAR)

El potencial de actividad de rocas se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de caída de rocas y que este se propague cierta distancia desde el pie del talud. Para determinar esta probabilidad, es necesario considerar tanto la probabilidad de ocurrencia como la trayectoria que podría seguir el evento en caso de que ocurra, es decir, su probabilidad de propagación, como se muestra en la Ecuación (1).

$$PAR = PO \cdot PP \quad (1)$$

Donde:

- PO corresponde a la probabilidad de ocurrencia
- PP corresponde a la probabilidad de propagación

En este contexto, el enfoque del potencial de actividad de rocas busca, de manera sencilla y utilizando la metodología ERHA como guía, complementar la probabilidad de ocurrencia con la probabilidad de propagación. De esta forma, junto con la intensidad, se pueden determinar los niveles de peligro asociados.

4.1.1 Probabilidad de ocurrencia

Para evaluar la probabilidad de ocurrencia, se considera la predisposición del sitio y la temporalidad en la ocurrencia de las caídas de rocas, como se muestra en la Ecuación (2), y el resultado se categoriza como se muestra en la Tabla 2

$$PO = \frac{\text{predisposición} \cdot \text{temporalidad}}{100} \quad (2)$$

Puntuación	0-24	25-49	50-69	70-79	80-100
P Ocurrencia	Bajo	Medio Bajo	Medio	Medio Alto	Alto

Tabla 2: probabilidad de ocurrencia

La predisposición del sitio se evalúa a través siete parámetros, ver Tabla 3, que se categorizan y a los cuales se asigna un respectivo peso de acuerdo con Santander (2019). Una vez que se categoriza cada uno de los parámetros, se calcula su predisposición con la Ecuación (3), la cual tiene un resultado entre 0 y 100, donde dependiendo de la puntuación obtenida se define el nivel predisposición del sitio, ver Tabla 4.

$$Predisposición = \sum_{i=1}^7 \frac{w_i \cdot C_i}{5} \quad (3)$$

		Categorización y puntajes					
Parámetros		Peso	5	4	3	2	1
Grado de fracturamiento (GSI) GSI		18	Muy mala calidad 0-20	Calidad mala 20-40	Calidad regular 40-60	Buena calidad 60-80	Muy buena calidad 80-100
Calidad de la roca intacta (UCS) [Mpa]		14	Poco resistente 25-35[Mpa]	Moderadamente resistente 35-50[Mpa]	Resistente 50-100[Mpa]	Muy resistente 100-250[Mpa]	Extremadamente resistente >250[Mpa]
Propiedades de discontinuidades	Rugosas	12	Suave	Ondulosa	Un poco rugosa	Rugosa	Muy rugosa
	Con relleno		Relleno blando >5[mm]	Relleno blando <5[mm]	Relleno duro >5[mm]	Relleno duro <5[mm]	Ninguno
	Apertura		Muy abierta >5[mm]	Medianamente abierta 1-5[mm]	Abierta 0.1-1[mm]	Medianamente cerrada 0.1[mm]	Cerrada
Orientación de discontinuidades ad = rumbo discontinuidad at = rumbo del talud Bd = manto discontinuidad Bt = manto talud		12	Muy desfavorable Bt/2<Bd<Bt ad- at<30°	Desfavorable Bt/4<Bd/2 y ad- at<30°	Regular 0<Bd<Bt/4 o ad- at>30°	Favorable Bd>Bt y ad- at<30°	Muy favorable Bd>Bt y ad- at>30°
Condiciones Hidráulicas		12	Agua fluyendo	Goteando	Húmedo	Ligeramente húmedo	Seco
Método de excavación		18	Tronaduras sin precorte ni filas buffer	Tronaduras sin precorte con 1 fila buffer	Tronaduras con precorte y sin filas buffer	Tronaduras con precorte y con 1 fila buffer	Tronaduras con precorte y doble fila buffer
Carguo a línea de diseño		14	Bloques sueltos en la cara del banco y falta carguo	Deuda en la parte superior	Sobreexcavado en la base del banco	Se aprecian medias cañas pero falta estabilización	Media cañas y pared estabilizadas

Tabla 3: clasificación de los parámetros seleccionados para la predisposición.

Puntuación	0-24	25-49	50-69	70-79	80-100
Nivel de predisposición	Bajo	Medio Bajo	Medio	Medio Alto	Alto

Tabla 4: nivel de predisposición a partir de los parámetros evaluados.

Luego, para la probabilidad temporal asociada al sitio, para esto se consideran cuatro parámetros, a los que se le asigna un peso y categorización, ver Tabla 5, con el respectivo ajuste de acuerdo con Santander (2019). Una vez que se evalúa, siguiendo la Ecuación (4), obteniendo un resultado de 0 a 100, se cataloga en cinco categorías, ver Tabla 6, y de acuerdo con Delonca et al. (2016), es necesario considerar la experiencia de quién evalúa, por tal razón la a la temporalidad preliminar se le añade el *Factor Experiencia*, Ecuación (5), el parámetro de experiencia se puede ver en la Tabla 7. Para dar como resultado la probabilidad de temporalidad o temporal.

$$Temporalidad\ preliminar = \sum_{i=1}^4 \frac{w_i \cdot P_i}{5} \quad (4)$$

$$Temporalidad = Temporalidad\ preliminar + Factor\ experiencia \quad (5)$$

Categorización y puntajes						
Parametro	Peso	5	4	3	2	1
Condiciones Hidráulicas	21	Agua fluyendo	Goteando	Húmedo	Ligeramente húmedo	Seco
Método de excavación	31	Tronaduras sin precorte ni filas buffer	Tronaduras sin precorte con 1 fila buffer	Tronaduras con precorte y sin filas buffer	Tronaduras con precorte y con 1 fila buffer	Tronaduras con precorte y doble fila buffer
Carguo a linea de diseño	24	Bloques sueltos en la cara del banco y falta carguo	Deuda en la parte superior	Sobreexcavado en la base del banco	Se aprecian medias cañas pero falta estabilización	Media cañas y pared estabilizadas
Distancia a tronadura	24	≤1/4 Campo cercano	≤1/2 Campo cercano	≤Campo cercano	≤6/4 Campo lejano	≥ 6/4 Campo lejano

Tabla 5: clasificación de los parámetros seleccionado para la probabilidad temporal.

Puntuación	0-24	25-49	50-69	70-79	80-100
Temporalidad	Bajo	Medio Bajo	Medio	Medio Alto	Alto
Tiempo	>1 año	<1 año	<6 meses	<4 semanas	<2 semanas

Tabla 6: probabilidad temporal

Ajuste por experiencia	Muy Poco Conservador	Poco Conservador	Neutral	Conservador	Muy Conservador
Puntaje	-20	-10	0	20	20

Tabla 7: factor de ajuste por experiencia según el criterio del evaluador

4.1.2 Probabilidad de propagación

La probabilidad de propagación dependerá exclusivamente de las características del sitio y las características del bloque rocoso. Se consideran los parámetros presentados en la sección 3 de este artículo, y que son de fácil identificación en terreno. Dicho lo anterior, se consideran ocho parámetros los cuales se muestran en la Tabla 8.

ID	Parámetro	Unidad	Categorización		
PP1	Pendiente banco	[°]	65	75	85
PP2	Ancho berma	[m]	5	11	17
PP3	Altura banco	[m]	10	20	30
PP4	Coefficiente de restitución normal	[-]	0.48	0.35	0.53
PP5	Coefficiente de restitución tangencial	[-]	0.53	0.85	0.99
PP6	Forma de bloques	[-]	Regular		Irregular
PP7	Volumen	[m3]	0.1	1	3
PP8	Rugosidad	[-]	muy poca	media	muy alta

Tabla 8: parámetros utilizados para la probabilidad de propagación

Para que sea aplicable en Chile, se categorizan los diferentes parámetros a partir de varias fuentes bibliográficas. Los rangos de los parámetros PP1, PP2 y PP3 se definen según Díaz (2017 y Parra (2015). Los rangos de los parámetros PP4 y PP5 se hacen según Restrepo et al. (2017). Para el parámetro PP6 se considera lo propuesto por Ma et al. (2021). El parámetro PP7 se categoriza a partir de Russo et al. (2015). Finalmente el parámetro PP8 que corresponde a una interpretación visual propuesta por Ferrari et al. (2017), como se muestra en la Figura 7.

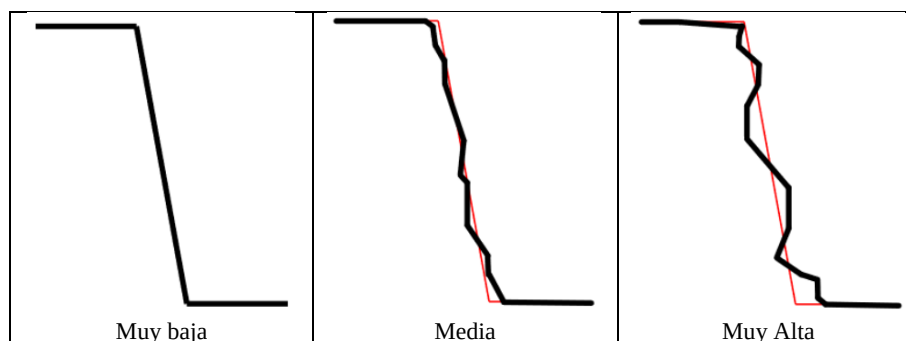


Figura 7: categorización de la rugosidad de la cara del talud

Una vez que se tiene cada uno de los parámetros categorizados, se hace uso del software Rocfall2 de Rocscience, el cual permite hacer un análisis estadístico en dos dimensiones para ayudar en la evaluación del peligro en caída de roca, ya que permite hacer un análisis como masa puntual o como cuerpo rígido, este último es el que se aplica durante el estudio. Además, permite determinar la energía, velocidad, altura de rebote y distancia de desplazamiento de las rocas.

Para hacer uso del software, primero es necesario diseñar las diferentes geometrías que se puede producir consideradas en los parámetros PP1, PP2 y PP3, en un software como AutoCAD. Segundo, se configura el método de análisis como cuerpo rígido y se importan las geometrías diseñadas

anteriormente. Tercero, se configura los parámetros de las propiedades del talud, como son PP4, PP5 y PP8, ver Figura 8, para PP4 y PP5 se considera una desviación estándar de 0.2 como plantean Asteriou & Tsiambaos (2018) ya que es un parámetro importante que controla el rebote, mientras que para PP7 el espaciamiento será de 0.5 metros y la amplitud tendrá una desviación estándar, con respecto a la línea de la cara del talud, de 0.15 y 0.3 para rugosidad media y muy alta, como se muestra en la Figura 7, respectivamente. Cuarto, se configuran las propiedades de la roca, ver Figura 9, donde se considera una densidad correspondiente a diorita; su masa dependerá del volumen, PP7, que se le asigne, mientras que las formas de bloques, PP6 se consideran una esfera y rombo para asimilar entre regular e irregularmente. Quinto, se ubican colectores de datos al pie del talud, los cuales están distanciados cada 5 metros y registran cantidad de rocas, energía y velocidad que pasa por ellos, como se muestra en la Figura 10. Sexto, se ubica a 0.5 metros desde la cresta del banco más alto el semillero de rocas, de donde caerán influenciados solamente por la gravedad, 5000 rocas.

Luego, se crea un script de Python para que crear dos bases de datos donde almacene los obtenidos de cada colector, ya que los entrega en formato HTM. La primera base de datos será para la cantidad de rocas o probabilidad de propagación, su categorización se muestra en la Tabla 9, y la segunda será para guardar la energía media. La información de estas bases de datos, al igual que los colectores, es cada 5 metros. Esto permite tener una medición discreta de lo que sucede.

Probabilidad de propagación	5%-25%	25%-50%	50%-100%
Categorización	Bajo	Medio	Alto

Tabla 9: probabilidad de propagación y su categorización

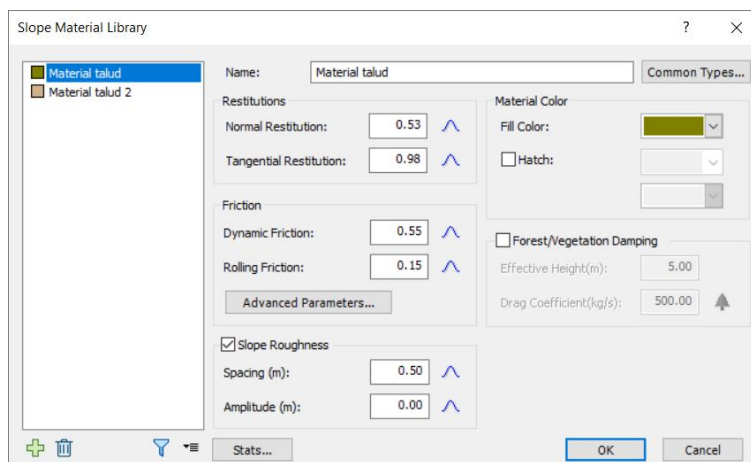


Figura 8: configuración de propiedades de material del talud

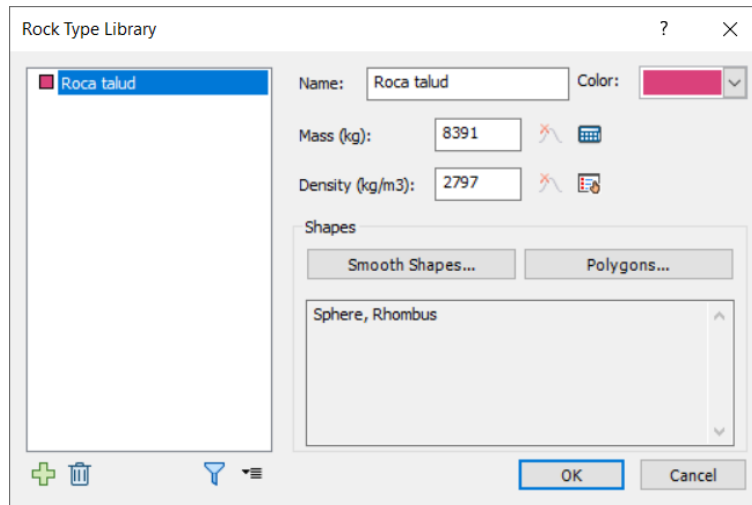


Figura 9: configuración de propiedades de la roca

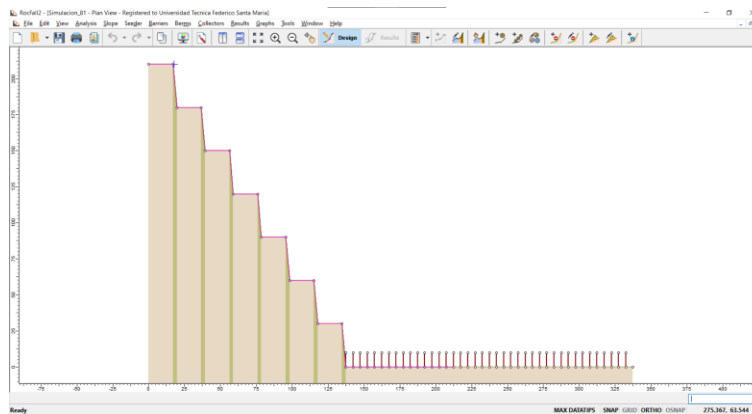


Figura 10: montaje experimental en Rocfall2

4.2 Evaluación del peligro

Para evaluar el peligro se considera el potencial de actividad de rocas y la intensidad o energía media. Para calcular el PAR se hace con la Ecuación (1), en la Tabla 10 se muestra la categorización en función del resultado obtenido.

Potencial de actividad de rocas	0%-25%	25%-50%	50%-100%
Categorización	Bajo	Medio	Alto

Tabla 10: PAR y su categorización.

Luego, para la intensidad o energía media que alcanza el bloque de roca en función de la distancia desde el pie del talud. Esto se evalúa considerando los niveles de energía propuestos por Ferrari et al. (2017) los cuales definen tres umbrales: 0.05[kJ], 11.6[kJ] y 300[kJ]. Estos umbrales, corresponden respectivamente, a la resistencia al impacto de cascos, estructura que protegen contra caída de objetos (FOPS) y portales de concreto, respectivamente, como se muestra en la Tabla 11.

Energía [kJ]	0.05-11.6	11.6-300	300+
Categorización	Mínima	Media	Máxima

Tabla 11: energía o intensidad y su categorización

Finalmente, se tiene tanto el potencial de actividad de rocas y la intensidad para cada punto es necesario cuantificar el peligro, y para comunicarlo de manera efectiva, se clasifica usando una matriz de peligro al igual que Ferrari et al. (2017) el cual está basado en el Código Suizo (Raetz et al., 2002) para comunicar el nivel de peligro a las personas, ver Figura 11. De esta forma teniendo ambas variables, es posible definir tres niveles de peligro cada cinco metros desde el pie del talud.

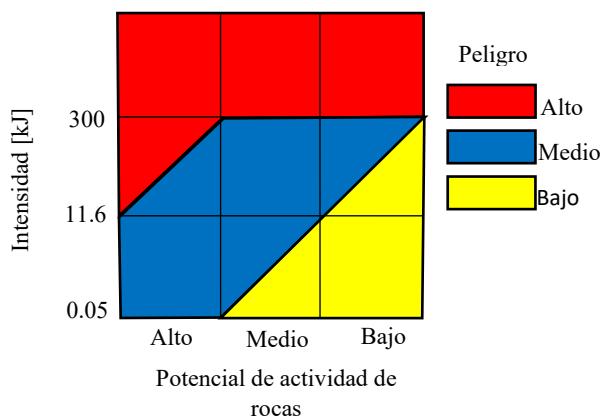


Figura 11: matriz para definir los niveles de peligro

5 Resultados

El resultado principal que se tiene es la creación de una herramienta que permita de manera fácil y sencilla con información que se tenga del terreno ya sea in situ o previamente, es así como se puede ingresar los parámetros necesarios para obtener el nivel de peligro. Así que se crean formularios donde se despliegan listas para clasificar los parámetros; en la Figura 12 se le pide al usuario que complete el campo Categorización, con las mismas categorías que la Tabla 3 y se le entrega el resultado de predisposición usando la Ecuación (3). Luego, se le pide al usuario rellenar el campo de *Categorización* para probabilidad temporal o temporalidad, ver Figura 14, siguiendo las categorías que contiene la Tabla 5, además se considera el ajuste por experiencia que se muestra en la Tabla 7, entregando como resultado la probabilidad de ocurrencia para los parámetros categorizados, ver Figura 14.

Predisposición					
ID	Parámetro	Categorización	Puntaje	Peso	Cálculo
NA1	Grado de fracturamiento (GSI)		0	18	0
NA2	Calidad de roca intacta (UCS)		0	14	0
NA3	Propiedades discontinuidades	Rugosidad	0	12	0
		Relleno	0		
		Apertura	0		
NA4	Orientación discontinuidades		0	12	0
NA5	Condiciones hidráulicas		0	12	0
NA6	Método de excavación		0	18	0
NA7	Ajuste diseño		0	14	0
			Predisposición Bajo 0		

Figura 12: formulario para que el usuario ingrese la categorización de los parámetros para la predisposición.

Temporalidad					
ID	Parámetro	Categorización	Puntaje	Peso	Cálculo
T1	Condiciones Hidráulicas		0	21	0
T2	Método de excavación		0	31	0
T3	Ajuste diseño		0	24	0
T4	Distancia a tronadura		0	24	0
			Ajuste por experiencia 0		
			Temporalidad Bajo 0		

Figura 13: formulario para que el usuario ingrese la categorización de los parámetros para la temporalidad.

			Probabilidad de ocurrencia Bajo 0		
--	--	--	--	--	--

Figura 14: probabilidad de ocurrencia que se le entrega al usuario

Por otra parte, para la probabilidad de propagación también se le pide al usuario que rellene el campo *Categorización* con los parámetros que se ajusten al terreno, ver Figura 15, y tal como se mostró anteriormente las categorías en la Tabla 8, entregando gráficamente el resultado de la probabilidad de propagación.

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorización
PP1	Altura de banco	[m]	
PP2	Ancho de berma	[m]	
PP3	Pendiente de banco	[°]	
PP4	Forma del bloque	[-]	
PP5	Coeficiente restitución normal	[-]	
PP6	Coeficiente restitución tangencial	[-]	
PP7	Rugosidad	[-]	
PP8	Volumen	[m3]	

Figura 15: formulario para que el usuario ingrese los parámetros para la propagación

A continuación, en la Figura 16, se muestra un ejemplo de uso de la herramienta. Se ha completado el formulario de predisposición y temporalidad, obteniendo como resultado la probabilidad de ocurrencia. Además, se ha llenado el formulario de propagación, el cual genera la Figura 17a. Esta figura muestra las categorías de la Tabla 9, representadas con una escala de colores que indican la distancia a la que puede propagarse un bloque rocoso.

Luego, se presenta el potencial de actividad de rocas en la Figura 17b, que permite visualizar la probabilidad de que ocurra un evento y alcance un punto específico. Esta probabilidad es menor que la de propagación. Asimismo, se muestra la intensidad o energía media que puede alcanzar en la Figura 17c.

Finalmente, se expone el nivel de peligro en la Figura 17d, categorizado según la matriz de peligro. De esta forma, se muestra el nivel de peligro cada cinco metros. Esto brinda una evaluación detallada del peligro en la zona en cuestión. En la Figura 18 se puede escanear un código QR para acceder y probar la herramienta.

Predisposición				
ID	Parámetro	Categorización	Puntaje	Peso
NA1	Grado de fracturamiento (GSI)	Muy mala calidad (0-20)	5	18
NA2	Calidad de roca intacta (UCS)	Poco resistente	5	14
NA3	Propiedades discontinuidades	Rugosidad Un poco rugosa	3	12
		Relleno Relleno duro >5[mm]	3	
		Apertura Medianamente abierta 1-5[mm]	4	
NA4	Orientación discontinuidades	Desfavorable	4	12
NA5	Condiciones hidráulicas	Goteando	4	12
NA6	Método de excavación	Tronaduras con precorte y doble fila buffer	1	18
NA7	Ajuste diseño	Sobreexcavado en la base del banco	3	14
Predisposición			Medio Alto	71

Temporalidad				
ID	Parámetro	Categorización	Puntaje	Peso
T1	Condiciones Hidráulicas	Goteando	4	21
T2	Método de excavación	Tronaduras con precorte y doble fila buffer	1	31
T3	Ajuste diseño	Sobreexcavado en la base del banco	3	24
T4	Distancia a tronadura	≤1/4 Campo cercano	5	24
Ajuste por experiencia			Neutral	0
Temporalidad			Medio	61

Probabilidad de ocurrencia			Medio Bajo	44
----------------------------	--	--	------------	----

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorización
PP1	Altura de banco	[m]	30
PP2	Ancho de berma	[m]	11
PP3	Pendiente de banco	[°]	75
PP4	Forma del bloque	[-]	Regular
PP5	Coefficiente restitución norm	[-]	0.48
PP6	Coefficiente restitución tange	[-]	0.98
PP7	Rugosidad	[-]	media
PP8	Volumen	[m3]	3

Figura 16: ejemplo de uso de la herramienta para determinar el peligro

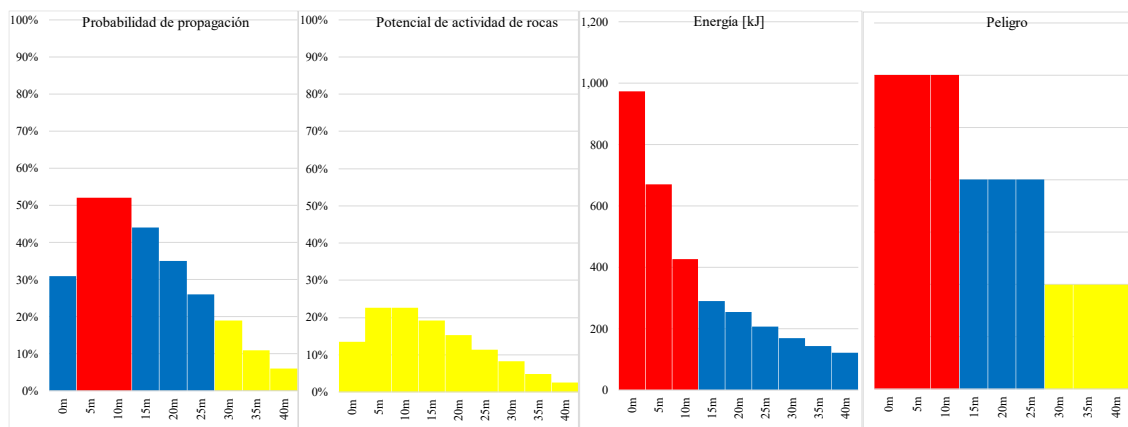


Figura 17: resultado de a) la probabilidad de propagación, b) potencial de actividad de rocas, c) intensidad y d) el peligro al hacer uso de la herramienta para determinar el peligro



Figura 18: código QR para acceder a la versión online de la herramienta creada

6 Interpretación y análisis

6.1 Aplicación de la herramienta

La herramienta resulta de fácil uso para un supuesto usuario final, sin embargo, hay que destacar que está limitado por la base de datos creadas para la probabilidad de propagación, ya que está hecha en función de los parámetros que se tienen definidos en la Tabla 8, ya que para la probabilidad de ocurrencia se abarcan parámetros que son generales y no tan específicos. Por tal razón, la probabilidad de ocurrencia se podría aplicar a cualquier sitio para evaluar la situación e indicar, de ser requerido, más estudios acerca de la posible trayectoria.

Por otra parte, la probabilidad de propagación se encuentra limitada por la altura del banco, ancho de berma y volumen, ya que si se necesita estudiar otras configuraciones no se puede ya que no están cargados en la base de datos, y no se puede afirmar que se pueda hacer una interpolación o extrapolación de los resultados.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, el uso de la herramienta logra comunicar de manera sencilla el peligro en función de la distancia, también permite observar por separado la probabilidad de propagación, el potencial de actividad de rocas e intensidad, lo que hace que los tomadores de decisiones formarse una opinión más completa, además que los umbrales presentados para la probabilidad de ocurrencia, probabilidad de propagación e intensidad se podrían modificar en caso

de que se requiera, ya que se puede tener diferentes niveles de tolerancia y querer ajustar para cada caso.

6.2 Influencia de la pendiente del banco

Los factores que controlan el potencial de actividad de rocas es la probabilidad de propagación ya que, si se mantiene constante la probabilidad de ocurrencia en una probabilidad media, se observa como al variar la pendiente, y manteniendo los demás factores constantes, ver Figura 19, a medida que aumenta la pendiente, el potencial de actividad de rocas va disminuyendo, lo que explica porque es proporcional a la probabilidad de propagación. Esto quiere decir, que a un menor ángulo más se proyectan las rocas fuera del talud, sin embargo, al aumentar el ángulo aumenta la energía alcanzada para un mismo punto, y esto implica que también aumentará el peligro en la misma proporción. Esto se puede visualizar en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22. En la Tabla 12, se muestra una comparación y se observa como al aumentar el ángulo del talud disminuyan la cantidad de rocas que alcanzan el pie del talud, pasando del 52% al 20% también se observa que hay un aumento de las zonas de peligro categorizadas como alto.

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorización
PP1	Altura de banco	[m]	10
PP2	Ancho de berma	[m]	5
PP3	Pendiente de banco	[°]	
PP4	Forma del bloque	[-]	Irregular
PP5	Coefficiente restitución normal	[-]	0.48
PP6	Coefficiente restitución tangencial	[-]	0.85
PP7	Rugosidad	[-]	media
PP8	Volumen	[m3]	3

Figura 19: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la pendiente del banco en el peligro.

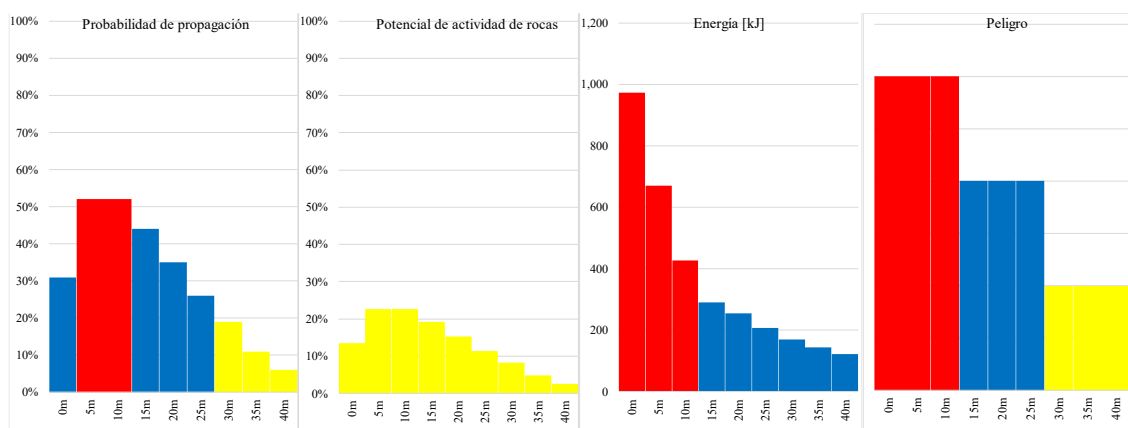


Figura 20: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 65°

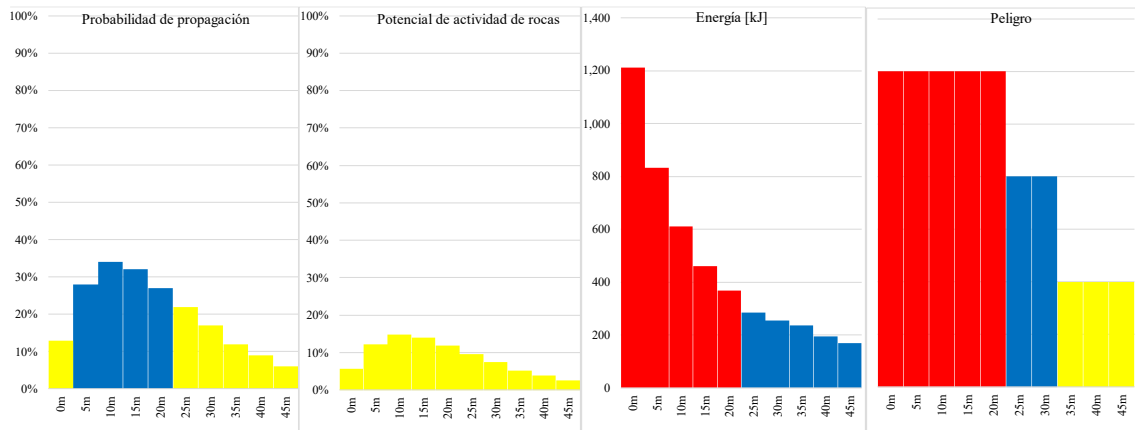


Figura 21: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 75°

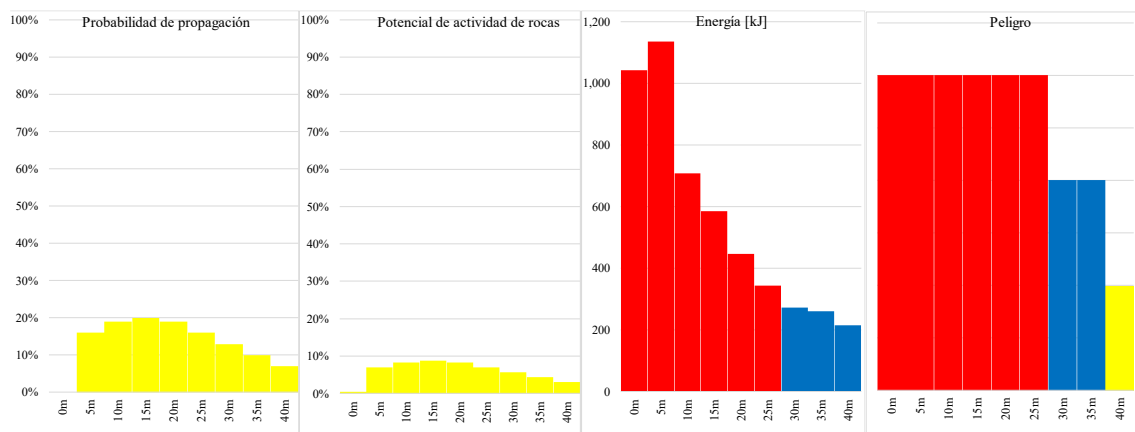


Figura 22: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 y una pendiente de banco de 85°

	Unidad	Figura 20	Figura 21	Figura 22
Energía media	[kJ]	434	504	545
Energía máx.	[kJ]	972	1211	1136
Distancia máx.	[m]	40	45	40
Propagación	[-]	52%	34%	20%
PAR	[-]	23%	15%	9%
Zonas de peligro	[-]	9	10	9
Bajo	[-]	3	3	1
Medio	[-]	3	2	2
Alto	[-]	3	5	6

Tabla 12: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el ángulo de talud

6.3 Influencia de la forma del bloque

Otro parámetro que controla el potencial de la actividad de rocas y por ende el peligro que puede alcanzar es la forma del bloque, ya que tal como indica Ma et al. (2021), para un bloque irregular el deslizamiento, rodadura y rebote dependerá de la zona de impacto de la roca con la superficie, y es así como, para el mismo ejemplo anterior, se cambia la forma del bloque por una forma regular, se observa como existe una mayor propagación que con una forma irregular, que implica un mayor potencial de actividad de rocas, y se alcanzan menores niveles de intensidad o energía pero siguen siendo alto para los umbrales definidos, lo que se traduce en que los niveles de peligro siguen siendo

controlados por la pendiente del banco, esto se visualiza al comparar la Tabla 12 con la Tabla 13 ya que se observa que la energía media disminuye en cada caso a pesar de no haber cambio significativo en las zonas de peligro.

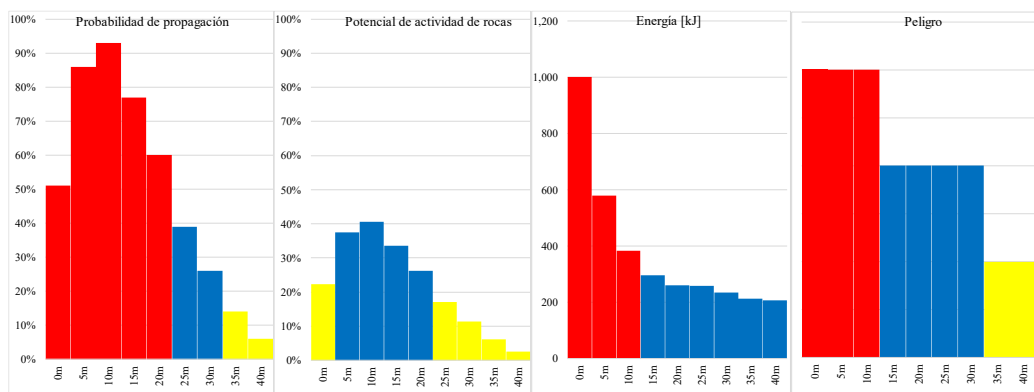


Figura 23: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 65° y una forma de bloque irregular

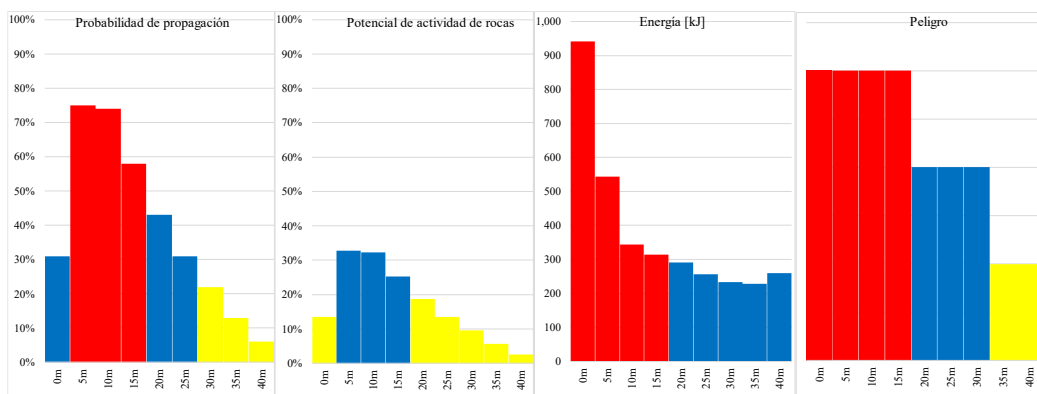


Figura 24: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 75° y una forma de bloque irregular

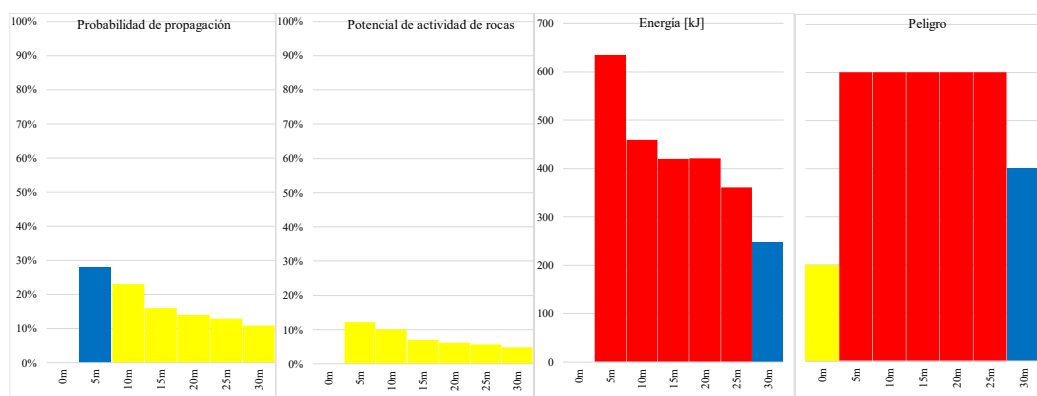


Figura 25: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 19 con una pendiente de banco de 85° y una forma de bloque irregular

	Unidad	Figura 23	Figura 24	Figura 25
Energía media	[kJ]	432	407	461
Energía máx.	[kJ]	1001	941	635
Distancia máx.	[m]	40	40	30
Propagación	[-]	93%	75%	28%
PAR	[-]	41%	33%	12%
Zonas de peligro	[-]	9	9	7
Bajo	[-]	2	2	1
Medio	[-]	4	3	1
Alto	[-]	3	4	5

Tabla 13: comparación de resultados obtenidos cuando se varía la forma del bloque

6.4 Influencia de la rugosidad de la superficie

Para la rugosidad de la cara del talud, se observa que para una rugosidad categorizada como muy poca se observa una alta propagación, pero con un alcance acotado, por ende, el potencial de actividad de rocas permanece proporcional a la probabilidad de ocurrencia que se mantiene constante en una categoría media. Mientras que, si se aumenta la rugosidad a media, se observa una alta propagación y que su alcance aumenta respecto a la categoría anterior y las zonas de peligro aumentan levemente. Si se aumenta la rugosidad a muy alta, no se observa una gran variación con respecto a rugosidad media, se puede deber que al ser una variable cualitativa es más complejo retratarla como parámetro dentro del software, ver Tabla 14. Sin embargo, la influencia que tiene la rugosidad sobre el alcance máximo de las zonas de peligro es notorio cuando se considera. En la Figura 26, se muestran los parámetros considerados para ejemplificar lo anterior, y en la Figura 27, Figura 28 y Figura 29 los resultados obtenidos, esta misma tendencia siguen las demás configuraciones posibles.

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorizació
PP1	Altura de banco	[m]	20
PP2	Ancho de berma	[m]	11
PP3	Pendiente de banco	[°]	65
PP4	Forma del bloque	[-]	Regular
PP5	Coeficiente restitución normal	[-]	0.48
PP6	Coeficiente restitución tangencial	[-]	0.85
PP7	Rugosidad	[-]	
PP8	Volumen	[m3]	1

Figura 26: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la rugosidad de la superficie en el peligro.

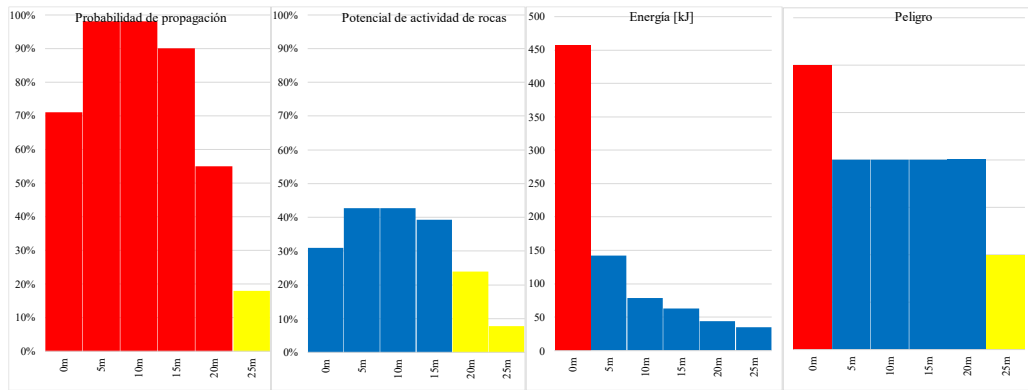


Figura 27: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como muy poca

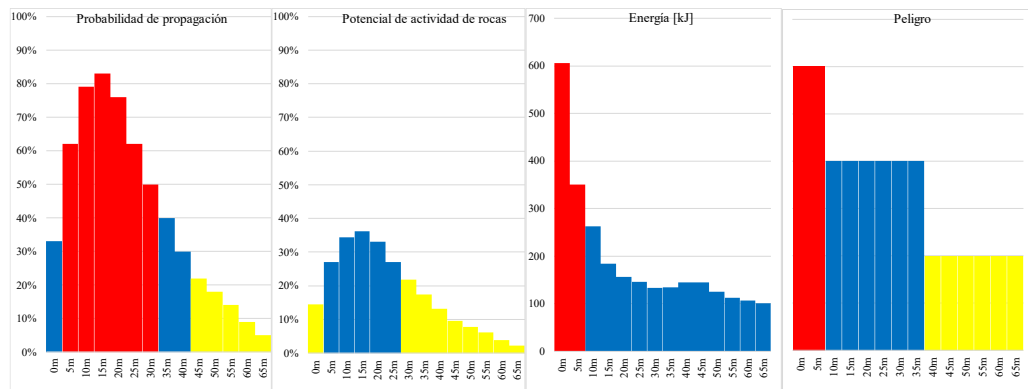


Figura 28: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como media

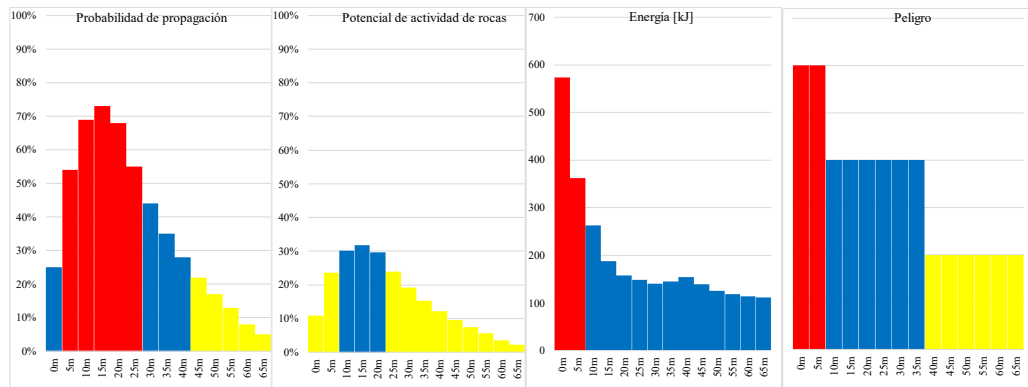


Figura 29: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 26 y con rugosidad categorizada como muy alta

	Unidad	Figura 27	Figura 28	Figura 29
Energía media	[kJ]	146	212	210
Energía máx.	[kJ]	457	606	573
Distancia máx.	[m]	25	65	65
Propagación	[-]	98%	83%	73%
PAR	[-]	43%	36%	32%
Zonas de peligro	[-]	6	14	14
Bajo	[-]	1	6	6
Medio	[-]	4	6	6
Alto	[-]	1	2	2

Tabla 14: comparación de resultados obtenidos cuando se varía la rugosidad de la superficie del talud

6.5 Influencia de la altura de banco y ancho de berma

La altura del banco está supeditada a los equipos de extracción del mineral y, junto con el ancho berma, se busca maximizar la extracción y la seguridad para contener los desprendimientos de rocas de bancos superiores (Díaz, 2017), así que para ejemplificar en la Figura 30, se muestran la selección de parámetros mientras varía el ancho de berma, y se confirma la función de seguridad de la berma ya que se ve reducido el potencial de actividad de rocas, el alcance y la energía alcanzada, mientras que las zonas de peligro disminuyen al tener menos alcance, como se muestra en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33. Mientras que en la Tabla 15 se muestra de manera cuantitativa como disminuyen la cantidad de zonas de peligro de 36 a 20 al aumentar el ancho de berma. Además, se le puede dar un uso como herramienta temprana o complementaria para la planificación minera, es más, si se alimenta la base de datos con más información se puede tener una herramienta más robusta.

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorizació
PP1	Altura de banco	[m]	30
PP2	Ancho de berma	[m]	
PP3	Pendiente de banco	[°]	75
PP4	Forma del bloque	[-]	Irregular
PP5	Coeficiente restitución normal	[-]	0.53
PP6	Coeficiente restitución tangencial	[-]	0.85
PP7	Rugosidad	[-]	media
PP8	Volumen	[m3]	1

Figura 30: parámetros seleccionados para analizar la influencia de la altura de banco y ancho de berma en el peligro

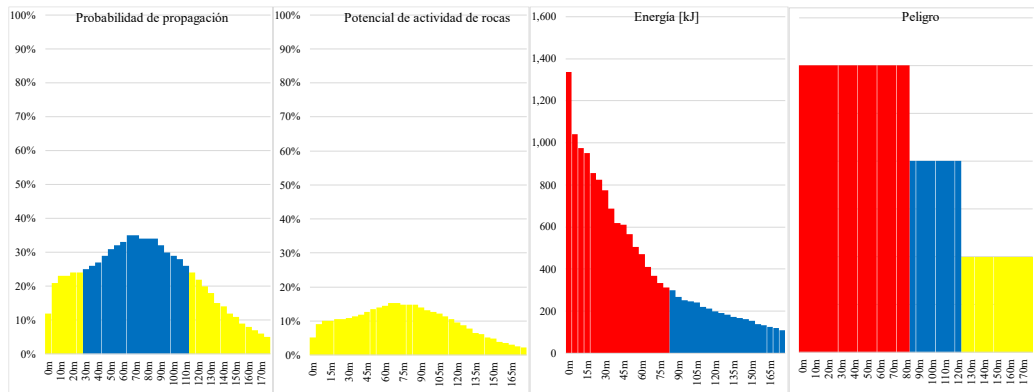


Figura 31: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 5 metros

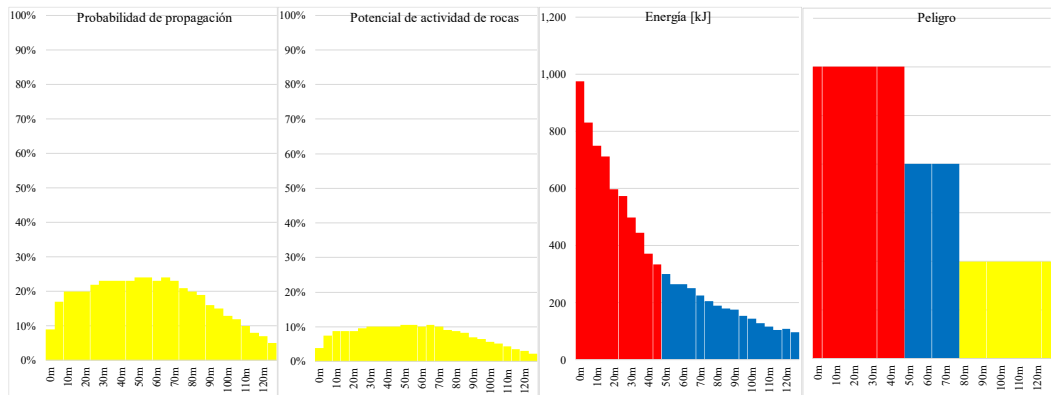


Figura 32: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 11 metros

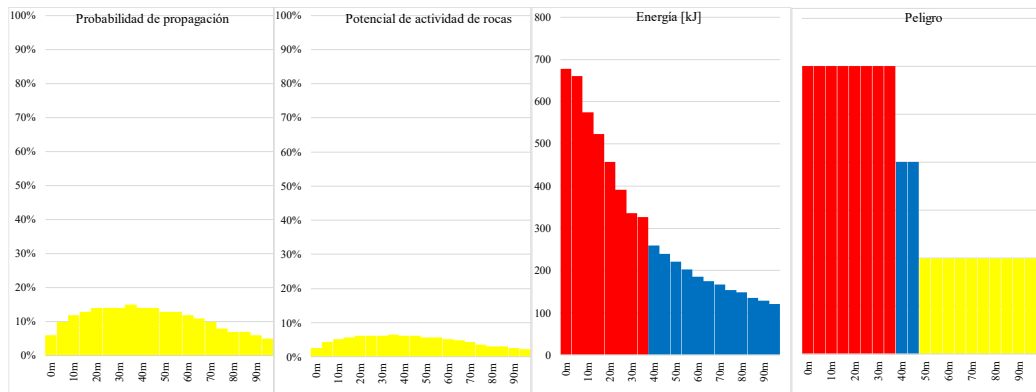


Figura 33: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 y con un ancho de berma de 17 metros

	Unidad	Figura 31	Figura 32	Figura 33
Energía media	[kJ]	450	363	315
Energía máx.	[kJ]	1337	975	677
Distancia máx.	[m]	175	125	95
Propagación	[-]	35%	24%	15%
PAR	[-]	15%	10%	7%
Zonas de peligro	[-]	36	26	20
Bajo	[-]	11	10	10
Medio	[-]	8	6	2
Alto	[-]	17	10	8

Tabla 15: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el ancho de berma

6.6 Influencia del volumen y coeficiente de restitución

Para el volumen analizado no se observa una diferencia apreciable en el potencial de actividad de rocas ni el alcance que pueda tener, si existe un aumento de la energía asociada y se explica principalmente a que la energía cinética es proporcional a la masa y al cuadrado de la velocidad. Para los parámetros seleccionados en la Figura 34, las zonas de peligro aumentan al estar involucrada un volumen mayor, esto se muestra en la Figura 35, Figura 36 y Figura 37. En la Tabla 16, se observa como a pesar de no haber un cambio en la PAR, la intensidad aumenta desde 92[kJ] a 2647[kJ] las zonas de peligro cambian de peligro bajo a peligro alto debido a la energía involucrada.

Propagación			
ID	Parámetro	unidad	Categorizació
PP1	Altura de banco	[m]	30
PP2	Ancho de berma	[m]	11
PP3	Pendiente de banco	[°]	75
PP4	Forma del bloque	[-]	Irregular
PP5	Coeficiente restitución normal	[-]	
PP6	Coeficiente restitución tangencial	[-]	
PP7	Rugosidad	[-]	media
PP8	Volumen	[m3]	

Figura 34: parámetros seleccionados para analizar la influencia del volumen en el peligro.

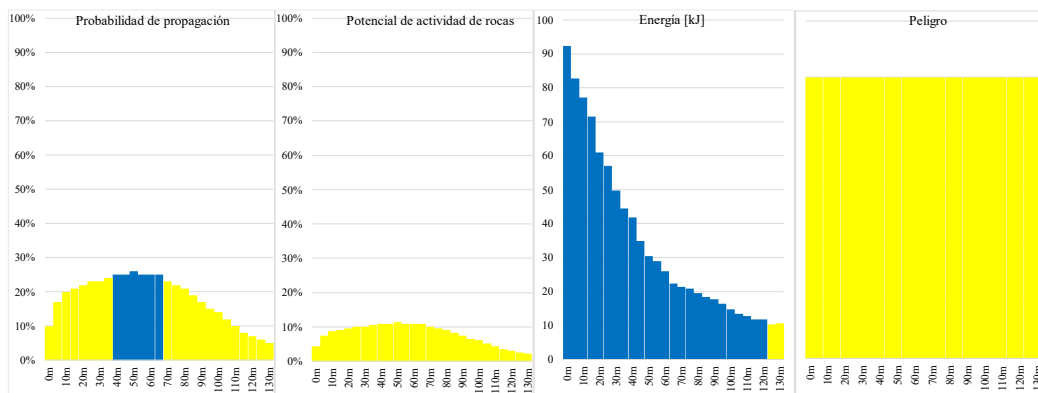


Figura 35: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 0.1[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente

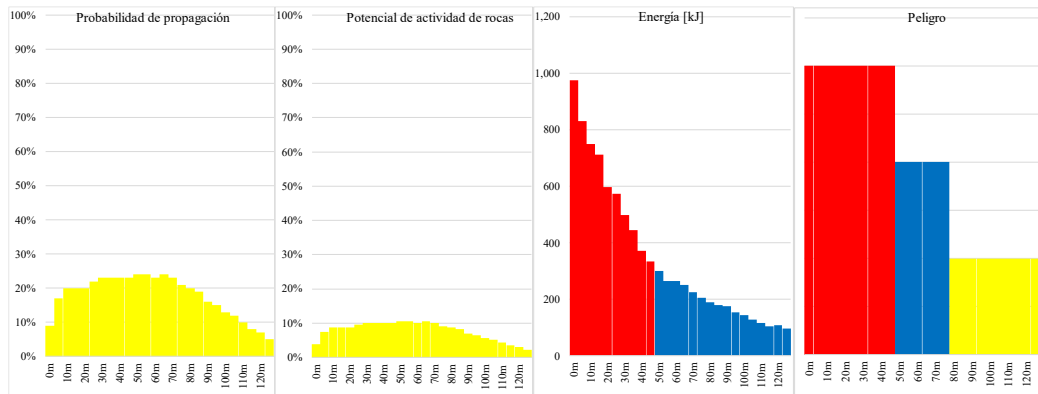


Figura 36: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 1[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente

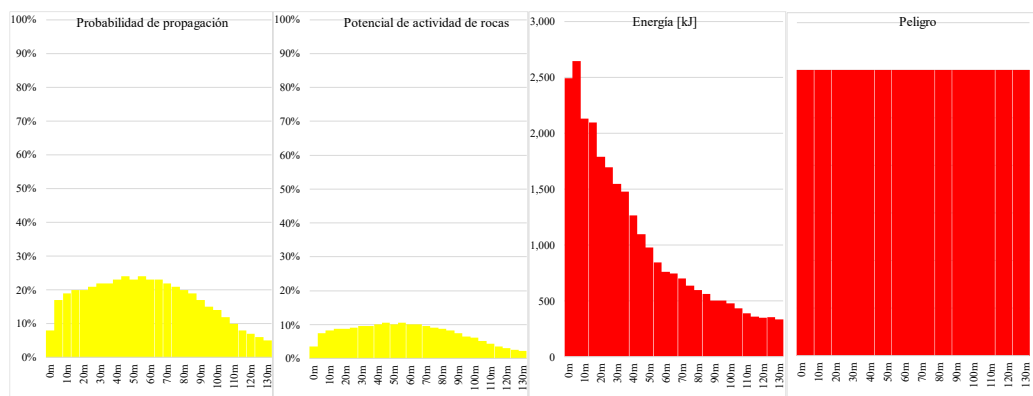


Figura 37: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente

	Unidad	Figura 35	Figura 36	Figura 37
Energía media	[kJ]	37	363	1097
Energía máx.	[kJ]	92	975	2647
Distancia máx.	[m]	130	125	130
Propagación	[-]	26%	24%	24%
PAR	[-]	11%	10%	10%
Zonas de peligro	[-]	27	26	27
Bajo	[-]	27	10	0
Medio	[-]	0	6	0
Alto	[-]	0	10	27

Tabla 16: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el volumen del bloque

Los coeficientes de restitución indican la conservación de la energía ya sea en la componente horizontal y tangencial del impacto entre la superficie y el bloque rocoso, ya sea por las características de la superficie como puede ser la presencia de material suelto, vegetación o simplemente se puede encontrar limpia la superficie y conservar mejor la energía. Se observa que, a medida que aumenta el coeficiente de restitución normal y tangencial, hay mayor potencial de actividad de rocas y con mayor alcance, y, al disiparse una menor energía en la colisión, estos bloques llegan al pie del talud con mayor energía. En consecuencia, aumentan las zonas de peligros, tal como se muestra desde la Figura 38 a la Figura 43. En la Tabla 17 y Tabla 18 se muestra esta comparación de manera cuantitativa.

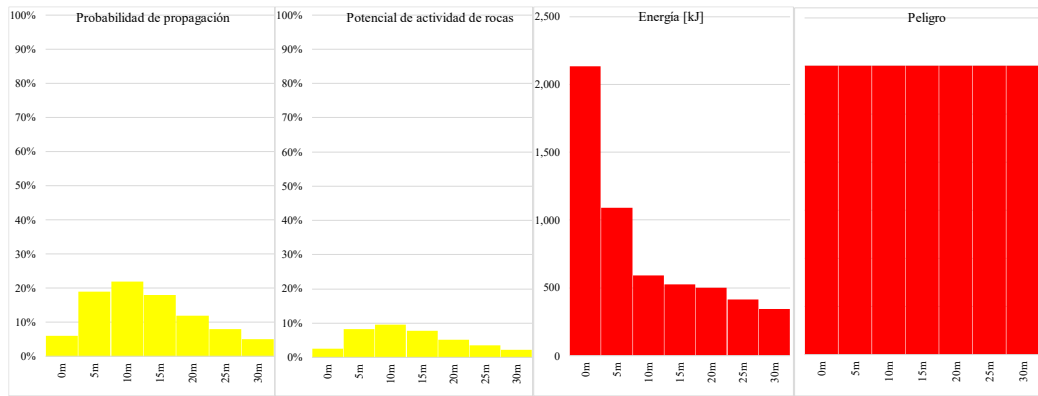


Figura 38: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 34 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.35 y 0.85, respectivamente

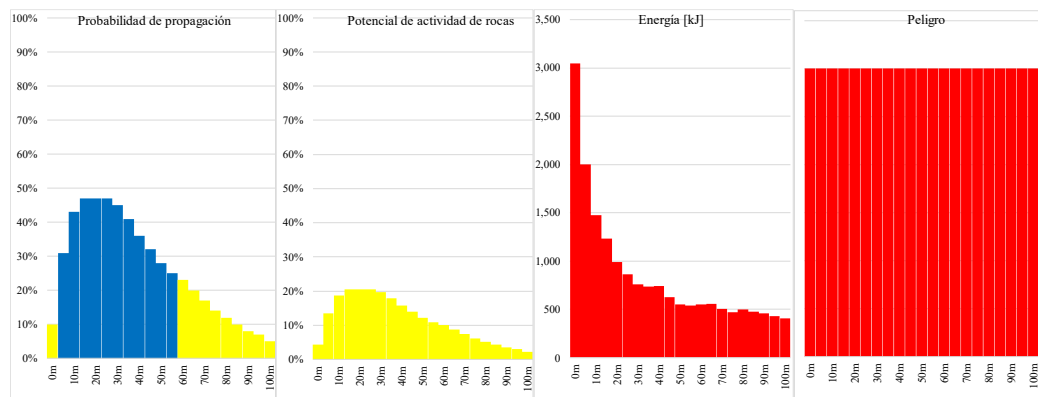


Figura 39: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.85, respectivamente

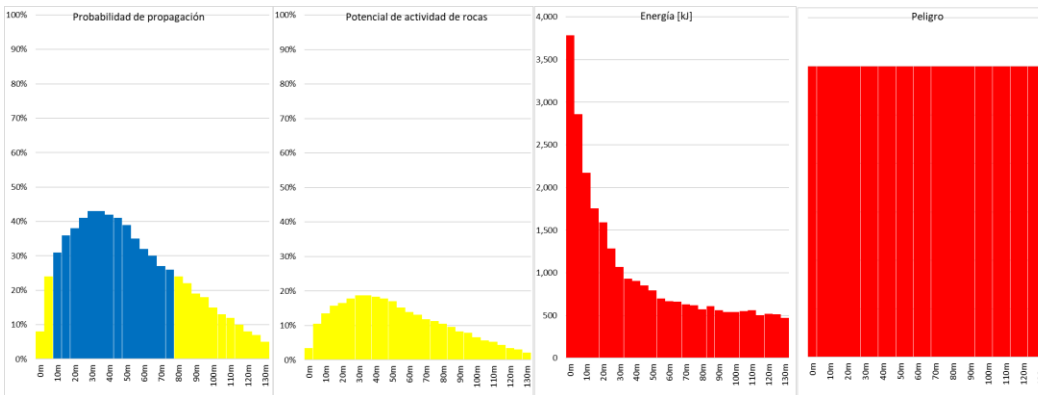


Figura 40: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.53 y 0.85, respectivamente

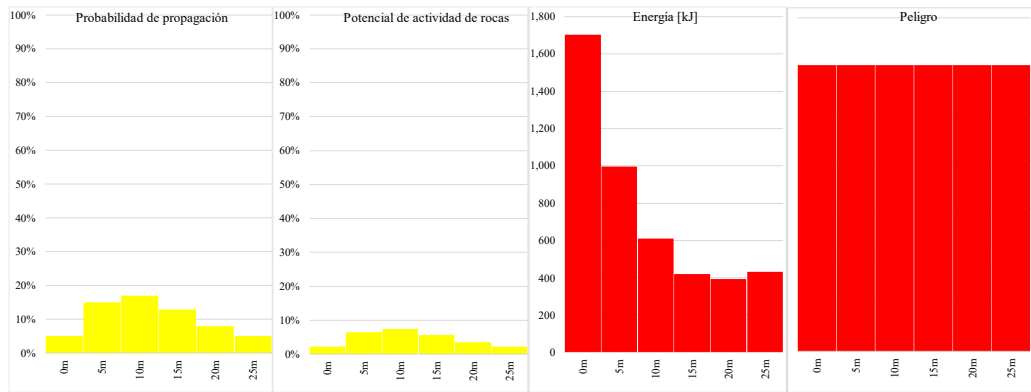


Figura 41: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.53, respectivamente

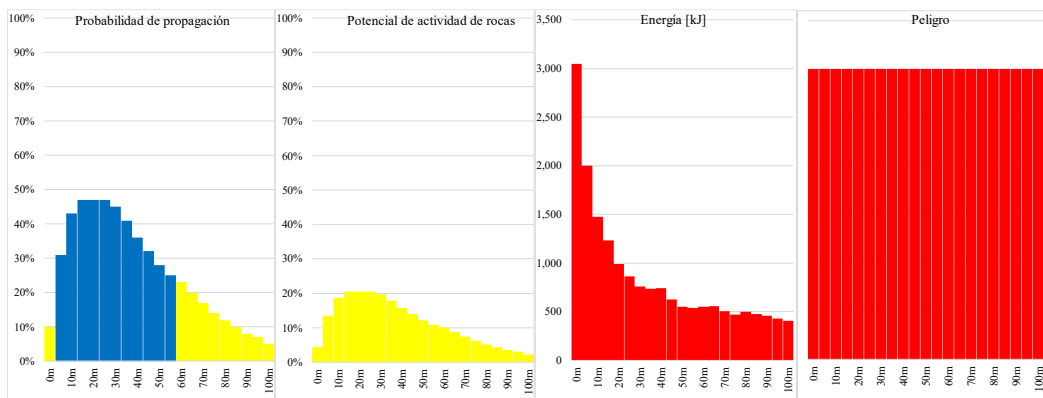


Figura 42: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.85, respectivamente

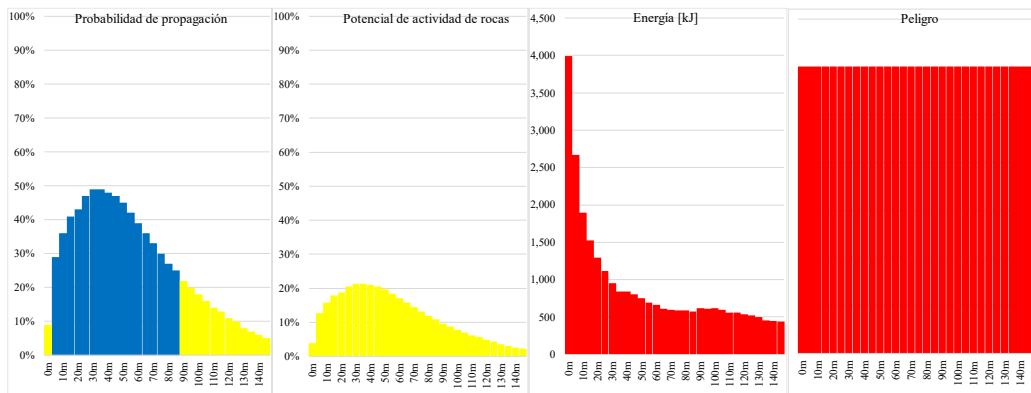


Figura 43: resultados obtenidos para los parámetros definidos en Figura 30 para un volumen de 3[m3] y coeficiente de restitución normal y tangencial de 0.48 y 0.98, respectivamente

	Unidad	Figura 38	Figura 39	Figura 40
Energía media	[kJ]	745	910	1040
Energía máx.	[kJ]	2136	3046	3784
Distancia máx.	[m]	30	100	130
Propagación	[-]	22%	47%	43%
PAR	[-]	10%	20%	19%
Zonas de peligro	[-]	7	21	27
Bajo	[-]	0	0	0
Medio	[-]	0	0	0
Alto	[-]	7	21	27

Tabla 17: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el coeficiente de restitución normal

	Unidad	Figura 41	Figura 42	Figura 43
Energía media	[kJ]	707	910	947
Energía máx.	[kJ]	1704	3046	3991
Distancia máx.	[m]	25	100	145
Propagación	[-]	17%	47%	49%
PAR	[-]	7%	20%	21%
Zonas de peligro	[-]	6	21	30
Bajo	[-]	0	0	0
Medio	[-]	0	0	0
Alto	[-]	6	21	30

Tabla 18: comparación de resultados obtenidos cuando se varía el coeficiente de restitución tangencial

7 Conclusiones

Se presentó una herramienta para evaluar el peligro a partir del potencial de actividad de rocas que representa la probabilidad de que se den las condiciones para que ocurra un evento de caída de rocas y que este a su vez se propague y alcance cierta distancia desde el pie del talud, y la intensidad que pueda alcanzar. Es novedoso, ya que la distancia que existe desde el pie del talud se discretiza y se puede tener punto a punto, que están separados cada cinco metros, así la probabilidad de ocurrencia pondera con la probabilidad de propagación, como se muestra en la Ecuación (1) para obtener el PAR, luego en conjunto con la intensidad, y haciendo uso de la matriz de peligro, Figura 11, se obtiene el peligro, el cual se puede entender de manera sencilla con la escala de colores.

Para probar, que tan cercano es a la realidad la herramienta planteada es necesario contar con base de datos de eventos de caída de rocas, ya que, al trabajar la probabilidad de ocurrencia, con la bibliografía pública a la fecha, puede ser que en determinados sitios haya factores que tengan una mayor predominancia que otros, y haya que hacer ajustes para que coincida con el sitio específico, pero como primera aproximación parece apropiada. Para la probabilidad de propagación e intensidad, lo importante es que en cuanto a propiedades y característica del material se abarca un amplio espectro de combinaciones y se limita en cuanto a la altura de banco y ancho de berma.

La influencia de los parámetros presentados en la Tabla 8 para la probabilidad propagación y cómo estos afectan a las zonas de peligros, hay que destacar la pendiente y ancho del banco ya que un óptimo diseño hará que se maximice la extracción y la seguridad ya que se reduce el ángulo a nivel interrampa o global. También, como la condición de la superficie del talud y como esta se representa con el coeficiente de restitución y el volumen involucrado producen un menor o mayor alcance y de igual forma la intensidad con la que llegan. Para la rugosidad de la superficie, se esperaba el comportamiento observado, ya que estas irregularidades ayudan a proyectar los bloques rocosos fuera del talud, sin embargo, la definición cualitativa de las categorías de rugosidad se puede ajustar de mejor forma.

Tener los resultados de 4374 simulaciones, es un insumo importante no solo para este trabajo, sino que para otros usos que se le quiera dar como en el ámbito del diseño y planificación minera. Otro aspecto de destacar es la gestión de la información, ya que se crearon más de veinticinco gigabytes, donde aplicar las herramientas de programación fue crucial para crear y administrar las bases de datos, principal insumo para la herramienta desarrollada.

8 Trabajo futuro

Principalmente, se puede presentar esta herramienta a proyectos de investigación o empresas interesadas en desarrollar el potencial que pueda tener, ya que se nutre de información que puedan tener, para comprobar o realizar ajustes a los parámetros de probabilidad de ocurrencia según los datos históricos que puedan tener de eventos de caída de rocas. Además, es importante actualizar la base de datos de la probabilidad de propagación e intensidad con más simulaciones, que abarquen más variaciones de parámetros, así quizá en un futuro se pueda reducir a un modelo. Por eso es importante, que se siga en esta línea investigativa, que en Chile hay potencial para seguir desarrollando.

Bibliografía

Alejano, L., & Oyanguren, P. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Red DESIR.

Alejano, Stockhausen, Alonso, Bastante, & Ramírez Oyanguren. (2008). ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 1252-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.003>

Asteriou, P., & Tsiambaos, G. (2018). Effect of impact velocity, block mass and hardness on the coefficients of restitution for rockfall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.001>

Delonca, A., Verdel, T., & Gunzburger, Y. (2016). Influence of expertise on rockfall hazard assessment using empirical methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(7), 1657-1672. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1657-2016>

Díaz, C. (2017). *Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146684>

Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K., & Lambert, C. (2017). Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98, 88-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.07.013>

Ma, K., Liu, G., Xu, N., Zhang, Z., & Feng, B. (2021). Motion characteristics of rockfall by combining field experiments and 3D discontinuous deformation analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104591. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104591>

Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S.-M. E. (2013). A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.01.012>

Parra, A. (2015). *Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicos*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136447>

Pfeiffer, T. J., & Bowen, T. D. (1989). Computer Simulation of Rockfalls. *Environmental & Engineering Geoscience*, xxvi(1), 135-146. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxvi.1.135>

Raetz, H., Lateltin, O., Bollinger, D., & Tripet, J. (2002). Hazard assessment in Switzerland – Codes of Practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(3), 263-268. <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0163-4>

Restrepo, E., Sanz, F., & Román, S. (2017). *Evaluación del Fenómeno de Caída de Rocas. Área Portal Socavón Los Sulfatos*.

Russo, A., Huerta, A., Pichuante, H., Quiroga, J., Sanz, F., & Hormazabal, E. (2015). *Estudio de Riesgo Geológico Geotécnico. Tramo 3 y Tramo 4*.

Santander, C. (2019). *Metodología rock engineering system para determinar estabilidad geomecánica en taludes mineros*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174807>

SERNAGEOMIN. (2022). *Estadísticas de accidentabilidad—Accidentes fatales 2000-2021*.

Whittall, J. R., McDougall, S., & Eberhardt, E. (2017). A risk-based methodology for establishing landslide exclusion zones in operating open pit mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.012>