

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Análisis de la potencial trayectoria de caída de rocas para la
optimización de controles de seguridad en los niveles inferiores
de una mina superficial**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Ruddy Elliott Poemape Gonzales

 [0009-0009-9314-3302](https://orcid.org/0009-0009-9314-3302)

Asesor

M.Sc. Adolfo Jesús Chavez Valdivia

 [0000-0003-0625-1495](https://orcid.org/0000-0003-0625-1495)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Poemape Gonzales [1]
Referencia/Reference	[1] R. Poemape Gonzales, " <i>Análisis de la potencial trayectoria de caída de rocas para la optimización de controles de seguridad en los niveles inferiores de una mina superficial</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Poemape , 2024)
Referencia/Reference	Poemape, R. (2024). <i>Análisis de la potencial trayectoria de caída de rocas para la optimización de controles de seguridad en los niveles inferiores de una mina superficial</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación está dedicado a mi esposa, hijos y nieto quienes con su amor, paciencia y apoyo incondicional hicieron que este proyecto se concrete acompañándome en el cumplimiento de mis sueños y metas.

Agradecimientos

Quiero expresa a ti mi Dios, quien con su profundo amor guía mis pasos.

A mis padres por su apoyo incondicional en mi época de estudiante, inculcando valores desde mis primeros pasos y estar siempre presentes en cada logro.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería, a las docentes de la facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que puede crecer profesionalmente y en especial a la escuela profesional de minas.

Resumen

La caída de rocas hacia bancos inferiores en minas superficiales representa uno de los riesgos más significativos en el desarrollo de las operaciones mineras, esto genera que las empresas requieran evaluar los controles de seguridad establecidos con el fin de asegurar la continuidad del proceso de minado.

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de la potencial trayectoria de la caída de rocas según las condiciones específicas del lugar de estudio mediante la determinación de los parámetros más relevantes e incidentes del problema con el fin de evaluar la eficiencia de los controles de seguridad establecidos en los niveles inferiores del tajo; este tipo de investigaciones son relevantes y cruciales para garantizar la seguridad de los trabajadores y los componentes en la mina.

En el desarrollo de la investigación se recopila la información de campo necesaria sobre características geológicas y geotécnicas de la roca en los sectores predominantes definidos en la unidad de interés, los cuáles son integrados con factores propios del yacimiento minero tales como son los agentes ambientales, siendo de importancia para el estudio los parámetros adicionales históricos de la roca existente en la zona de interés que complementan la información para el desarrollo de las simulaciones necesarias para predecir el comportamiento de la trayectoria de las rocas en caída libre.

La investigación requiere el uso de técnicas de análisis y procesamiento de información estadística, asimismo la utilización de software de simulación de alta ingeniería para modelar adecuadamente el movimiento de las rocas y la interacción con los agentes que afectan el comportamiento de la trayectoria de la caída de rocas.

La importancia de los resultados de la investigación permite evaluar los controles de seguridad establecidos en los niveles inferiores del yacimiento, identificándose el potencial de riesgo existente en las zonas de interés hacia personas, equipos o instalaciones de la mina. Además, proporciona la información necesaria para la implementación y diseño de medidas adicionales de contención o protección.

Palabras clave — Caída de rocas, trayectoria, mina superficial, simulación, controles de seguridad, bancos inferiores.

Abstract

The fall of rocks towards the lower slopes in surface mines represents one of the most important risks in the development of mining operations, this means that companies need to evaluate the security controls established to ensure the continuity of the mining process.

The objective of this research is to analyze the behavior of the potential trajectory of rockfall according to the specific conditions of the study site by determining the most relevant parameters and incidents of the problem in order to evaluate the efficiency of security controls established in the lower levels of the pit; this type of investigation is relevant and crucial in order to guarantee the safety of workers and components in the mine.

In the development of the investigation, the necessary information is collected on the geological and geotechnical characteristics of the rock in predominant sectors existing in the unit of interest, which are integrated with factors specific to the mining site such as environmental agents, being of importance for the study of parameters such as wind speed or humidity, which complement the information necessary for the development of the simulations necessary to predict the behavior of the trajectory of the rocks in free fall.

The research requires the use of statistical information analysis and processing techniques, as well as the use of highly-engineered simulation software to adequately model the movement of the rocks and the interaction with the agents that can affect the behavior of the trajectory of the fall of rocks.

The importance of the research results makes it possible to evaluate the security controls established at the lower levels of the deposit, identifying the risk potential existing in the areas of interest that could affect people, equipment or mine facilities. In addition, it provides the necessary information for the implementation and design of additional containment or protection measures.

Keywords — Rockfall, trajectory, surface mine, simulation, safety controls, lower banks

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos del estudio	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.4 Antecedentes investigativos	5
1.4.1 Antecedentes investigativos internacionales	5
1.4.2 Antecedentes investigativos nacionales	10
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	13
2.1 Marco teórico	13
2.1.1 Modelo estructural.....	13
2.1.2 Mapeo con drones	14
2.1.3 Diseño de taludes	15
2.1.4 Voladura.....	16
2.1.5 Diseño de voladuras.....	17
2.1.6 Coeficiente de restitución	18
2.1.7 Caída de rocas.....	19
2.1.8 Análisis de riesgo geotécnico	20
2.1.9 Monitoreo y control de deslizamientos.....	21
2.1.10 Ingeniería de taludes.....	22
2.2 Marco Conceptual	23
2.2.1 Modelo	23
2.2.2 Intrusión	24

2.2.3 Banco.....	25
2.2.4 Deslizamiento.....	26
2.2.5 Fragmentación	27
2.2.6 Simulación	28
2.2.7 Erosión.....	29
2.2.8 Estabilidad	29
2.2.9 Monitoreo	30
2.2.10 Mitigación.....	30
2.2.11 Análisis.....	31
2.2.12 Interacción	32
2.2.13 Riesgo.....	32
2.3 Hipótesis general	32
2.4 Variables	33
2.5 Tipo y Diseño de la Investigación	33
2.5.1 Tipo de Investigación	33
2.5.2 Nivel de Investigación	34
2.5.3 Diseño de la Investigación.....	34
2.6 Unidad de análisis.....	34
2.6.1 Ubicación	34
2.6.2 Geología	36
2.6.3 Geomorfología y Estratigrafía.....	36
2.6.4 Geología Estructural.....	37
2.6.5 Caracterización geotécnica de la Unidad Minera.....	38
2.7 Matriz de consistencia.....	40
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	41
3.1 Metodología del diseño	41
3.2 Recopilación de información	42
3.2.1 Mapeo de información estructural	42

3.2.2	Delimitación de secciones	45
3.2.3	Parámetros de roca.....	46
3.3	Procesamiento de información	47
3.3.1	Seccionamiento de área.....	47
3.3.2	Parámetros de secciones	48
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		68
4.1	Introducción	68
4.2	Evaluación de resultados	68
4.2.1	Resultados Sección 1.....	68
4.2.2	Resultados Sección 2.....	69
4.2.3	Resultados Sección 3.....	69
4.2.4	Resultados Sección 4.....	69
4.2.5	Resultados Sección 5.....	70
4.2.6	Resultados Sección 6.....	70
4.2.7	Resultados Sección 7.....	71
4.2.8	Resumen de resultados	71
4.3	Optimización de controles	72
Conclusiones		73
Recomendaciones		75
Referencias bibliográficas.....		77
Anexos		82

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Parámetros de roca – Fase 09.....	47
Tabla 2: Coordenadas de vértices – Sección 1.....	48
Tabla 3: Asignación de Material – Sección 1.....	49
Tabla 4: Propiedades cinemáticas – Sección 1.....	50
Tabla 5: Coordenadas de vértices – Sección 2.....	51
Tabla 6: Asignación de Material – Sección 2.....	52
Tabla 7: Propiedades cinemáticas – Sección 2.....	53
Tabla 8: Coordenadas de vértices – Sección 3.....	54
Tabla 9: Asignación de Material – Sección 3.....	55
Tabla 10: Propiedades cinemáticas – Sección 3.....	56
Tabla 11: Coordenadas de vértices – Sección 4.....	57
Tabla 12: Asignación de Material – Sección 4.....	58
Tabla 13: Propiedades cinemáticas – Sección 4.....	59
Tabla 14: Coordenadas de vértices – Sección 5.....	60
Tabla 15: Asignación de Material – Sección 5.....	61
Tabla 16: Propiedades cinemáticas – Sección 5.....	62
Tabla 17: Coordenadas de vértices – Sección 6.....	63
Tabla 18: Asignación de Material – Sección 6.....	64
Tabla 19: Propiedades cinemáticas – Sección 6.....	65
Tabla 20: Coordenadas de vértices – Sección 7.....	66
Tabla 21: Asignación de Material – Sección 7.....	67
Tabla 22: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 1.....	68
Tabla 23: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 2.....	69
Tabla 24: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 3.....	69
Tabla 25: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 4.....	70
Tabla 26: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 5.....	70

Tabla 27: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 6.....	70
Tabla 28: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 7.....	71

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Total de mortales por tipo, Perú (2022).....	2
Figura 2: Planos de foliaciones tectónicas.....	14
Figura 3: Aplicaciones de drones en la industria minera.....	15
Figura 4: Evaluación de Factor de Seguridad en Mina Superficial – Mina La Arena.....	16
Figura 5: Voladura en mina superficial.....	17
Figura 6: Voladuras controladas en minería a cielo abierto.....	18
Figura 7: Comportamiento del objeto frente a rebotes para evaluación de coeficiente de restitución.....	19
Figura 8: Caída de rocas en taludes.....	20
Figura 9: Presencia de carbón en taludes.....	21
Figura 10: Equipos de monitoreo de estabilidad de taludes.....	22
Figura 11: Estabilización de taludes con geotextiles.....	23
Figura 12: Método para el diseño de taludes.....	24
Figura 13: Formación de rocas intrusivas.....	25
Figura 14: Partes de un banco.....	26
Figura 15: Deslizamiento de material en la mina Byngham Canyon.....	27
Figura 16: Análisis de pila de fragmentación.....	28
Figura 17: Simulación de caída de rocas en software Rockfall.....	28
Figura 18: Trabajos de estabilidad.....	29
Figura 19: Monitoreo de taludes mediante radar.....	30
Figura 20: Barreras contra desprendimiento de rocas.....	31
Figura 21: Modelo matemático Janbu para análisis de estabilidad.....	31
Figura 22: Aguas subterráneas en taludes.....	32
Figura 23: Ubicación de Mina La Arena.....	34
Figura 24: Ubicación regional de mina La Arena.....	35
Figura 25: Ubicación regional de mina La Arena.....	36

Figura 26: Ubicación regional de mina La Arena.....	37
Figura 27: Unidades litológicas y límites de los dominios estructurales definidos para el Tajo Calaorco	38
Figura 28: Identificación de orientaciones preferentes en dominios estructurales	39
Figura 29: Caracterización de unidades geotécnicas.....	40
Figura 30: Matriz de consistencia.....	40
Figura 31: Metodología del diseño.....	41
Figura 32: Flujoograma de trabajo de investigación.....	42
Figura 33: Mapeo geotécnico de Fas 09 – Sur.....	43
Figura 34: Clasificación geomecánica de estación EG-01	44
Figura 35: Zonas de interés de evaluación.....	45
Figura 36: Secciones de análisis – Fase 09.....	46
Figura 37: Seccionamiento de área en Autocad.....	47
Figura 38: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 1.....	50
Figura 39: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 2.....	53
Figura 40: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 3.....	56
Figura 41: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 4.....	59
Figura 42: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 5.....	62
Figura 43: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 6.....	65
Figura 44: Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 7.....	67
Figura 45: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes.....	71
Figura 46: Relación de bloques detenidos y bloques pasantes.....	72

Introducción

El aporte de la investigación consiste en el análisis del comportamiento de la trayectoria de las rocas en caída libre para evaluar los controles de seguridad establecidos brindando las recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

La investigación se desarrolló en 06 capítulos, los cuáles se describen a continuación:

En el capítulo I, se describe las generalidades de la investigación detallando la problemática existente que motiva el desarrollo de la presente investigación, planteando el objetivo final del estudio, la información viene complementado con un estudio del arte de los principales antecedentes investigativos relacionados al presente trabajo de suficiencia profesional.

En el capítulo II, se describe y detalla el marco teórico y conceptual del proyecto, delimitando los principales conceptos necesarios para la comprensión del desarrollo de la investigación.

Se muestra también la hipótesis que será validada o refutada en el desarrollo de la investigación, asimismo se determinan las principales variables dependientes e independientes del trabajo de investigación.

Asimismo, se define la metodología utilizada en la investigación, conjeturando el tipo y diseño empleado, así como el desarrollo y descripción a detalle de la unidad de análisis para finalmente elaborar la matriz de consistencia.

En el capítulo III, se desarrolla el trabajo de investigación, iniciando con la delimitación de la zona de interés para posteriormente efectuar la recopilación de todos los datos necesarios que permitan el desarrollo del modelamiento estructural y geológico. Con el modelo desarrollado se efectúan las simulaciones del comportamiento de la trayectoria de rocas en caída libre para finalmente evaluar los controles de seguridad establecidos y brindar las recomendaciones correspondientes.

En el capítulo IV, se presenta el análisis final y la evaluación de resultados, dónde se valida la hipótesis sobre la importancia de la evaluación de la trayectoria en la caída de rocas para la optimización de los controles de seguridad

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La presente investigación estudia la problemática del comportamiento variable de trayectoria de rocas en caída libre, un fenómeno que representa diversos riesgos en las operaciones mineras superficiales, dado que la caída de rocas no solo puede causar daños a infraestructuras, maquinarias o componentes, sino que también representa un peligro significativo para la seguridad de los trabajadores que efectúan sus labores en la Unidad Minera, por lo que toma gran importancia la acción de modelar y simular adecuadamente la trayectoria de la caída de rocas en una mina superficial para mejorar los parámetros de seguridad y así minimizar riesgos asociados a la actividad.

A su vez con los resultados obtenidos y la evaluación de los controles implementados al desarrollarse el estudio, se proporcionarán alternativas de contención con un mayor factor de seguridad ante la ocurrencia de un evento de caída de rocas en la zona de interés que permita la continuidad del proceso de minado minimizando el riesgo al que se exponen los trabajadores y los equipos en mina.

La investigación brinda información relevante en cuánto al procedimiento para la evaluación de trayectoria de rocas en caída libre y enfatiza la necesidad de considerar estas variables de estudio para la implementación de controles de seguridad adecuados que aseguren la sostenibilidad del desarrollo de las labores cotidianas, especialmente en la interacción de equipos por el desarrollo de actividades entre diferentes niveles o bancos de las fases activas en la ejecución del plan de minado.

Los resultados de la investigación facilitarán una serie de alternativas de mayor protección en términos de seguridad validadas en las simulaciones para una implementación ante escenarios de similares características a los descritos en la investigación.

Por último, se espera que esta investigación contribuya al desarrollo y evaluación de protocolos de seguridad más robustos y efectivos en la minería superficial, promoviendo

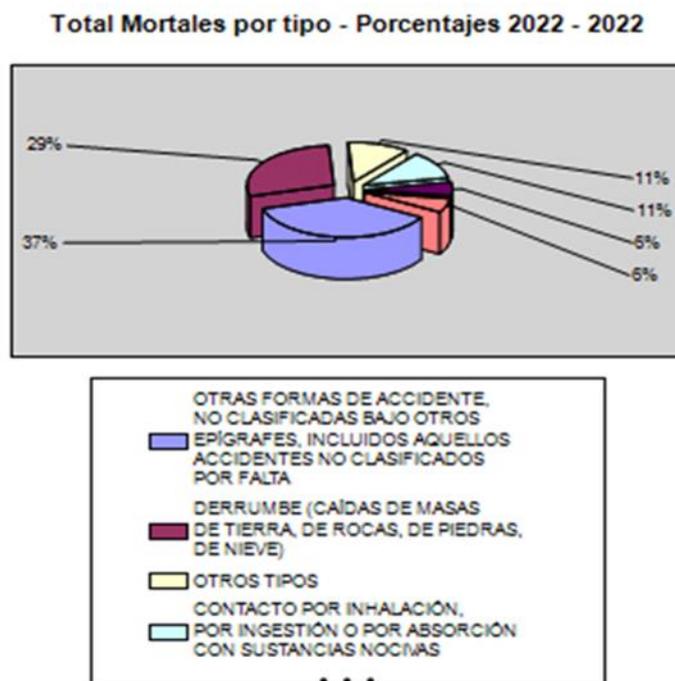
una cultura de prevención y cuidado en el entorno laboral. La implementación de controles adicionales siguiendo las recomendaciones de un estudio validado permitirá a las empresas mineras operar con un mayor nivel de seguridad y sostenibilidad, protegiendo tanto a su personal como a sus activos.

1.2 Descripción del problema de investigación

Durante el desarrollo y avance de las operaciones mineras, uno de los riesgos más relevantes e importantes a considerar; es la caída de rocas tanto en operaciones mineras a tajo abierto como en operaciones de minería subterránea, según la estadística de eventos mortales ocurridos en Perú brindada por el Ministerio de Energía y Minas durante el año 2022, los eventos por derrumbe y/o caída de rocas representaron el 29% del total de eventos mortales detallados en la Figura 1, representando este uno de los peligros con mayor potencial de riesgo en las operaciones mineras, el cuál debe ser contemplado en la planificación del diseño de la mina y a su vez en la ejecución de las labores que son parte del proceso de minado a lo largo de toda la vida de la mina.

Figura 1

Total de mortales por tipo, Perú (2022).



Fuente: Boletín Estadístico de Accidentes Mortales del año 2022. Ministerio de Energía y Minas, Perú (2022).

El riesgo de caída de rocas en minería superficial representa una problemática en las operaciones mineras debido a los impactos directos e indirectos en el proceso que generaría la ocurrencia de un evento de esta característica, independientemente del tamaño de los bloques de roca a desprenderse, se debe considerar el alto potencial de energía liberado debido a la velocidad adquirida por la distancia que recorren.

Un pequeño fragmento de roca desprendido de los niveles superiores en una mina superficial con caída libre en dirección hacia las personas pondría en riesgo la seguridad de los trabajadores, dado el alto potencial generador que poseen, pudiendo provocar lesiones graves e incluso fatalidades.

Por otro aspecto, la caída de rocas en dirección hacia los equipos mineros y/o maquinaria generan impactos directos provocando paradas en mantenimiento no planificadas, inactividad de la operación, afecciones al plan de minado y costos asociados debido a la ejecución de reparaciones no presupuestadas (Sanabria, 2019).

La condición de caída de rocas es provocada por diversos factores que comprometen la estabilidad de las mismas, entre las principales condiciones resaltan los factores geológicos por la presencia de estructuras, fallas geológicas o tipo de material inestable, un factor adicional relevante está relacionado a las condiciones ambientales de la unidad, puesto que la erosión del terreno generada por acciones de agentes hídricos, eólicos u otros impactan en las estructuras geológicas por ende en la estabilidad de la zona.

Otro aspecto significativo que debe ser considerado como factor que incrementa el riesgo de caída de rocas es el proceso de voladura, debido a la vibración generada que impacta en la estabilidad de las rocas adyacentes al desarrollo del proceso, asimismo la propagación de las ondas sísmicas tanto longitudinales como transversales son debilitadores de estructuras geológicas en conjunto con la sobrecarga de tensión en rocas por la liberación de energía; es por ello que las empresas efectúan diversos controles que mitiguen los impactos ocasionado por el proceso de voladura.

Según la descripción dada, los factores mencionados estarán presentes durante todo el desarrollo de una mina debido a que son parte del proceso de minado por lo que los mismos no son eliminados, por ende, las empresas mineras deben establecer los controles de mitigación necesarios para reducir el riesgo significativo.

Un factor adicional que favorece el potencial de caída de rocas, son las necesidades en el desarrollo del minado del yacimiento relacionados a mantener un alto nivel de selectividad de material debido al tipo de mineralización previamente formado según el comportamiento de las leyes del mineral y las relaciones proporcionales de mineral/desmonte a lo largo del yacimiento, lo que genera que los diseños tiendan a un enfoque con pendientes pronunciadas de forma agresiva las cuáles favorecen el deslizamiento de material ante un colmatado de banquetas ocasionadas por voladuras cercanas a las crestas, lógicamente las pendientes de los taludes están diseñadas bajo un previo análisis de estabilidad y secuencia miento de minado que es evaluado por especialistas en la rama con el fin de asegurar la sostenibilidad de la operación a lo largo del tiempo, es por ello “que la minería requiere ingenieros geotécnicos para garantizar que el diseño del tajo esté respaldado por controles operativos apropiados” (Nairn, 2021).

Sin embargo, es importante mencionar que; “la tendencia es que los diseños de minas actuales y futuros también mantendrán la intención de implementar pendientes pronunciadas para mantener proporciones rentables de mineral a desmonte” (Bar, 2016)

Es importante mencionar que en el avance del proceso de minado, uno de los principales objetivos es alcanzar la granulometría definida por el área de procesos que permita obtener la recuperación óptima en la planta de procesos del mineral valioso, siendo uno de los condicionantes que durante el avance y profundización del tajo en zonas cercanas a las paredes finales se observa la constante acumulación de material generado por la propia acción de los procesos de voladura, lo cual repercute en el derrame de material que a su vez provoca la condicionante de banquetas colmatadas.

Las mismas banquetas colmatadas a su vez representan una línea de trayectoria que facilita el desplazamiento de fragmentos de rocas de los bancos superiores con un

potencial de caída hacia los bancos inferiores, por lo que es importante tomar en cuenta que “el desprendimiento de rocas del nivel de explotación minera en el camino de acarreo o bancos inferiores es un riesgo crítico para la operación” (Morkeh, 2020).

Si bien en la actualidad las empresas destinan una cantidad importante de inversión económica en tecnología que permita prevenir los eventos de caída de rocas, el riesgo se continúa haciendo presente por lo que el mínimo error en la operación o la ausencia de un control del proceso se potencia como un generador de un evento no deseado.

Por lo cual se define la siguiente problemática, la trayectoria desarrollada por una caída de rocas afectaría los controles regulares de seguridad establecidos en los bancos inferiores de una mina superficial, bajo el supuesto de que ocurra un evento con caída de rocas en zonas que se caractericen por reunir las condiciones necesarias que favorezcan una caída de rocas.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Analizar la potencial trayectoria de la caída de rocas hacia los niveles inferiores de una mina Superficial.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes investigativos internacionales

Bar, N, et al (2016), En su investigación “Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock”

Los autores desarrollan su estudio mediante la utilización de modelos calibrados que permiten evaluar la efectividad de diferentes diseños geométricos en los taludes de la zona de estudio, los mismos son evaluados mediante 02 tipos de modelos principales basados en la teorías de impacto, para el caso del modelo en 2D se emplea el modelo bidimensional de impacto de masa y para el caso del modelo en 3D se utiliza un modelo de impacto de cuerpo rígido, posteriormente se comparan los resultados obtenidos en ambos casos, la evaluación efectuada permite comparar las predicciones obtenidas de las trayectorias de caídas de rocas analizadas según los parámetros obtenidos de la zona de

interés, los autores mencionan la importancia de evaluar las posibilidad de las trayectorias de caídas de rocas, esto debido a la inminente necesidad del desarrollo de minas con taludes que posean pendientes con ángulos elevados, siendo este tipo de diseños los que permiten maximizar la rentabilidad económica, asimismo los autores detallan la importancia de considerar las evaluaciones correspondientes de las posibles trayectorias en la caídas de rocas tanto en el proceso de diseño de los taludes como en el desarrollo de los mismos, puesto que la ausencia de estas representan un peligro significativo en las minas a cielo abierto.

Bermedo, E et al (2020), En su trabajo de investigación “Risk analysis of impacting people and/or equipment due to rockfall”

Los autores evalúan los impactos directos que obtienen en personas como en maquinaria principal de la operación frente a un potencial del caída de rocas en una operación minera, esta evaluación se plantea mediante una metodología orientada al análisis del riesgo obtenido por el desprendimiento de rocas, a diferencia de otros trabajos o metodologías de evaluación, para el presente estudio los autores consideran variables adicionales de importancia inherentes al sitio de estudio, como son las probabilidades de la ocurrencia de un evento de caída de rocas, el tiempo al cuál se mantienen expuestos los agentes de evaluación y otras variables adicionales de igual importancia, durante el desarrollo del planteamiento de la metodología descrita, los autores asocian un valor final obtenido a la probabilidad asociada de la ocurrencia de una fatalidad, las cuáles son comparadas fin de determinar el riesgo del sector de interés. Los autores incorporan condiciones específicas del sitio de análisis planteando mejoras en la estimación y cuantificación de los riesgos, asimismo se menciona la importancia de modelar el factor de seguridad de contención ante la caída de rocas según los diseños o barreras de controles establecidos en cada una de las zonas de evaluación.

Bourrier, F, et al (2021), En el trabajo de investigación “Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model”

Los autores describen la importancia de la calidad de los inputs necesarios para el desarrollo de una simulación de caída de rocas, describen la importancia del coeficiente de restitución para el cálculo de la energía de rebote planteando el desarrollo de modelos estocásticos para el cálculo de los mismos.

Los autores mencionan la importancia de la recopilación de datos en campo para la ejecución de las evaluaciones y modelamientos previos al desarrollo de la simulación que permitan obtener valores con resultados que posean un mayor grado de confianza, asimismo describen cuáles son los principales parámetros que se requieren obtener para el desarrollo del trabajo en gabinete.

Para una adecuada evaluación de los resultados, los autores recomiendan efectuar la comparación de los valores obtenidos con datos de campo basados en experimentos de caídas de rocas bajo factores controlados o en su defecto con la evaluación de data histórica con valores determinísticos. Uno de los aspectos más importantes respecto a la recopilación de datos en campo es la correlación con los valores promedio del tamaño de rocas que se tienen dispuestos en el suelo.

Finalmente, los autores concluyen que los enfoques del modelamiento de caída de rocas basados en recopilación de datos mediante técnicas de obtención de datos, complementados con una evaluación de valores variables según el tipo de terreno de evaluación y/o condiciones propias de la Unidad Minera, constituyen parte de las bases necesarias para la mejora de las evaluaciones con orientación probabilística objetiva sobre el peligro de desprendimiento de rocas existente en la minería de tajo abierto.

Garcia, I, et al. (2020), en el trabajo de investigación "Analysis of the effect of back-break on rockfall trajectories"

Los autores describen la importancia de los diseños de bancos cuyo objetivo en parte es el de retener y mitigar el peligro existente por la posibilidad de desprendimiento de rocas de bancos superiores, las evaluaciones y análisis de desprendimientos son útiles para las reevaluaciones de los diseños de bancos, teniendo que consideración que la

geometría de los taludes y los parámetros relacionados a los coeficientes de restitución fueron los óptimos.

En el artículo de investigación los autores integran la importancia de los valores de sobre rotura de los taludes debido al sobre minado de material cercano a las paredes finales de evaluación en los yacimientos o por resultados no óptimos de procesos de voladura, y cómo los mismos afectan las trayectorias de caída de rocas, para lo cuál resaltan la importancia de tomar las mediciones y mapeos correspondientes en campo para un adecuado modelamiento de la información y aplicarlas al diseño de tajo que permitirá proporcionar una superficie de talud más precisa para la ejecución de los cálculos de desprendimiento de rocas.

Finalmente, en el desarrollo de su investigación que es un caso de estudio en una mina de Sudamérica, recomiendan la implementación de bancos dobles con recomendaciones de mejoras en técnicas de voladuras que permitirían optimizar los beneficios de la operación minera en la cuál se efectuó el estudio en mención.

Farmakis, I, et. al (2023) en el trabajo de investigación "Slope-Scale Rockfall Susceptibility Modeling as a 3D Computer Vision Problem".

Los autores de la investigación describen la amenaza que representa la caída de rocas para la seguridad y la sostenibilidad de las principales rutas de acarreo cercanas a taludes, el enfoque que le brindan los autores a la investigación es el de modelar la susceptibilidad de desprendimiento de rocas para identificar las zonas que representan mayor riesgo dentro de la unidad de análisis.

Los autores desarrollan un sistema basado en el modelamiento de las características y particularidades de los taludes conforme avanza el proceso de minado, resaltando la importancia de conocer los lugares más probables dónde pudiesen ocurrir deslizamientos de material y lo importante de la complementación con los sistemas actuales y modernos de detección de cambios volumétricos de espacio de las zonas de mayor interés que permitan desarrollos en evaluaciones y predicciones de caídas de rocas.

El estudio finaliza con una evaluación mediante modelamiento con inteligencia artificial para determinar los indicadores principales de susceptibilidad del diseño geométrico actual de la operación y el aprendizaje obtenido por la evaluación histórica de caídas de rocas procesados por el algoritmo definido.

López, J., & Torres, R. (2020) en su investigación “Rockfall hazard assessment and mitigation in open pit mines”

Los autores orientan su estudio en la evaluación del riesgo de una eventual caída de rocas en minas a cielo abierto, el cuál catalogan como un problema común en la minería superficial, que compromete la seguridad de los trabajadores, así como la integridad de infraestructura, componentes y maquinarias.

Los autores enfatizan en el análisis de factores geológicos y operativos que favorecen la inestabilidad de los taludes, centrándose en la importancia de entender todo el entorno geotécnico necesario para la mitigación de riesgos. El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo, desarrollan métodos de simulación contemplando variables como la inclinación de taludes y las condiciones externas de intemperie.

Las diversas estrategias de mitigación incluyen barreras físicas y la complementación con sistemas de monitoreo en tiempo real. Los resultados sugieren que la implementación de medidas preventivas debe estar sustentada en una adecuada evaluación integral de los riesgos de caída de rocas para la mejora significativa de la seguridad operativa de las minas.

Smith, A., & Johnson, P. (2019). En la investigación “Geomechanical analysis of rockfall events in surface mining operations”

Los autores en el artículo evalúan los eventos de caídas de rocas en minas superficiales con un enfoque geomecánico, por medio de análisis a detalle de casos particulares de caídas de rocas, los autores identifican las diferentes condiciones que contribuyeron a la ocurrencia de estos eventos. Los modelos numéricos utilizados para simular trayectorias de caídas de rocas permiten proporcionar una comprensión más detallada de los mecanismos que son los generadores de estos eventos.

Los hallazgos de la investigación sugieren que las condiciones de terreno, la fracturación, la presencia de estructuras y el tipo de roca, son los fundamentales en la estabilidad de los taludes. Además de ello se evalúan las implicaciones de estos resultados para la planificación y ejecución de operaciones mineras. El estudio concluye que la implementación de un enfoque basado en la modelación numérica puede mejorar las estrategias de mitigación y prevención de caídas de rocas, asegurando un entorno de trabajo más seguro.

1.4.2 Antecedentes investigativos nacionales

Yalan, L e al. (2020) en su tesis de investigación titulada “Reducción del riesgo de caída de rocas a nivel de banco en una operación minera a tajo abierto con la aplicación de un análisis estructural”.

Los autores efectúan diferentes tipos de análisis incluyendo análisis probabilísticos de simulaciones sobre caída de rocas hacia zonas en niveles inferiores con el fin de identificar cuál es el posible impacto para la unidad de interés ante la ocurrencia de un evento de este tipo.

Los autores focalizan su estudio en los datos provenientes de los mapeos estructurales que se realizan en la zonas de interés mediante el despliegue de drones los cuáles poseen la ventaja de acceder a zonas de mayor complejidad recalcando la importancia de la obtención de información actualizada del status de las diversas zonas de interés, posteriormente procesan la información en modelos fotogramétricos, para una posterior evaluación estadística de escenarios y modelamiento en softwares comerciales con el fin de que se identifiquen los principales sectores con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de desplazamiento de bloques de macizo rocoso.

Finalmente, con los resultados obtenidos plantean la reevaluación de los diseños geotécnicos con el fin de reducir los riesgos, concluyendo en las sugerencias de reducciones de ángulos de taludes en las áreas de mayor criticidad para asegurar la continuidad de la operación reduciendo la exposición ante un evento de esta naturaleza.

Córdova, M., & Quispe, J. (2022) en su estudio “evaluación del riesgo de caídas de rocas en minas superficiales en Perú: Un enfoque geotécnico”.

Los autores en el estudio investigan el riesgo de caídas de rocas en minas superficiales ubicadas en diversas regiones de Perú, un país con una significativa actividad minera. Los autores realizan un análisis geotécnico detallado de los taludes en varias minas, identificando factores clave que influyen en la estabilidad de las pendientes. Utilizando técnicas de modelación numérica, el estudio simula las trayectorias de las rocas en caída libre, considerando variables como la geomorfología del terreno, la composición del suelo y las condiciones climáticas.

Los hallazgos revelan que diversos factores geológicos, como la fracturación y la presencia de agua, son determinantes en la ocurrencia de caídas de rocas. Además, se discuten las implicaciones de estos resultados para la seguridad de las operaciones mineras y se proponen medidas de mitigación, como la instalación de sistemas de monitoreo y la implementación de barreras físicas.

Los autores concluyen que una evaluación integral del riesgo de caída de rocas es esencial para mejorar las condiciones de seguridad en las minas superficiales peruanas. La investigación proporciona un marco de referencia útil para la aplicación de controles de seguridad y la planificación de operaciones mineras sostenibles, contribuyendo así a la protección de los trabajadores y equipos en el sector.

Torres, A., & Mendoza, L. (2021) en su estudio “análisis de la estabilidad de taludes en minas a cielo abierto en Perú”

Los autores presentan un análisis detallado de la estabilidad de taludes en minas a cielo abierto en Perú, utilizando una combinación de estudios de campo y modelación matemática. El objetivo principal de la investigación es identificar los factores que influyen en la caída de rocas y proponer un conjunto de recomendaciones para el diseño seguro de taludes. Los autores realizan simulaciones de diferentes escenarios geotécnicos, evaluando cómo diversas condiciones, como la humedad del suelo y la composición geológica, afectan la estabilidad de los taludes.

A través de su análisis, los investigadores identifican patrones específicos en las trayectorias de caída de rocas, lo que les permite establecer un conjunto de pautas para el diseño de taludes que minimicen el riesgo de caída. El estudio destaca la importancia de integrar el análisis de la trayectoria de caída de rocas en la fase de planificación de proyectos mineros, enfatizando que una aproximación proactiva puede prevenir accidentes y mejorar la seguridad operativa.

Finalmente, los autores sugieren que las empresas mineras adopten prácticas de monitoreo continuo para detectar cambios en las condiciones del talud y reaccionar de manera oportuna ante posibles riesgos.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Modelo estructural*

Dey, J, Roy (2021) 'Drone photogrammetry: a structural data gathering tool for open pit mining geotechnics'.

La información recopilada para la generación de modelos estructurales se da con frecuencia rutinaria, el levantamiento de esta información permite tener una mejor comprensión estructural adicional que permite optimizar los diseños geométricos del yacimiento.

Según las recomendaciones de la entidad OSINERGMIN, el modelo estructural debe ser desarrollado en 02 niveles:

- Estructuras mayores e intermedias (mayores dimensiones como fallas)
- Estructuras menores (menores dimensiones de estructuras)

La información estructural se modela de diversas formas según las dimensiones de la operación y la tecnología de procesamiento de información que permita mayores niveles de diferenciación.

El levantamiento de información estructural proveniente de la recopilación geotécnica complementaria al mapeo litológico de una determinada zona de interés, permitirá detallar la presencia de estructuras de diferentes tipos y características que facilitará la parametrización de las zonas de interés, las mismas deben contar con la documentación, registros de información y las herramientas necesarias para el dimensionamiento de estructuras.

Lo que se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Planos de foliaciones tectónicas



Fuente: Rustichelli et al. Deformation within the Pisco Basin sedimentary record (Southern Peru): Stratabound orthogonal vein sets and their impact on fault development. (2016).

2.1.2 Mapeo con drones

Kalbende, K (2020). "Drone Technology Solutions for the Mining Industry"

Las compañías mineras comenzaron a implementar nuevas tecnologías mediante la utilización de drones para la recopilación de datos fotogramétricos para levantamientos de todo tipo y utilidad, así como para la gestión de los diversos componentes que se tienen en una Unidad Minera, debido a la facilidad de recopilar múltiple información que permite obtener cálculo de volumen con mayor precisión y eficacia.

Los drones se catalogan como equipos gran importancia en la minería dado que se han integrado con los diversos procesos de recopilación de información en las unidades mineras gracias la flexibilidad y facilidad de acceso con las que cuentan a zonas que anteriormente se consideraban de un alto grado de complejidad de acceso, principalmente por ser zonas de difícil acceso para las personas representando un potencial riesgo, sin embargo con la utilización de estos equipos se optimiza la seguridad e incrementa la productividad en sus aplicaciones, asimismo mejora el alcance y perspectivas de visualización como en la Figura 3.

Asimismo, los drones destacan por 02 ventajas principales, por los tipos de sensores que permiten inspecciones más eficientes y veloces especialmente en situaciones atípicas, y por la accesibilidad a zonas de difícil acceso dónde se tengan obstrucciones.

Figura 3

Aplicaciones de drones en la industria minera.



Fuente: Revista IMG. Drones una herramienta para la minería inteligente. (2020). tomado de: <https://www.revistaimg.com/los-drones-una-herramienta-para-la-mineria-inteligente/>

2.1.3 Diseño de taludes

Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. Australia: CSIRO,

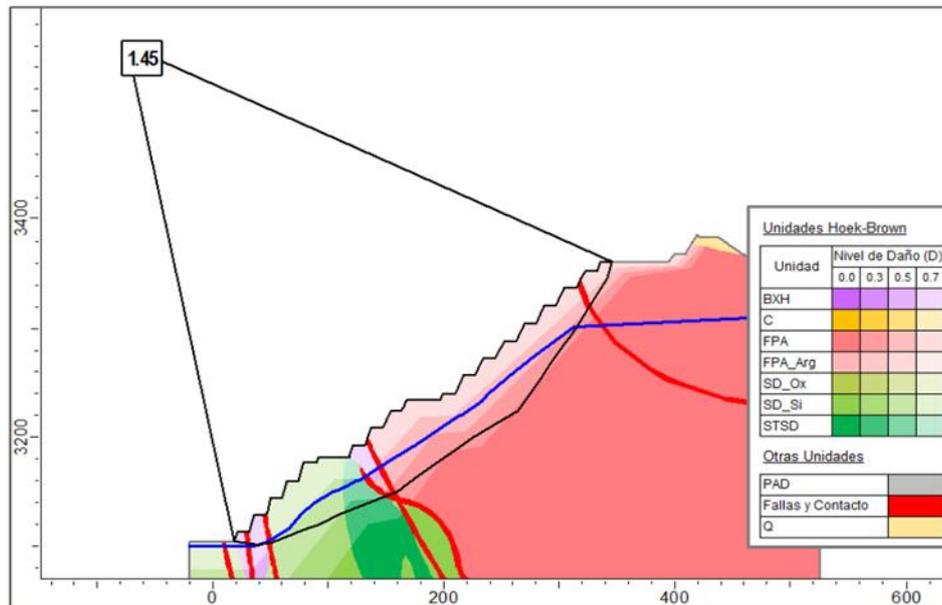
Para la realización de un diseño de taludes, se requiere utilizar criterios de diseño ante una posibilidad de falla que afecten la pendiente diseñada o establecida, tanto entre niveles de bancos como entre niveles interrampa y finalmente como diseño de ángulo global de la mina.

La evaluación de los diseños debe ser aceptada por organismos reguladores del Estado dónde emplace el yacimiento minero, para efectuar adecuadamente el diseño de taludes, se requiere el modelo con los dominios geotécnicos parametrizados con las características y las propiedades de la roca en la zona de interés, para posteriormente

definir un diseño que cumpla con un factor de seguridad establecido, un ejemplo de evaluación del factor de seguridad se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Evaluación de Factor de Seguridad en Mina Superficial – Mina La Arena.



Fuente: ITASCA. (2019). Estudio geotécnico para explotación de fases 7 y 8 del Tajo Calaorco.

2.1.4 Voladura

Lopez, J., Bermudez, P. (2003): “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”

La técnica de voladura consiste en utilizar la energía generada por la acción de explosivos, los cuales fueron cargados en barrenos que fueron previamente perforados y conectados mediante la utilización de accesorios de iniciación con el fin de fragmentar la roca y a su vez desplazar el material de manera controlada sin afectar elementos externos.

La energía liberada por la reacción química ocasionada en la detonación de los explosivos, se divide en energía útil (energía que influye directamente en la fragmentación) y en energía no útil (consecuentes de la voladura, polvo, ruido, vibraciones), por lo que el empleo de este tipo de energía debe ser controlado con el fin de no generar impactos en la estabilidad de los taludes diseñados y a su vez alcanzar los objetivos de fragmentación definidos, un ejemplo de la liberación de energía generada por voladura se visualiza en la Figura 5.

Figura 5

Voladura en mina superficial.



Fuente: Tecnología Minera (2023). Métodos comunes de voladura en minería a cielo abierto. Tomado de: <https://tecnologiaminera.com/noticia/5-metodos-comunes-de-voladura-en-mineria-a-cielo-abierto-1663167963>

2.1.5 Diseño de voladuras

Bernaloa, J., Castilla, J. (2013) Manual de Perforación y Voladura de Rocas en Minería. Universidad Politécnica de Madrid.

El diseño de voladuras requiere la identificación previa de parámetros no controlados como son los que dependen del tipo de roca del terreno en el cual se efectuará el proceso. Para el diseño correcto de una voladura, se toman los parámetros geométricos del yacimiento, los relacionados al macizo rocoso y los que dependen del tipo de explosivo a utilizar.

Para el posterior procesamiento de los parámetros mencionados se tienen diversos modelos relacionados al objetivo de fragmentación requerido con el fin de definir adecuadamente los parámetros controlables, pero a su vez evitando impactos negativos por vibraciones, sobrepresiones de aire, flyrock o generación de gases nitrosos; en definitiva, la disposición de controles según la criticidad de la zona dónde se efectuará la voladura.

Es la energía útil producto de la reacción química de los explosivos la que genera impacto en los taludes por efectos de vibraciones y a su vez la condición de banquetas colmatadas debido al desplazamiento de los fragmentos de roca post voladura hacia la cara libre del talud, tal como se observa en la Figura 6.

Figura 6

Voladuras controladas en minería a cielo abierto.



Fuente: Cueva, O et al. Técnicas modernas de voladuras controladas en minería a cielo abierto. (2017).

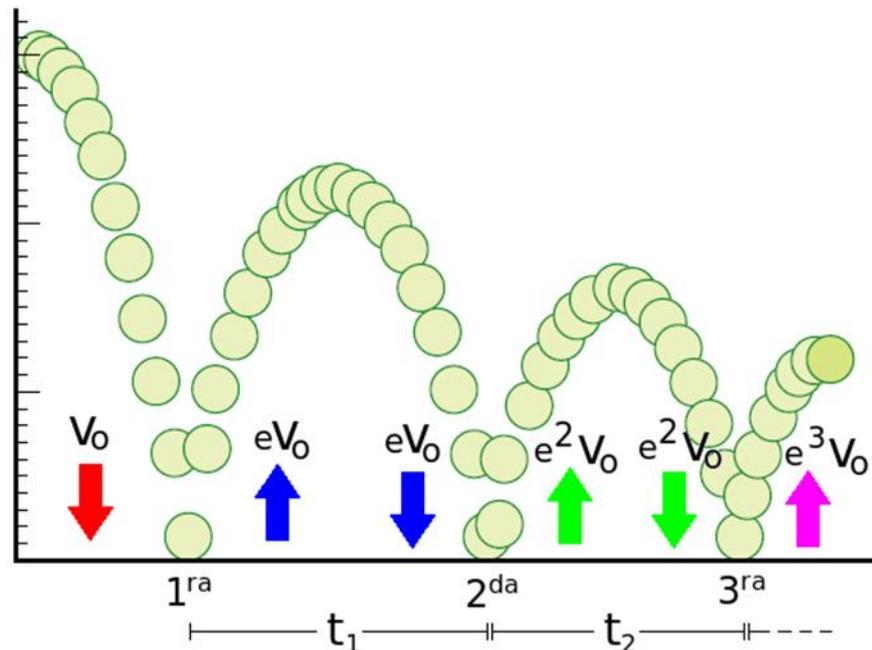
2.1.6 Coeficiente de restitución

De acuerdo a Montiel, E. y Zuñiga, E. (2014). Barreras elásticas de protección contra caídos de rocas. Ejemplo de aplicación en la C.H. “Fernando Hiriart Balderrama”.

El coeficiente de restitución es uno de los parámetros más relevantes en el cálculo de caída de rocas, debido a que permite modelar el desarrollo de los rebotes a través de la superficie por la cual se desplazará el objeto, estos índices brindarán la información sobre la energía que retendrá el objeto después de cada rebote, este coeficiente se dividirá en valores del tipo normal y tangencial, la acción de rebote se observa en la Figura 7.

Figura 7

Comportamiento del objeto frente a rebotes para evaluación de coeficiente de restitución.



Fuente: Salazar, J. (2019), Coeficiente de restitución en experimentos demostrativos. Tomado de: <https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/CoeficienteRestitucion>

2.1.7 Caída de rocas

Geobrugg Group. 2018 “Rockfall mitigation measures in open pit mines. Case study quarry wall stabilisation and protection works at Mandai”

Define que los peligros por caída de rocas o desprendimiento de bloques de macizo rocoso en minas a cielo abierto existen especialmente por lo ángulos elevados que se tienen en las Unidades Mineras. Las áreas que cuentan con mayor exposición son las zonas de bancos inferiores en dónde se tengan trabajos programados de minado y en las rampas de acarreo dónde se tiene el tránsito constante de los equipos.

De forma sintetizada el término caída o desprendimiento de rocas refiere alusión a cualquier material suelto que cae o rueda por una determinada superficie. La caída de rocas se debe a diversos factores tanto operacionales como condicionantes naturales, tal como es el caso de del tipo de material presente como discontinuidad en una determinada franja del comportamiento del macizo rocoso, tal como se muestra en la Figura 8, dónde se visualiza que la zona dónde se encuentra el carbón se ha tenido desplazamiento de material.

Figura 8

Caída de rocas en taludes.



Fuente: Maccaferri, T (2023). How to Protect Open-Pit Mine Infrastructure from Rockfalls. Tomado de: <https://www.miningtechnology.com/contractors/roofing/maccaferri1/pressreleases/open-pit-mine-rockfalls/>

Por otro punto producto del proceso propio del avance de minado y la profundización en sentido vertical de un yacimiento minero, uno de las condicionantes que se generan son las banquetas colmatadas producto del proceso de voladura y la eyección de rocas hacia las crestas de los taludes.

2.1.8 Análisis de riesgo geotécnico

De acorde a lo descrito por Bishop, A. W. (2018) en su estudio “The stability of earth slopes.”

El análisis de riesgo geotécnico es un enfoque sistemático utilizado para identificar, evaluar y gestionar los riesgos asociados con las condiciones del terreno en proyectos de minería y construcción. Este análisis implica la recopilación de datos geológicos y geotécnicos, así como la modelación de diferentes escenarios que podrían causar inestabilidad en las estructuras, como los taludes. En el contexto de la minería superficial, el análisis de riesgo geotécnico permite a los ingenieros evaluar la probabilidad de caídas de rocas, proporcionando información crítica para el diseño de controles de seguridad y la planificación de operaciones.

Los métodos de análisis de riesgo geotécnico incluyen el uso de software de modelación, que permite simular diferentes condiciones y evaluar cómo pueden influir en la estabilidad de los taludes, cómo la presencia de material con propiedades que podrían afectar la estabilidad mostrado en la Figura 9. Además, se puede realizar un análisis cualitativo y cuantitativo que considere factores como la historia de fallas, la geología local y las condiciones climáticas. Este enfoque integral es fundamental para minimizar riesgos y asegurar la protección de los trabajadores y la maquinaria en la mina.

Figura 9

Presencia de carbón en taludes



Fuente: Mina La Arena (2021). Presencia de carbon en taludes de una mina Superficial. Elaboración propia.

2.1.9 Monitoreo y control de deslizamientos

Sidle, R. C., & Ochiai, H. (2016). Landslides: Processes, prediction, and land use.

El monitoreo y control de deslizamientos es un componente crucial en la gestión de riesgos en la minería superficial. Este proceso implica la implementación de tecnologías y metodologías para detectar y evaluar movimientos en el terreno que pueden llevar a caídas de rocas. Las tecnologías de monitoreo incluyen sensores de inclinación, sistemas de radar, y drones que permiten la obtención de datos en tiempo real sobre la estabilidad de los taludes.

Figura 10

Equipos de monitoreo de estabilidad de taludes



Fuente: América Minera (2022). Perú: Quellaveco usa radares, imágenes satelitales y estación robotizada para monitorear estabilidad de taludes. Tomado de: <https://americaminera.com/peru-quellaveco-usa-radares-imagenes-satelitales-y-estacion-robotizada-para-monitorear-estabilidad-de-taludes/>

La información obtenida a través del monitoreo puede ser utilizada para desarrollar modelos predictivos que alerten sobre posibles deslizamientos antes de que ocurran. Esto permite a los operadores de la mina tomar decisiones informadas sobre la ejecución de actividades, la programación de voladuras y la aplicación de medidas de contención. Un enfoque proactivo en el monitoreo no solo mejora la seguridad, sino que también optimiza la productividad al prevenir interrupciones inesperadas en las operaciones mineras.

2.1.10 Ingeniería de taludes

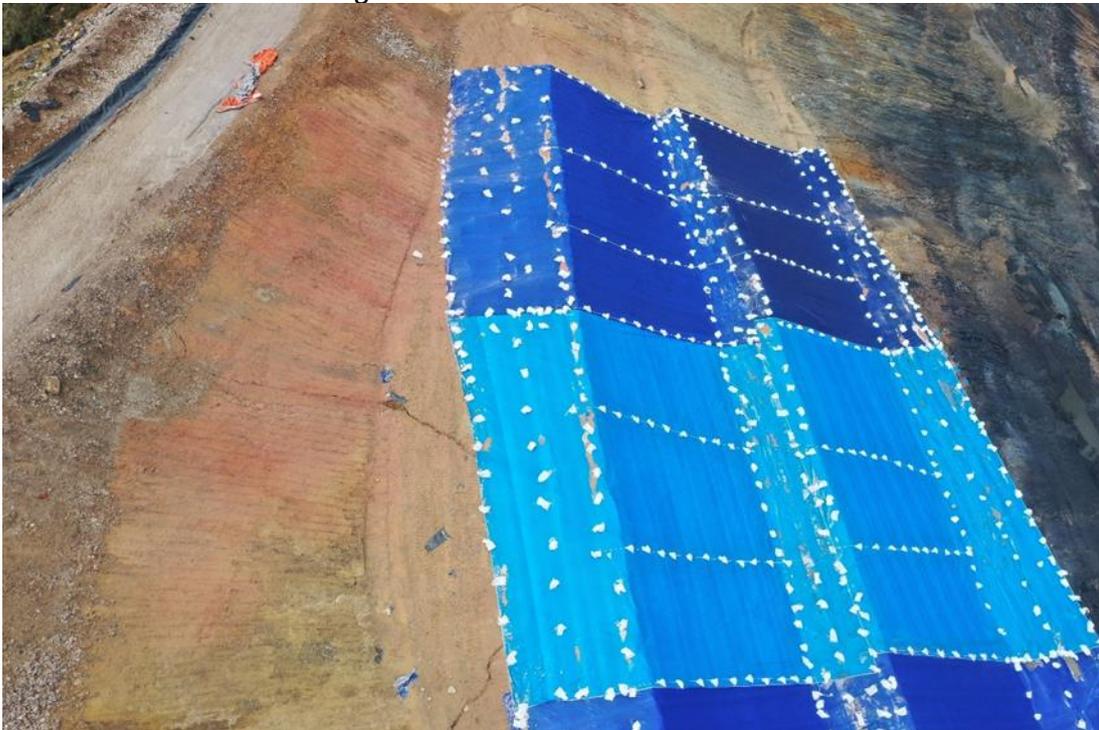
Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2018). Soil Strength and Slope Stability.

La ingeniería de taludes se centra en el diseño y análisis de pendientes en contextos geotécnicos, como en las minas superficiales. Este campo de estudio es fundamental para garantizar la estabilidad de los taludes y prevenir caídas de rocas. La ingeniería de taludes implica la evaluación de factores como la geometría del talud, el tipo de material, las condiciones de drenaje y las fuerzas externas que pueden afectar la estabilidad, como la lluvia o las vibraciones provocadas por voladuras.

Los ingenieros utilizan modelos matemáticos y simulaciones para predecir el comportamiento de los taludes bajo diversas condiciones. El diseño de taludes debe considerar no solo la seguridad, sino también la eficiencia de las operaciones mineras. Una planificación adecuada puede reducir la cantidad de material extraído y optimizar la logística de transporte. Además, se pueden implementar técnicas de estabilización, como el uso de geotextiles, tal cual se muestra en la Figura 11 y vegetación, para mejorar la resistencia de los taludes frente a fenómenos naturales.

Figura 11

Estabilización de taludes con geotextiles



Fuente: Mina La Arena (2021). Estabilidad de taludes con el uso de geotextiles, elaboración propia.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Modelo

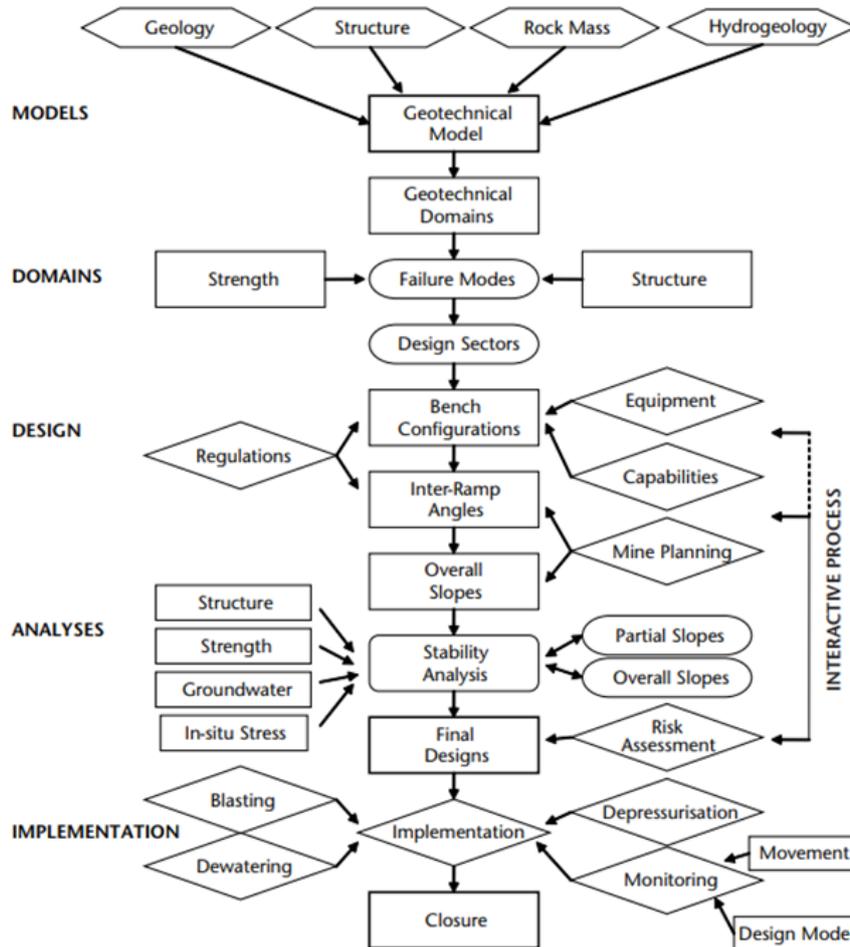
La conceptualización de un modelo geotécnico es la base fundamental para todo el diseño de taludes. Este modelo está compuesto por cuatro sub-modelos (Read & Stacey, 2009), cómo se detalla en la Figura 12.

- Modelo geológico
- Modelo Estructural
- Modelo Hidrogeológico

- Modelo del macizo rocoso (Caracterización)

Figura 12

Método para el diseño de taludes.



Fuente: Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design.

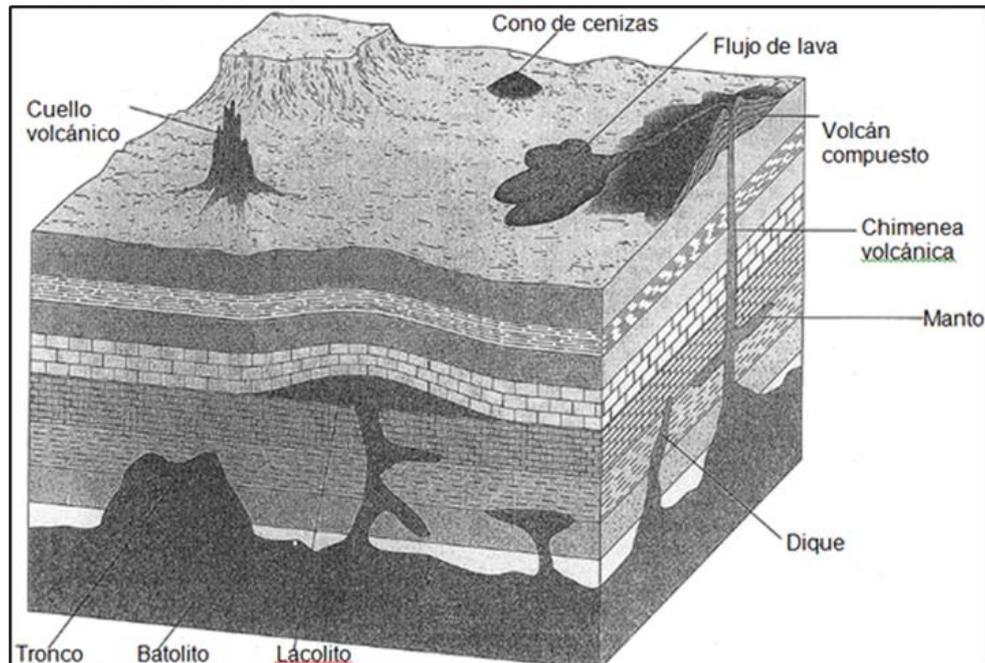
2.2.2 Intrusión

Murawski, H. (1982). Geologisches Wörterbuch. 8., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Define a la intrusión como el cuerpo de roca ígnea que se cristalizó a partir del magma fundido que se encuentra por debajo de la superficie terrestre. Para posteriormente emerger como plutones, las rocas provenientes de este proceso son conocidas como rocas intrusivas, la descripción de formación se denota en la Figura 13.

Figura 13

Formación de rocas intrusivas



Fuente: Wicander, R (2000). Fundamentos de geología. Cap 4, pág. 80.

2.2.3 Banco

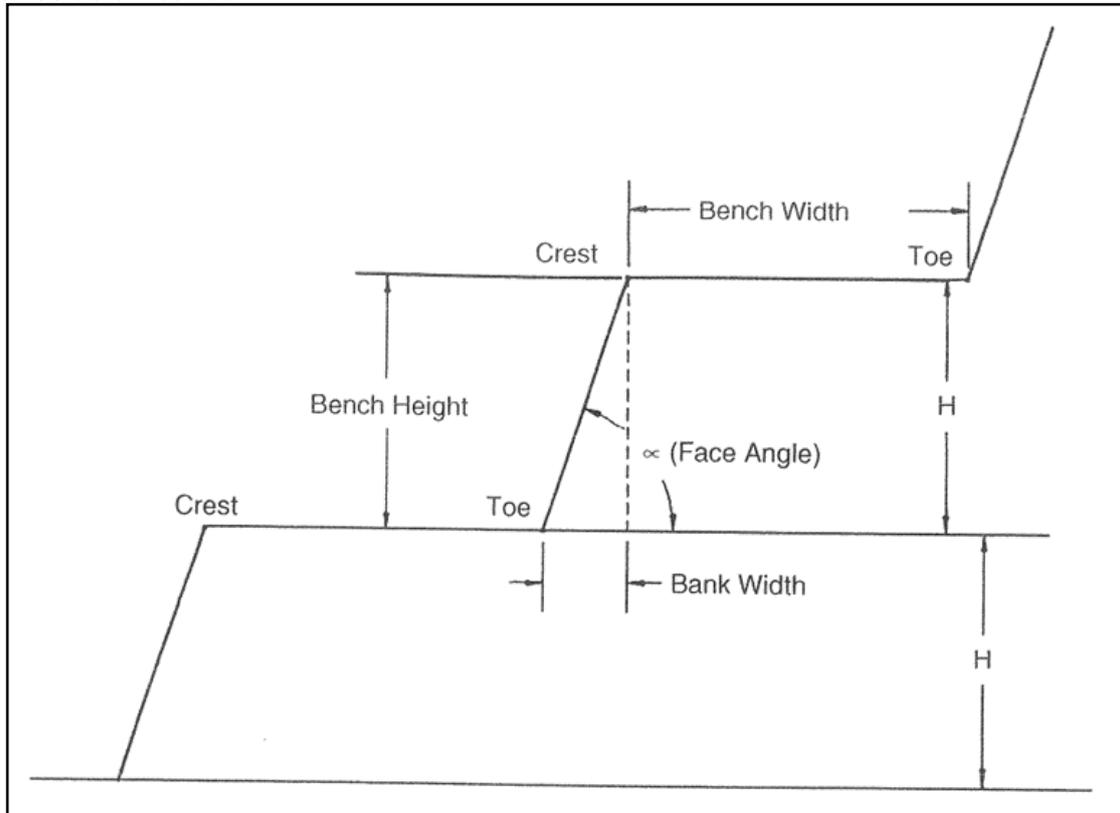
Hustruild, W., Kuchta, M. (2006) "Open Pit Mine Planning & Design". Taylor & Francis.

Los bancos son los componentes básicos de extracción en una mina superficial, cada banco tiene una superficie con un punto superior e inferior, asimismo la superficie expuesta hacia el lado opuesto del macizo rocoso, se conoce como cara de talud. Los parámetros principales geométricos principales son la cresta, el piso, el ángulo de cara.

Uno de los aspectos principales en el diseño de los bancos aparte de la altura y el ángulo del mismo, los cuáles son calculados por diversos factores de seguridad, características de rocas, prácticas de voladura entre otros factores adicionales. Se tienen los anchos de los bancos y a su vez las bermas de seguridad, estos 02 conceptos importantes cuentan con un propósito principal, que es el de retener el material que se desliza desde los bancos superiores y a su vez detener el progreso de los cantos rodados que caen por la superficie, en la Figura 14 se muestra el avance de minado con los diseños finales de las banquetas

Figura 14

Partes de un banco.



Fuente: Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design.

2.2.4 Deslizamiento

Fell, R (2005). "A Framework for Landslide Risk Assessment and Management", define el deslizamiento, como la deformación y caída de masa de roca por la inestabilidad de zonas específicas que presentaron condiciones propicias para que en conjunto con la gravedad generen esta caída masiva de material.

En la historia de la minería supercificial, se han tenido diversos precedentes, uno de los más importantes fue el ocurrido en la mina Byngham Canyon, como se puede observar en la Figura 15.

Figura 15

Deslizamiento de material en la mina Byngham Canyon.



Fuente: Pankow, K (2014). Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data. GSA Today. Volume 24, Issue 1.

2.2.5 Fragmentación

EXSA, 2021 “Manual práctico de voladuras”, define la fragmentación de rocas por acción de explosivos como consecuencia de la activación de los mismos que generar la transferencia de energía en el taladro dónde se han cargado los explosivos y a su vez la roca circundante.

La fragmentación generada por las voladuras, son previamente evaluados mediante diseños de voladura con el fin de obtener un tamaño de partículas óptimo en función a la necesidad de cada operación, el indicador que permite medir la eficiencia del proceso de fragmentación se conoce como P80 el cual indica la medida de roca pasante en longitud (in, cm) con el 80% de certeza, otro indicador importante en la fragmentación es el grado de uniformidad de la zona analizada post voladura, dónde se analiza la heterogeneidad del comportamiento de la pila de rocas post voladura, en las cuáles podemos identificar valores como el % de presencia de material grueso y fino existente en la pila de materia analizada, este tipo de análisis se muestra como ejemplo en la Figura 16.

Figura 16

Análisis de pila de fragmentación.



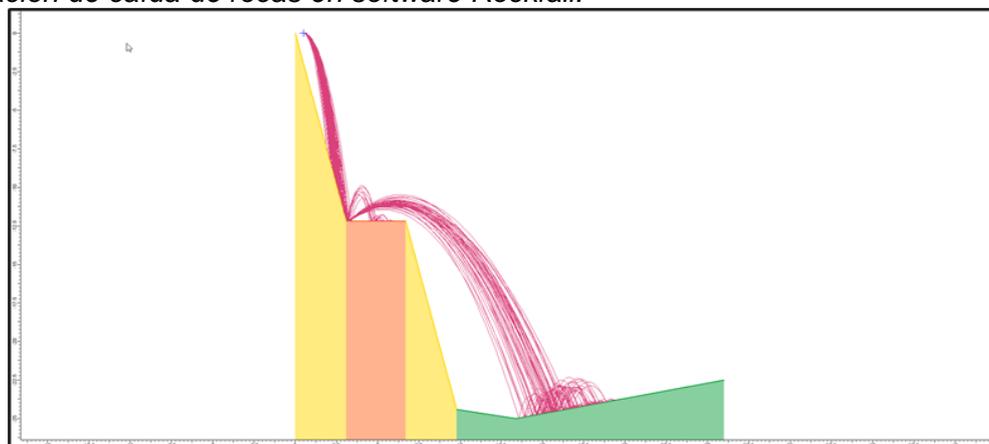
Fuente: Orica Mining (2023). Análisis de pila de fragmentación – Mina la Arena.

2.2.6 Simulación

La simulación y modelamiento de caída de rocas, se efectúa mediante el procesamiento y análisis de información estadístico, el análisis descrito se efectúa tanto en modelos 2D como se muestra en la Figura 17, así como también en la actualidad se incorporan soluciones que permiten el modelamiento en 3D gracias al mayor poder computacional desarrollado. El objetivo de las simulaciones y los análisis son el de determinar la velocidad y el rebote generado por la caída de rocas en la zona de evaluación, para efectuar este tipo de evaluaciones se requiere una serie de inputs locales que permitirán realizar la evaluación correspondiente.

Figura 17

Simulación de caída de rocas en software Rockfall.



Fuente: Rocscience (2022). Quick start guideline to rockfall 2D. Tomado de: <https://www.rocscience.com/help/rockfall/tutorials/tutorials-overview/1-quick-start>

2.2.7 Erosión

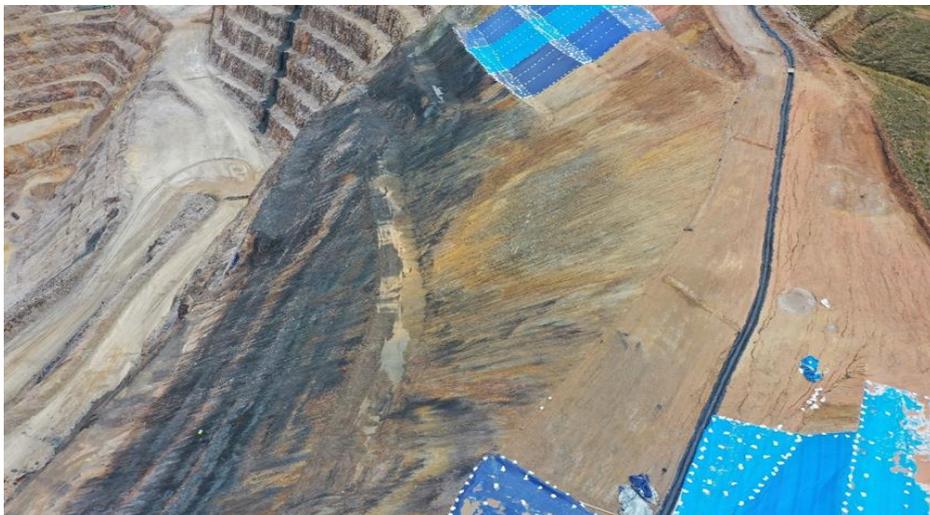
La erosión es el proceso mediante el cual el material del talud se desgasta y se desplaza debido a la acción del agua, viento o gravedad. Este fenómeno puede debilitar la estabilidad de los taludes y aumentar el riesgo de caída de rocas. Según Pimentel et al. (2019), la erosión puede ser exacerbada por actividades mineras, como la falta de cobertura vegetal y las prácticas de extracción inadecuadas. Implementar medidas de control de erosión, como la revegetación y la construcción de drenajes adecuados, es crucial para mantener la estabilidad del talud y reducir riesgos asociados.

2.2.8 Estabilidad

La estabilidad de un talud se refiere a su capacidad para resistir fuerzas que podrían provocar su colapso. Este concepto es fundamental en geotecnia, ya que un talud inestable puede resultar en deslizamientos de tierra o caídas de rocas, poniendo en riesgo tanto a las operaciones mineras como a la seguridad de los trabajadores. La evaluación de la estabilidad implica el uso de métodos de equilibrio límite y análisis numérico, considerando factores como la geometría del talud, las propiedades mecánicas del material y las condiciones ambientales, como la saturación del suelo y la presión del agua intersticial, para poder efectuar los trabajos y diseños que aseguran mejor estabilidad de la zona como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Trabajos de estabilidad



Fuente: Mina La Arena (2021). Trabajos de Estabilidad Fase 8 – Mina la Arena.

2.2.9 Monitoreo

El monitoreo de deformaciones es un proceso crítico que implica la observación continua de cambios en la geometría de un talud a lo largo del tiempo. Utilizando instrumentos como inclinómetros, extensómetros y sistemas de monitoreo remoto cómo se muestra en la Figura 19, se pueden detectar movimientos que indiquen un aumento en el riesgo de deslizamiento. Este proceso es vital para la gestión de riesgos en operaciones mineras, ya que permite tomar decisiones informadas sobre la seguridad y la estabilidad de los taludes.

Figura 19

Monitoreo de taludes mediante radar



Fuente: Mina La Arena (2023). Monitoreo de estabilidad de taludes con radar geotécnico.

2.2.10 Mitigación

Las estrategias de mitigación son un conjunto de acciones diseñadas para reducir el riesgo de caídas de rocas y mejorar la seguridad en las operaciones mineras. Estas estrategias pueden incluir el diseño de taludes, la instalación de barreras y sistemas de monitoreo, y son fundamentales para proteger tanto a los trabajadores como a la infraestructura. La implementación de medidas de mitigación adecuadas es crucial para garantizar la seguridad operativa y la sostenibilidad de las actividades mineras, como en el caso de la Figura 20 dónde se instalan barreras físicas.

Figura 20

Barreras contra desprendimiento de rocas



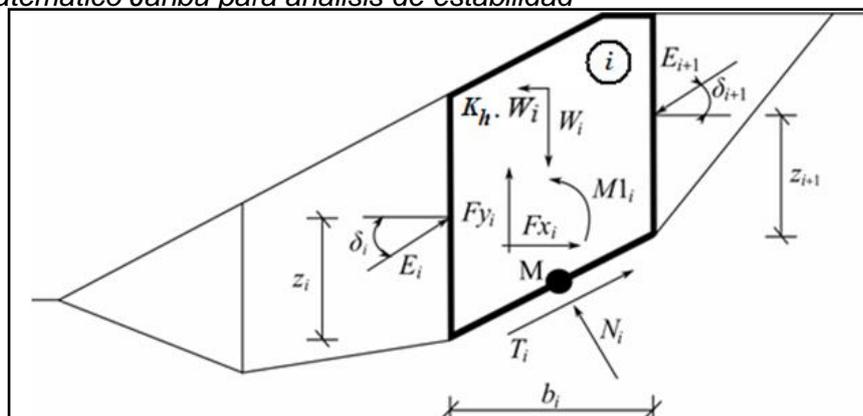
Fuente: Maccaferri Peru (2021). Barreras dinámicas nueva Fuerabamba. Tomado de: <https://www.maccaferri.com/pe/casos-de-%C3%A9xito/barreras-dinamicas-nueva-fuerabamba/>

2.2.11 Análisis

El análisis numérico es una técnica utilizada para simular el comportamiento de los taludes bajo diferentes condiciones de carga y humedad. A través de métodos como el de elementos finitos, los ingenieros pueden modelar la respuesta de un talud a factores externos, como lluvias intensas o cambios en la presión del agua. Este tipo de análisis es fundamental para la evaluación de la estabilidad y la planificación de medidas de mitigación en operaciones mineras.

Figura 21

Modelo matemático Janbu para análisis de estabilidad



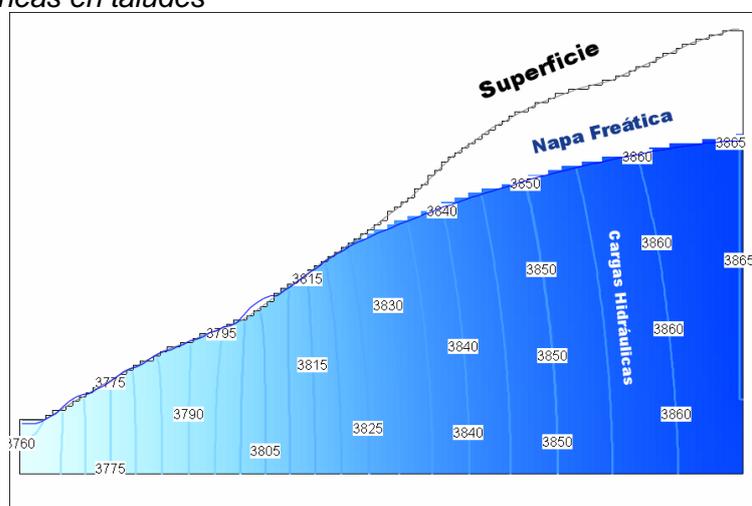
Fuente: GEO5 (2021). Superficie de deslizamiento poligonal con modelo Janbu

2.2.12 Interacción

La interacción entre el agua y el suelo es un factor crítico en la estabilidad de taludes. La presión del agua intersticial puede reducir la resistencia del suelo, aumentando el riesgo de deslizamientos. Comprender cómo el agua se mueve y se distribuye en el terreno es esencial para diseñar sistemas de drenaje efectivos y prevenir la inestabilidad. Este concepto abarca tanto el drenaje superficial como el drenaje profundo, cada uno con su propio impacto en la estabilidad del talud, cómo se observa en la Figura 22.

Figura 22

Aguas subterráneas en taludes



Fuente: Gihadatari (2019). Régimen de aguas subterráneas en un talud. Tomado de: <https://gidahatari.com/ih-es/como-es-el-regimen-de-aguas-subterrneas-en-un-talud>

2.2.13 Riesgo

El riesgo se refiere a la probabilidad de que ocurra un deslizamiento o caída de rocas, evaluado mediante el análisis de datos históricos y condiciones geológicas. Este análisis permite predecir la frecuencia y magnitud de fallas potenciales, ayudando a priorizar áreas que requieren atención especial en las operaciones mineras. La gestión del riesgo es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores y la continuidad de las operaciones.

2.3 Hipótesis general

Al analizar la potencial trayectoria de la caída de rocas permitirá optimizar los controles de seguridad en niveles inferiores de una mina superficial.

2.4 Variables

Variable independiente:

Análisis de la trayectoria potencial de caída de rocas.

Variable dependiente:

Controles de seguridad en niveles inferiores.

Indicadores

- Desplazamiento de rocas
- Dirección de caída de rocas
- Altura de rebote

2.5 Tipo y Diseño de la Investigación

2.5.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de enfoque cuantitativo basado en el análisis de características epistemológicas detallado.

Respecto a la percepción de la realidad, la investigación es objetiva dado que analizará datos numéricos, valores determinísticos y se efectuarán análisis estadísticos.

Según la característica de razonamiento, la investigación es del tipo deductiva, dado que se contrasta la hipótesis planteada y la importancia de esta.

De acuerdo con la característica de finalidad, la investigación es del tipo comprobatoria concluyendo en la validación de la hipótesis mediante la evaluación y simulación de escenarios.

La investigación se orienta al resultado, debido a que la validación adecuada de la hipótesis se recolectó la información necesaria para desarrollar el proyecto.

Conforme el principio de verdad, la investigación es particular contemplando que la información recolectada es de una zona en específico con características y parámetros propios.

Según la causalidad, la investigación es de tipo cuantitativa, se utilizó información histórica como son los antecedentes de evaluación en los parámetros de interés.

2.5.2 Nivel de Investigación

La investigación es del nivel correlacional, valorando que se evaluaron los datos obtenidos de los análisis de la trayectoria de un potencial de caída de rocas para verificar la eficiencia de los controles de seguridad en los bancos inferiores implementados.

2.5.3 Diseño de la Investigación

La presente investigación es del tipo experimental, los datos obtenidos se analizaron a partir de la recolección de información para la verificación y desarrollo de mejoras respecto a los controles establecidos en los niveles inferiores de una mina superficial.

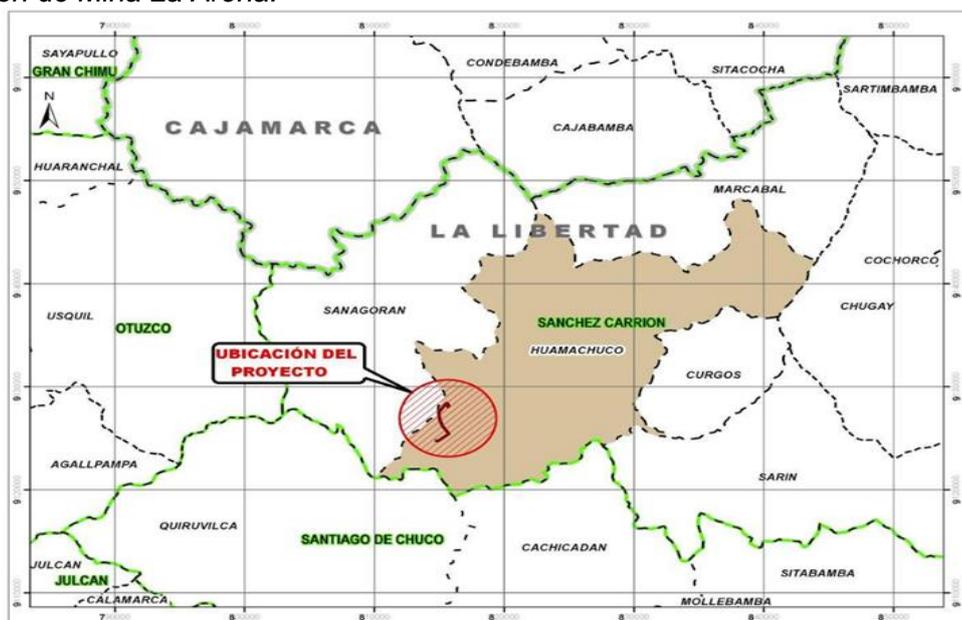
2.6 Unidad de análisis

2.6.1 Ubicación

La presente investigación se desarrolló en la Unidad Minera La Arena, el área del proyecto se encuentra ubicado en el Norte del Perú, a 480 km al NW de la ciudad de Lima, en el departamento de La Libertad, provincia de Sanchez Carrión, distrito de Hauamachuco con una altitud promedio de 3,400 msnm.

Figura 23

Ubicación de Mina La Arena.



Fuente: Ingemmet (2023). Mapa geológico del Perú.
Tomado de: <https://portal.ingemmet.gob.pe/web/guest/mapa-geologico-nacional>

Condiciones ambientales

- Altitud sobre el nivel del Mar : 3 300 msnm
- Temperatura mínima (invierno) : 0 °C
- Temperatura máxima : 20 °C
- Velocidad del viento : 70 km/h
- Condiciones Atmosféricas : Seco/Polvoriento
- Humedad Relativa : 65 %
- Precipitación promedio anual : 628.9 mm
- Nivel Isoceraunico : 30 tormentas eléctricas-año

Medios de transporte

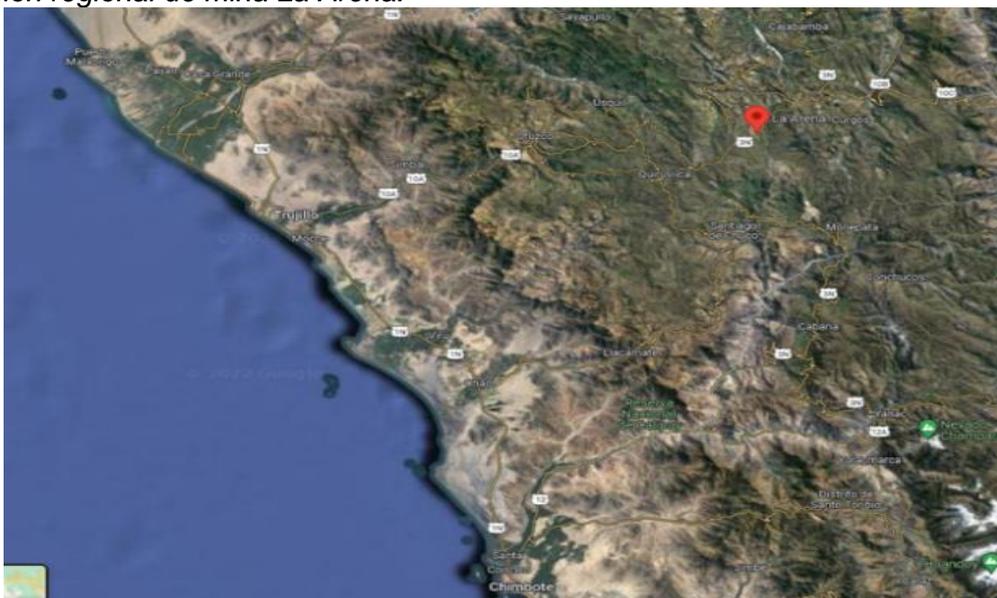
El medio de transporte es vía terrestre por la ruta Lima - Trujillo – Huamachuco o por la vía aérea Lima –Trujillo y después por medios de transporte terrestre hasta Huamachuco.

Existen vías de acceso que facilitan el acceso a la zona del Proyecto.

El acceso por carretera se realiza por la carretera asfaltada Lima – Trujillo – Huamachuco.

Figura 24

Ubicación regional de mina La Arena.



Fuente: Google (s.f.). [Ubicación de mina La Arena referenciada geográficamente mediante Google Earth]

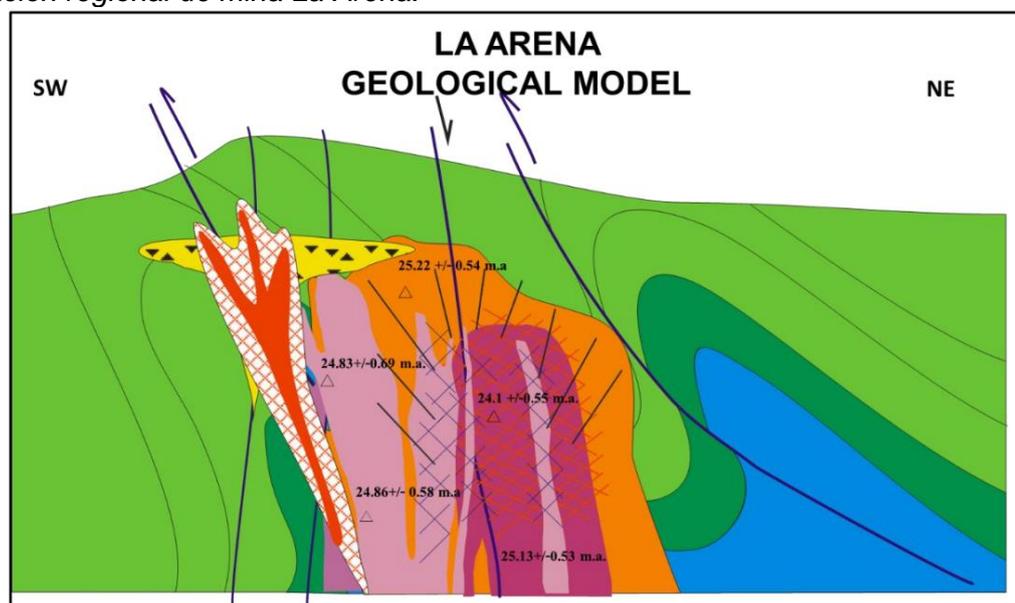
2.6.2 Geología

El área de la mina La Arena está comprendido por la secuencia sedimentaria de la Formación Chimú, conformada principalmente por areniscas, cuarcitas y algunas intercalaciones de limolitas y carbón, afectados por la intrusión de pórfidos dacíticos. Las rocas sedimentarias (predominantemente areniscas) se extienden en el sector oeste del Tajo Calaorco; mientras que los intrusivos se emplazan predominantemente en el sector este del tajo, cómo se muestra en la Figura 25.

Las intrusiones ácidas están ligadas a la mineralización tipo pórfido Cu-Mo (Au), que están en contacto con las rocas clásticas permeables. Las areniscas en el área de estudio son brechadas y muy fracturadas, que en contacto con la roca intrusiva constituyen el principal ambiente litológico donde se alojan los depósitos auríferos lixiviables, determinando el área de Calaorco como una zona de óxidos y brechas.

Figura 25

Ubicación regional de mina La Arena.



Fuente: Mina La Arena. Estudios Geológicos realizados en el yacimiento minero de la Arena. Geología Mina. (2023).

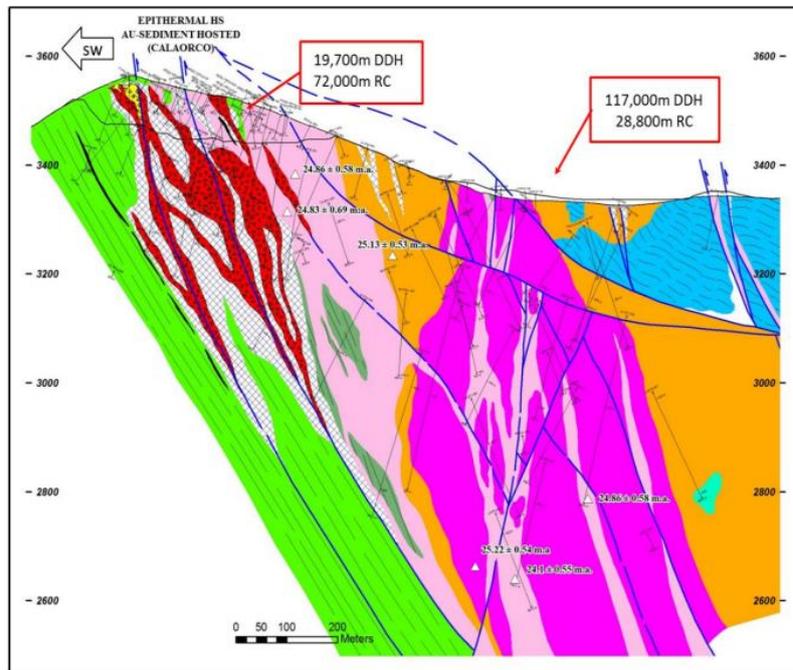
2.6.3 Geomorfología y Estratigrafía

El yacimiento de mina La Arena se encuentra por sobre los 3300 msnm, presenta formaciones con la presencia de colinas y pampas, debido a las diversas formaciones que afloraron por el área del yacimiento. La estratigrafía se caracteriza por la presencia de

intercalación de lutitas con lechos de areniscas. La secuencia de la columna definida permite el origen del yacimiento de tipo Epitermal y pórfido de Cu-Au.

Figura 26

Ubicación regional de mina La Arena.



Fuente: Mina La Arena. Estudios Geológicos realizados en el yacimiento minero de la Arena. Geología Mina. (2023).

2.6.4 Geología Estructural

La zona ha sido sometida a una intensa actividad tectónico-magmática evidenciada por:

- Intenso plegamiento y fallamiento andino.
- Intensa actividad magmática efusiva e intrusiva.
- Arqueamiento del plegamiento andino.
- Generación de fallas de transferencia.
- Actividad magmática hidrotermal.

Distritalmente, la estructura dominante constituye el “Domo de Huamachuco”, generado por la intrusión de un stock elíptico de 20 x 11 km.

En el yacimiento la Arena la mineralización económica está controlada por el sistema estructural NW-SE y NE-SW.

2.6.5 Caracterización geotécnica de la Unidad Minera

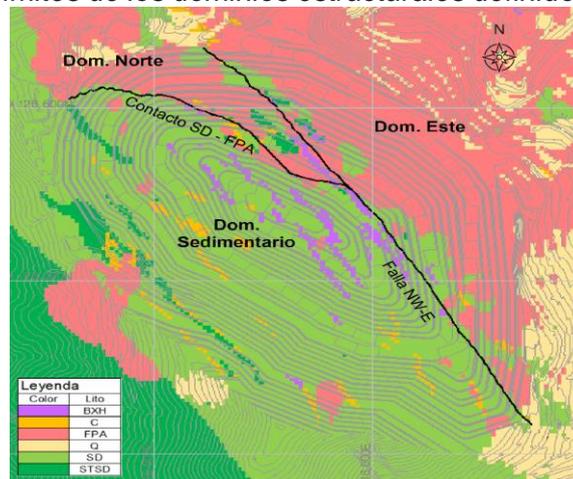
Las rocas que se encuentran presentes en el yacimiento son principalmente Areniscas, cuarcitas con algunas intercalaciones de limolitas y carbón afectados por la intrusión de pórfidos dacíticos, las rocas sedimentarias se extienden en el sector Oeste del Tajo Calaorco. Mientras que el intrusivo se emplazan predominantemente en el sector Este del Tajo.

A partir de los controles identificados en la fábrica estructural del macizo, se han definido y caracterizado 3 dominios estructurales en el tajo:

- **Dominio Este**, asociado a los pórfidos ubicados en el este que, limitado por la Falla NW-E.
- **Dominio Norte**, asociado a los pórfidos ubicados en la pared norte, limitados al este por la falla NW-E y al oeste por el contacto con las Areniscas
- **Dominio Sedimentario**, correspondiente a la parte baja de las paredes norte y este, y pared oeste del tajo.

Figura 27

Unidades litológicas y límites de los dominios estructurales definidos para el Tajo Calaorco.



Fuente: Golder Associates, 2016. Estudio Geotécnico de la Expansión del Tajo Calaorco a Nivel de Factibilidad

Se detalla la proyección estereográfica, de la cuál observamos las orientaciones preferenciales identificadas para cada dominio estructural e información base utilizada para su caracterización. El dominio norte dispone de menor información estructural para

soportar su caracterización debido a la dificultad de acceso, lo que se considera en las evaluaciones finales referenciadas para el estudio.

Uno de los puntos más importantes de evaluación se relaciona al modelamiento de las discontinuidades, para ello es necesario identificar las orientaciones de los principales dominios existentes, como se demuestra en la Figura 28.

Figura 28

Identificación de orientaciones preferentes en dominios estructurales

Dominio	Proyección Estereográfica	Set	Dip	Dip Dir
Norte		1	$68^{\circ} \pm 7^{\circ}$	$047^{\circ} \pm 7^{\circ}$
		2	$59^{\circ} \pm 8^{\circ}$	$089^{\circ} \pm 8^{\circ}$
		3	$21^{\circ} \pm 8^{\circ}$	$252^{\circ} \pm 8^{\circ}$
		4	$59^{\circ} \pm 7^{\circ}$	$279^{\circ} \pm 7^{\circ}$
		5	$76^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$229^{\circ} \pm 6^{\circ}$
<ul style="list-style-type: none"> ■ Mapeo fotogramétrico pared norte y 3 ventanas geotécnicas (188 polos), y ■ 1 sondaje (64 polos) 				
Este		1	$65^{\circ} \pm 9^{\circ}$	$241^{\circ} \pm 9^{\circ}$
		2	$79^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$316^{\circ} \pm 6^{\circ}$
		3	$82^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$137^{\circ} \pm 6^{\circ}$
		4	$59^{\circ} \pm 4^{\circ}$	$049^{\circ} \pm 4^{\circ}$
		5	$80^{\circ} \pm 5^{\circ}$	$173^{\circ} \pm 5^{\circ}$
<ul style="list-style-type: none"> ■ Mapeo fotogramétrico pared noreste y 39 ventanas geotécnicas (504 polos), y ■ 5 sondajes (1947 polos) 				
Sedimentario		1	$69^{\circ} \pm 8^{\circ}$	$52^{\circ} \pm 8^{\circ}$
		2	$81^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$318^{\circ} \pm 6^{\circ}$
		3	$59^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$165^{\circ} \pm 6^{\circ}$
		4	$29^{\circ} \pm 6^{\circ}$	$229^{\circ} \pm 6^{\circ}$
		5	$75^{\circ} \pm 5^{\circ}$	$248^{\circ} \pm 5^{\circ}$
<ul style="list-style-type: none"> ■ 95 ventanas geotécnicas (433 polos), y ■ 6 sondajes (4380 polos) 				

Fuente: Golder Associates, 2016. Estudio Geotécnico de la Expansión del Tajo Calaorco a Nivel de Factibilidad

Pared Este.

Se entiende que la litología es el principal control geológico para las variables geotécnicas. En consecuencia, las unidades geotécnicas para el yacimiento estarán basada en la definición de las unidades litológicas identificadas, en donde rocas intrusivas de la parte NE del yacimiento (pórfidos), son en general de menor calidad geotécnica que las rocas sedimentarias (areniscas).

Pared Oeste

El tajo Calaorco se compone de 4 unidades geotécnicas, asociadas a las unidades litológicas reconocidas. La unidad geotécnica Sedimentaria ha sido dividida en dos subunidades: una asociada a roca fresca y otra a zonas de aumento en el fracturamiento e intensa oxidación, la caracterización de las rocas presentes se describirá en la Figura 29.

Figura 29

Caracterización de unidades geotécnicas

Unidad Geotécnica	Actualización Caracterización					Nº de datos
	RMR ₇₆		RMR ₇₆		RQD	
	Promedio	Máx	Min	P35	Promedio (%)	
Sedimentaria	53 ± 13.1	87	19	47	67 ± 26.7	588
Sedimentaria Alterada /Oxidación	32 ± 6.0	51	13	28	2 ± 5.3	349
Intrusivo	46 ± 11.8	80	22	42	63 ± 34.7	455
Limolita	35 ± 11.6	55	24	26	23 ± 37.0	7
Lutita Carbonosa	35 ± 10.5	61	24	24	18 ± 31.2	46

Fuente: Golder Associates, 2016. Estudio Geotécnico de la Expansión del Tajo Calaorco a Nivel de Factibilidad

2.7 Matriz de consistencia

Título: Análisis de la potencial trayectoria de caída de rocas para la optimización de controles de seguridad en los niveles inferiores de una mina superficial.

Figura 30

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE		INDICADORES	TECNICAS DE INSTRUMENTOS DE RECOPIACION
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿En qué medida un desarrollo de trayectoria desfavorable en la caída de rocas desde los bancos superiores de una mina superficial puede superar los controles de seguridad establecidos en los niveles inferiores?	Analizar la potencial trayectoria de la caída de rocas hacia los niveles inferiores de una mina Superficial.	¿Al analizar la potencial trayectoria de la caída de rocas permitirá optimizar los controles de seguridad en niveles inferiores de una mina superficial?	Controles de seguridad en niveles inferiores.	Análisis de la trayectoria potencial de caída de rocas.	- Desplazamiento de rocas - Dirección de caída de rocas - Altura de rebote	- Levantamiento de información estructural en campo - Fotogrametría con drones - Evaluación de estudios geotécnicos - Verificación de controles de seguridad en niveles inferiores actuales

Fuente: Elaboración propia

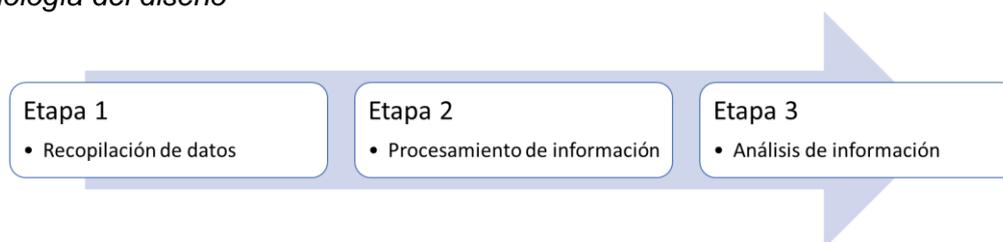
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Metodología del diseño

La presente investigación se ha distribuido en 03 etapas principales, las cuáles se describen de forma generalizada en la Figura 31.

Figura 31

Metodología del diseño



Fuente: Elaboración propia.

La etapa inicial está comprendida por la recopilación de datos, durante el desarrollo de esta se efectuaron trabajos en campo, específicamente en la zona de interés ubicada en la Fase 09 Zona Sureste del Tajo Calaorco en la Mina La Arena, estos trabajos de campo comprendieron 02 tareas principales; el levantamiento de información geológica y estructural del área, así como el levantamiento topográfico de los bancos de la zona de influencia.

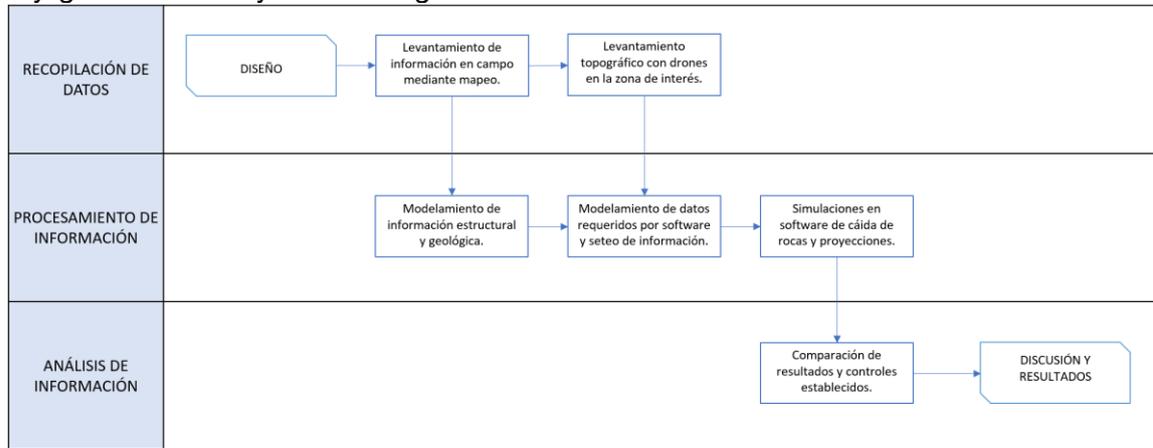
En la siguiente etapa, se efectuó el modelamiento de la información recopilada, iniciando con la información obtenida de los mapeos geológicos y estructurales efectuados en campo, posteriormente se efectuó un trabajo de procesamiento de parámetros principales necesarios para efectuar las simulaciones con los valores ajustados y verificados, una vez obtenidos todos los inputs necesarios se realizaron las simulaciones de la trayectoria de caída de rocas y las alturas de rebote obtenidas en los bancos inferiores del Tajo.

En la tercera etapa, se realizó la evaluación de resultados, valorando los controles de seguridad establecidos en los niveles inferiores de la Fase 09 Sur en el Tajo Calaorco, posteriormente se definieron controles de seguridad adicionales a implementarse que

permitan la continuidad de las labores planificadas en la zona de interés, tal cómo es detallado en la Figura 32 dónde se describe el flujograma de trabajo.

Figura 32

Flujograma de trabajo de investigación



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Recopilación de información

3.2.1 Mapeo de información estructural

Durante el levantamiento de toma de datos estructurales en Fase 9 – Sur, se determinaron cuatro (4) Estaciones Geomecánicas; se identificaron 3 Principales familias de discontinuidades por cada estación. Los principales datos recogidos en campo son los siguientes.

- Tipo de Roca: Sedimentaria
- Litología: Arenisca.
- DIP
- Peso específico: 2.5 Tn / m³
- DIP DIRECTION / Ángulo de fricción interna: 35°
- REBOTE (Martillo Schmidt)

En cuanto a las propiedades físicas del Macizo, tales como son Cohesión; Angulo de Fricción y Peso específico; se tomaron los datos de estudios previos realizados en la Unidad.

El detalle de la ubicación de las estaciones geomecánica utilizadas para la realización del mapeo de información geológica recopilada en campo se visualiza en la Figura 33.

Figura 33

Mapeo geotécnico de Fas 09 – Sur

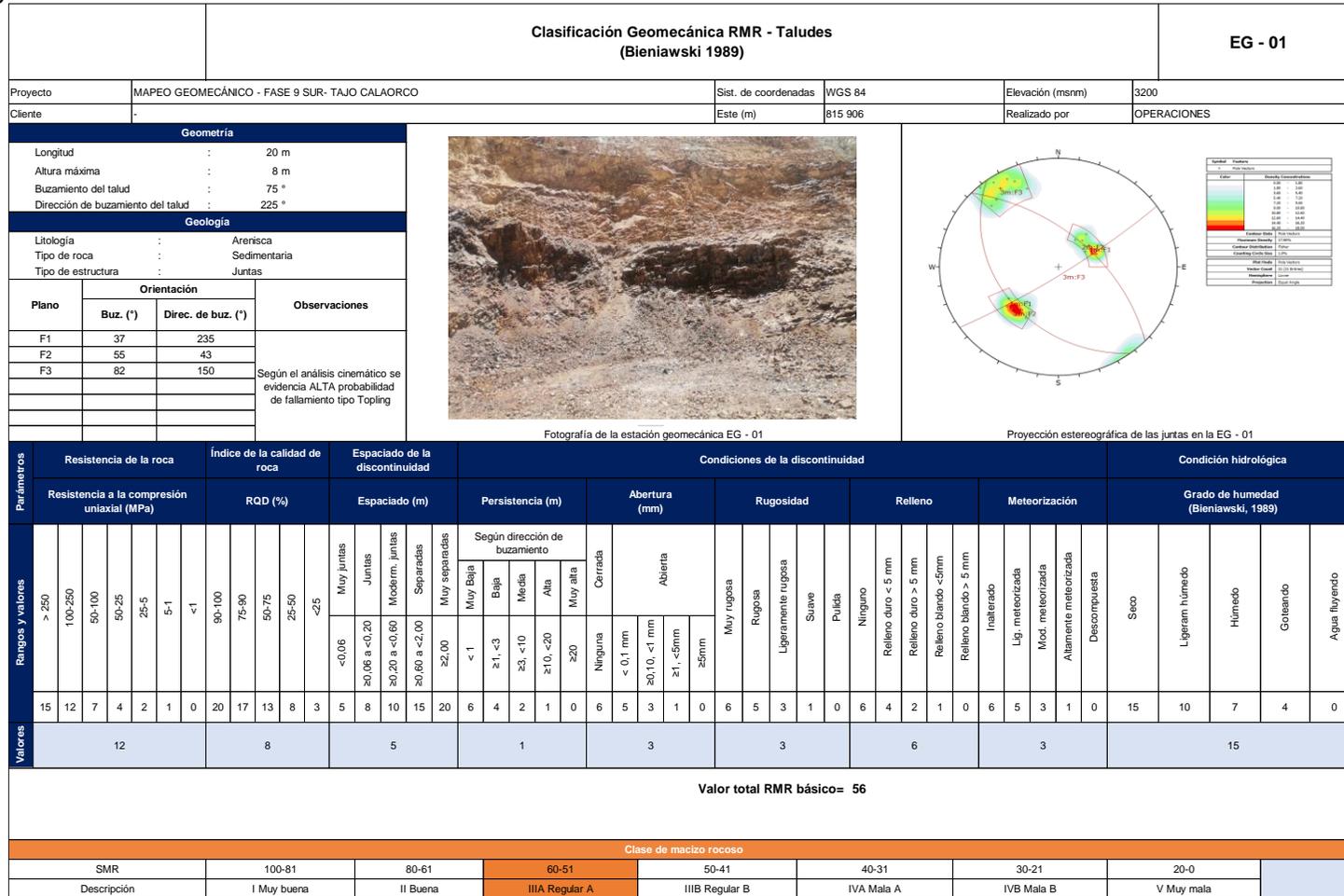


Fuente: Elaboración propia.

La información recopilada de las estaciones se describe en los formatos adjuntos dentro de los anexos de la investigación, así como la información de clasificación geomecánica RMR de los taludes, los datos obtenidos de 01 estación geomecánica se sintetizan de forma ejemplificada en la Figura 34., la información general recolectada se visualiza en los Anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

Figura 34

Clasificación geomecánica de estación EG-01.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Delimitación de secciones

La información recopilada fue obtenida específicamente de la zona ubicada en la parte superior de la Fase 09, la cuál definida como el área de interés, por lo que se efectuó el levantamiento topográfico de los 12 bancos dobles que se encuentran hacia la zona superior ubicado en la Fase 08 en conexión con rampa Norte, asimismo se tomó en consideración la implicancia de la interrampa ubicado 05 niveles por encima del nivel inferior del Tajo Calaorco, por lo que se definieron 02 zonas con potencialidad de caída de rocas en el área de interés detallado en la Figura 35.

Figura 35

Zonas de interés de evaluación



Fuente: Elaboración propia

Para la ejecución de las proyecciones se dividió el área en 07 secciones representativas con la topografía actual, según la delimitación de las zonas de interés definidas y asimismo, en concordancia con las características litológicas del área de influencia geológica del macizo rocoso predominante y las alteraciones existentes, estas secciones se detallan en la Figura 36

Figura 36

Secciones de análisis – Fase 09



Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Parámetros de roca

Para la zona de interés se determinaron 02 tipos de roca predominantes que son arenisca y roca intrusiva, adicionalmente se consideran 01 tipo de material adicional generado por conglomeración de material producto de voladuras catalogado como material de derrumbe.

Los análisis consideran los parámetros de roca intrusiva, arenisca y material de derrumbe; considerando parámetros desfavorables obtenidos de bibliografía actual, los parámetros del coeficiente de restitución normal y tangencial se visualizan en la Tabla 1

Tabla 1

Parámetros de roca – Fase 09

Tipo de Roca	NR	TR
Arenisca	0.45	0.90
Intrusivo	0.35	0.87
Material de derrumbe	0.30	0.85

Fuente: Elaboración propia

3.3 Procesamiento de información

3.3.1 Seccionamiento de área

Dada el área definida en campo como la zona de interés para la evaluación de los análisis y a su vez efectuado el dimensionamiento del número de secciones a considerarse para el desarrollo de las simulaciones, se efectúa la actualización y parametrización de la información en trabajo de gabinete para complementar con el levantamiento topográfico actualizado del área, para ello se utilizó el software Autocad Civil 3D (Figura 37)

Figura 37

Seccionamiento de área en Autocad.



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Parámetros de secciones

3.3.2.1 Sección 1. En la sección 1 según el modelamiento se definieron 61 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada, con las ubicaciones detalladas en la Tabla 2.

Tabla 2

Coordenadas de vértices – Sección 1

Sección 1					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	-3.492E-10	3384.95	32	64.948	3331.15
2	13.5193	3385	33	66.239	3329.32
3	15.1097	3386	34	67.7449	3325.69
4	16.5225	3386	35	69.156	3321
5	17.7846	3385	36	71.4181	3320
6	20.2647	3382.34	37	73.5922	3319.62
7	22.1507	3377.61	38	77.1285	3319
8	22.5405	3377	39	77.8041	3317.92
9	24.6402	3375	40	79.6587	3314
10	26.8642	3373.16	41	81.0568	3310
11	31.7702	3369.71	42	82.3707	3307
12	33.5004	3368.36	43	83.3846	3306
13	34.4827	3367.59	44	86.5785	3305
14	36.0649	3365.39	45	88.4102	3304.64
15	37.6504	3362.78	46	91.6054	3304
16	38.2699	3360.39	47	93.3027	3300.87
17	39.0788	3358	48	95.601	3294.04
18	40.5476	3354.39	49	97.8512	3289
19	40.9853	3353.8	50	100.251	3288
20	42.3114	3353	51	101.619	3287.64
21	49.2642	3352	52	104.013	3287
22	50.3875	3351	53	104.421	3286.55
23	50.9125	3350	54	106.626	3282.67
24	53.7052	3340.69	55	110.099	3278
25	54.4119	3339	56	111.862	3275
26	55.3027	3338	57	112.841	3273.86
27	57.1304	3337	58	114.003	3273
28	59.4084	3336.53	59	117.986	3273
29	61.949	3336	60	119.843	3272
30	62.4738	3335.54	61	144.641	3272
31	63.2273	3334.47			

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada, se asignó a los vértices según la Tabla 3.

Tabla 3

Asignación de Material – Sección 1

Material	Desde el Vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	6
Arenisca	6	9
Derrumbe	9	14
Arenisca	14	18
Derrumbe	18	20
Arenisca	20	25
Derrumbe	25	28
Arenisca	28	35
Derrumbe	35	37
Arenisca	37	42
Derrumbe	42	45
Arenisca	45	49
Derrumbe	49	51
Arenisca	51	58
Derrumbe	58	60
Arenisca	60	61

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 01 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de parámetros descritos en la Tabla 4, así como los resultados de la simulación son verificados en la Figura 38

Tabla 4

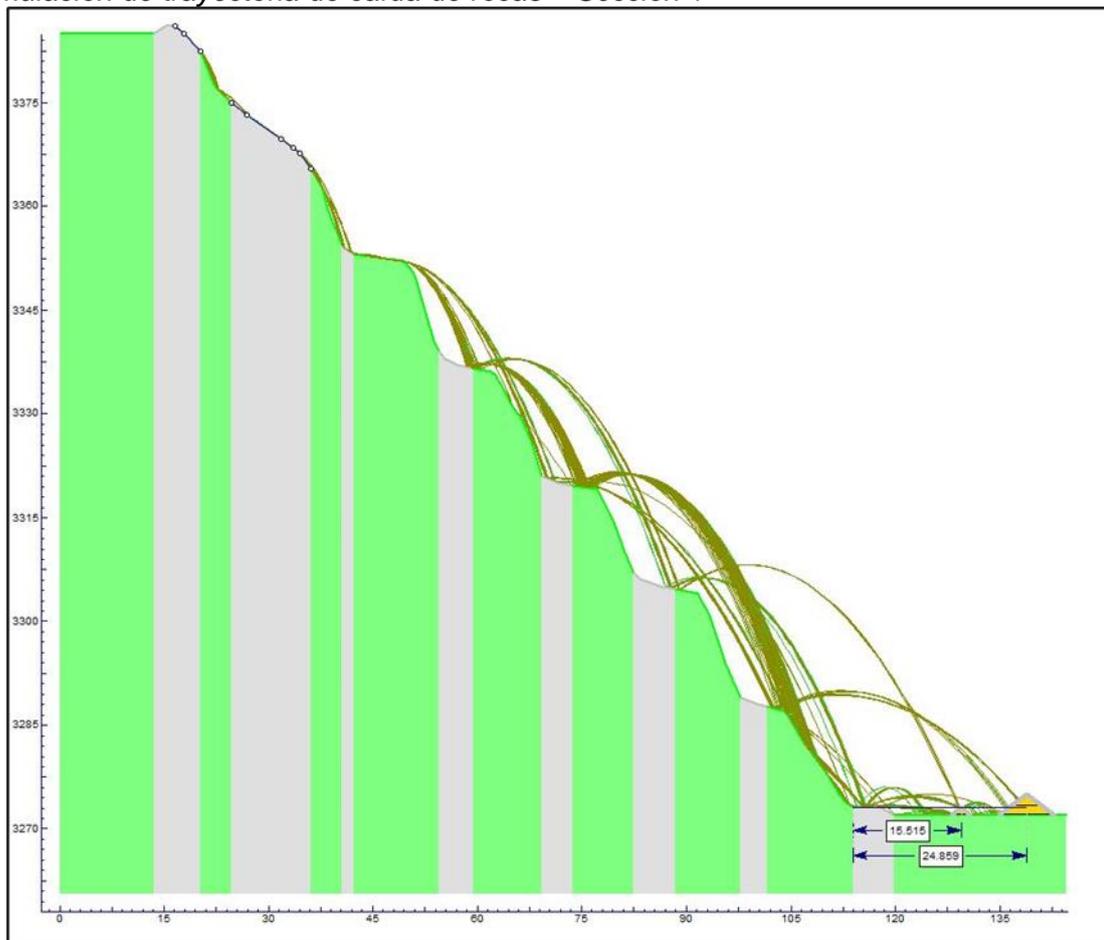
Propiedades cinemáticas – Sección 1

Propiedades de Sección 1			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	17.94	13.44	17.01
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	141.2	69.2	141.2
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	133	66.09	133
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	31.44	12.41	31.44
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	29.02	25.34	29.02
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	115.9	73.27	115.9

Fuente: Elaboración propia

Figura 38

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 1



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Sección 2. En la sección 2 según el modelamiento se definieron 66 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada descritos en la Tabla 5.

Tabla 5

Coordenadas de vértices – Sección 2

Sección 2					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	0	3384.35	34	70.3023	3322.19
2	7.02703	3384	35	70.5863	3321
3	12.3409	3384.92	36	72.4437	3320.75
4	21.1709	3385	37	77.8948	3320
5	22.1737	3384.05	38	80.9865	3313.62
6	23.07	3383.51	39	82.8999	3310.26
7	23.7003	3383	40	84.4116	3308
8	25.7913	3376.99	41	85.3614	3307
9	27.2081	3376	42	86.5305	3306
10	30.7919	3373	43	89.439	3305
11	32.4869	3371.76	44	90.4332	3304.36
12	33.6951	3371	45	91.1964	3304
13	37.7054	3367.38	46	93.6096	3299
14	38.5589	3365.38	47	95.4312	3296.08
15	40.6202	3360	48	96.6782	3292.58
16	42.4785	3358.52	49	97.7761	3290.11
17	44.6367	3357	50	98.2995	3289.81
18	46.2857	3355.59	51	100.355	3289.02
19	48.4283	3354	52	104.573	3288
20	49.9396	3352.67	53	106.2	3284.94
21	50.5376	3352	54	108.267	3281.36
22	50.8078	3351.49	55	109.164	3279.44
23	51.2291	3351	56	109.947	3277.3
24	52.7093	3348	57	111.141	3275
25	53.8898	3345	58	111.384	3274.87
26	55.2088	3341	59	112.249	3274
27	56.5321	3340	60	113.59	3273.38
28	61.8526	3337	61	114.069	3273
29	63.6123	3335.82	62	124.616	3273
30	65.6396	3332.86	63	125.802	3273.12
31	67.1918	3330.29	64	126.997	3273
32	68.1713	3327.92	65	137.793	3273
33	68.9446	3326.32	66	142.98	3273

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada, se asignó un tipo de material en función a cambios entre vértices detallados en la Tabla 6.

Tabla 6

Asignación de Material – Sección 2

Material	Desde el Vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	6
Arenisca	6	8
Derrumbe	8	13
Arenisca	13	15
Derrumbe	15	22
Arenisca	22	26
Derrumbe	26	29
Arenisca	29	34
Derrumbe	34	36
Arenisca	36	40
Derrumbe	40	44
Arenisca	44	49
Derrumbe	49	51
Arenisca	51	57
Derrumbe	57	61
Arenisca	61	62
Derrumbe	62	64
Arenisca	64	66

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 02 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de parámetros descritos en la Tabla 7 y la simulación se puede visualizar en la siguiente Figura 39.

Tabla 7

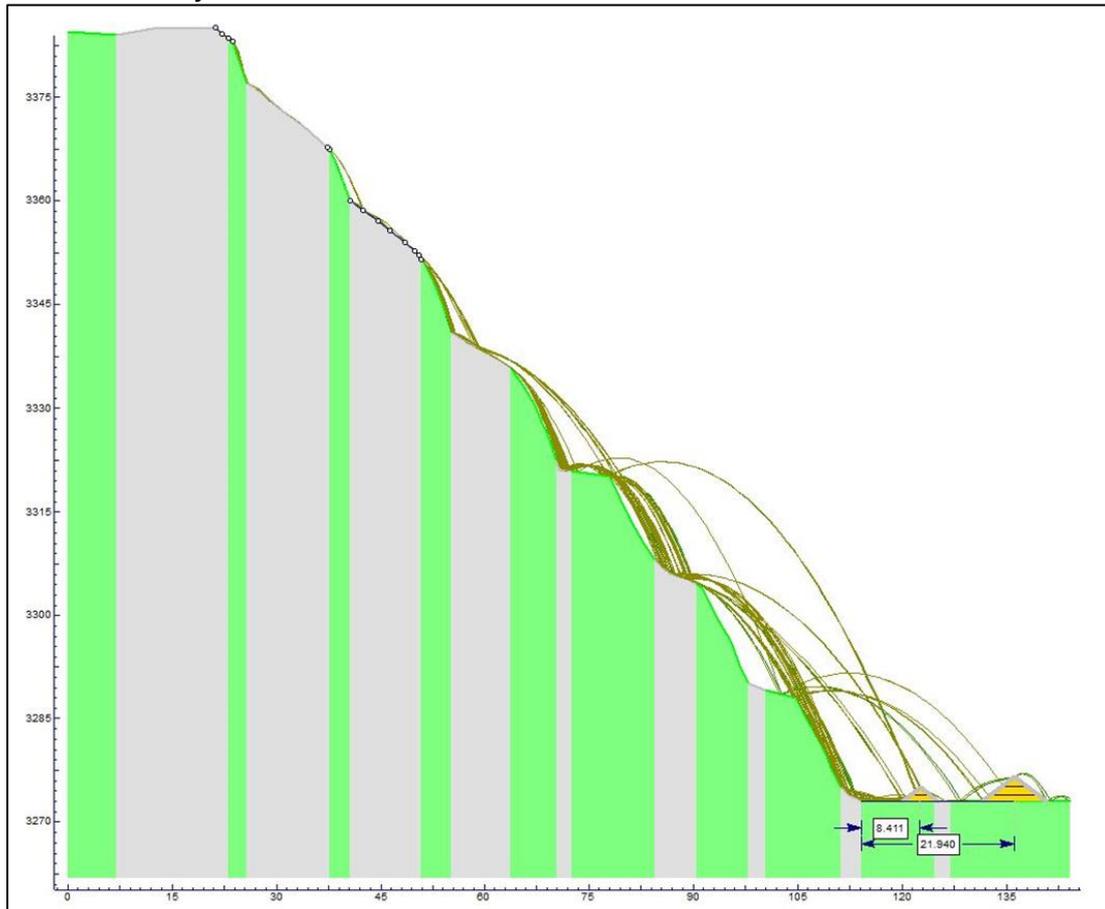
Propiedades cinemáticas – Sección 2

Propiedades de Sección 2			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	26.62	15.58	26.6
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	192.8	58.72	192.8
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	185.1	52.78	185.1
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	23.68	7.586	23.68
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	33.16	21.89	33.16
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	100.6	56.14	100.6

Fuente: Elaboración propia

Figura 39

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 2



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Sección 3. En la sección 3 según el modelamiento se definieron 66 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada, detallados en la Tabla 8.

Tabla 8*Coordenadas de vértices – Sección 3*

Sección 3					
Vertex	X	Y	Vertex	X	Y
1	0	3384.35	34	70.3023	3322.19
2	7.02703	3384	35	70.5863	3321
3	12.3409	3384.92	36	72.4437	3320.75
4	21.1709	3385	37	77.8948	3320
5	22.1737	3384.05	38	80.9865	3313.62
6	23.07	3383.51	39	82.8999	3310.26
7	23.7003	3383	40	84.4116	3308
8	25.7913	3376.99	41	85.3614	3307
9	27.2081	3376	42	86.5305	3306
10	30.7919	3373	43	89.439	3305
11	32.4869	3371.76	44	90.4332	3304.36
12	33.6951	3371	45	91.1964	3304
13	37.7054	3367.38	46	93.6096	3299
14	38.5589	3365.38	47	95.4312	3296.08
15	40.6202	3360	48	96.6782	3292.58
16	42.4785	3358.52	49	97.7761	3290.11
17	44.6367	3357	50	98.2995	3289.81
18	46.2857	3355.59	51	100.355	3289.02
19	48.4283	3354	52	104.573	3288
20	49.9396	3352.67	53	106.2	3284.94
21	50.5376	3352	54	108.267	3281.36
22	50.8078	3351.49	55	109.164	3279.44
23	51.2291	3351	56	109.947	3277.3
24	52.7093	3348	57	111.141	3275
25	53.8898	3345	58	111.384	3274.87
26	55.2088	3341	59	112.249	3274
27	56.5321	3340	60	113.59	3273.38
28	61.8526	3337	61	114.069	3273
29	63.6123	3335.82	62	124.616	3273
30	65.6396	3332.86	63	125.802	3273.12
31	67.1918	3330.29	64	126.997	3273
32	68.1713	3327.92	65	137.793	3273
33	68.9446	3326.32	66	142.98	3273

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada, el tipo de asignación de material utilizado para la sección 03 se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9

Asignación de Material – Sección 3

Material	Desde el Vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	3
Arenisca	3	5
Derrumbe	5	9
Arenisca	9	13
Derrumbe	13	17
Arenisca	17	19
Derrumbe	19	24
Arenisca	24	29
Derrumbe	29	32
Arenisca	32	37
Derrumbe	37	40
Arenisca	40	47
Derrumbe	47	51
Arenisca	51	56
Derrumbe	56	58
Arenisca	58	60

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 03 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de la información recopilada, los resultados se detallan en la Tabla 10 y los resultados de la simulación en la Figura 40.

Tabla 10

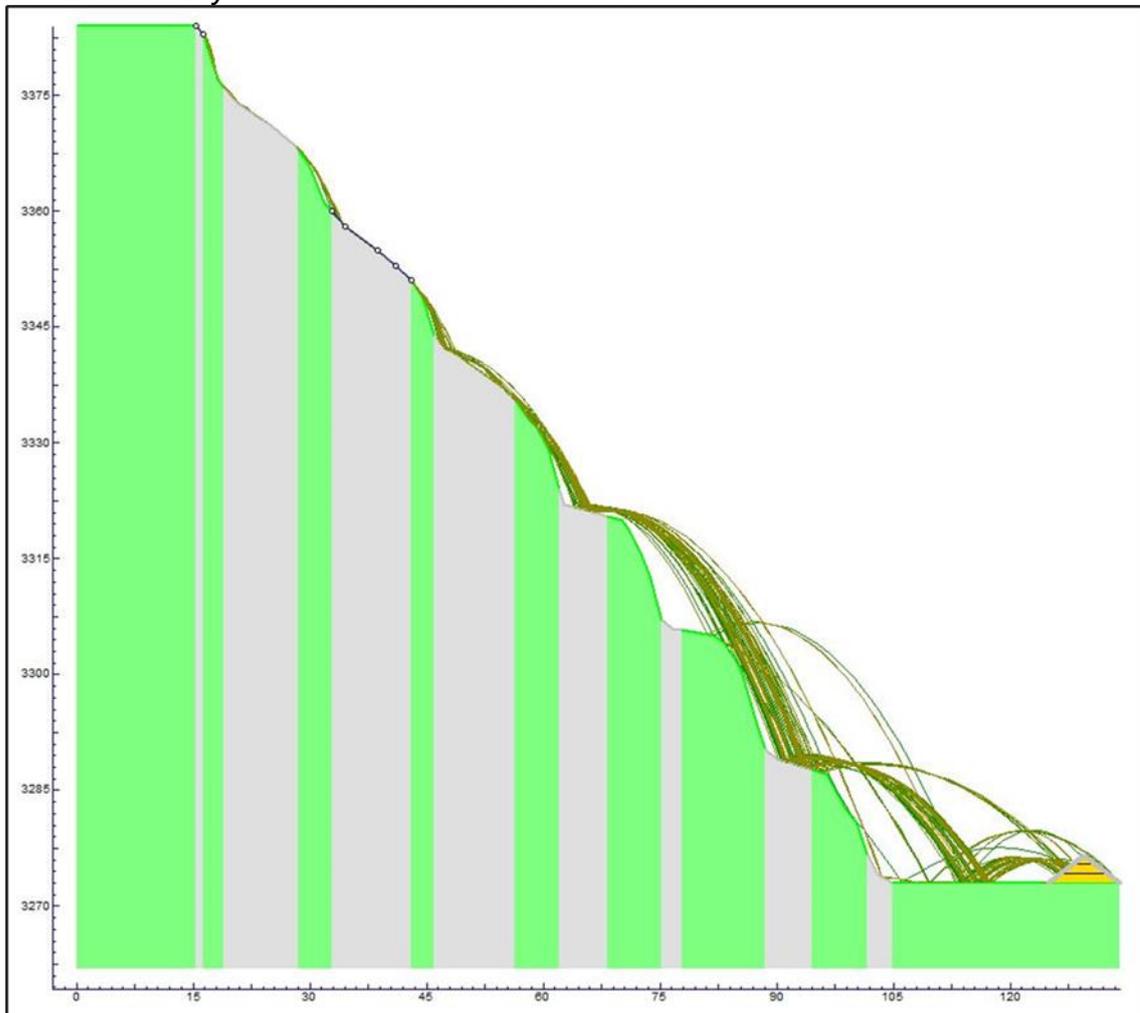
Propiedades cinemáticas – Sección 3

Propiedades de Sección 3			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	26.62	15.58	26.6
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	192.8	58.72	192.8
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	185.1	52.78	185.1
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	23.68	7.586	23.68
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	33.16	21.89	33.16
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	100.6	56.14	100.6

Fuente: Elaboración propia

Figura 40

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 3



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4 Sección 4. En la sección 4 según el modelamiento se definieron 110 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada los cuáles son descritos en la Tabla 11.

Tabla 11

Coordenadas de vértices – Sección 4

Sección 4					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	0	3384.79	56	133.045	3273
2	3.32124	3384.7	57	134.958	3274
3	6.10153	3384.35	58	135.775	3274
4	6.75407	3384.16	59	137.09	3273.25
5	9.38619	3384	60	138.728	3272
6	13.3738	3384	61	139.554	3271
7	14.8745	3381.85	62	140.969	3268.41
8	16.2072	3379.95	63	142.698	3263
9	16.7706	3378.52	64	144.717	3259.29
10	17.8022	3374.71	65	145.466	3257.92
11	19.661	3372.26	66	146.906	3257
12	21.486	3371	67	150.127	3257
13	22.5673	3370	68	151.917	3256
14	24.4658	3368.57	69	153.321	3254
15	26.0238	3367.02	70	154.749	3251.14
16	26.8022	3366.04	71	157.887	3246.29
17	27.7375	3364.87	72	159.14	3244.71
18	28.5538	3363.11	73	160.287	3242
19	29.813	3361	74	160.631	3241.69
20	31.3521	3359	75	161.57	3241
21	38.4623	3354	76	165.772	3240.84
22	39.7267	3353	77	166.383	3240.6
23	40.6503	3352	78	167.193	3240
24	41.5978	3350.55	79	167.922	3239
25	43.1902	3344.56	80	168.996	3237
26	43.7623	3343.57	81	170.891	3234
27	49.9327	3338.86	82	171.647	3231.37
28	52.6637	3337	83	173.373	3227
29	53.7732	3336	84	173.779	3226.39
30	56.1235	3333	85	174.086	3226
31	57.8266	3330.57	86	176.222	3225
32	59.2833	3325.3	87	177.603	3224.71
33	66.7132	3320	88	180.941	3224
34	71.0215	3313	89	183.827	3220
35	72.3669	3310	90	185.567	3217
36	77.017	3307	91	186.868	3213.6
37	79.6949	3305	92	187.476	3212.33
38	80.8817	3304.01	93	188.239	3210
39	82.6726	3302.19	94	189.761	3209
40	84.1219	3299.56	95	191.268	3208.7
41	85.5062	3295.98	96	194.811	3208
42	87.0214	3293	97	196.954	3204
43	88.8038	3292	98	197.784	3202
44	93.0929	3289	99	199.184	3199.47
45	93.8434	3288.04	100	201.336	3196.31
46	96.7182	3285	101	203.219	3193
47	97.3732	3284	102	204.015	3192
48	98.8086	3281.02	103	205.317	3191.77
49	99.3721	3279.13	104	209.738	3191
50	100.218	3277	105	213.325	3186
51	100.591	3276.78	106	214.49	3185
52	101.308	3276	107	216.957	3184.13
53	103.62	3275	108	218.89	3184
54	108.003	3274	109	249.609	3184
55	110.121	3273	110	255.998	3184

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada se asignó el tipo de material según las divisiones más relevantes determinadas en función al levantamiento de información descrito en la Tabla 12.

Tabla 12

Asignación de Material – Sección 4

Material	Desde el Vértice	Al vértice	Material	Desde el Vértice	Al vértice
Derrumbe	1	4	Derrumbe	56	61
Arenisca	4	6	Arenisca	61	64
Derrumbe	6	7	Derrumbe	64	66
Arenisca	7	10	Arenisca	66	67
Derrumbe	10	16	Derrumbe	67	68
Arenisca	16	20	Arenisca	68	72
Derrumbe	20	22	Derrumbe	72	75
Arenisca	22	26	Arenisca	75	77
Derrumbe	26	29	Derrumbe	77	78
Arenisca	29	32	Arenisca	78	83
Derrumbe	32	33	Derrumbe	83	87
Arenisca	33	35	Arenisca	87	93
Derrumbe	35	39	Derrumbe	93	95
Arenisca	39	42	Arenisca	95	100
Derrumbe	42	46	Derrumbe	100	103
Arenisca	46	50	Arenisca	103	105
Derrumbe	50	55	Derrumbe	105	107
Arenisca	55	56	Arenisca	107	110

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 04 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de parámetros descrito en la Tabla 13 y los resultados de simulación en la Figura 41.

Tabla 13

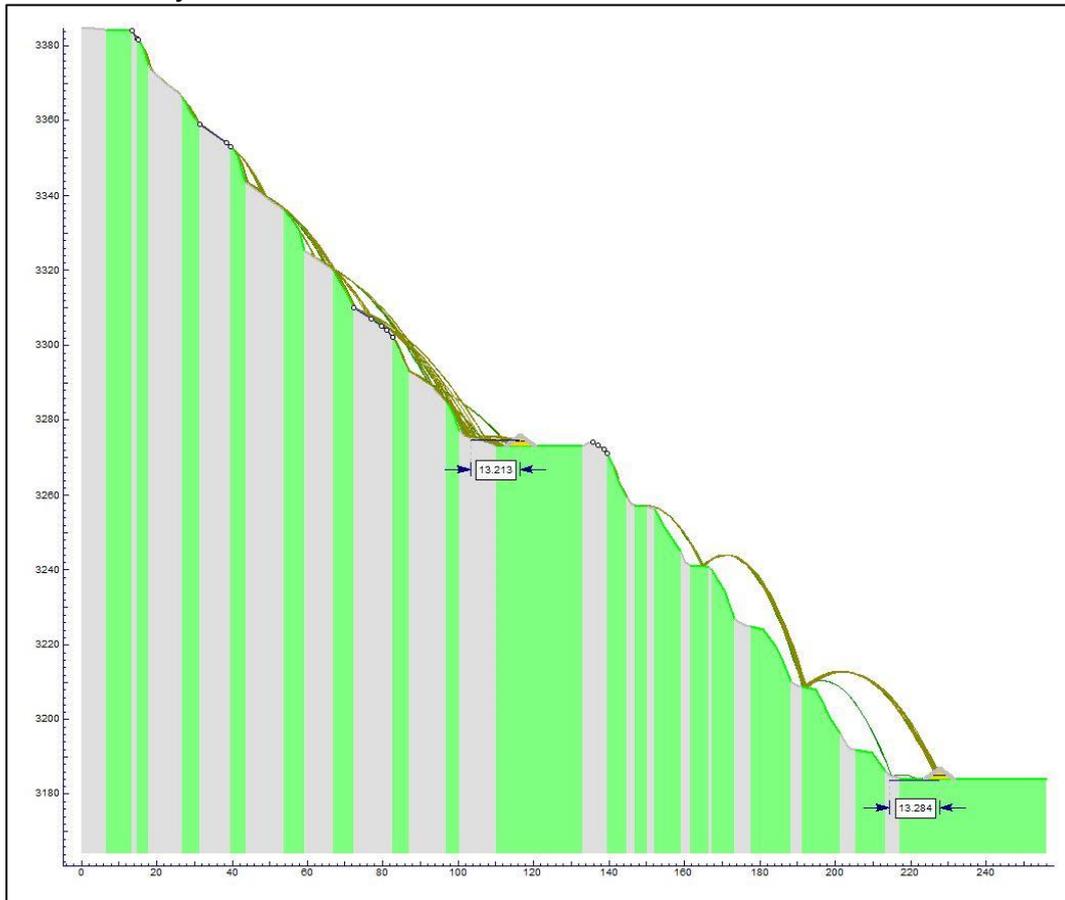
Propiedades cinemáticas – Sección 4

Propiedades de Sección 4			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	32.73	17.25	27.86
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	175.8	74.26	175.8
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	166.2	63.41	166.2
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	26.8	10.85	26.8
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	34.14	24.51	34.14
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	133.7	69.26	133.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 41

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 4



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.5 Sección 5. En la sección 5 según el modelamiento se definieron 50 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada detallados en la Tabla 14.

Tabla 14

Coordenadas de vértices – Sección 5

Sección 5					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	0	3272	26	54.2479	3230
2	8.57087	3272	27	55.0953	3229.56
3	15.9426	3272.99	28	57.8534	3227.71
4	17.6192	3273.12	29	61.6312	3225
5	19.2242	3273	30	62.7985	3224
6	19.4875	3272.79	31	63.7038	3223
7	21.9048	3270.41	32	64.2785	3222
8	22.3802	3269.94	33	67.0195	3216
9	22.9165	3269	34	69.5878	3211.02
10	23.8346	3267.77	35	70.8291	3209
11	25.2429	3264	36	72.6895	3208.78
12	25.8143	3263.07	37	79.2873	3208
13	27.5914	3261	38	80.3407	3206.96
14	34.2485	3256	39	81.6402	3205
15	35.4258	3255	40	86.2536	3195
16	38.6983	3250	41	87.5415	3193
17	41.041	3245.44	42	89.2358	3192.27
18	42.1109	3244	43	90.6865	3192
19	43.1687	3243	44	94.174	3192
20	48.5133	3239	45	95.2567	3191
21	49.4758	3238	46	95.8174	3190.17
22	50.2157	3236.92	47	97.5085	3186.67
23	51.0439	3235.33	48	99.5203	3184
24	52.3198	3232	49	106.588	3184
25	52.9277	3231	50	127.808	3184

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada se asignó un tipo de material en cada cambio significativo del comportamiento de la roca a lo largo del talud descritos en la Tabla 15.

Tabla 15

Asignación de Material – Sección 5

Material	Desde el vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	7
Arenisca	7	11
Derrumbe	11	15
Arenisca	15	16
Derrumbe	16	21
Arenisca	21	24
Derrumbe	24	30
Arenisca	30	34
Derrumbe	34	36
Arenisca	36	40
Derrumbe	40	42
Arenisca	42	50

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 05 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y la simulación efectuada de los mismo detallados en la Tabla 16 y la Figura 42.

Tabla 16

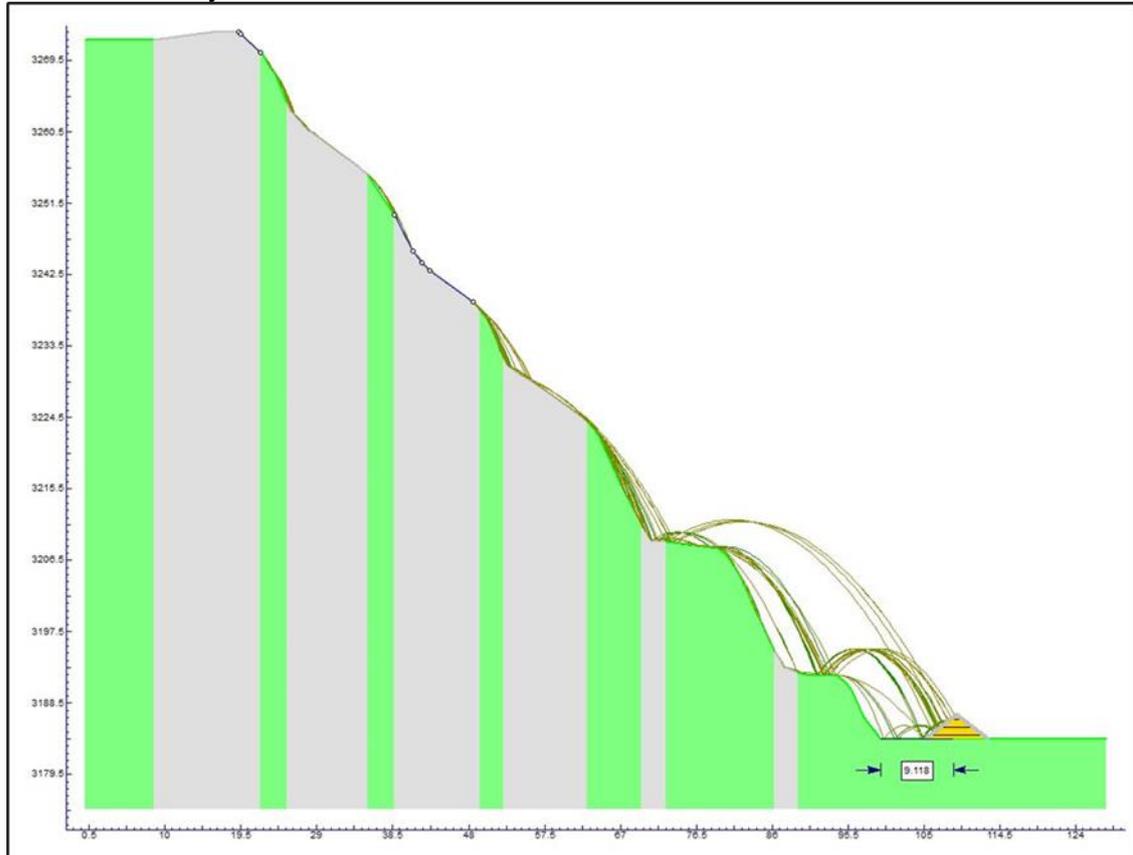
Propiedades cinemáticas – Sección 5

Propiedades de Sección 5			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	32.73	17.25	27.86
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	175.8	74.26	175.8
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	166.2	63.41	166.2
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	26.8	10.85	26.8
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	34.14	24.51	34.14
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	133.7	69.26	133.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 5



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.6 Sección 6. En la sección 6 según el modelamiento se definieron 50 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada descritos en la Tabla 17.

Tabla 17*Coordenadas de vértices – Sección 6*

Sección 6					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	0	3272.43	27	53.4084	3224
2	3.97338	3272.76	28	54.6389	3222.59
3	6.54288	3272.97	29	56.8845	3218
4	10.0737	3273	30	60.1438	3215
5	11.3316	3272	31	66.2836	3210.25
6	12.2915	3270.86	32	68.1252	3209
7	13.2443	3269.74	33	68.9646	3208.19
8	14.1794	3266.05	34	70.1852	3207
9	14.8991	3263.88	35	72.1404	3203.58
10	15.8617	3263	36	73.6613	3199.77
11	25.5736	3256	37	75.2393	3197.42
12	26.5597	3255	38	76.1807	3195.32
13	29.0589	3251.3	39	77.1006	3194.06
14	29.7927	3249.68	40	77.8756	3193
15	30.6581	3247	41	79.4103	3192.61
16	32.034	3244.63	42	81.3401	3192.13
17	32.625	3244	43	84.3328	3192
18	35.6404	3242	44	86.0154	3191
19	36.8828	3241	45	88.2259	3187.05
20	38.2708	3239.48	46	89.2583	3186
21	39.5195	3238.73	47	91.3291	3185.56
22	41.0473	3237	48	97.7738	3184.67
23	42.4769	3234.53	49	101.16	3184
24	43.8675	3231	50	110.129	3184.01
25	47.4564	3228.24	51	135.047	3184.01
26	52.1834	3225			

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada

Tabla 18

Asignación de Material – Sección 6

Material	Desde el Vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	6
Arenisca	6	9
Derrumbe	9	12
Arenisca	12	16
Derrumbe	16	21
Arenisca	21	24
Derrumbe	24	28
Arenisca	28	29
Derrumbe	29	33
Arenisca	33	39
Derrumbe	39	41
Arenisca	41	45
Derrumbe	45	49
Arenisca	49	51

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 06 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de los parámetros obtenidos descritos en la Tabla 19 y la Figura 43.

Tabla 19

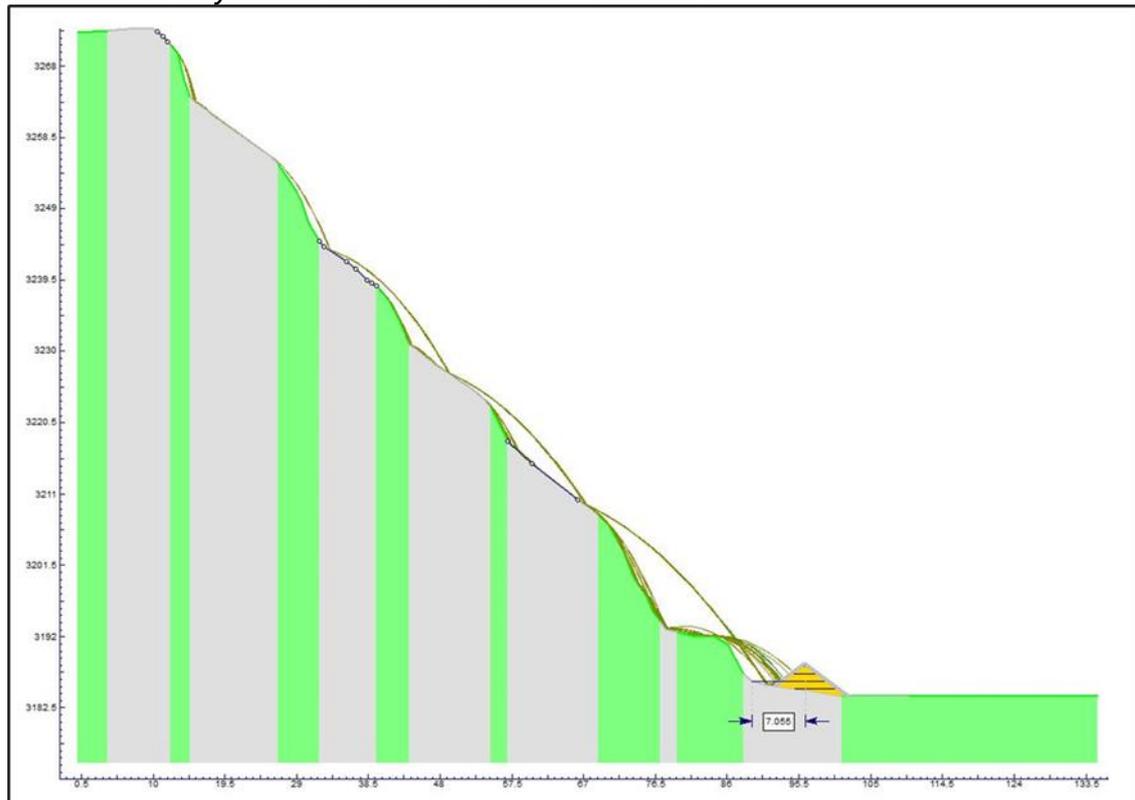
Propiedades cinemáticas – Sección 6

Propiedades de Sección 6			
Descripción	Max	Media	95%
Altura de rebote (m)	9.222	3.658	9.213
Energía Cinética Total Envolvente (kJ)	140	41.77	140
Energía Cinética Traslacional Envolvente (kJ)	122.7	36.47	122.7
Energía Cinética Rotacional Envolvente (kJ)	17.31	6.095	17.31
Velocidad Cinética Traslacional Envolvente (m/s)	27.01	17.62	27.01
Velocidad Cinética Rotacional Envolvente (rad/s)	86.03	51.31	86.03

Fuente: Elaboración propia

Figura 43

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 6



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.7 Sección 7. En la sección 7 según el modelamiento se definieron 45 puntos como vértices de relevancia según las características de la topografía levantada en campo descrito en la Tabla 20.

Tabla 20*Coordenadas de vértices – Sección 7*

Sección 7					
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y
1	0	3273	24	57.7804	3221
2	8.28483	3273	25	59.6878	3217
3	10.4271	3274	26	62.0364	3214.16
4	11.159	3274	27	64.4399	3213.08
5	12.2033	3273	28	66.7327	3212.43
6	14.3699	3271.43	29	70.6483	3209
7	16.5489	3268.85	30	71.4289	3207.97
8	17.4221	3267.82	31	72.2496	3207.3
9	18.4589	3264.98	32	73.7771	3206.54
10	19.7574	3262.24	33	74.3782	3204.81
11	24.4238	3259	34	75.8674	3202.01
12	26.7728	3257	35	78.8224	3199.2
13	28.2473	3256	36	82.1297	3194.82
14	29.2278	3255	37	83.0883	3194
15	30.4697	3252.7	38	85.4436	3192.8
16	32.9969	3247	39	86.5908	3192
17	41.4188	3241	40	87.6204	3190.28
18	43.3603	3239	41	90.7374	3186
19	45.7038	3235.3	42	91.5223	3185
20	47.9477	3229.8	43	92.6618	3184
21	48.4978	3229	44	124.285	3184
22	49.4518	3228	45	131.23	3184
23	56.8569	3222			

Según la caracterización geológica del tipo de material predominante en base a la información recopilada se asignó un tipo de material por cada zona con cambios de comportamiento de material en tramos verticales descritos en la Tabla 21.

Tabla 21

Asignación de Material – Sección 7

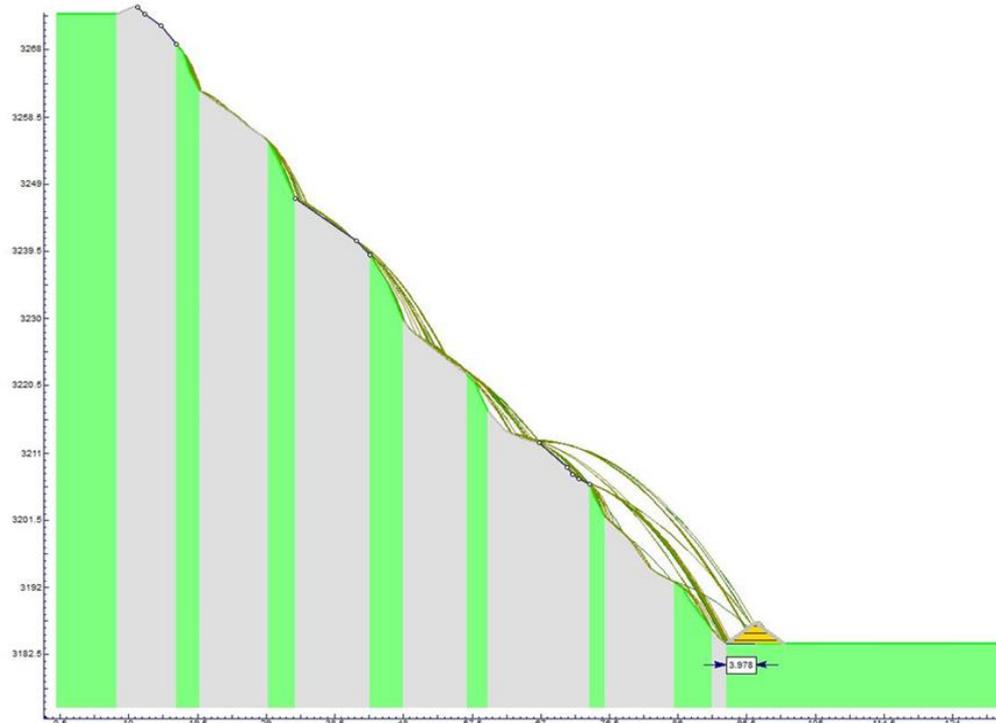
Material	Desde el Vértice	Al vértice
Arenisca	1	2
Derrumbe	2	7
Arenisca	7	10
Derrumbe	10	14
Arenisca	14	16
Derrumbe	16	18
Arenisca	18	20
Derrumbe	20	23
Arenisca	23	25
Derrumbe	25	32
Arenisca	32	34
Derrumbe	34	38
Arenisca	38	41
Derrumbe	41	43
Arenisca	43	45

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros obtenidos de la sección 07 se detallan en el cuadro de valores de energía y velocidad desarrollada según el levantamiento de parámetros y simulación de parámetros y en la Figura 44.

Figura 44

Simulación de trayectoria de caída de rocas – Sección 7



Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Introducción

El análisis de las potenciales trayectorias en la caída de rocas hacia los bancos inferiores se realizó mediante simulaciones efectuadas en el software Rockfall 2D, para el mismo se requirió el levantamiento de información estructural en campo y levantamiento topográfico actualizado mediante drones, para posteriormente en base a todos los parámetros recabados en cada una de las secciones definidas como sectores de influencia en el área de interés establecida en la parte inferior del tajo efectuar el trabajo de simulación considerando que la probabilidad de caídas para cada evaluación fue de 60 bloques de tamaños máximos de 0.20 y 0.50 m de diámetro, obteniéndose resultados que reflejan si los sectores definidos podrían superar los controles de seguridad estándares establecidos en el área de interés.

4.2 Evaluación de resultados

Los resultados obtenidos por cada sector son evaluados en función a la cantidad de bloques de roca que pasan los controles definidos en el área de interés al inicio del estudio, la cual se encuentra ubicada en los niveles inferiores del Tajo.

4.2.1 Resultados Sección 1

Para la sección 01 según el área definida de interés se tuvo un total de 200 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 22

Tabla 22

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 1

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	114	57%
Bloques pasantes	86	43%
<i>Total Bloques</i>	<i>200</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Resultados Sección 2

Para la sección 02 según el área definida de interés se tuvo un total de 130 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 23

Tabla 23

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 2

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	53	41%
Bloques pasantes	77	59%
<i>Total Bloques</i>	<i>130</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Resultados Sección 3

Para la sección 03 según el área definida de interés se tuvo un total de 120 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 3

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	53	41%
Bloques pasantes	77	59%
<i>Total Bloques</i>	<i>130</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Resultados Sección 4

Para la sección 04 según el área definida de interés se tuvo un total de 120 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25*Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 4*

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	168	70%
Bloques pasantes	72	30%
<i>Total Bloques</i>	<i>240</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Resultados Sección 5

Para la sección 05 según el área definida de interés se tuvo un total de 140 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26*Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 5*

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	140	100%
Bloques pasantes	0	0%
<i>Total Bloques</i>	<i>140</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Resultados Sección 6

Para la sección 06 según el área definida de interés se tuvo un total de 180 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27*Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 6*

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	180	100%
Bloques pasantes	0	0%
<i>Total Bloques</i>	<i>180</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

4.2.7 Resultados Sección 7

Para la sección 07 según el área definida de interés se tuvo un total de 150 bloques diferenciados dentro de la simulación, de los cuáles la cantidad de bloques detenidos y pasantes se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes – Sección 7

Descripción	Total	%
Bloques detenidos	150	100%
Bloques pasantes	0	0%
<i>Total Bloques</i>	<i>150</i>	<i>100%</i>

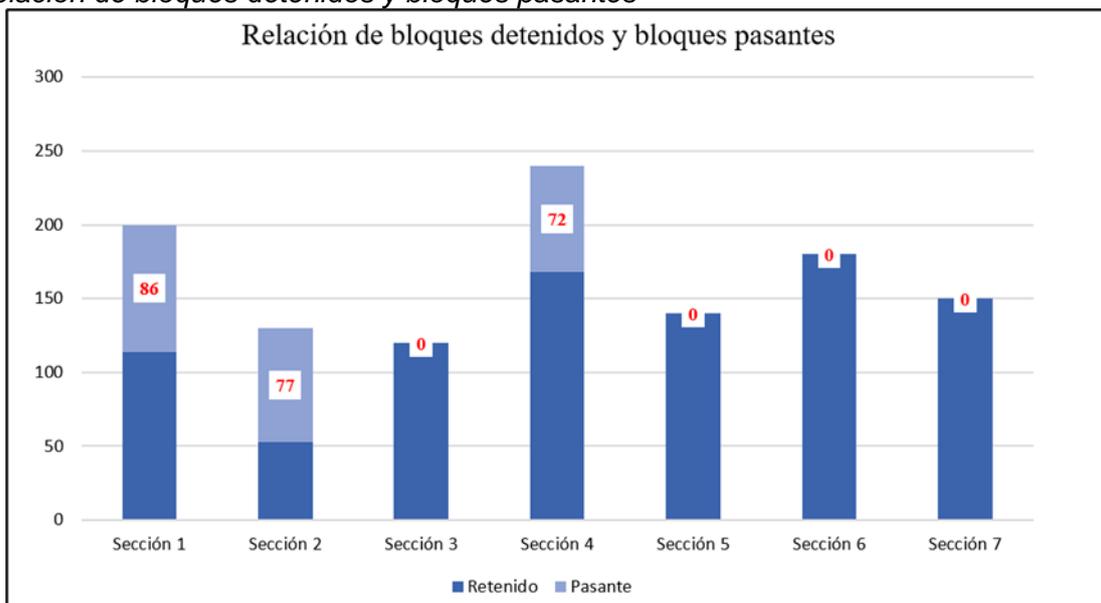
Fuente: Elaboración propia

4.2.8 Resumen de resultados

En resumen, se tuvieron bloques en las secciones 1,2 y 4 que sobrepasan los controles establecidos inicialmente ante una eventual caída de bloques de roca detallado en la Figura 45, por lo que es necesario una optimización de los controles a establecer en los niveles inferiores del Tajo con el fin de mitigar los riesgos existentes y brindarle continuidad al desarrollo de las labores de minado con un factor de seguridad adecuado.

Figura 45

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes



Fuente: Elaboración propia

4.3 Optimización de controles

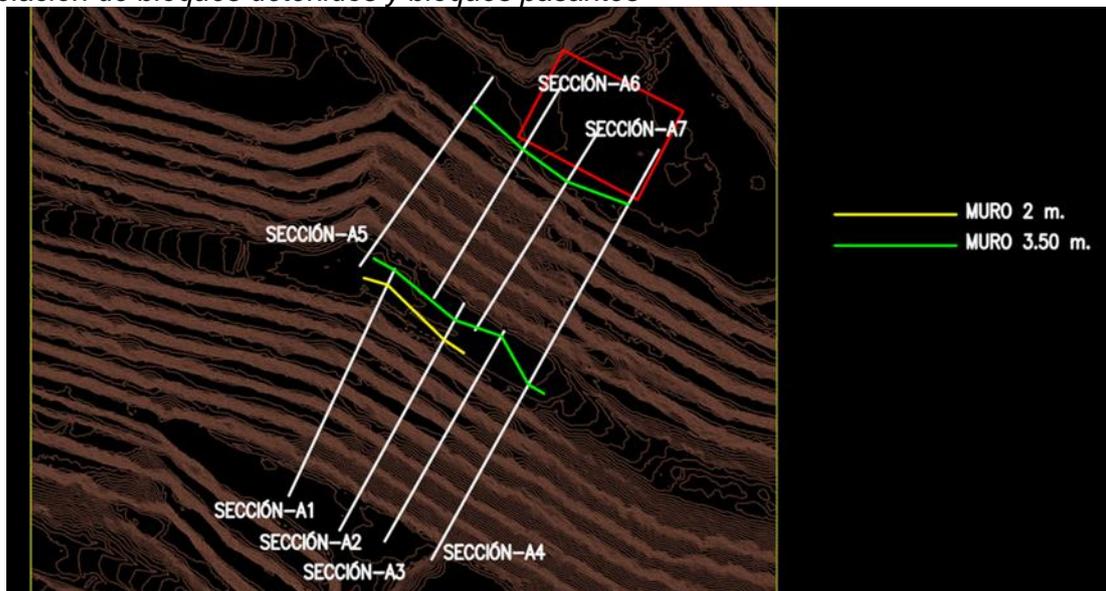
En base a las simulaciones desarrolladas y la obtención de los parámetros finales como son las alturas de rebote, velocidades cinemáticas y factores incidentes en la trayectoria recorrida por la caída de bloques de roca de cada una de las secciones descritas en la investigación, se obtuvo el planteamiento de controles de seguridad adicionales que optimizan el factor de seguridad de los niveles inferiores y asegura la continuidad de labores de minado, el cual consiste en la implementación de 03 muros de seguridad:

El primer muro de seguridad se recomienda ubicar en la parte superior de todos los niveles con una altura de 3.50 m y envuelve a todas las secciones analizadas.

Un segundo muro al pie del talud del piso de la inter rampa principal con una altura de 3.50 m, finalmente un muro de seguridad adicional cercano a la cresta de la inter rampa entre la sección 1 y la sección 3 con una altura de 2 m, estos controles adicionales aseguran el desarrollo de labores en niveles inferiores con un mayor factor de seguridad, tal como se describe en la Figura 46

Figura 46

Relación de bloques detenidos y bloques pasantes



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El estudio confirmó la necesidad del modelamiento y simulación de la trayectoria de caída de rocas en las zonas de riesgo, en el presente estudio de las zonas evaluadas donde se alcanzaron velocidades cinéticas de hasta 34.14 m/h y alturas de rebote media máxima de 17.25 m, valores significativos por lo que se resalta la importancia de poder evaluar la eficiencia de los controles de seguridad establecidos en los niveles inferiores de una mina superficial, los resultados de las simulaciones permiten ajustar y mejorar los controles adaptándose a las condiciones que cada sector específico evaluado.

El estudio demuestra la importancia en cuanto a la precisión de la elaboración de los mapeos estructurales, estudios geológicos y levantamientos topográficos para la generación de los inputs adecuados y necesarios para el desarrollo del estudio, dado que la variabilidad de factores cinemáticos entre las secciones varían una resultante de 23% para alturas máximas de rebote y un 26% para el factor de velocidad cinética desarrollada, Este rango de variabilidad es significativo, considerando que las secciones evaluadas presentan características locales homogéneas.

El indicador adecuado para determinar la eficiencia de los controles de seguridad es la cantidad de roca pasante ante una caída masiva de bloques en la zona de interés mediante simulaciones de caída de rocas, el mismo debe ser 0 para considerar que controles establecidos son totalmente eficientes, durante el análisis inicial se tenían 235 bloques pasantes de 1160 bloques simulados.

El análisis efectuado determinó que, en la zona de interés al modelar la caída masiva de bloques de rocas en cada una de las 07 secciones delimitadas en la evaluación, el 20.2% de las rocas superan los controles establecidos inicialmente, dado que no son retenidos por los muros de seguridad y las banquetas de diseño iniciales esto debido principalmente a que la zona establecida se encuentra condicionada por el colmatado de material en las banquetas, lo que favorece el desarrollo de velocidades superiores en la

caída de rocas, con las implementaciones efectuadas y solicitadas se redujo a 0% la cantidad de roca pasante.

Dentro del proceso de mina, se requiere constantemente evaluación y optimización de los parámetros de seguridad, por lo que al finalizar estudio se efectuó el replanteamiento de controles de seguridad con la añadidura de 03 muros de seguridad en diferentes ubicaciones espaciales y con diferentes características, variando entre los 2.0 m y 3.5m de altura, en función a cada sección analizada, los mismos controles deben ser adaptativos y totalmente operativos al momento de su implementación.

Recomendaciones

Al comprobarse la hipótesis planteada se recomienda la extensión del estudio a diversas zonas identificadas con potencial de riesgo dentro de las principales zonas de minado activas en la operación especialmente las que presenten banquetas colmatadas.

Al comprobarse la hipótesis planteada se recomienda la extensión del estudio a diversas zonas identificadas con potencial de riesgo dentro de las principales zonas de minado activas en la operación especialmente las que presenten banquetas colmatadas, el enfoque puede ser replicado en otras minas superficiales, lo que permitiría una comprensión más integral de los riesgos recurrentes en las diversas operaciones.

Se recomienda el desarrollo del estudio considerando recopilación de información actualizada concerniente al coeficiente de restitución con el fin de obtener un mayor grado de precisión en el estudio, lo que requiere poder efectuar pruebas de caída de rocas en vacío que aseguren la obtención de datos precisos, otras minas pueden beneficiarse de la creación de bases de datos sobre estos valores en función a los históricos, facilitando el acceso a información con base más estandarizada.

El monitoreo constante de la operación y del comportamiento de los taludes, permite identificar las zonas con mayor potencial de riesgo en los cuáles se deben efectuar estudios adicionales para el modelamiento de la trayectoria en la caída de rocas con el fin de determinar los controles de seguridad óptimos para la zona específica de evaluación, se sugiere que otras minas adopten tecnologías de monitoreo remoto y sensores en tiempo real, para detectar los cambios en la estabilidad del talud y las condiciones que podrían incidir en la caída de rocas, el enfoque proactiva permitirá la planificación de estudios y evaluaciones de las zonas específicas de interés con mayor potencial de riesgo.

Los controles de seguridad deben ser considerados totalmente dinámicos y específicos a la zona evaluada como sector de interés según el potencial del riesgo identificado con el objetivo de poder garantizar la continuidad de las labores de minado, estos mismos deben poseer un enfoque adaptativo, se recomienda que las minas

establezcan protocolos de revisión con frecuencia definida, esto garantizará un adecuado seguimiento a las diferentes condiciones existentes en la operación minera.

Se recomienda la evaluación de las zonas más críticas en la operación, y poder explorar alternativas de contención superiores a los muros de seguridad como son las barreras dinámicas que permiten la contención de mayores alturas de rebote de los bloques en caída libre, y requieren un menor ancho efectivo para la instalación de estas, a pesar de tener un costo elevado, representa uno de los controles más efectivos para zonas con una elevada criticidad.

Es importante fomentar la colaboración y benchmarking entre las diferentes operaciones mineras en los diversos congresos y simposios con el fin de compartir las mejores experiencias y prácticas en el manejo de riesgos por la caída de rocas, así como los controles establecidos que proporcionaron mejores resultados.

Referencias bibliográficas

- Anderson, K., et al. (2018). *Remote sensing for environmental monitoring in mining*. Remote Sensing of Environment, 209, 43-56.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.020>
- Bar, N, Nicoll, S & Pothitos, F 2016, 'Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock', in PM Dight (ed.), APSSIM 2016: Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 457-466
- Bell, F. G. (2007). *Stability of slopes*. In *Geotechnical Engineering* (pp. 367-391). Taylor & Francis.
- Bermedo, E, Schellman, M & Diaz, D 2020, 'Risk analysis of impacting people and/or equipment due to rockfall', in PM Dight (ed.), *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- Bishop, A. W. (2018). *The stability of earth slopes*. *Journal of Soil Mechanics*, 100(6), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.06.005>
- Bourrier, F., Dorren, L., and Hungr, O., 2013, *The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation: Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, p. 435–440, doi: 10.1002/esp.3372.
- Bourrier, F, Dorren, L, Nicot, F, Berger, F., Darve, T. *Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model*. *Geomorphology*, 2021, 110 (3-4), pp.68-79.
- Córdova, M., & Quispe, J. (2022). *Evaluación del riesgo de caídas de rocas en minas superficiales en Perú: Un enfoque geotécnico*. *Revista de Ingeniería de Minas*, 34(1), 85-95. <https://doi.org/10.1234/rim.2022.001>
- Dadashzadeh, N, Duzgun, H. S. B., Yesiloglu-Gultekin, N., Bilgin, A. (2014). *Comparison of Lumped Mass and Rigid Body Rockfall Simulation Models for the Mardin Castle*,

- Turkey. American Rock Mechanics Association. 48th Geomechanics Symposium. USA.
- Dey, J, Roy, S & Matin, A 2021, '*Drone photogrammetry: a structural data gathering tool for open pit mining geotechnics*', in PM Dight (ed.), SSIM 2021: Second International Slope Stability in Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 135-148, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2135_06
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2018). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons.
- Duncan, J. M. (2000). *State of the art in slope stability analysis*. In Proceedings of the 53rd Canadian Geotechnical Conference.
- EXSA. *Manual práctico de voladura*. [En línea] Tercera, Lima 2009. [fecha de consulta: 15 de agosto de 2021].
- Farmakis, I, D. Jean Hutchinson, Vlachopoulos, et al. (2023) "*Slope-Scale Rockfall Susceptibility Modeling as a 3D Computer Vision Problem*" Remote Sensing 15, no. 11: 2712. <https://doi.org/10.3390/rs15112712>
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S. y Leroi, E. (2005). *A framework for landslide risk assessment and management*. En O. Hungr, R. Fell, R. Couture y E. Eberhardt (Eds.), *Landslide Risk Management* (pp. 3-25). London, Taylor & Francis Group.
- Fell, R., & Hartford, D. (1997). *Landslide risk assessment*. Geotechnical Engineering, 148(3), 243-254.
- Fernández, M., & López, R. (2021). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill
- Garcia, M., & Chen, L. (2021). *Assessment of rockfall risk in open pit mines: A case study*. Mining Engineering, 73(5), 45-53. <https://doi.org/10.1002/9781119526826>
- García, I & Pastine, S 2020, '*Analysis of the effect of back-break on rockfall trajectories*', in PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1173-1182, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_78

- GEOSTRU. (2020) *Guía Georock 2D*. guía disponible en:
https://help.geostru.eu/pdf/GeoRock2D_ES.pdf
- Golder Associates. (2016). *Estudio Geotécnico de la Expansión del Tajo Calaorco a Nivel de Factibilidad*.
- González, A. (2015). *Evaluación de la estabilidad de taludes en rocas intrusivas en la región andina* (Tesis de maestría). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- González, R., & Mendoza, A. (2021). *Modelación de caídas de rocas en minas de cobre: Estudio de caso en el sur de Perú*. Journal of Mining Engineering, 29(3), 45-58.
<https://doi.org/10.1002/jme.2021.003>
- Gutiérrez, H., & Ramírez, J. (2022). *Mitigation strategies for rockfall hazards in urban areas*. En Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering (pp. 123-130). ASCE.
- Haneberg, W. C. (2008). *Monitoring and evaluating slope stability*. Geotechnical Testing Journal, 31(3), 259-272. <https://doi.org/10.1520/GTJ100350>
- Hustruuld, W., & Kuchta, M. (2006). *Open Pit Mine Planning & Design*. Taylor & Francis.
- ITASCA. (2019). *Estudio geotécnico para explotación de fases 7 y 8 del Tajo Calaorco*.
- Kalbende, K. & Annavarapu, S. (2022). *Drone Technology Solutions for the Mining Industry*.
- López, J., & Torres, R. (2020). *Rockfall hazard assessment and mitigation in open pit mines*. Journal of Mining Science, 56(4), 1234-1245.
<https://doi.org/10.1007/s10913-020-00662-5>
- Martínez, F., & Torres, E. (2020). *Geomechanical properties of rock masses*. En J. Pérez (Ed.), *Advances in Rock Mechanics* (pp. 45-67). Springer.
- Morkeh, J, Cefalo, J & Robertson, K 2020, 'Optimisation of crest blasting and excavation techniques for controlling spillover at Bingham Canyon Mine', in PM Dight (ed.), *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1483-1494

- Nairn, L, Della Pasqua, F & Payne, D 2021, '*Improved prediction of runout distance for in situ highwall instability in Australian eastern coast coal mines*', in PM Dight (ed.), SSIM 2021: Second International Slope Stability in Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 501-512
- Pavioni O, Ortega, F (2015), *Obteniendo los coeficientes de restitucion y arrastre en un solo experimento*. Revista Mexicana de Física
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Australia: CSIRO
- Pimentel, P., Figueiredo, C. A., & Sampaio, C. (2019). *Erosion control in mining operations*. *Environmental Engineering Science*, 36(7), 102-110.
<https://doi.org/10.1089/ees.2018.0523>
- Ramírez, L., & Salazar, P. (2020). *Impacto de la voladura en la estabilidad de taludes en minas superficiales: Un análisis en Perú*. *Minería y Geología*, 12(2), 78-90.
<https://doi.org/10.1002/mg.2020.004>
- Rockscience. (2002). *RocFall Risk Analysis of Falling Rocks on Steep Slopes*. User's Guide. Disponible en:
<https://www.rockscience.com/downloads/rocfall/RocFall%20Tutorial.pdf>.
- Sanabria, J. (2019). *Evaluación del riesgo ante caída de bloques en taludes de roca a partir de procesamiento de imágenes digitales y simulación de redes de fracturamiento y de trayectorias de bloques*. Universidad Nacional de Colombia.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*.
- Rodríguez, P., & Gutiérrez, S. (2019). *Análisis de riesgos geotécnicos en áreas de deslizamientos*. Informe técnico. Corporación Autónoma Regional de Caldas.
- RUSTICHELLI, A., DI CELMA, C., TONDI, E., BIANUCCI, G. (2016). *Deformation within the Pisco Basin sedimentary record (southern Peru): Stratabound orthogonal vein sets and their impact on fault development*. *Journal of South American Earth Sciences*. Manuscript Draft SAMES-D-15-00160.
- Smith, J., & Johnson, L. (2018). *Stability analysis of slopes in sedimentary rocks*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 144(3), 04017123.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001845](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001845)

Smith, A., & Johnson, P. (2019). *Geomechanical analysis of rockfall events in surface mining operations*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 112, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.005>

Stark, T. D., & Hussain, M. (2018). *Risk assessment in geotechnics*. Geotechnical Engineering, 171(4), 169-179. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.162>

Torres, A., & Mendoza, L. (2021). *Análisis de la estabilidad de taludes en minas a cielo abierto en Perú*. Geotecnia Peruana, 22(3), 45-60.
<https://doi.org/10.5678/gp.2021.003>

Yalan, L. y Valenzuela, S. (2020) "*Reducción del riesgo de caída de rocas a nivel de banco en una operación minera a tajo abierto con la aplicación de un análisis estructural*", tesis de grado. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. Repositorio académico de PUCP.

Zhang, L., Wang, J., & Li, H. (2018). *Application of geotechnologies in mining operations*. Journal of Mining Science, 54(4), 635-648.
<https://doi.org/10.1134/S106273911804015X>

Anexos

	Pág.
Anexo 1 : Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 01.....	1
Anexo 2 : Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 02.....	1
Anexo 3 : Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 03.....	2
Anexo 4 : Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 04.....	2
Anexo 5 : Clasificación geomecánica RMR – Estación 01	3
Anexo 6 : Clasificación geomecánica RMR – Estación 02	4
Anexo 7 : Clasificación geomecánica RMR – Estación 03	4
Anexo 8 : Clasificación geomecánica RMR – Estación 04	6
Anexo 9 : Reportes de Salida – Rockfall.....	7
Anexo 10: Valores NR, TR, densidad y ángulo de fricción.	25

Anexo 1: Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 01

ESTACION	EG 1	F1	DIP	DIP DIRECTION	REBOTE
			35	220	45
38	245	55			
32	210	60			
40	245	45			
30	238	50			
38	250	53			
42	218				
60	40				
53	38				
54	55				
58	45				
59	50				
57	30				
45	39				
85	152				
77	135				
78	140				
75	160				
82	155				
89	138				
87	145				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 02

ESTACION	EG 2	E1	DIP	DIP DIRECTION	REBOTE
			55	220	72
52	245	64			
49	210	41			
40	245	50			
65	238	48			
71	250	48			
50	218	62			
40	40	50			
39	38	67			
65	55	68			
50	45	69			
40	50				
58	30				
62	39				
75	152				
85	135				
80	140				
86	160				
77	155				
76	138				
81	145				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 03

ESTACION	EG 3	E1	DIP	DIP DIRECTION	REBOTE
			61	55	58
62	55	62			
68	52	50			
59	40	57			
60	60	62			
65	38	69			
70	45	50			
35	358				
30	232				
40	330				
35	320				
40	345				
25	310				
27	290				
80	148				
82	142				
76	155				
72	160				
82	140				
74	150				
75	145				

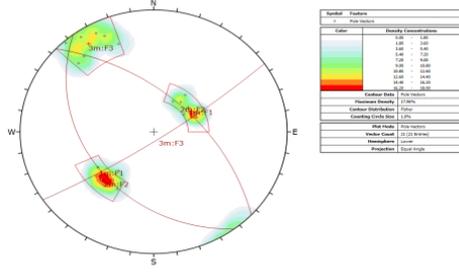
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Mapeo geotécnico en Fase 09 – Estación 04

ESTACION	EG 4	E1	DIP	DIP DIRECTION	REBOTE
			75	54	63
72	48	63			
68	59	56			
80	52	64			
75	56	55			
70	45	58			
65	50	66			
40	238				
32	252				
34	259				
41	260				
40	255				
39	251				
33	241				
80	142				
80	146				
74	142				
77	131				
75	150				
85	147				
73	140				
85	310				
80	315				
84	313				
73	303				
70	301				
81	323				
70	316				

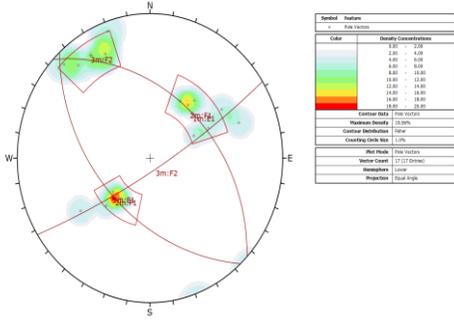
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Clasificación geomecánica RMR – Estación 01

Clasificación Geomecánica RMR - Taludes (Bieniawski 1989)										EG - 01																																																																																																												
Proyecto				MAPEO GEOMECÁNICO - FASE 9 SUR- TAJO CALAORCO				Sist. de coordenadas		WGS 84		Elevación (msnm)		3200																																																																																																								
Cliente								Este (m)		815 906		Realizado por		OPERACIONES																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Geometría</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Longitud</td> <td>:</td> <td>20 m</td> </tr> <tr> <td>Altura máxima</td> <td>:</td> <td>8 m</td> </tr> <tr> <td>Buzamiento del talud</td> <td>:</td> <td>75 °</td> </tr> <tr> <td>Dirección de buzamiento del talud</td> <td>:</td> <td>225 °</td> </tr> </tbody> </table>										Geometría			Longitud	:	20 m	Altura máxima	:	8 m	Buzamiento del talud	:	75 °	Dirección de buzamiento del talud	:	225 °																																																																																														
Geometría																																																																																																																						
Longitud	:	20 m																																																																																																																				
Altura máxima	:	8 m																																																																																																																				
Buzamiento del talud	:	75 °																																																																																																																				
Dirección de buzamiento del talud	:	225 °																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Geología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Litología</td> <td>:</td> <td>Arenisca</td> </tr> <tr> <td>Tipo de roca</td> <td>:</td> <td>Sedimentaria</td> </tr> <tr> <td>Tipo de estructura</td> <td>:</td> <td>Juntas</td> </tr> </tbody> </table>										Geología			Litología	:	Arenisca	Tipo de roca	:	Sedimentaria	Tipo de estructura	:	Juntas	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Plano</th> <th colspan="2">Orientación</th> <th rowspan="2">Observaciones</th> </tr> <tr> <th>Buz. (°)</th> <th>Direc. de buz. (°)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F1</td> <td>37</td> <td>235</td> <td rowspan="3">Según el análisis cinemático se evidencia ALTA probabilidad de fallamiento tipo Toppling</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>55</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>82</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>				Plano	Orientación		Observaciones	Buz. (°)	Direc. de buz. (°)	F1	37	235	Según el análisis cinemático se evidencia ALTA probabilidad de fallamiento tipo Toppling	F2	55	43	F3	82	150																																																																													
Geología																																																																																																																						
Litología	:	Arenisca																																																																																																																				
Tipo de roca	:	Sedimentaria																																																																																																																				
Tipo de estructura	:	Juntas																																																																																																																				
Plano	Orientación		Observaciones																																																																																																																			
	Buz. (°)	Direc. de buz. (°)																																																																																																																				
F1	37	235	Según el análisis cinemático se evidencia ALTA probabilidad de fallamiento tipo Toppling																																																																																																																			
F2	55	43																																																																																																																				
F3	82	150																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parámetros</th> <th colspan="2">Resistencia de la roca</th> <th>Índice de la calidad de roca</th> <th colspan="2">Espaciado de la discontinuidad</th> <th colspan="8">Condiciones de la discontinuidad</th> <th colspan="2">Condición hidrológica</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</th> <th>RQD (%)</th> <th colspan="2">Espaciado (m)</th> <th colspan="2">Persistencia (m)</th> <th colspan="2">Abertura (mm)</th> <th colspan="2">Rugosidad</th> <th colspan="2">Relleno</th> <th colspan="2">Meteorización</th> <th colspan="2">Grado de humedad (Bieniawski, 1989)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Rangos y valores</td> <td>> 250</td> <td>100-250</td> <td>90-100</td> <td>Muy juntas</td> <td colspan="2">Según dirección de buzamiento</td> <td colspan="2">Cerrada</td> <td colspan="2">Muy rugosa</td> <td colspan="2">Ninguno</td> <td colspan="2">Inalterado</td> <td colspan="2">Seco</td> </tr> <tr> <td>50-100</td> <td>25-5</td> <td>75-90</td> <td>Juntas</td> <td>Baja</td> <td>Baja</td> <td>< 0.1 mm</td> <td>Rugosa</td> <td colspan="2">Ligeramente rugosa</td> <td colspan="2">Relleno duro < 5 mm</td> <td colspan="2">Lig. meteorizada</td> <td colspan="2">Ligeram húmedo</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Valores</td> <td>15</td> <td>12</td> <td>17</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>6</td> <td>15</td> <td>10</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>8</td> <td>8</td> <td>5</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>15</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Parámetros	Resistencia de la roca		Índice de la calidad de roca	Espaciado de la discontinuidad		Condiciones de la discontinuidad								Condición hidrológica		Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)		RQD (%)	Espaciado (m)		Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)		Rangos y valores	> 250	100-250	90-100	Muy juntas	Según dirección de buzamiento		Cerrada		Muy rugosa		Ninguno		Inalterado		Seco		50-100	25-5	75-90	Juntas	Baja	Baja	< 0.1 mm	Rugosa	Ligeramente rugosa		Relleno duro < 5 mm		Lig. meteorizada		Ligeram húmedo		Valores	15	12	17	5	6	4	5	6	5	3	6	4	6	15	10	7	12	8	8	5	1	3	3	3	3	6	3	3	15				Valor total RMR básico= 56									
Parámetros	Resistencia de la roca		Índice de la calidad de roca	Espaciado de la discontinuidad		Condiciones de la discontinuidad								Condición hidrológica																																																																																																								
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)		RQD (%)	Espaciado (m)		Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)																																																																																																						
Rangos y valores	> 250	100-250	90-100	Muy juntas	Según dirección de buzamiento		Cerrada		Muy rugosa		Ninguno		Inalterado		Seco																																																																																																							
	50-100	25-5	75-90	Juntas	Baja	Baja	< 0.1 mm	Rugosa	Ligeramente rugosa		Relleno duro < 5 mm		Lig. meteorizada		Ligeram húmedo																																																																																																							
Valores	15	12	17	5	6	4	5	6	5	3	6	4	6	15	10	7																																																																																																						
	12	8	8	5	1	3	3	3	3	6	3	3	15																																																																																																									
Clase de macizo rocoso																																																																																																																						
SMR		100-81		80-61		60-51		50-41		40-31		30-21		20-0																																																																																																								
Descripción		I Muy buena		II Buena		III A Regular A		III B Regular B		IV A Mala A		IV B Mala B		V Muy mala																																																																																																								

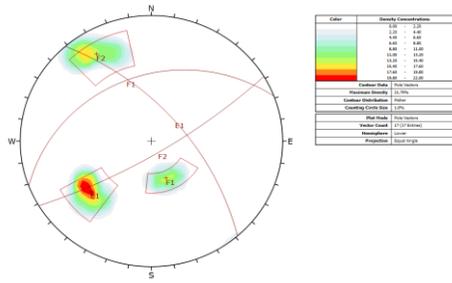
Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Clasificación geomecánica RMR – Estación 02

Clasificación Geomecánica RMR - Taludes (Bieniawski 1989)										EG - 02																																																																																																																																																																																																																																																											
Proyecto				MAPEO GEOMECÁNICO - FASE 9 SUR- TAJO CALAORCO				Sist. de coordenadas		WGS 84		Elevación (msnm)		3200																																																																																																																																																																																																																																																							
Cliente				PERFORACION Y VOLADURA				Este (m)		815 951.231		Realizado por		GEOTECNIA & HIDROGEOLOGIA																																																																																																																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Geometría</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Longitud</td> <td>:</td> <td>20 m</td> </tr> <tr> <td>Altura máxima</td> <td>:</td> <td>8 m</td> </tr> <tr> <td>Buzamiento del talud</td> <td>:</td> <td>75 °</td> </tr> <tr> <td>Dirección de buzamiento del talud</td> <td>:</td> <td>231 °</td> </tr> </tbody> </table>										Geometría			Longitud	:	20 m	Altura máxima	:	8 m	Buzamiento del talud	:	75 °	Dirección de buzamiento del talud	:	231 °	 <p>Fotografía de la estación geomecánica EG - 02</p>				 <p>Proyección estereográfica de las juntas en la EG - 02</p>																																																																																																																																																																																																																																								
Geometría																																																																																																																																																																																																																																																																					
Longitud	:	20 m																																																																																																																																																																																																																																																																			
Altura máxima	:	8 m																																																																																																																																																																																																																																																																			
Buzamiento del talud	:	75 °																																																																																																																																																																																																																																																																			
Dirección de buzamiento del talud	:	231 °																																																																																																																																																																																																																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Geología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Litología</td> <td>:</td> <td>ARENISCA</td> </tr> <tr> <td>Tipo de roca</td> <td>:</td> <td>SEDIMENTARIA</td> </tr> <tr> <td>Tipo de estructura</td> <td>:</td> <td>Juntas</td> </tr> </tbody> </table>										Geología			Litología	:	ARENISCA	Tipo de roca	:	SEDIMENTARIA	Tipo de estructura	:	Juntas	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Plano</th> <th colspan="2">Orientación</th> <th rowspan="2">Observaciones</th> </tr> <tr> <th>Buz. (°)</th> <th>Direc. de buz. (°)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E1</td> <td>55</td> <td>232</td> <td rowspan="3">La proyección estereográfica muestra fallamiento por Toppling con respecto a la E1</td> </tr> <tr> <td>F1</td> <td>47</td> <td>46</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>81</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>				Plano	Orientación		Observaciones	Buz. (°)	Direc. de buz. (°)	E1	55	232	La proyección estereográfica muestra fallamiento por Toppling con respecto a la E1	F1	47	46	F2	81	150																																																																																																																																																																																																																												
Geología																																																																																																																																																																																																																																																																					
Litología	:	ARENISCA																																																																																																																																																																																																																																																																			
Tipo de roca	:	SEDIMENTARIA																																																																																																																																																																																																																																																																			
Tipo de estructura	:	Juntas																																																																																																																																																																																																																																																																			
Plano	Orientación		Observaciones																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Buz. (°)	Direc. de buz. (°)																																																																																																																																																																																																																																																																			
E1	55	232	La proyección estereográfica muestra fallamiento por Toppling con respecto a la E1																																																																																																																																																																																																																																																																		
F1	47	46																																																																																																																																																																																																																																																																			
F2	81	150																																																																																																																																																																																																																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parámetros</th> <th colspan="3">Resistencia de la roca</th> <th colspan="3">Índice de la calidad de roca</th> <th colspan="3">Espaciado de la discontinuidad</th> <th colspan="6">Condiciones de la discontinuidad</th> <th colspan="4">Condición hidrológica</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</th> <th colspan="3">RQD (%)</th> <th colspan="3">Espaciado (m)</th> <th colspan="2">Persistencia (m)</th> <th colspan="2">Abertura (mm)</th> <th colspan="2">Rugosidad</th> <th colspan="2">Relleno</th> <th colspan="2">Meteorización</th> <th colspan="4">Grado de humedad (Bieniawski, 1989)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Rangos y valores</td> <td>> 250</td> <td>100-250</td> <td>50-100</td> <td>50-25</td> <td>25-5</td> <td>5-1</td> <td>< 1</td> <td>90-100</td> <td>75-90</td> <td>50-75</td> <td>25-50</td> <td>< 25</td> <td>Muy juntas</td> <td>Juntas</td> <td>Moderm. juntas</td> <td>Separadas</td> <td>Muy separadas</td> <td>Muy Baja</td> <td>Baja</td> <td>Media</td> <td>Alta</td> <td>Muy alta</td> <td>Cerrada</td> <td>Abierta</td> <td>Muy rugosa</td> <td>Rugosa</td> <td>Ligeramente rugosa</td> <td>Suave</td> <td>Pulida</td> <td>Ninguno</td> <td>Relleno duro < 5 mm</td> <td>Relleno duro > 5 mm</td> <td>Relleno blando < 5mm</td> <td>Relleno blando > 5 mm</td> <td>Inalterado</td> <td>Lig. meteorizada</td> <td>Mod. meteorizada</td> <td>Altamente meteorizada</td> <td>Descompuesta</td> <td>Seco</td> <td>Ligeram humedo</td> <td>Húmedo</td> <td>Gotearo</td> <td>Agua fluyendo</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>12</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>17</td> <td>13</td> <td>8</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>15</td> <td>10</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Valores</td> <td colspan="3">15</td> <td colspan="3">8</td> <td colspan="3">5</td> <td colspan="2">4</td> <td colspan="2">1</td> <td colspan="2">3</td> <td colspan="2">2</td> <td colspan="2">3</td> <td colspan="4">15</td> </tr> <tr> <td colspan="25" style="text-align: center;">Valor total RMR básico= 56</td> </tr> <tr> <td colspan="25" style="text-align: center;">Clase de macizo rocoso</td> </tr> <tr> <td colspan="3">SMR</td> <td colspan="3">100-81</td> <td colspan="3">80-61</td> <td colspan="3">60-51</td> <td colspan="3">50-41</td> <td colspan="3">40-31</td> <td colspan="3">30-21</td> <td colspan="3">20-0</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Descripción</td> <td colspan="3">I Muy buena</td> <td colspan="3">II Buena</td> <td colspan="3">III A Regular A</td> <td colspan="3">III B Regular B</td> <td colspan="3">IV A Mala A</td> <td colspan="3">IV B Mala B</td> <td colspan="3">V Muy mala</td> </tr> </tbody> </table>										Parámetros	Resistencia de la roca			Índice de la calidad de roca			Espaciado de la discontinuidad			Condiciones de la discontinuidad						Condición hidrológica				Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)			RQD (%)			Espaciado (m)			Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)				Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	< 1	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	Muy juntas	Juntas	Moderm. juntas	Separadas	Muy separadas	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Cerrada	Abierta	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Pulida	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm	Inalterado	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta	Seco	Ligeram humedo	Húmedo	Gotearo	Agua fluyendo	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0	Valores	15			8			5			4		1		3		2		3		15				Valor total RMR básico= 56																									Clase de macizo rocoso																									SMR			100-81			80-61			60-51			50-41			40-31			30-21			20-0			Descripción			I Muy buena			II Buena			III A Regular A			III B Regular B			IV A Mala A			IV B Mala B			V Muy mala		
Parámetros	Resistencia de la roca			Índice de la calidad de roca			Espaciado de la discontinuidad				Condiciones de la discontinuidad						Condición hidrológica																																																																																																																																																																																																																																																				
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)			RQD (%)			Espaciado (m)			Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)																																																																																																																																																																																																																																																	
Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	< 1	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	Muy juntas	Juntas	Moderm. juntas	Separadas	Muy separadas	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Cerrada	Abierta	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Pulida	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm	Inalterado	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta	Seco	Ligeram humedo	Húmedo	Gotearo	Agua fluyendo																																																																																																																																																																																																																									
	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0																																																																																																																																																																																																																											
Valores	15			8			5			4		1		3		2		3		15																																																																																																																																																																																																																																																	
Valor total RMR básico= 56																																																																																																																																																																																																																																																																					
Clase de macizo rocoso																																																																																																																																																																																																																																																																					
SMR			100-81			80-61			60-51			50-41			40-31			30-21			20-0																																																																																																																																																																																																																																																
Descripción			I Muy buena			II Buena			III A Regular A			III B Regular B			IV A Mala A			IV B Mala B			V Muy mala																																																																																																																																																																																																																																																

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Clasificación geomecánica RMR – Estación 03

Clasificación Geomecánica RMR - Taludes (Bieniawski 1989)										EG - 03																																																																																																																																																																																																																																	
Proyecto		MAPEO GEOMECÁNICO - FASE 9 SUR- TAJO CALAORCO				Sist. de coordenadas		WGS 84		Elevación (msnm)		3200																																																																																																																																																																																																																															
Cliente		PERFORACION Y VOLADURA				Este (m)		815,992		Realizado por		OPERACIONES																																																																																																																																																																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Geometría</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Longitud</td> <td>: 20 m</td> </tr> <tr> <td>Altura máxima</td> <td>: 8 m</td> </tr> <tr> <td>Buzamiento del talud</td> <td>: 75 °</td> </tr> <tr> <td>Dirección de buzamiento del talud</td> <td>: 236 °</td> </tr> </tbody> </table>										Geometría		Longitud	: 20 m	Altura máxima	: 8 m	Buzamiento del talud	: 75 °	Dirección de buzamiento del talud	: 236 °																																																																																																																																																																																																																								
Geometría																																																																																																																																																																																																																																											
Longitud	: 20 m																																																																																																																																																																																																																																										
Altura máxima	: 8 m																																																																																																																																																																																																																																										
Buzamiento del talud	: 75 °																																																																																																																																																																																																																																										
Dirección de buzamiento del talud	: 236 °																																																																																																																																																																																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Geología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Litología</td> <td>: Andesita</td> </tr> <tr> <td>Tipo de roca</td> <td>: Volcánico</td> </tr> <tr> <td>Tipo de estructura</td> <td>: Juntas</td> </tr> </tbody> </table>										Geología		Litología	: Andesita	Tipo de roca	: Volcánico	Tipo de estructura	: Juntas	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Plano</th> <th colspan="2">Orientación</th> <th rowspan="2">Observaciones</th> </tr> <tr> <th>Buz. (°)</th> <th>Dircc. de buz. (°)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E1</td> <td>65</td> <td>50</td> <td rowspan="3">Según el Análisis Estereográfico la E1 presenta potencial falla por Vuelco</td> </tr> <tr> <td>F1</td> <td>36</td> <td>317</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>80</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>				Plano	Orientación		Observaciones	Buz. (°)	Dircc. de buz. (°)	E1	65	50	Según el Análisis Estereográfico la E1 presenta potencial falla por Vuelco	F1	36	317	F2	80	150																																																																																																																																																																																																						
Geología																																																																																																																																																																																																																																											
Litología	: Andesita																																																																																																																																																																																																																																										
Tipo de roca	: Volcánico																																																																																																																																																																																																																																										
Tipo de estructura	: Juntas																																																																																																																																																																																																																																										
Plano	Orientación		Observaciones																																																																																																																																																																																																																																								
	Buz. (°)	Dircc. de buz. (°)																																																																																																																																																																																																																																									
E1	65	50	Según el Análisis Estereográfico la E1 presenta potencial falla por Vuelco																																																																																																																																																																																																																																								
F1	36	317																																																																																																																																																																																																																																									
F2	80	150																																																																																																																																																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parámetros</th> <th colspan="2">Resistencia de la roca</th> <th colspan="2">Índice de la calidad de roca</th> <th colspan="2">Espaciado de la discontinuidad</th> <th colspan="8">Condiciones de la discontinuidad</th> <th colspan="2">Condición hidrológica</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</th> <th colspan="2">RQD (%)</th> <th colspan="2">Espaciado (m)</th> <th colspan="2">Persistencia (m)</th> <th colspan="2">Abertura (mm)</th> <th colspan="2">Rugosidad</th> <th colspan="2">Relleno</th> <th colspan="2">Meteorización</th> <th colspan="2">Grado de humedad (Bieniawski, 1989)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Rangos y valores</td> <td>> 250</td> <td>100-250</td> <td>50-100</td> <td>50-25</td> <td>25-5</td> <td>5-1</td> <td><1</td> <td>90-100</td> <td>75-90</td> <td>50-75</td> <td>25-50</td> <td><25</td> <td>Muy juntas</td> <td>Juntas</td> <td>Moderm. juntas</td> <td>Separadas</td> <td>Muy separadas</td> <td>Muy Baja</td> <td>Baja</td> <td>Media</td> <td>Alta</td> <td>Muy alta</td> <td>Cerrada</td> <td colspan="2">Abierta</td> <td>Muy rugosa</td> <td>Rugosa</td> <td>Ligeramente rugosa</td> <td>Suave</td> <td>Pulida</td> <td>Ninguno</td> <td>Relleno duro < 5 mm</td> <td>Relleno duro > 5 mm</td> <td>Relleno blando <5mm</td> <td>Relleno blando > 5 mm</td> <td>Inalterado</td> <td>Lig. meteorizada</td> <td>Mod. meteorizada</td> <td>Altamente meteorizada</td> <td>Descompuesta</td> <td>Seco</td> <td>Ligeram húmedo</td> <td>Húmedo</td> <td>Goteando</td> <td>Agua fluyendo</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>12</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>17</td> <td>13</td> <td>8</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>15</td> <td>10</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Valores</td> <td colspan="2">12</td> <td colspan="2">8</td> <td colspan="2">5</td> <td colspan="2">4</td> <td colspan="2">3</td> <td colspan="2">3</td> <td colspan="2">1</td> <td colspan="2">3</td> <td colspan="2">15</td> </tr> <tr> <td colspan="14" style="text-align: center;">Valor total RMR básico= 54</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td colspan="14" style="text-align: center;">Clase de macizo rocoso</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">SMR</td> <td colspan="2">100-81</td> <td colspan="2">80-61</td> <td colspan="2">60-51</td> <td colspan="2">50-41</td> <td colspan="2">40-31</td> <td colspan="2">30-21</td> <td colspan="2">20-0</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Descripción</td> <td colspan="2">I Muy buena</td> <td colspan="2">II Buena</td> <td colspan="2">IIIA Regular A</td> <td colspan="2">IIIB Regular B</td> <td colspan="2">IVA Mala A</td> <td colspan="2">IVB Mala B</td> <td colspan="2">V Muy mala</td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>										Parámetros	Resistencia de la roca		Índice de la calidad de roca		Espaciado de la discontinuidad		Condiciones de la discontinuidad								Condición hidrológica		Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)		RQD (%)		Espaciado (m)		Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)		Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	<1	90-100	75-90	50-75	25-50	<25	Muy juntas	Juntas	Moderm. juntas	Separadas	Muy separadas	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Cerrada	Abierta		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Pulida	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando > 5 mm	Inalterado	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta	Seco	Ligeram húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0	Valores	12		8		5		4		3		3		1		3		15		Valor total RMR básico= 54																								Clase de macizo rocoso																								SMR		100-81		80-61		60-51		50-41		40-31		30-21		20-0				Descripción		I Muy buena		II Buena		IIIA Regular A		IIIB Regular B		IVA Mala A		IVB Mala B		V Muy mala			
Parámetros	Resistencia de la roca		Índice de la calidad de roca		Espaciado de la discontinuidad		Condiciones de la discontinuidad								Condición hidrológica																																																																																																																																																																																																																												
	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)		RQD (%)		Espaciado (m)		Persistencia (m)		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Meteorización		Grado de humedad (Bieniawski, 1989)																																																																																																																																																																																																																										
Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	<1	90-100	75-90	50-75	25-50	<25	Muy juntas	Juntas	Moderm. juntas	Separadas	Muy separadas	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Cerrada	Abierta		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Pulida	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando > 5 mm	Inalterado	Lig. meteorizada	Mod. meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta	Seco	Ligeram húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo																																																																																																																																																																																														
	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	4	2	1	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0																																																																																																																																																																																																	
Valores	12		8		5		4		3		3		1		3		15																																																																																																																																																																																																																										
Valor total RMR básico= 54																																																																																																																																																																																																																																											
Clase de macizo rocoso																																																																																																																																																																																																																																											
SMR		100-81		80-61		60-51		50-41		40-31		30-21		20-0																																																																																																																																																																																																																													
Descripción		I Muy buena		II Buena		IIIA Regular A		IIIB Regular B		IVA Mala A		IVB Mala B		V Muy mala																																																																																																																																																																																																																													

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9: Reportes de Salida – Rockfall

Sección 1

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A1 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 13:33:44

Project Settings

General Settings

Engine Lump Mass
Units Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle Use friction angle from material editor
Consider angular velocity Yes
Maximum steps per rock 20000
Normal velocity cutoff (m/s) 0.1
Stopped velocity cutoff (m/s) 0.1
Maximum timestep (s) 0.01
Switch velocity (m/s) -1e-09

Random Number Generation

Sampling method Latin-Hypercube
Random seed Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties

Name	Seeder 1
Location	(16.5225, 3386), (17.7846, 3385), (20.2647, 3382.34)

Rocks to Throw

Number of Rocks	100 Overall
Rock Types	Grupo1, Grupo 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform		0	360

Seeder 2

Seeder Properties

Name	Seeder 2
Location	(33.5004, 3368.36), (34.4827, 3367.59), (36.0649, 3365.39)

Rocks to Throw

Number of Rocks	100 Overall
Rock Types	Grupo1, Grupo 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform		0	360

Rock Types

Grupo1

Properties

Name	Grupo1
Color	

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Grupo 2

Properties

Name	Grupo 2
Color	

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Summary Results

Run Properties

Simulation Time (s)	0.09
Envelope data:	
	Max Mean 95%
Envelope Bounce Height (m)	17.94 13.44 17.01
Envelope Total Kinetic Energy (kJ)	141.2 69.2 141.2
Envelope Translational Kinetic Energy (kJ)	133 66.09 133
Envelope Rotational Kinetic Energy (kJ)	31.44 12.41 31.44
Envelope Translational Kinetic Velocity (m/s)	29.02 25.34 29.02
Envelope Rotational Kinetic Velocity (rad/s)	115.9 73.27 115.9

Stopping Reason

CONTINUE	0
Invalid Start Location	0
Invalid Slope Geometry	0
Invalid bad crest loss definition	0
Invalid relative size between rock and slope	0
Max Steps	0
Edge Model	86
Stopped	114
Stopped (wedged)	0
Stopped (chattering)	0
Hit Barrier	0
Hit Berm with infinite capacity	0
No collision found	0
Bad Collision Geometry (location before)	0
Rock is freefalling onto a spike or a trough	0
END_ERROR_UNKNOWN	0
END_ERROR_POSITIVE_GAP	0
Bad collision calculation	0
Bad Collision Geometry (0 intersection)	0
Bad Collision Geometry (location after)	0
Bad Collision Geometry (missing intersection)	0
Error during results reading	0
Total Rocks	200

Sección 2

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A2 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 02:41:10 pm

Project Settings

General Settings

Engine	Lump Mass
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle	Use friction angle from material editor
Consider angular velocity	Yes
Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

Random Number Generation

Sampling method	Latin-Hypercube
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties					
Name	Seeder 1				
Location	(21.1709, 3385), (22.1737, 3384.05), (23.07, 3383.51), (23.7003, 3383)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	360	

Seeder 2

Seeder Properties					
Name	Seeder 2				
Location	(50.5376, 3352), (49.9396, 3352.67)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	30 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	360	

Seeder 3

Seeder Properties					
Name	Seeder 3				
Location	(37.7054, 3367.38), (37.284, 3367.76)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	40 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	360	

Rock Types

Group 1

Properties					
Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties					
Name	Group 2				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Summary Results

Run Properties				
Simulation Time (s)	0.07			
Envelope data:				
	Max	Mean	95%	
Envelope Bounce Height (m)	26.62	15.58	26.6	
Envelope Total Kinetic Energy (kJ)	192.8	58.72	192.8	
Envelope Translational Kinetic Energy (kJ)	185.1	52.78	185.1	
Envelope Rotational Kinetic Energy (kJ)	23.68	7.586	23.68	
Envelope Translational Kinetic Velocity (m/s)	33.16	21.89	33.16	
Envelope Rotational Kinetic Velocity (rad/s)	100.6	56.14	100.6	

Stopping Reason	
CONTINUE	0
Invalid Start Location	0
Invalid Slope Geometry	0
Invalid bad crest loss definition	0
Invalid relative size between rock and slope	0
Max Steps	0
Edge Model	77
Stopped	53
Stopped (wedged)	0
Stopped (chattering)	0
Hit Barrier	0
Hit Berm with infinite capacity	0
No collision found	0
Bad Collision Geometry (location before)	0
Rock is freefalling onto a spike or a trough	0
END_ERROR_UNKNOWN	0
END_ERROR_POSITIVE_GAP	0
Bad collision calculation	0
Bad Collision Geometry (0 intersection)	0
Bad Collision Geometry (location after)	0
Bad Collision Geometry (missing intersection)	0
Error during results reading	0
Total Rocks	130

Sección 3

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A3 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 03:13:38 p. m.

Project Settings

General Settings

Engine Lump Mass
Units Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle Use friction angle from material editor
Consider angular velocity Yes
Maximum steps per rock 20000
Normal velocity cutoff (m/s) 0.1
Stopped velocity cutoff (m/s) 0.1
Maximum timestep (s) 0.01
Switch velocity (m/s) -1e-09

Random Number Generation

Sampling method Latin-Hypercube
Random seed Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties					
Name	Seeder 1				
Location	(15.2885, 3384), (16.3052, 3383)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 2

Seeder Properties					
Name	Seeder 2				
Location	(28.5618, 3368), (28.0036, 3368.62), (27.483, 3369.04)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	40 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 3

Seeder Properties					
Name	Seeder 3				
Location	(42.9869, 3351.08), (42.3849, 3351.67), (41.8768, 3352.17)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	30 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Rock Types

Group 1

Properties					
Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties					
Name	Group 2				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Sección 4

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A4 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 08:26:38 p. m.

Project Settings

General Settings

Engine	Lump Mass
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle	Use friction angle from material editor
Consider angular velocity	Yes
Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

Random Number Generation

Sampling method	Latin-Hypercube
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties					
Name	Seeder 1				
Location	(13.3738, 3384), (14.8745, 3381.85), (15.1453, 3381.47)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 2

Seeder Properties					
Name	Seeder 2				
Location	(26.8022, 3366.04), (26.0238, 3367.02), (24.5943, 3368.44)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 3

Seeder Properties

Name Seeder 3
Location (39.7267, 3353), (38.4623, 3354), (37.364, 3354.77), (36.0674, 3355.68)

Rocks to Throw

Number of Rocks 60 Overall
Rock Types Group 1, Group 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0		360

Seeder 4

Seeder Properties

Name Seeder 4
Location (139.554, 3271), (138.728, 3272), (137.09, 3273.25), (135.775, 3274)

Rocks to Throw

Number of Rocks 60 Overall
Rock Types Group 1, Group 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0		360

Rock Types

Group 1

Properties

Name Group 1
Color 

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties

Name Group 2
Color 

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Summary Results

Run Properties			
Simulation Time (s)	0.11		
Envelope data:			
	Max	Mean	95%
Envelope Bounce Height (m)	32.73	17.25	27.86
Envelope Total Kinetic Energy (kJ)	175.8	74.26	175.8
Envelope Translational Kinetic Energy (kJ)	166.2	63.41	166.2
Envelope Rotational Kinetic Energy (kJ)	26.8	10.85	26.8
Envelope Translational Kinetic Velocity (m/s)	34.14	24.51	34.14
Envelope Rotational Kinetic Velocity (rad/s)	133.7	69.26	133.7

Stopping Reason	
CONTINUE	0
Invalid Start Location	0
Invalid Slope Geometry	0
Invalid bad crest loss definition	0
Invalid relative size between rock and slope	0
Max Steps	0
Edge Model	72
Stopped	168
Stopped (wedged)	0
Stopped (chattering)	0
Hit Barrier	0
Hit Berm with infinite capacity	0
No collision found	0
Bad Collision Geometry (location before)	0
Rock is freefalling onto a spike or a trough	0
END_ERROR_UNKNOWN	0
END_ERROR_POSITIVE_GAP	0
Bad collision calculation	0
Bad Collision Geometry (0 intersection)	0
Bad Collision Geometry (location after)	0
Bad Collision Geometry (missing intersection)	0
Error during results reading	0
Total Rocks	240

Sección 5

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A5 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 03:51:21 p. m.

Project Settings

General Settings

Engine	Lump Mass
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle	Use friction angle from material editor
Consider angular velocity	Yes
Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

Random Number Generation

Sampling method	Latin-Hypercube
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties					
Name	Seeder 1				
Location	(19.2242, 3273), (19.4875, 3272.79), (19.8436, 3272.44)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 2

Seeder Properties					
Name	Seeder 2				
Location	(34.2485, 3256), (35.4258, 3255), (35.4864, 3254.91)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	40 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 3

Seeder Properties					
Name	Seeder 3				
Location	(49.4758, 3238), (48.8125, 3238.69)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	30 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform		0	360

Seeder 4

Seeder Properties					
Name	Seeder 4				
Location	(62.7985, 3224), (62.313, 3224.42)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	20 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform		0	360

Rock Types

Group 1

Properties					
Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties					
Name	Group 2				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Sección 6

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A6 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 04:42:42 p. m.

Project Settings

General Settings

Engine Lump Mass
 Units Metric (m, kg, kJ)
 Rock throw mode Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle Use friction angle from material editor
 Consider angular velocity Yes
 Maximum steps per rock 20000
 Normal velocity cutoff (m/s) 0.1
 Stopped velocity cutoff (m/s) 0.1
 Maximum timestep (s) 0.01
 Switch velocity (m/s) -1e-09

Random Number Generation

Sampling method Latin-Hypercube
 Random seed Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties					
Name	Seeder 1				
Location	(10.0737, 3273), (11.3316, 3272), (12.2915, 3270.86)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 2

Seeder Properties					
Name	Seeder 2				
Location	(32.625, 3244), (35.8528, 3241.83), (36.8828, 3241), (38.2708, 3239.48)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 3

Seeder Properties					
Name	Seeder 3				
Location	(56.8845, 3218), (60.1438, 3215), (66.2836, 3210.25)				
Rocks to Throw					
Number of Rocks	60 Overall				
Rock Types	Group 1,		Group 2		
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Rock Types

Group 1

Properties					
Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties					
Name	Group 2				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Summary Results

Run Properties				
Simulation Time (s)	0.10			
Envelope data:				
		Max	Mean	95%
Envelope Bounce Height (m)	9.222	3.658	9.213	
Envelope Total Kinetic Energy (kJ)	140	41.77	140	
Envelope Translational Kinetic Energy (kJ)	122.7	36.47	122.7	
Envelope Rotational Kinetic Energy (kJ)	17.31	6.095	17.31	
Envelope Translational Kinetic Velocity (m/s)	27.01	17.62	27.01	
Envelope Rotational Kinetic Velocity (rad/s)	86.03	51.31	86.03	

Stopping Reason	
CONTINUE	0
Invalid Start Location	0
Invalid Slope Geometry	0
Invalid bad crest loss definition	0
Invalid relative size between rock and slope	0
Max Steps	0
Edge Model	0
Stopped	180
Stopped (wedged)	0
Stopped (chattering)	0
Hit Barrier	0
Hit Berm with infinite capacity	0
No collision found	0
Bad Collision Geometry (location before)	0
Rock is freefalling onto a spike or a trough	0
END_ERROR_UNKNOWN	0
END_ERROR_POSITIVE_GAP	0
Bad collision calculation	0
Bad Collision Geometry (0 intersection)	0
Bad Collision Geometry (location after)	0
Bad Collision Geometry (missing intersection)	0
Error during results reading	0
Total Rocks	180

Sección 7

RocFall2 Analysis Information

Project Summary

File Name S-A7 File Version 8.019

Date Created 20/12/2023, 05:04:05 p. m.

Project Settings

General Settings

Engine	Lump Mass
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

Friction angle	Use friction angle from material editor
Consider angular velocity	Yes
Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

Random Number Generation

Sampling method	Latin-Hypercube
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Material Properties

Arenisca

"Arenisca" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.45	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Derrumbe

"Derrumbe" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope Roughness (°)		None			

Seeders

Seeder 1

Seeder Properties

Name Seeder 1
 Location (11.159, 3274), (12.2033, 3273), (14.3699, 3271.43), (16.5489, 3268.85)

Rocks to Throw

Number of Rocks 60 Overall
 Rock Types Group 1, Group 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 2

Seeder Properties

Name Seeder 2
 Location (32.9969, 3247), (41.4188, 3241), (43.3603, 3239)

Rocks to Throw

Number of Rocks 60 Overall
 Rock Types Group 1, Group 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Seeder 3

Seeder Properties

Name Seeder 3
 Location (66.7327, 3212.43), (70.6483, 3209), (71.4289, 3207.97), (72.2496, 3207.3), (73.7771, 3206.54)

Rocks to Throw

Number of Rocks 60 Overall
 Rock Types Group 1, Group 2

Initial Conditions

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform	0	0	360

Rock Types

Group 1

Properties

Name Group 1
 Color 

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	72.9	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Group 2

Properties

Name Group 2
 Color 

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	337.5	None			
Density (kg/m ³)	2700	None			

Anexo 10: Valores NR, TR, densidad y ángulo de fricción.

La estabilidad de taludes de roca es un aspecto crítico en proyectos de minería, ya que los desprendimientos y caída de rocas pueden representar un grave peligro para la seguridad. Dos de los principales parámetros utilizados para evaluar la estabilidad de taludes son el coeficiente de caída de rocas no-rockfall (NR) y el coeficiente de talud-roca (TR).

El coeficiente NR estima la probabilidad de desprendimiento de rocas en zonas planas sin taludes, mientras que el coeficiente TR evalúa la estabilidad de los taludes de roca propiamente dichos. Estos valores adimensionales se obtienen mediante análisis geotécnicos que consideran propiedades de la roca como cohesión, ángulo de fricción interna, meteorización, entre otros factores.

Diversos estudios han reportado rangos típicos de valores de NR y TR para diferentes tipos de rocas. Por ejemplo, para arenisca se han documentado valores de NR entre 0.45 a 0.9 y valores de TR entre 0.7 a 1.1 (Smith et al., 2018; Fernández et al., 2021). Para rocas intrusivas, los valores de NR suelen estar en el rango de 0.35 a 0.8 y los de TR entre 0.8 a 1.2 (González et al., 2015; Martínez et al., 2020).

En el caso de materiales de derrumbe, los valores de NR comúnmente se encuentran entre 0.3 a 0.6, mientras que los valores de TR oscilan entre 0.7 a 1.0 (Rodríguez et al., 2019; Gutiérrez et al., 2022).

En vista a la evaluación de las propiedades geomecánicas específicas mapeadas en campo, se tomaron como referencia los parámetros con valores desfavorables de NR y TR debido a una menor estabilidad de taludes.

- Arenisca: NR = 0.45 / TR = 0.90
- Roca Intrusiva: NR = 0.35 / TR = 0.87
- Material de Derrumbe: NR = 0.30 / TR = 0.85

En el caso de la densidad y ángulo de fricción, son valores tomados de estudios efectuadas en la unidad minera según el mapeo geológico y estudios estructurales detallados en los anexos 5.5 al anexo 5.7, efectuados en las estaciones geomecánicas.