



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Aplicación de la simulación Montecarlo en la
cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un
plan de minado en minera Yauliyacu**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Roque Fidel GONZALES MERA

ASESOR

Mariano PACHECO ORTIZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Gonzales, R. (2025). *Aplicación de la simulación Montecarlo en la cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en minera Yauliyacu*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Roque Fidel Gonzales Mera
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70269657
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-0726-5120
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Mariano Pacheco Ortiz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06284228
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8764-7306
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	William Gilberto Escudero Simon
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	04051131
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	David Ysaac Melgar Cabana
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41423051
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Hugo Solis Sarmiento
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09671245

Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Huarochirí Distrito: Chicla Centro Poblado: Yauliyacu Calle: Kilómetro 115 de la carretera central Latitud: -11.650629 Longitud: -76.236557
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2022 – agosto 2024
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

En el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el martes 16, de Diciembre del 2025 siendo las 13:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. WILLIAM GILBERTO ESCUDERO SIMON	(PRESIDENTE)
Mg. DAVID YSAAC MELGAR CABANA	(SECRETARIO)
Mg. HUGO SOLIS SARMIENTO	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: "*Aplicación de la simulación Montecarlo en la cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en minera Yauliyacu*" presentada por Don: **ROQUE FIDEL GONZALES MERA**, Bachiller en Ingeniería Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

PCENITUD

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo

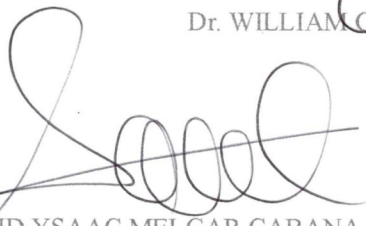
resultado fue la nota de: *15 (QUINCE)*.

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, a Don: **ROQUE FIDEL GONZALES MERA**.

Siendo las *1:45pm* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 16 de diciembre del 2025


Dr. WILLIAM GILBERTO ESCUDERO SIMON
Presidente


Mg. DAVID YSAAC MELGAR CABANA
Secretario


Mg. HUGO SOLIS SARMIENTO
Miembro


Mg. MARIANO PACHECO ORTIZ
Asesor de Tesis



Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Msc. Ing. Mariano Pacheco Ortiz en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° 000006-2025-EPIMI-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "Aplicación de la Simulación Montecarlo en la Cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un Plan de Minado en minera Yauliyacu" presentado por el bachiller Roque Fidel, Gonzales Mera para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el $< 2 \%$ de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero de Minas.

Lima, 25 de noviembre del 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Msc. Ing. Mariano Pacheco Ortiz

DNI: 06284228

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a mis padres por su inquebrantable respaldo y continuo estímulo para que siga avanzando y creciendo en mi vida.

Agradecimiento

Expreso mi profundo agradecimiento a Dios por mantenerme con vida y conceder salud a mi familia, permitiéndonos avanzar y demostrar los logros que podemos alcanzar. Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a la EPIM ya que por las enseñanzas impartidas en sus aulas he podido brindar soporte a mis seres queridos.

Índice de contenido

Dedicatoria	2
Agradecimiento.....	3
Índice de contenido	4
Índice de tabla	6
Índice de figura	7
Resumen	8
Abstract	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Introducción.....	10
1.2. Planteamiento del problema.....	11
1.2.1. Descripción de la problemática	11
1.2.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Objetivos de la investigación	14
1.4. Importancia y alcance de la investigación	14
1.5. Limitaciones de la Investigación.....	15
CAPÍTULO II. EL MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes de la investigación	16
2.2. Bases teóricas.....	20
2.3. Definición de términos.....	47
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	49
3.1. Las hipótesis	49
3.2. Las variables	49
3.3. Operacionalización de variables.....	49
CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS	51
4.1. Área de estudio	51
4.2. Diseño de investigación	57
4.3. Población y Muestra.....	57
4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información. ...	58
4.5. Análisis estadístico.....	60
CAPÍTULO V. RESULTADOS	62
5.1. Descripción general del proyecto minero	62

5.1.1.	Escenario Actual: Deterministico.....	62
5.1.2.	Escenario Propuesto: Uso de variables probabilísticas	66
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....		88
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		95
ANEXOS.....		102

Índice de tabla

Tabla 1 Operacionalización de variables	50
Tabla 2 Distancias de acarreo, destinos del mineral, leyes de plata (Oz/tn) y recuperaciones metalúrgicas por tajo.....	63
Tabla 3 Disponibilidad mecánica y utilización por equipo scooptram 4yd3 (CAT-R1300G).....	64
Tabla 4 Cálculo de productividad por tajo	65
Tabla 5 Ingreso esperado por tajo	66
Tabla 6 Parámetros estadísticos descriptivos	70
Tabla 7 Valores aleatorios para los inputs del cálculo	80

Índice de figura

Figura 1 Clasificación de los métodos de minería subterránea	22
Figura 2 Esquema del desarrollo de SLS	24
Figura 3 Ejemplo de un realce abierto regular en SLS	24
Figura 4 Sublevel overhand	27
Figura 5 Sublevel underhand.....	27
Figura 6 Ciclo de minado subterráneo	32
Figura 7 Relación entre recursos mineros y reservas mineras	37
Figura 8 Distribución uniforme	40
Figura 9 Distribución normal	40
Figura 10 Distribución Poisson	41
Figura 11 Distribución Exponencial	41
Figura 12 Distribución Binomial	42
Figura 13 Distribución Bernoulli	42
Figura 14 Distribución t de Student.....	43
Figura 15 Distribución Chi cuadrado.....	43
Figura 16 Ubicación y accesibilidad a la empresa minera	51
Figura 17 Estratigrafía de la empresa minera.....	53
Figura 18 Geología Estructural Zona Alta.....	54
Figura 19 Veta 742_M - Tj_753	55
Figura 20 Esquema Sub Level Stoping semimecanizado.....	56
Figura 21 Esquema Sub Level Stoping variante Long-Blast-Hole (LBH).....	57
Figura 22 Procedimiento metodológico para la aplicación de la SMC en la evaluación del plan de minado	59
Figura 23 Distribución triangular para horas efectivas de trabajo	68
Figura 24 Histograma de datos toneladas_cuchara	71
Figura 25 Boxplot de datos BD_tn_cuchara	71
Figura 26 Comparación de distribuciones acumuladas	73
Figura 27 Tonelaje por cuchara de scooptram R-1300G.....	74
Figura 28 Distribución triangular para el ciclo de acarreo	75
Figura 29 Distribución triangular para leyes promedio del tajo	76
Figura 30 Distribución triangular para disponibilidad mecánica	77
Figura 31 Distribución triangular para utilización mecánica	78
Figura 32 Distribución pert para el precio de la plata.....	79
Figura 33 Ingreso proyectado con software @Risk	81
Figura 34 Probabilidad de cumplimiento del plan de minado	82
Figura 35 Variables con mayor impacto en el cumplimiento del plan (Gráfico tornado).	83
Figura 36 Valores más probables encontrados para las variables probabilísticas mediante el programa @RISK.....	87

Resumen

El objetivo de este estudio fue aplicar la simulación de Montecarlo (SMC) para evaluar la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en una mina subterránea localizada en la sierra de Lima. Se realizó un análisis de los riesgos vinculados a la ejecución del plan minero utilizando un diseño no experimental de tipo transversal. La población y muestra se definieron a partir de bases de datos que incluían variables clave como disponibilidad mecánica, utilización de equipos, rendimiento, leyes promedio, valor de los metales y recuperaciones metalúrgicas. La fase investigativa se distribuyó en cuatro fases: recopilación de datos, generación de bases de datos, tratamiento estadístico y ajuste de datos, seguidas del funcionamiento de la SMC. Durante la evaluación de la planificación minera de una sección específica de la mina Yauliyacu, en la semana 50 del 2022, se identificaron siete variables críticas: Ciclo promedio, Tonelaje/cuchara, Ley promedio, Disponibilidad mecánica, Horas efectivas, Recuperación metalúrgica y Utilización efectiva. Estos descubrimientos enfatizan el interés de tener en cuenta la variabilidad e incertidumbre en las operaciones mineras. Aunque se estimaron ingresos de 60,083 dólares para el Tajo TJ_1017, este resultado es sensible a cambios, pues se basa en promedios que no reflejan completamente las realidades operativas. En conclusión, la SMC simplificó la evaluación de la probabilidad de alcanzar los ingresos proyectados y los factores de variabilidad. La probabilidad actual de cumplimiento es del 95.9%, pero con mejoras en transporte, mantenimiento y selección de zonas, podría elevarse al 98.7%, optimizando la planificación y reduciendo la incertidumbre.

Palabras claves: Montecarlo, probabilidad, plan de minado, minería subterránea.

Abstract

The objective of this study was to apply Monte Carlo Simulation (MCS) to evaluate the probability of meeting a mining plan in an underground mine located in the highlands of Lima. A non-experimental, cross-sectional design was used to analyze risks associated with the execution of the mining plan, based on databases containing key variables such as mechanical availability, equipment utilization, performance, average grades, metal value, and metallurgical recoveries. The research process involved data collection, database generation, statistical treatment, and data adjustment, followed by the application of MCS. In evaluating the planning of a specific section of the Yauliyacu mine in week 50 of 2022, seven critical variables were identified: average cycle, tons per bucket, average grade, mechanical availability, effective hours, metallurgical recovery, and effective utilization. The findings underscore the importance of incorporating variability and uncertainty into mining operations. Although revenues of 60,083 dollars were estimated for the TJ_1017 stope, the result is highly sensitive to changes because it relies on averages that do not fully reflect operational realities. Ultimately, MCS facilitated the assessment of the probability of achieving projected revenues and understanding variability factors, showing a current compliance probability of 95.9%, which could increase to 98.7% with improvements in transportation, maintenance, and zone selection.

Keywords: Montecarlo, probability, mining plan, underground mining.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La explotación minera enfrenta una variedad de riesgos que abarcan aspectos legales, geológicos, ambientales, sociales, políticos, de mercado y operativos, los cuales pueden afectar significativamente la viabilidad y rentabilidad de un proyecto en todas sus etapas, desde su concepción hasta su operación. En este contexto, la planificación minera debe abordar una alta incertidumbre, especialmente en la estimación de variables clave. Este estudio se enfoca en el uso de la simulación Montecarlo (SMC) para examinar la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en Minera Yauliyacu, una empresa que emplea el método de explotación Sublevel Stopping (SLS) para la extracción de minerales polimetálicos. Se compararán dos enfoques: uno basado en variables determinísticas, con resultados predecibles, y otro que incorpora variables probabilísticas, permitiendo una modelación más realista de la incertidumbre. Para simular distintas situaciones, medir riesgos y fortalecer la calidad de las decisiones estratégicas en la operación minera, se utilizará @Risk. La investigación busca brindar una estimación más clara de la posibilidad de que el plan de minado tenga éxito, lo cual facilita detectar elementos esenciales que influyen en su cumplimiento y reforzar la habilidad para reducir riesgos. Por lo tanto, esta revisión colaborará en mejorar las operaciones en el campo minero, impulsando una administración más sostenible y eficaz de los proyectos. La investigación se organizó en seis capítulos, que se detallan seguidamente:

El Capítulo I, “INTRODUCCIÓN”, trata sobre la exposición del problema de análisis, una breve descripción de la realidad problemática, la formulación del problema, la justificación de la presente exploración, la presentación de los objetivos a alcanzar, la importancia del estudio, su alcance y las limitaciones que se han enfrentado durante la ejecución de la indagación.

En el Capítulo II, “MARCO TEÓRICO”, se presentan los términos clave que facilitan comprender con claridad los principios de la SMC y la estrategia de extracción de minerales. Asimismo, se exponen los precedentes a nivel nacional e internacional, se explican los fundamentos teóricos y científicos, y se establecen conceptos esenciales.

El Capítulo III, “HIPÓTESIS Y VARIABLES”, se formula la hipótesis general, y se describen las variables de la averiguación, incluyendo sus definiciones conceptuales y operacionales.

En el Capítulo IV, “MATERIALES Y MÉTODOS”, se detalla la metodología empleada en la fase investigativa. Se describe el área de estudio, el diseño de investigación, la selección de la población y muestra, a su vez de las técnicas empleadas en la recopilación de información, acompañadas de los respectivos instrumentos. Adicionalmente, se detalla el tratamiento de la información y se lleva a cabo un análisis minucioso.

En el Capítulo V, “RESULTADOS”, se detalla el examen de los hallazgos logrados en esta exploración. Se debe realizar un análisis detallado, llevar a cabo pruebas para contrastar las hipótesis y abordar las complicaciones que surgieron durante el desarrollo de esta indagación.

En el Capítulo VI, “DISCUSIÓN”, se contrastan los descubrimientos y los procedimientos abarcados en el presente análisis con los de otros autores, lo que permite una comprensión más amplia y un enfoque crítico.

Finalmente, en las páginas siguientes, se desarrollan las conclusiones alcanzadas durante la ejecución de la investigación, resaltando los hallazgos más relevantes. Asimismo, se presentan propuestas y recomendaciones para abordar las necesidades identificadas en las conclusiones. Para garantizar la integridad académica y evitar problemas de plagio, se han citado todas las referencias bibliográficas siguiendo la normativa APA de la séptima edición. En la última sección de este trabajo, se incluyen todos los anexos necesarios para brindar al lector una comprensión más completa de la investigación realizada.

1.2. Planteamiento del problema.

1.2.1. Descripción de la problemática

A nivel internacional, la industria minera enfrenta una presión creciente por parte de las comunidades y los gobiernos para adoptar prácticas más sostenibles y responsables. En acuerdo con Kivinen et al. (2018), la inquietud de la sociedad por la sostenibilidad ambiental y social ha experimentado un notable incremento, lo que ha generado un mayor examen de las actividades mineras. Esta situación se evidencia

en el aumento de disputas entre compañías mineras y poblaciones cercanas. En la revisión de Oh et al. (2023), se destaca que la ausencia de un marco institucional robusto posibilita que las compañías mineras ejerzan su influencia corporativa sin abordar de manera efectiva las inquietudes de las poblaciones locales, lo cual incrementa la desconfianza. Asimismo, la inestabilidad de los costos de los metales dificulta la factibilidad financiera de las iniciativas mineras, poniendo en riesgo su perdurabilidad en el futuro (Imasiku & Ntagwirumugara, 2021).

En el contexto nacional, Perú no está exento de estos desafíos. La minería, pilar fundamental de la economía peruana, también ha sido fuente de conflictos sociales y ambientales. La averiguación efectuada por Awuah et al. (2021) expresa que la ausencia de un compromiso genuino con las poblaciones locales provoca desconfianza y oposición social, lo que podría poner en riesgo que las labores mineras resulten sustentables. Asimismo, la limitada infraestructura tecnológica en muchas minas del país dificulta la implementación de tecnologías avanzadas, como la SMC, herramienta que podría mitigar riesgos operativos y económicos. En consonancia con Amos & Boahen (2024), esta situación se agrava por la escasez de personal capacitado en dichas tecnologías, lo que resulta en una planificación deficiente y en la incapacidad de anticipar problemas críticos.

A nivel local, la minera Yauliyacu, ubicada en Pasco, enfrenta desafíos significativos que afectan su planificación y operaciones, incluyendo la variabilidad geológica del terreno, la falta de infraestructura tecnológica adecuada y la limitada capacitación en herramientas avanzadas como la SMC. Estas dificultades obstaculizan una gestión anticipada de los riesgos y complican la realización de las metas beneficiosas. Asimismo, es fundamental considerar las inquietudes ambientales y sociales de las comunidades cercanas, junto con la inestabilidad de los precios de los metales a nivel mundial, lo que añade complejidad a las proyecciones financieras y la rentabilidad. Frente a este panorama, el método de SMC surge como una solución clave para optimizar la administración de riesgos, incrementar la eficiencia en las operaciones y mejorar las probabilidades de alcanzar las metas de producción de manera sostenible y socialmente responsable.

Justificación de la investigación

Justificación teórica

La SMC para simular es una estrategia de modelado basada en la utilización de distribuciones de probabilidad para reflejar la incertidumbre y la variabilidad de las variables presentes en las operaciones mineras. Teóricamente, su aplicación en la minería permite predecir posibles escenarios de ejecución del plan de minado, facilitando la cuantificación de riesgos asociados a factores como la variabilidad geológica, la fluctuación de precios de los minerales y la eficacia operacional. Este método resulta particularmente útil en situaciones de gran incertidumbre, como la que afronta la minera Yauliyacu. Esto se debe a que ofrece una perspectiva completa de los riesgos y simplifica la selección de opciones bien fundamentadas para garantizar que los fines productivos se logren. Para Bernal (2010) la justificación teórica explica cómo el estudio contribuye al conocimiento existente, sustentándose en teorías, conceptos y antecedentes relevantes.

Justificación practica

Prácticamente, la SMC ofrece a la minera Yauliyacu la capacidad de simular múltiples escenarios de operación bajo diferentes condiciones de incertidumbre, lo cual es esencial para anticipar posibles desviaciones del plan de minado. Con esta herramienta es posible realizar una evaluación más precisa de la posibilidad de alcanzar los objetivos de producción, lo que simplifica la detección temprana de los elementos que podrían causar demoras o pérdidas financieras. Asimismo, el uso de simulaciones posibilita mejorar la distribución de recursos, la organización de actividades y el control de posibles riesgos, lo que a su vez favorece el aumento de la eficacia y la sostenibilidad de la actividad minera. La justificación práctica, de acuerdo con las ideas de Bernal (2010), explica las ventajas y usos específicos que tendrán los logros para solucionar dificultades reales o elevar procedimientos en escenarios particulares.

Justificación metodológica

Desde el enfoque metodológico, el manejo de la SMC para calcular la perspectiva de éxito de un proyecto minero en la empresa Yauliyacu es respaldado por su habilidad para representar de forma matemática la incertidumbre. Al emplear distribuciones de probabilidad para modelar los elementos fundamentales de la actividad minera (tales como la pureza del mineral, el rendimiento de los equipos y los gastos de operación), este enfoque posibilita alcanzar conclusiones más fieles y detalladas al analizar

diversas eventualidades. De esta manera, el uso de la SMC permite ampliar el entendimiento sobre cómo interactúan las variables y colabora con los responsables de tomar decisiones en la ejecución de estrategias eficaces para disminuir los riesgos relacionados con el incumplimiento de los planes de extracción. De acuerdo con Bernal (2010), la fundamentación metodológica explica la relevancia de las técnicas, recursos o enfoques empleados en el estudio, resaltando su idoneidad para lograr los propósitos establecidos y su contribución a investigaciones venideras.

1.2.2. Formulación del problema

Problema general

¿Cómo se utiliza la simulación de Montecarlo para cuantificar la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en la minera Yauliyacu?

Problemas específicos

¿Cuál es el riesgo asociado a un plan de minado en la minera Yauliyacu?

¿Es posible conocer que variables generan un mayor impacto en la probabilidad de cumplimiento de un plan minero en la minera Yauliyacu?

¿Con una variable probabilística se puede caracterizar el comportamiento de una variable minera en la minera Yauliyacu?

1.3. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Aplicar la simulación Montecarlo en la cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en la minera Yauliyacu.

Objetivos específicos

Conocer el riesgo asociado a un plan de minado en la minera Yauliyacu.

Identificar las variables que generan mayor impacto en el incumplimiento de un plan de minado en la minera Yauliyacu.

Generar planes de acción para que la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado en la minera Yauliyacu aumente.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

En la industria, es esencial examinar el empleo de la SMC para cuantificar la posibilidad de éxito en una iniciativa minera, ya que esto agiliza el análisis de viabilidad operativa, reduce los riesgos económicos y optimiza la toma de decisiones significativas. Su influencia va más allá de este sector, ya que se puede utilizar en áreas como la ingeniería, la logística y las finanzas, proporcionando herramientas

útiles para manejar riesgos y planificar en función de probabilidades. Asimismo, estimula el crecimiento de modelos matemáticos y estadísticos sofisticados, impulsando avances en la simulación y la interpretación de datos, lo cual posibilita la resolución de dilemas complicados con mayor exactitud y eficacia en un entorno que prioriza cada vez más el análisis numérico.

1.5. Limitaciones de la Investigación

La falta de datos históricos precisos y completos constituye una de las principales restricciones en los estudios acerca de la utilización de la SMC para calcular el grado de factibilidad de éxito de un plan de extracción minera, ya que son indispensables para nutrir el modelo de forma adecuada. Además, la naturaleza dinámica de la industria minera, caracterizada por cambios constantes en la geología, equipos, procedimientos y factores externos, dificulta la captura precisa de todas las variables relevantes y sus interacciones. A pesar de estas limitaciones, la SMC sigue siendo una herramienta valiosa, siempre que se utilicen los mejores datos disponibles y se aplique con cautela.

CAPÍTULO II. EL MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Antecedentes internacionales

Cardozo et al. (2023) aplicaron el Proceso Analítico Jerárquico de Montecarlo (MAHP) en la selección del acceso y transporte en minería subterránea, con la finalidad de potenciar la elección estratégica mediante la reducción de la subjetividad y la incorporación del análisis de riesgos. Para ello, se evaluaron cuatro opciones: pozo, rampa con camiones diésel, rampa con camiones eléctricos y cinta transportadora, considerando criterios técnicos, económicos y socioambientales. A través de la metodología MAHP, se comparó la variabilidad de los pesos y preferencias asignados a cada opción en relación con el método tradicional AHP. Como resultado, se determinó que la opción preferida fue la rampa con camiones diésel, seguida de la rampa con camiones eléctricos, destacando que, en escenarios con prioridades similares, el coeficiente de variación debe considerarse en la decisión final. En conclusión, la aplicación del MAHP demostró ser una herramienta eficaz en estudios conceptuales y de prefactibilidad minera, ya que permite evaluar la incertidumbre y definir estrategias de variabilidad, optimizando así la selección de acceso en proyectos mineros.

Hou et al. (2023) crearon un esquema de simulación para optimizar la asignación de camiones y cargadores en minas subterráneas, con el fin de incrementar la eficiencia del transporte de mineral y minimizar los efectos negativos de las interacciones vehiculares en espacios reducidos. Para ello, dividieron la fase de transporte en 3 partes: carga, desplazamiento y remoción, y aplicaron un método de simulación basado en el escaneo de actividades orientado a entidades, programado en Python. Asimismo, incorporaron la SMC para considerar las incertidumbres en los parámetros del transporte y mejorar la robustez de los resultados. Como resultado, se optimizó la configuración de vehículos sin rieles, logrando una mayor velocidad de transporte, una mejor tasa de utilización de camiones y una reducción en los eventos de colisión. En conclusión, la metodología propuesta demostró ser altamente aplicable en la optimización del transporte en minería subterránea, permitiendo evaluar y mejorar los esquemas de transporte antes de realizar inversiones significativas.

Medinaceli & Medinaceli (2021) crearon un enfoque fundamentado en la probabilidad que emplea la SMC para analizar la resistencia de un talud de roca, especialmente en

relación con la falla en cuña, que es considerada como el tipo de colapso más probable en este escenario. Se condujo una exploración con el propósito de revisar la firmeza de un talud específico mediante la aplicación de un método determinista y otro de carácter probabilístico. Respecto a la metodología empleada, se efectuó inicialmente un examen determinista del terreno inclinado, donde se determinó el índice de estabilidad utilizando el enfoque convencional para el diseño de taludes. Después, se optó por utilizar un método basado en probabilidades para diseñar el talud, llevando a cabo la SMC en mil pruebas, con el propósito de analizar la estabilidad y la posibilidad de colapso del talud mencionado. Los resultados obtenidos del análisis determinista mostraron un índice de estabilidad de 1.6, lo cual sugiere que, de acuerdo con este método, el talud se encuentra en condiciones estables. No obstante, al realizar el análisis basado en probabilidades, se obtuvo una media de 2.922 para los índices de seguridad, con una tasa de fallo del 17.8%. Esto permite evaluar la fiabilidad del diseño. En resumen, el análisis destaca la sencillez conceptual de la SMC y cómo, gracias a la tecnología informática actual, se ha vuelto una herramienta al alcance de los ingenieros en Bolivia, especialmente en los campos de la ingeniería de minas, civil y geotécnica, mejorando los diseños con un enfoque probabilístico más sólido.

Spanidis et al. (2021) crearon un enfoque para organizar la gestión de peligros naturales en proyectos mineros al aire libre. Su meta era analizar cuán probable es que ocurran riesgos y cómo afectarían a los presupuestos y plazos de los proyectos. Para ello, utilizaron el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP) combinado con la función de Valor Esperado (EV), la SMC y el método PERT, permitiendo una estimación precisa de los retrasos y sobrecostos asociados a distintos escenarios de desastre. Mediante un análisis de caso, se comprobó que la metodología es un recurso económica y versátil para adoptar determinaciones en el sector minero, lo cual ayuda a planear tácticas de mitigación y recuperación. Los hallazgos mostraron que el FAHP simplifica la conversión del conocimiento de expertos en datos que se pueden cuantificar, lo cual potencia la exactitud de las proyecciones de riesgo y ofrece un fundamento sólido para administrar eventos adversos en minas a cielo abierto. En conclusión, la integración de esta metodología con herramientas de simulación contribuyó significativamente a la sostenibilidad de los proyectos mineros, minimizando costos imprevistos y fortaleciendo la resiliencia operativa frente a eventos catastróficos.

Li et al. (2021) analizaron la estabilidad de pilares de roca dura en minas subterráneas mediante la combinación de métodos de diferencias finitas, redes neuronales y técnicas de SMC. Con el fin de mejorar la predicción del factor de seguridad (SF), incorporaron el índice de resistencia geológica (GSI) como una nueva variable, además de la relación de forma del pilar (w/h), la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y la profundidad del pilar (H). La metodología abarcó la formulación de una plataforma de registros integrada por 594 conjuntos de datos a través del empleo de FLAC3D, la predicción de esfuerzos a través de una red neuronal de retropropagación (BPNN) y el análisis de estabilidad mediante un enfoque determinista, análisis de sensibilidad y SMC. Los resultados indicaron que el GSI es un factor clave en la estabilidad del pilar, con un impacto mayor en pilares de baja resistencia, y que la probabilidad de falla aumenta con el incremento del coeficiente de variación de las variables. Se concluyó que el GSI, después del UCS, es el segundo factor más importante en la estabilidad del pilar, por lo que su consideración en el diseño de pilares es fundamental para optimizar su resistencia y minimizar riesgos en minas subterráneas.

Antecedentes nacionales

El trabajo investigativo de Soles (2020) se enfoca en los descubrimientos de la valoración financiera y económica, igualmente de la discusión de riesgo del plan para abordar la vinaza mediante un sistema de biometanación anaeróbica denominado Ecomet-XT. Se materializó un estudio sobre la factibilidad económica y los riesgos relacionados con el plan, que pretende mitigar el impacto medioambiental en los recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como atenuar la carga orgánica en la vinaza. Para ejecutar esta evaluación, se aprovechó un esquema de simulación financiera y económica en Microsoft Excel® para identificar la TIR y el VAN en un contexto de certeza. Después, se procedió a examinar los elementos del proyecto y se les asignaron distribuciones de probabilidad, basándose en datos previos y en los detalles proporcionados por los proveedores. Se llevó a cabo la SMC operando el programa Oracle Crystal Ball®, con un total de 20,000 repeticiones para calcular las proyecciones económicas y financieras. De acuerdo con las evidencias recogidas, el VAN se ubica entre 0 y 3,521.33 miles de dólares con una tasa de confianza del 74.21%, mostrando una media de 760.38 miles de dólares y una dispersión de 1,061.89 miles de dólares. Tras examinar las observaciones, se concluyó que, aunque los hallazgos mostraron una viabilidad positiva, existe un

25.79% de probabilidades de que el VAN resulte negativo, lo cual implica que la iniciativa podría tener gastos.

Pinado (2021) empleó la SMC dentro de su indagación para examinar la estabilidad física de taludes en áreas mineras que portan material grueso, con la finalidad de examinar las fluctuaciones en el factor de seguridad (FS) y la amenaza de fallo. La metodología utilizada consistió en ejecutar mil simulaciones para obtener tanto el FS crítico como el FS promedio en distintas secciones del talud. Los resultados mostraron que en un escenario estático, el Pad de lixiviación presentó un factor crítico de 1.494 y un factor promedio de 1.543, mientras que en la evaluación de la desmontera, se obtuvo un FS mínimo de 1.155 y un promedio de 1.159. En un escenario seudoestático, el Pad de lixiviación mostró un factor crítico de 0.956 y un factor promedio de 0.981, mientras que el depósito de desmonte tuvo un factor crítico de 0.771 y un promedio de 0.831. La conclusión del estudio indicó una fuerte correlación positiva del 78.17% entre la confiabilidad y el factor de seguridad. En las circunstancias estáticas, se hallaron factores de seguridad superiores a 1.50 con una confiabilidad mínima del 97.55%. Sin embargo, en las condiciones seudoestáticas, el Pad de lixiviación presentó una confiabilidad del 48.64%, y el depósito de desmonte mostró un factor crítico de 0.883, lo que indica un estado por debajo del límite de equilibrio, con la confiabilidad nula en esta condición.

Bustillos (2024) creó un proyecto minero para la mina Marcapunta con el fin de mejorar la disposición de las áreas de extracción y soporte, garantizando así que el terreno continúe estable y que la producción minera resulte más eficiente. Se dividió el proceso en dos etapas: en la primera etapa, se creó un modelo geomecánico con el fin de examinar los elementos que afectan la estabilidad y establecer los parámetros geomecánicos clave; posteriormente, se unió toda esta información para estudiar la estabilidad de los pozos subterráneos y establecer las nuevas medidas de cámaras y pilares. Conforme a las evidencias alcanzadas, se observó que la calidad de la roca en la región analizada presenta variaciones según los distintos dominios geomecánicos, lo que posibilitó la detección de posibilidades para incrementar la anchura de los pilares sin poner en riesgo la estabilidad. No obstante, no se aconsejó aumentar la amplitud de las cámaras por la mala calidad de la roca y los problemas para garantizar la estabilidad del techo. En conclusión, esta indagación validó que la puesta en marcha del sistema de clasificación geomecánica de Bieniawski junto con

el uso del Método Gráfico de Estabilidad (MGE) posibilitaron establecer un plan más efectivo, favoreciendo la seguridad y la viabilidad a largo plazo de la actividad minera. Torres & Rondon (2023) reforzaron la estrategia de extracción en el proyecto Romina, con el fin de aumentar su eficiencia y beneficios económicos a largo plazo, tanto en la minería subterránea como en la superficial. Con ese fin, se enfocaron en modificar el diseño de planificación, realizar cálculos de métricas importantes de rendimiento (KPIs), establecer la cantidad de equipos disponibles y evaluar las existencias de mineral junto con el VAN. Gracias a la metodología utilizada, se logró reconocer elementos fundamentales y limitaciones que impactan en la ejecución del proyecto minero, creando tácticas para incrementar su eficacia en la operación. Se consiguió optimizar la planificación de extracción, retrasando la operación en la mina a cielo abierto hasta el tercer año y aprovechando al máximo las reservas disponibles. Esto condujo a obtener un VAN favorable de 163.6 millones de dólares. En resumen, la nueva estructura favoreció una administración más efectiva de los recursos y maquinarias, garantizando un plan de extracción más lucrativo y perdurable en el tiempo.

Ramírez et al. (2023) formularon directrices para la ejecución del esquema de producción en una operación minera a cielo abierto, por medio del control de indicadores esenciales de rendimiento en perforación, cargado y traslado de mineral. La metodología utilizada consistió en la creación y adaptación de una hoja de cálculo que hace concordancia entre los criterios operativos de la flota productiva y el tonelaje previsto, incorporando la SMC a través del complemento Oracle Crystal Ball para evaluar la variabilidad en los parámetros clave. Como resultado, se identificaron los indicadores de mayor impacto en la ejecución del plan minero, permitiendo realizar ajustes en las variables controlables del modelo para optimizar el desempeño. Se concluyó que la adopción de la SMC hace posible minimizar los riesgos operativos, incrementar la productividad y maximizar los costos, logrando una reducción potencial del 2% en comparación con el presupuesto previo y un índice B/C de 27.

2.2. Bases teóricas

Minería subterránea

La extracción de minerales en el subsuelo es la utilización de recursos que se efectúa bajo la corteza terrestre. Cuando no es factible extraer minerales en superficie debido a razones económicas, sociales o ambientales, se lleva a cabo esta práctica. Es

indispensable el desarrollo de galerías, pozos, chimeneas y túneles, entre otras tareas (Luna, 2011).

Las minas subterráneas se emplean para recuperar una variedad de minerales y recursos naturales, incluyendo preciosos metales como el Au y la Ag, además de otros minerales como Zn y Cu. Asimismo se emplean para conseguir combustibles fósiles, por ejemplo, el carbón. Estos recursos se encuentran en depósitos subterráneos, como vetas o en forma de sulfuros y óxidos, y son extraídos mediante equipos especializados. El oro y la plata suelen encontrarse juntos en vetas, mientras que el cobre y el zinc tienen aplicaciones industriales significativas, como la producción de cables eléctricos y acero, respectivamente. De igual modo, se encuentran otros minerales, entre ellos el Sn, el Pb, el Ni y el U (I. Vergara, 2023).

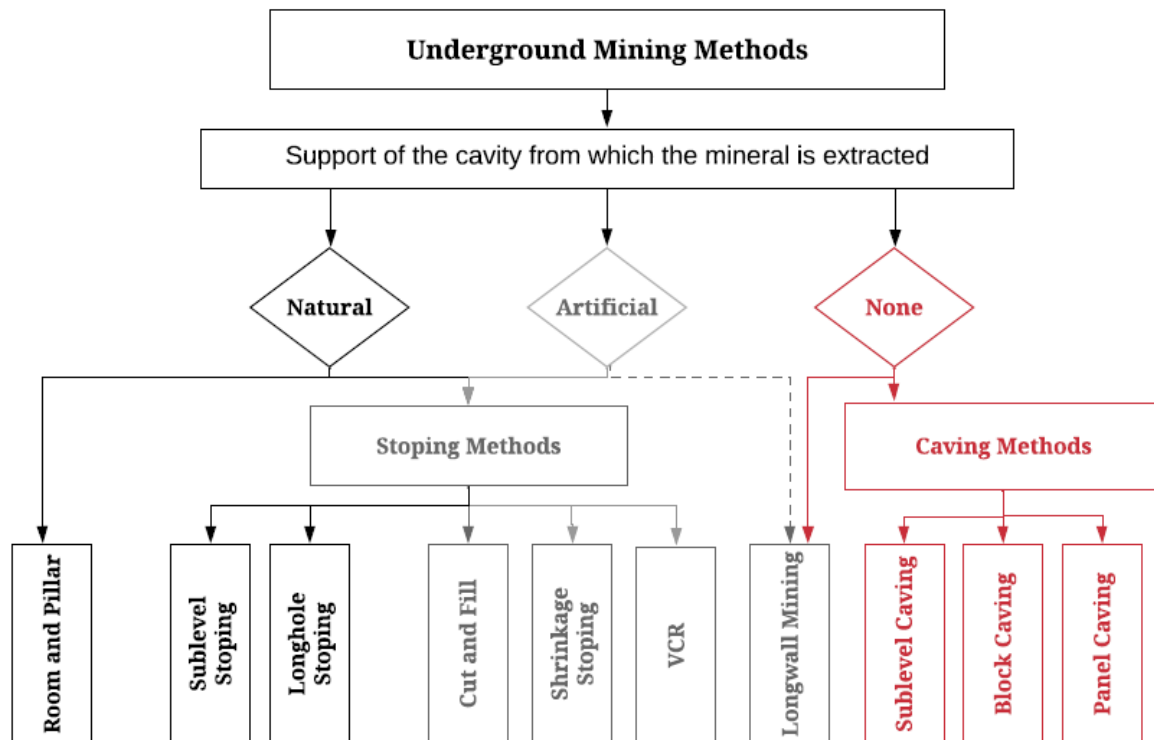
En la minería subterránea, los costos asociados al arranque, excavación y transporte tienden a ser significativamente más elevados que en la minería a tajo abierto. Esto se debe al uso de equipos de menor tamaño, lo que limita la capacidad de extracción de los minerales contenidos en las vetas, capas o filones. Además, esta modalidad requiere una inversión considerable en sistemas de ventilación, iluminación y estructuras de soporte artificial (Arbaiza et al., 2014).

Al principio, la extracción de minerales bajo tierra requiere una inversión baja en herramientas y maquinaria, y no requiere el uso extensivo de grandes extensiones de tierra. Igualmente que la minería a cielo abierto, tiene repercusiones ecológicas en el campo circundante, por lo tanto, es esencial realizar las actividades mineras con total consideración por el entorno, asegurando la protección y bienestar de los empleados para impedir eventuales disputas sociales y restaurar el entorno medioambiental al concluir la explotación. Así se asegura que esta operación sea sustentable.

(Arbaiza et al., 2014).

A juicio de Brady & E Brown (2013), los métodos de minería subterránea pueden clasificarse en función al tipo de sostenimiento que tengan. El sostenimiento puede ser natural, artificial o ninguno, como se indica en la Figura 1. Este estudio se centrará en la técnica de minería SLS, que utiliza mayormente sostenimiento natural.

Figura 1
Clasificación de los métodos de minería subterránea



Fuente: Brady & E Brown, 2013.

Método Sublevel Stopeing

En territorios como Canadá, Australia y Chile, el método SLS subterráneo se emplea de forma frecuente en la gran y mediana minería porque presenta un rendimiento elevado con equipos de bajo perfil. Conlleva la extracción del mineral a través de tronaduras verticales, que dejan grandes caserones vacíos, en los que se recoge el material en zanjas situadas en la parte inferior. Se pone en práctica en yacimientos tabulares verticales o sub-verticales de gran espesor, preferiblemente con contactos regulares, y también en depósitos masivos subdivididos en caserones con pilares recuperables. La viabilidad del método depende principalmente del estado del macizo rocoso (Ramos, 2017).

Para Movil (2021), el SLS El SLS es un proceso de extracción subterránea utilizado en cuerpos minerales que son subverticales (y verticales) y ampliamente utilizado en la minería de mediana escala en Chile. La obtención del mineral se efectúa en subniveles, usando voladuras y el movimiento de la materia bajo el efecto de la gravedad hacia los sitios de extracción situados en la parte baja de los realces abiertos (stopes).

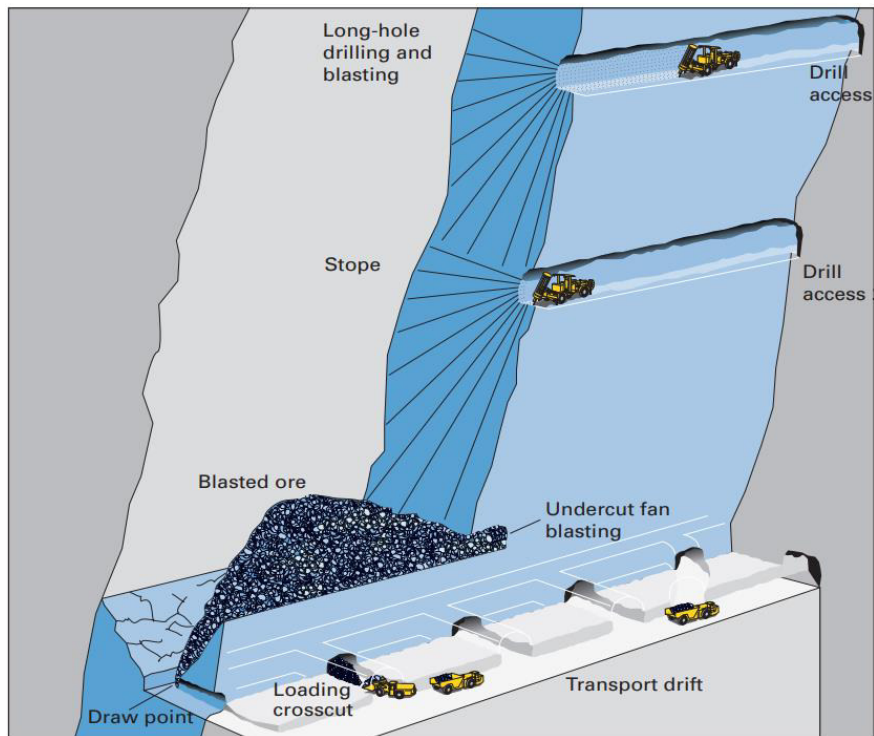
Existen dos variantes posibles del método: longitudinal y transversal (Movil, 2021): El SLS longitudinal se emplea en vetas estrechas, que no superan los 15 m de espesor, y considera realces paralelos a la dirección de la veta. Para cuerpos de mineral masivos, los realces se orientan perpendiculares (transversales) a la dirección de la veta y se dejan pilares entre cavidades. En estos casos, la recuperación de los pilares requiere algún tipo de relleno consolidado (T. Brady et al., 2005).

La configuración del método SLS en los caserones implica la detonación del mineral mediante la perforación en abanico o en paralelo. Gran parte del mineral es extraído del caserón a medida que se detona, dejando un caserón abierto (Harraz, 2014). El método SLS consiste en la extracción de mineral a través de cámaras de gran tamaño llamadas tajos, las cuales se generan mediante un proceso de perforación y voladura. Este sistema es adecuado para explotar depósitos minerales que cumplen con ciertas condiciones geológicas y estructurales (Herrera, 2020):

- Yacimientos verticales/semiverticales, con una inclinación que sobrepasa el ángulo de reposo y buzamiento muy fuerte.
- Cuerpos mineralizados de potencia media a grande, superiores a 6 metros de espesor.
- Ubicación en zonas profundas, alcanzando hasta 2000 metros.
- Condiciones de estabilidad en las paredes del tajo y en los frentes de explotación.
- Tanto el mineral como la roca encajonante deben ser mecánicamente resistentes y competentes.
- Contornos bien definidos en la mineralización.

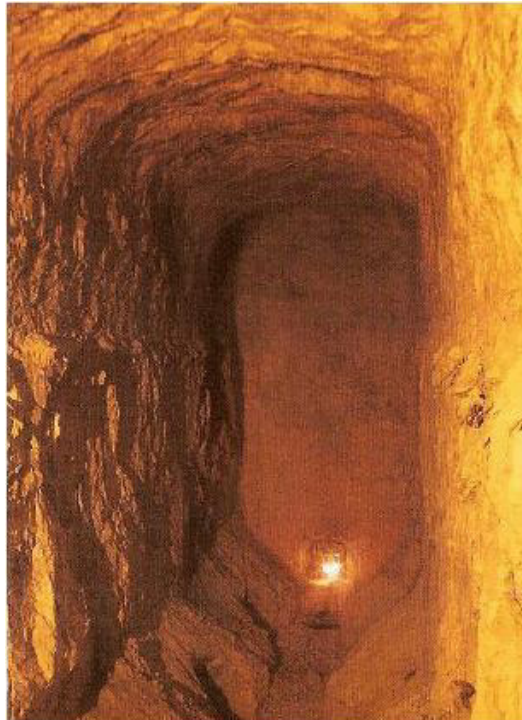
La Figura 2 muestra un esquema del desarrollo del SLS, mientras que la Figura 3 ilustra un ejemplo de un realce abierto regular en SLS.

Figura 2
Esquema del desarrollo de SLS



Fuente: Atlas Copco, 2007.

Figura 3
Ejemplo de un realce abierto regular en SLS



Fuente: Caicedo & Oliveros, 2007.

Consideraciones técnicas del método de explotación SLS

Los siguientes criterios técnicos son parte del esquema del método SLS (Toribio, 2019):

- **Resistencia del mineral:** Para la aplicación del método SLS, es fundamental que el mineral presente una resistencia moderada a alta, ya que debe mantener su estabilidad durante la perforación y voladura sin desmoronarse prematuramente. Un mineral con estas características permite una fragmentación eficiente y un mejor control en la extracción del material.
- **Resistencia de las rocas encajantes:** Las rocas que rodean el cuerpo mineralizado también deben tener una resistencia moderada a alta para evitar colapsos no controlados. Esto es crucial para garantizar la estabilidad de las cámaras y galerías que se desarrollan a diferentes niveles dentro del yacimiento. Una buena resistencia en las rocas encajantes minimiza la necesidad de sostenimiento adicional y reduce los riesgos operativos.
- **Forma del yacimiento:** Este método es más adecuado para depósitos con una forma tabular o lenticular, con un espesor que varía entre 6 y 30 metros y una extensión significativa a lo largo del yacimiento. Estas características permiten una explotación eficiente mediante la fragmentación del mineral en diferentes niveles y su posterior extracción sin comprometer la estabilidad general del depósito.
- **Inclinación del yacimiento:** El ángulo de buzamiento ideal para la aplicación del método SLS es de al menos 45°, siendo preferible un rango entre 60° y 90°. Un buzamiento más pronunciado facilita el flujo gravitacional del mineral fragmentado hacia los lugares de extracción, lo que aminora la necesidad de manipulación mecánica y optimiza la eficacia del proceso minero.
- **Uniformidad del yacimiento:** La homogeneidad en la distribución de las leyes y el espesor del mineral es un factor clave para la aplicación exitosa de este método. Una buena uniformidad permite un diseño de explotación más predecible y eficiente, reduciendo las pérdidas de mineral y garantizando una recuperación óptima del recurso.
- **Profundidad del yacimiento:** El método SLS se emplea en depósitos ubicados a profundidades moderadas, preferiblemente entre 1 y 2 km. A estas profundidades, la presión de las rocas es manejable y la estabilidad del sistema

de explotación puede mantenerse sin la necesidad de estructuras de sostenimiento excesivas. Igualmente, el uso de este método bajo estas circunstancias posibilita una relación costo-beneficio más favorable en relación con otras tácticas de la extracción subterránea

Variaciones del método SLS

En la práctica, existen tres variaciones del método SLS. La principal diferencia entre ellas radica en la forma en que se realizan la perforación y el arranque en el realce. Estas son (Oliveira, 2012):

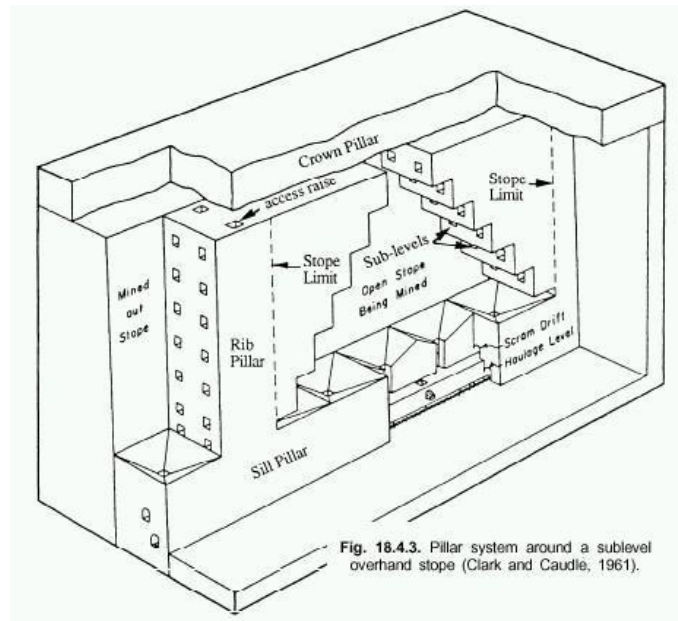
- Perforación Radial (Blasthole Method)
- Perforación de Barrenos Largos (Open-Ending Method)
- Método de Retiro por Cráter Vertical (Vertical Crater Retreat – VCR Method)

En el Blasthole Method, la perforación se realiza en un patrón radial en cada subnivel, desmontando el mineral en secciones verticales. En el Open-Ending Method, la perforación se hace de manera vertical y, al igual que en el Blasthole Method, el arranque se ejecuta en cortes verticales. En el VCR Method, la perforación es también vertical, como en el Open-Ending Method, pero las secciones desmontadas son horizontales.

Desarrollo y accesibilidad en el método SLS

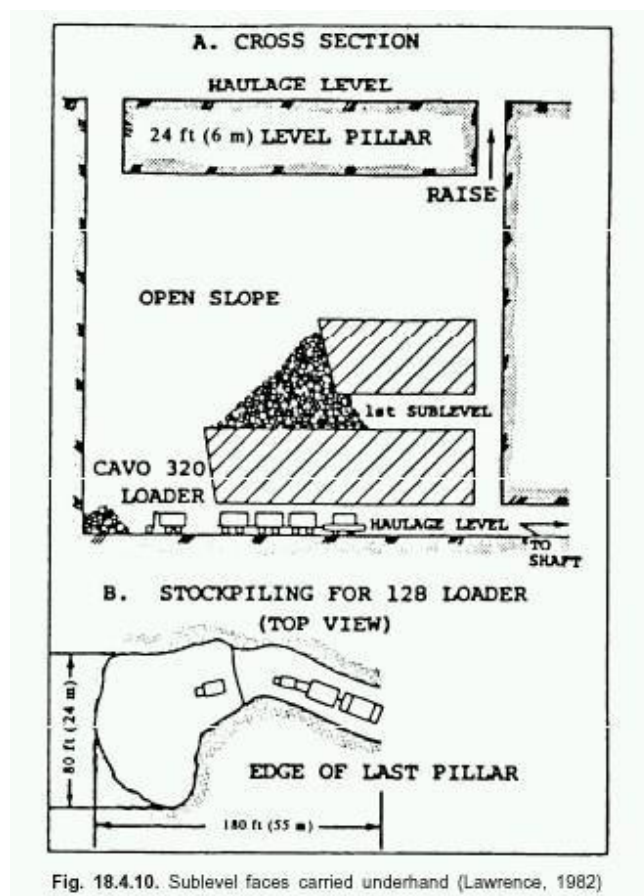
En el método SLS, la elaboración de rampas y chimeneas en el muro piso es parte del avance de la mina con el fin de que sea más fácil llegar a ella y trasladar los materiales. Se establecen rutas de transporte hacia la base de la cámara, permitiendo el traslado eficiente tanto del mineral como del material estéril. Además, se abren chimeneas ascendentes que conectan con los niveles superiores, proporcionando ventilación y facilitando la comunicación entre secciones de la mina. Dependiendo de las condiciones del yacimiento y la estrategia de explotación, el desarrollo puede realizarse mediante el método Overhand (de arriba hacia abajo) (Figura 4) o Underhand (de abajo hacia arriba) (Figura 5), asegurando una extracción eficiente y segura del mineral (Harraz, 2014).

Figura 4
Sublevel overhead



Fuente: Harraz, 2014.

Figura 5
Sublevel underhand



Fuente: Harraz, 2014.

Aplicación y productividad del SLS

El SLS es aplicable en yacimientos con rocas competentes en el techo (hanging wall) y el piso (footwall), además de contar con una mineralización estable. La resistencia a la compresión mínima requerida para aplicar este método es de aproximadamente 55 MPa. No presenta limitaciones en cuanto a profundidad y ha sido aplicado hasta los 900 m bajo la superficie. En cuerpos mineralizados con un ancho superior a 6 m, se genera una geometría adecuada para la utilización de patrones de perforación y voladura de alta producción (Oraee & Bangian, 2007).

La uniformidad y regularidad en los límites del yacimiento, la inclinación, la forma, el ancho y la distribución de la ley son condiciones esenciales para seleccionar el método SLS. Debido a esto, la minería selectiva no es posible con este método. Además, una planificación ideal es necesaria para mantener tasas de producción constantes. La recuperación inicial del mineral en un caserón o bloque pilar varía entre el 35% y el 50% (Gertsch & Bullock, 1998).

Como se mencionó anteriormente, las actividades de producción en SLS incluyen la perforación, carga de explosivos, voladura y posterior carga del mineral fragmentado en los puntos de extracción. La etapa más crítica para la tasa de producción en este método es el tipo de sistema de perforación utilizado, ya que este define el rendimiento y los resultados económicos en un período determinado.

Los dos sistemas principales de perforación en SLS con alta productividad son la perforación en anillo (ring drilling) y la perforación en paralelo (parallel drilling). En la perforación en anillo, los barrenos se perforan en un patrón radial desde el extremo de cada subnivel de producción hasta el cuerpo mineralizado. La máquina más adecuada para este tipo de perforación es una perforadora hidráulica mecanizada de anillos (Oraee & Bangian, 2007).

Los diámetros comunes de los barrenos en este sistema varían entre 48 – 64 mm, con longitudes de hasta 25 m, ya que perforaciones más largas pueden generar desviaciones y problemas de control. El rendimiento de perforación en este método es de 120 – 180 m por turno, con una producción de 1.5 – 2.5 m³ de mineral por metro perforado (Gertsch & Bullock, 1998). En cada voladura, generalmente se detonan 3 o 4 filas de barrenos, donde la separación entre barrenos varía en los extremos, pero la carga de explosivos es uniforme (Oraee & Bangian, 2007).

Ventajas y desventajas del método SLS

Hartman & Mutmanský (2002) recopilaron las ventajas y desventajas del método SLS, propuestas por otros autores:

Ventajas

- Productividad moderada a alta por turno de trabajo.
- Costo de minería moderado (relat = 0.4).
- Tasa de producción moderada a alta.
- Adecuado para la mecanización.
- Baja exposición a condiciones inseguras.
- Posibilidad de realizar operaciones unitarias simultáneamente.
- Recuperación promedio del 75% y dilución moderada (hasta un 20%).

Desventajas

- Desarrollo lento, complejo y costoso (aunque parte se realiza en el mineral).
- Método no selectivo.
- La perforación de producción a gran profundidad requiere una alineación cuidadosa (pequeñas desviaciones en los taladros).
- Grandes voladuras pueden causar vibraciones excesivas, desplazamiento de aire y daños estructurales.

El ciclo de minado

El proceso de extracción de minerales se lleva a cabo de manera continua y organizada a través del ciclo de minado, asegurando que los minerales estén listos para ser procesados de forma eficaz. Las actividades operativas se repiten de forma sistemática en este proceso cíclico con el fin de mantener la producción y maximizar el aprovechamiento de los recursos y el tiempo. La forma en que se lleva a cabo puede cambiar dependiendo del tipo de explotación que se utilice, ya sea al aire libre o bajo tierra. Consiste en el planeamiento, ejecución y monitoreo de las labores para garantizar la seguridad, la rentabilidad y la sostenibilidad en el ámbito minero (Cuba, 2023). Las fases del proceso de extracción subterránea, que resultan cruciales para el desarrollo de la exploración, se presentan a continuación y se ilustran en el ciclo de minado subterráneo (Ver figura 6).

Perforación

La perforación en minería tiene como objetivo extraer la mayor cantidad de mineral

posible mediante la colocación estratégica de explosivos, optimizando su uso para volar grandes volúmenes de roca. Se clasifica en manual, que emplea barrenos y herramientas de percusión; neumática, que utiliza aire comprimido y perforadoras convencionales; eléctrica, que opera con energía de un generador y barrenos helicoidales; e hidráulica, que destaca por su precisión y automatización. Para su correcta ejecución, es esencial considerar factores como la clase de terreno, las caras libres de la labor, el grado de fragmentación del material y el equipo de perforación. Dado que estos parámetros influyen directamente en el éxito del proyecto, la industria minera busca constantemente atenuar los gastos y optimizar la efectividad al incrementar las tasas de penetración y perfeccionar las herramientas (Cuba, 2023).

Voladura

La voladura implica la fragmentación de materiales como carbón, mena y minerales mediante el uso de explosivos, en un proceso físico-químico. En el diseño se tiene en cuenta el modelo de perforación, la elección de materiales explosivos, el intervalo de tiempo, el esquema de activación y las precauciones de seguridad. Su relevancia se encuentra en la mejora de las operaciones mineras al impactar en los gastos de producción, eficiencia y beneficios económicos. En la minería, se dividen los explosivos en diferentes categorías: altos explosivos como la dinamita, ANFO y emulsiones; bajos explosivos como la pólvora negra; explosivos especiales como los sísmicos y binarios; y sustitutos como agentes expansores y técnicas mecánicas. La forma en que se define está influenciada por diversos elementos, como la densidad, la rapidez de la detonación, la habilidad de soportar el agua y el tamaño crítico, lo cual incide en su efectividad para fragmentar y en el gasto total de la operación (Cuba, 2023).

Ventilación

En minería, la ventilación posibilita que el aire circule sin obstáculos en el área de trabajo subterránea, garantizando un entorno limpio y protegido para los mineros. Se clasifica en natural, auxiliar y principal, y se implementa mediante un circuito de aire con accesos independientes o sistemas de tuberías en minas con un solo acceso. Su importancia radica en garantizar la respiración de los operarios, disolver gases tóxicos, regular la temperatura y mejorar el confort térmico para incrementar la productividad. En las minas, el aire está compuesto por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y diversas impurezas generadas por gases o partículas. Para una adecuada instalación del sistema de ventilación, se siguen varias etapas: planeación con diseño ingenieril

y protocolos de seguridad, gestión del programa con capacitación, estudios técnicos sobre gases, temperatura y explosividad, construcción de barreras de polvo o agua, registros detallados de variables ambientales y monitoreo constante para mantener condiciones óptimas (Cuba, 2023).

Limpieza

La minería, al implicar la excavación y tratamiento de grandes volúmenes de roca y tierra, puede causar contaminación por metales pesados, afectar la productividad y generar problemas ambientales como agua ácida, suelos contaminados y pérdida de biodiversidad. Con el fin de contrarrestar estos efectos, se llevan a cabo acciones de limpieza que tienen como propósito disminuir las elevaciones y acumulaciones de material removido, reducir la erosión y restringir la interacción del agua con minerales sulfurosos que producen ácido. Además, se eliminan carreteras innecesarias para restringir el acceso de vehículos. Sin embargo, estos procesos pueden ser costosos, lo que a menudo dificulta su ejecución a pesar de las consecuencias ambientales y económicas a largo plazo (Cuba, 2023).

Transporte y acarreo

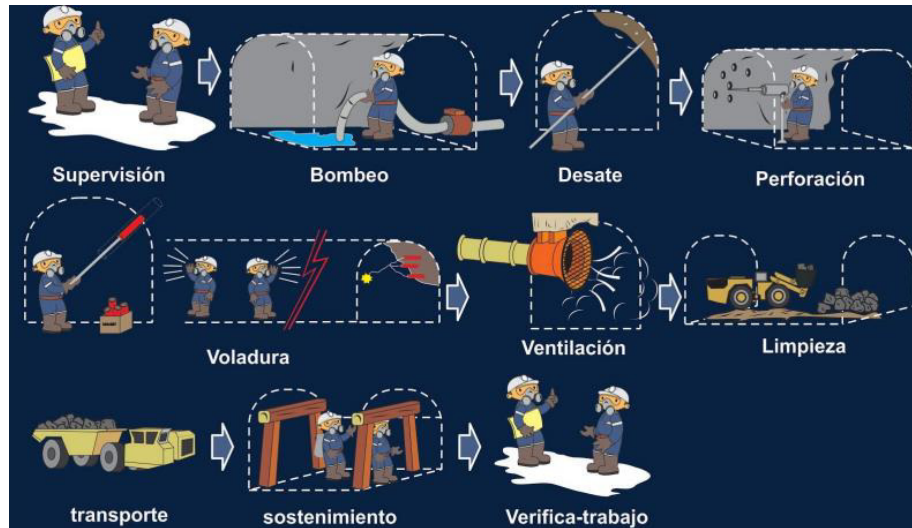
El transporte y acarreo en minería consiste en la carga y traslado del mineral hacia la planta de procesamiento, siguiendo estrictas normas de seguridad. Se requiere equipar los vehículos con faros, bocinas y frenos adecuados, ajustar rieles según especificaciones, mantener espacios mínimos de seguridad y controlar la velocidad máxima. Además, se establecen señales sonoras y visuales para coordinar los movimientos del convoy, garantizando un transporte seguro. Los sistemas de frenos y embragues deben operar eficientemente, y la velocidad de transporte depende de la profundidad del pique. En la fase de carga y descarga de la mercancía, resulta fundamental evitar movimientos no deseados a través de la edificación de conductos sólidos, recipientes correctamente planificados y revisiones periódicas para asegurar la estabilidad y protección durante la operación (Cuba, 2023).

Sostenimiento

El sostenimiento en la industria minera resulta esencial para asegurar la protección y firmeza de las zonas de excavación, previniendo caídas de material pétreo y aumentando la eficiencia en el trabajo. Se utilizan diversos métodos según la extensión de la zona afectada, como pernos de anclaje, mallas metálicas, concreto lanzado, cable bolting, cimbras metálicas, puntales, paquetes y cuadros de madera, así como el pre refuerzo del macizo rocoso. Para asegurar su efectividad, se deben

seguir controles de calidad, incluyendo la correcta instalación, cumplimiento de especificaciones, almacenamiento adecuado, certificaciones de calidad y orientación del personal. Además, es esencial implementar controles visuales e instrumentales para monitorear la estabilidad del macizo rocoso (Cuba, 2023).

Figura 6
Ciclo de minado subterráneo



Fuente: Gustavo, 2023.

Planeamiento de minado

La meta del planeamiento en minería consiste en aumentar el valor de la extracción y el manejo de los recursos, teniendo en cuenta las directrices estratégicas y las perspectivas venideras. Este proceso tiene un impacto significativo en los costos, el rendimiento y la ejecución de las operaciones, además de influir en el diseño de la unidad minera. También ha sido clave en la implementación de acciones para mitigar el avance de la pandemia y proteger a los trabajadores. La planificación de costos se organiza en dos divisiones: los costos operativos (Opex), que integran el procesamiento, la minería y los costos administrativos; y los costos de capital (Capex), que agregan el capital del proyecto, cuyo propósito es elevar la capacidad instalada y cuyo costo lo incorpora el mismo proyecto, y el capital de sostenimiento, que pretende conservar la capacidad instalada (IIMP, 2022).

La planificación minera busca lograr la óptima planificación del aprovechamiento de los recursos minerales existentes, siendo una labor flexible ante posibles modificaciones a lo largo del tiempo. La planificación minera juega una función vital en el rumbo de la operación minera tanto en la actualidad como en el porvenir. La labor minera cuenta con un proceso operativo conocido como Planificación de

Producción, cuyo éxito radica en lograr un VPN ideal que garantice la viabilidad del proyecto en desarrollo. Alcanzar ese valor puede hacer que la tarea resulte complicada y desafiante en ocasiones (Bastante et al., 2004; Hustrulid et al., 2013). Para lograr los resultados deseados en la planificación minera, existen dos enfoques para monitorear la efectividad. Una de las tácticas iniciales trata en emplear técnicas de simulación, las cuales se fundamentan en datos existentes para crear diversas hipótesis que son posteriormente analizadas y desarrolladas. El empleo de técnicas de simulación en la industria minera es crucial debido a su capacidad para disminuir gastos y tiempos en ciertas tareas, mitigar riesgos en la toma de decisiones y crear modelos simulados que reflejen fielmente la realidad. El segundo enfoque consiste en la optimización a partir de un plan predefinido o apoyándose en las simulaciones previamente efectuadas. El propósito principal es implementar las mejoras necesarias para no desviarse de los objetivos establecidos. En el tiempo presente, la exactitud en la planificación, las técnicas utilizadas para estimar recursos y planear la extracción de minerales es deficiente (Franco et al., 2012). Es importante considerar que la incertidumbre ha disminuido gracias a la creación y la implementación de regulaciones internacionales para calcular las reservas minerales, como se ve en el estándar conocido como el Código JORC (Hustrulid et al., 2013).

La planificación minera convencional calcula las reservas minerales utilizando modelos básicos que no representan de manera precisa la diversidad y la incertidumbre relacionadas. De esta manera, al perfeccionar la exactitud en la evaluación de las reservas, aumentar la extracción del mineral y planificar de forma óptima, se logrará el propósito principal de todo proyecto minero: maximizar el VPN (Lagos et al., 2011). Si se analiza los planes de minado de acuerdo con el tiempo existen 03 tipos:

Planeamiento a corto plazo

Corresponde a los ingenieros que están implicados en las operaciones cotidianas de la mina. Su propósito principal es verificar que las tareas planeadas se efectúen de modo eficaz en un marco temporal no superior a un año. Para facilitar su implementación, este planeamiento se desglosa en planes específicos de distinta periodicidad, como planes mensuales, trimestrales y un plan anual consolidado. En este nivel, se prioriza la administración eficaz de los recursos, la asignación precisa de equipos y personal, así como la adaptación a posibles contingencias operativas. De igual manera, se centra en la realización de las metas de producción fijadas,

avalando que el proceso minero opere de forma eficaz y se ajuste a las tácticas generales de la compañía (Valencia, 2019).

Planeamiento a mediano plazo

Tiene la función de adaptar y optimizar los modelos establecidos en el planeamiento de largo plazo, con el fin de convertirlos en planes de producción que permitan alcanzar las metas estratégicas de la operación. Este nivel de planificación, con un horizonte de 1 a 3 años, se enfoca en diseñar estrategias de producción sostenibles y evaluar su viabilidad técnica y económica. También brinda soporte técnico y de ingeniería para garantizar operaciones mineras seguras, eficientes y rentables, considerando la gestión de reservas, el mantenimiento preventivo y la optimización del ciclo de minado (Yana, 2014).

Planeamiento a largo plazo

Es un proceso estratégico que define la dirección general de la operación minera en un horizonte temporal de más de 3 años. Su objetivo es establecer lineamientos fundamentales para el desarrollo sostenible de la mina, asegurando su viabilidad y rentabilidad en el tiempo. Entre sus principales funciones se incluyen la planificación de la secuencia de minado, considerando el movimiento de mineral y desmonte, la determinación de leyes de corte y sus posibles variaciones, así como la identificación y gestión de los recursos necesarios para mantener las operaciones en el futuro. Además, este nivel de planificación proyecta los ingresos y gastos de la operación, proporcionando una visión integral de la sostenibilidad financiera del proyecto. También incorpora estudios de mercado, análisis de impacto ambiental y evaluación de tecnologías emergentes que puedan mejorar la eficiencia y reducir costos a largo plazo (Chura, 2017).

Recursos mineros

De acuerdo con The JORC Code (2012), un recurso minero es una acumulación de sustancia con valor económico en la superficie terrestre con perspectivas viables de extracción comercial, determinada mediante información y conocimiento geológico especializado. Para Ortiz & Emery (2004), un depósito es una acumulación de sustancias valiosas en la corteza terrestre cuya extracción futura puede ser rentable. Los recursos mineros se clasifican, a juicio de Bernabé (2021), en inferidos, indicados y medidos, en relación con el grado de confianza geológica.

Recurso minero inferido

Un recurso minero inferido es aquella parte de un recurso mineral estimada con bajo nivel de confianza, basada en evidencia geológica limitada o de calidad incierta, sin garantizar la continuidad geológica ni de ley. Se obtiene mediante afloramientos, zanjas, tajos o sondajes, y aunque no puede convertirse en reserva de mena, puede reclasificarse con exploración adicional. Cuando la estimación proviene de extrapolaciones, deben detallarse su alcance y fundamentos (Bernabé, 2021).

Recurso mineral indicado

Un recurso minero indicado es la parte de un recurso mineral cuyo tonelaje, densidad, forma, características físicas, ley y contenido se estiman con un nivel razonable de confianza. Se basa en información obtenida mediante exploración, muestreo y pruebas en ubicaciones como afloramientos, trincheras, rajos, túneles, labores y sondajes. Aunque la distribución de los puntos de muestreo no permite confirmar completamente la continuidad geológica y/o de ley, sí es suficiente para inferirla. Este recurso tiene un menor nivel de confianza que un recurso mineral medido y solo puede convertirse en una reserva probable (Bernabé, 2021).

Recurso mineral medido

Un recurso mineral medido es aquella fracción de un recurso mineral cuya cantidad, ley, densidad, morfología y propiedades físicas han sido determinadas con un alto grado de certeza. Esta precisión facilita la incorporación de factores modificadores para la planificación minera y el análisis económico del depósito. Su determinación se basa en información obtenida a través de exploraciones detalladas, muestreos representativos y ensayos confiables en distintos puntos de evaluación, como afloramientos, zanjas, perforaciones, labores subterráneas y sondeos. La continuidad geológica y la ley han sido verificadas con mayor fiabilidad en comparación con los recursos indicados o inferidos, lo que permite su posible conversión en una reserva minera probada (Bernabé, 2021).

Reservas Mineras

En concordancia con The JORC Code (2012), una reserva minera es la parte de un recurso medido o indicado cuya extracción es técnica y económicamente viable, considerando la dilución, pérdidas y estudios de factibilidad con factores modificadores. De acuerdo con lo señalado por Ortiz & Emery (2004), corresponde a la porción del recurso que puede aprovecharse económicamente, tras evaluaciones de viabilidad que consideran aspectos de extracción, metalurgia, finanzas, mercado,

medio ambiente y gobernanza. Las reservas se clasifican, conforme a Chara (2017), en probables y probadas, en línea con el nivel de confianza.

Reserva probable

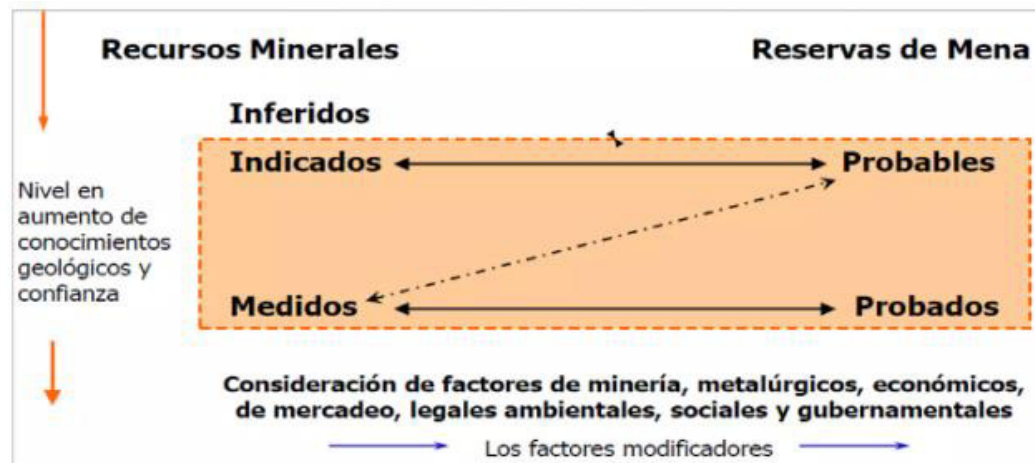
Una reserva probable es la parte del recurso mineral estimada con alto nivel de confianza a partir de exploraciones, muestreos y pruebas detalladas. Sus estimaciones provienen de un muestreo sistemático y estrechamente espaciado, asegurando la definición precisa del yacimiento y minimizando el riesgo de discontinuidad mineral. Representa la categoría de mayor certeza en la estimación de reservas, permitiendo una planificación minera precisa (Chara, 2017).

Reserva probada

La reserva probada es aquella cuyo tonelaje, ley, densidad, forma, tamaño y otras características físicas se estiman con un alto nivel de confianza, basándose en exploración detallada, muestreo y pruebas obtenidas en afloramientos, trincheras, tajos, labores subterráneas y sondajes. Sus estimaciones provienen de un muestreo sistemático y estrechamente espaciado, asegurando la definición precisa del yacimiento y minimizando el riesgo de discontinuidad mineral. Representa la categoría de mayor certeza en la estimación de reservas, permitiendo una planificación minera precisa (Chara, 2017).

La relación entre recursos y reservas mineras es clave para evaluar la viabilidad técnica y económica de un yacimiento, ya que los recursos abarcan todo el material mineralizado, explotable o no. En cambio, las reservas mineras corresponden a la fracción de los recursos que, tras estudios geológicos, técnicos y económicos, pueden ser extraídas de manera rentable y segura (Murray & Cranswick, 2024). A continuación, se detalla cómo esta clasificación influye en la planificación y sostenibilidad de los proyectos mineros, permitiendo una gestión eficiente de los recursos disponibles (Ver figura 7).

Figura 7
Relación entre recursos mineros y reservas mineras



Fuente: CODIGO JORC
 Fuente: Código de Australasia para Informar sobre Recursos Minerales y Reservas de Mena (Código JORC)

Fuente: The JORC Code, 2012.

Mineral potencial

Es la parte de un yacimiento estimada con menor confianza que un recurso inferido, basada en indicios geológicos y evidencias indirectas como controles litoestructurales o anomalías geofísicas y geoquímicas. Su delimitación puede provenir de afloramientos con valores anómalos, estructuras paralelas desarrolladas, o sondajes aislados en formaciones mineralizadas. La profundidad y dimensiones de los bloques potenciales se determinan en función de criterios geológicos, sin estimación de ley en ciertos casos, pero excluyendo materiales de baja ley o submarginales (Chara, 2017).

Riesgo

El término riesgo apunta a la posibilidad de que surja un perjuicio que impacte la vida, el bienestar o el entorno natural. Este riesgo emerge como resultado de una amenaza potencial (Agarwal, 2007).

El riesgo relacionado con una tarea se articula en dos componentes esenciales: la posibilidad de que se inicie un efecto perjudicial y la magnitud de las posibles repercusiones. En este sentido, un riesgo será mayor cuando tanto la probabilidad del evento negativo como el impacto potencial sean elevados (Ticona & Argota, 2016).

Cuando tomamos una decisión y evaluamos la relación entre los gastos y las ventajas, estamos teniendo en cuenta los riesgos asociados con esa elección y las posibles consecuencias favorables o desfavorables que pueda tener. En nuestro día a día, nos enfrentamos a la noción de riesgos, aun cuando no siempre estemos completamente conscientes de esta situación. Por lo tanto, tanto la idea de riesgo como la noción que

conlleve no son nuevas para nuestra comprensión, sino que, desde los inicios de la humanidad, el ser humano ha convivido de manera intrínseca con los riesgos y ha reaccionado de forma instintiva ante ellos (Tocabens, 2011).

Fue a partir de un momento específico en la historia de las sociedades cuando las personas empezaron a darse cuenta de la relevancia del riesgo. Con el paso del tiempo, debido al progreso tecnológico y científico, esta definición empezó a ser integrada en el campo científico, convirtiéndose en un concepto dinámico y sofisticado con repercusiones en campos como la ciencia, la economía, la sociedad y la política. Esto significa que especialistas de diferentes áreas han examinado el estudio de los distintos elementos del riesgo más allá de las consideraciones comunes (Grijalva, 2016).

El riesgo en un plan de minado

El riesgo en un plan de minado debe evaluarse desde los ámbitos de seguridad, economía y operación. En seguridad, Cuello & Lastra (2023) resaltan la necesidad de planes de gestión basados en el PMBOK® (2017) y en los controles críticos del ICMM, ante la persistencia de fatalidades en Chile pese a una reducción del 26,7 %. En el aspecto económico, Botín (2019) propone la metodología MPRM para cuantificar y mitigar riesgos, mientras Fernández (2018), identifica la inversión, el precio del cobre y los costos operativos como factores críticos que afectan el VAN y la TIR, recomendando sondajes, túneles y tecnologías innovadoras. En el plano operativo, Cerda (2016) advierte que los planes basados en variables determinísticas son limitados y recomienda el uso de simulaciones como GEM/REEM y DSim Open Pit para proyectar escenarios más realistas y evitar sobreestimaciones.

Variable aleatoria

Una variable aleatoria es una función matemática que asigna valores numéricos a los resultados de un experimento aleatorio, permitiendo su análisis mediante distribuciones de probabilidad (B. Hernández & Huerta, 2013). Su rango representa los valores posibles que puede asumir y se clasifica en continuas y discretas (Velásquez & Velásquez, 2012). Las continuas describen fenómenos con valores infinitos dentro de un intervalo, como la estatura o el peso, y se analizan mediante funciones de densidad de probabilidad (Nores, 2021); mientras que las discretas toman valores finitos o contables, como el número de caras en lanzamientos de moneda, y se estudian mediante funciones de probabilidad específicas (Población & Serna, 2015).

Distribuciones de probabilidad

Los indicadores de una variable sirven para definir, categorizar o separar a los individuos. Como tenemos nociones acerca de la regularidad de los valores de una variable, a la mayor parte de las personas no les basta con detallar, segmentar o diferenciar. En la estadística, al referirse a una variable, usualmente se hace alusión a la función de densidad de probabilidad, a la función de distribución o a la función de probabilidad (Rodríguez et al., 2013).

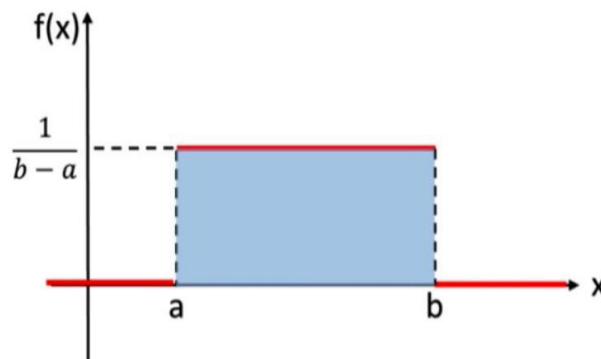
Las distribuciones de probabilidad están estrechamente relacionadas con las distribuciones de frecuencias, ya que pueden considerarse una versión idealizada de ellas. Una distribución teórica describe la probabilidad de distintos resultados y su comportamiento esperado, por lo que constituye una herramienta útil para realizar inferencias y tomar decisiones en contextos de incertidumbre (Badii et al., 2007; Badii et al., 2017).

Los propósitos de las distribuciones de probabilidad abarcan la presentación de las más comunes en determinar acciones, posibilitando elegir la más apropiada según la situación y calcular sus valores respectivos. Adicionalmente, se pretende emplear el EV como un elemento clave en la toma de decisiones bien fundamentadas. Es esencial tener en cuenta las restricciones de cada distribución para utilizarlas correctamente y prevenir malentendidos al analizar datos y modelar la incertidumbre (Badii & Castillo, 2009).

Hay muchos tipos de distribuciones de probabilidad, las más comunes son:

Distribución uniforme: Es un fundamento crucial en probabilidad y ciencias estadísticas, según el cual todos los datos que se encuentran dentro de un período específico tienen igual posibilidad de presentarse. En una asignación equitativa, todos los valores en el rango especificado tienen la misma posibilidad de aparecer. La utilidad de las distribuciones uniformes se destaca en diversos ámbitos como el análisis de datos, la realización de simulaciones y la creación de modelos estadísticos. Existen dos categorías principales: la distribución uniforme discreta y la distribución uniforme continua, las cuales se utilizan en distintos contextos dependiendo de la naturaleza de la información (Walpole et al., 1998).

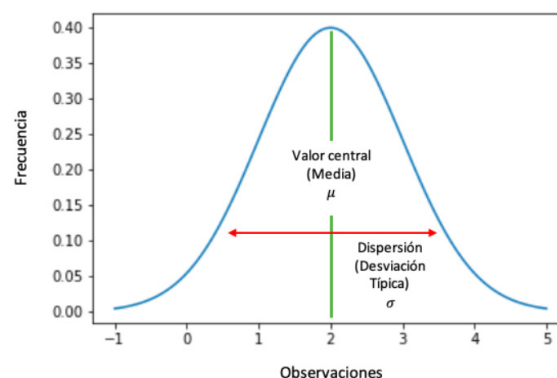
Figura 8
Distribución uniforme



Fuente: Lifeder, n.d.

Distribución normal o Gaussiana: La distribución gaussiana, popularmente llamada campana de Gauss, se destaca por su simetría en relación a la media y su rápido decrecimiento hacia cero en ambas direcciones. Esto indica que es muy poco probable que se observen valores extremadamente altos o extremadamente bajos en comparación con la media. Si las alturas de una población se repartida de este modo, es prácticamente imposible encontrar a alguien cuya estatura sea el doble del promedio (Ver figura 9) (Fontanelli et al., 2020).

Figura 9
Distribución normal

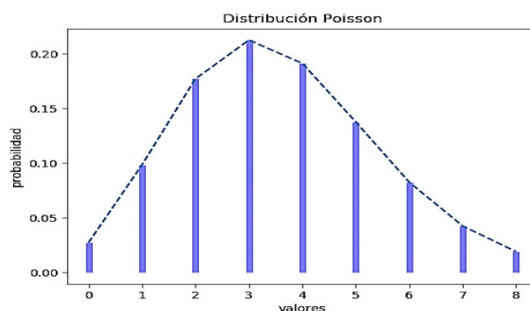


Fuente: Rodó, 2019.

Distribución de Poisson: Es un modelo matemático que caracteriza la cantidad de sucesos que tienen lugar en un lapso concreto, siempre y cuando estos sucesos sean independientes y ocurran a una tasa constante. Su función principal es explicar situaciones en las que los eventos ocurren de manera poco frecuente o intermitente, como la aparición de clientes en un negocio, fallos en una cadena de producción o llamadas en un centro de atención telefónica. Esta distribución se define por un único

parámetro, λ , el cual indica el promedio de sucesos en el periodo analizado (Ver figura 10) (Arroyo et al., 2014).

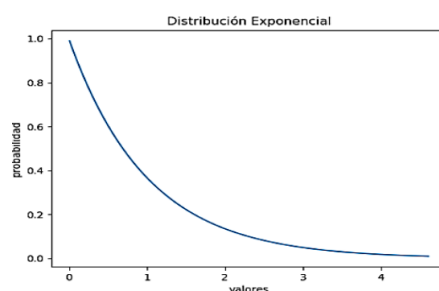
Figura 10
Distribución Poisson



Fuente: Pérez et al., 2019.

Distribución exponencial: Consiste de una distribución de probabilidad continua que representa el lapso de tiempo entre la aparición de sucesos en un proceso de Poisson, en lo que los eventos que surgen de manera autónoma y a una velocidad constante. Es frecuente emplearlo para indicar la extensión de sucesos como la vida útil de un artículo, el intervalo entre arribos en un sistema de filas o el lapso de espera entre averías en maquinarias. La densidad de probabilidad está determinada por un parámetro λ , el cual indica la velocidad promedio de eventos que suceden (Ver figura 11) (Arroyo et al., 2014).

Figura 11
Distribución Exponencial

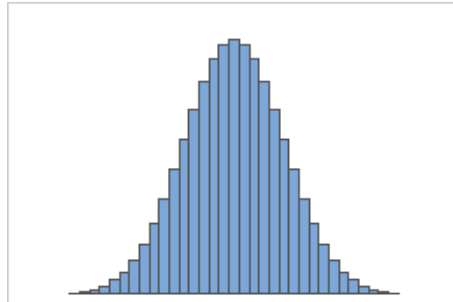


Fuente: Pérez et al., 2019.

Distribución binomial: Se trata de una distribución discreta de probabilidad que detalla la cantidad de logros en una cantidad determinada de pruebas independientes, en las cuales cada prueba tiene únicamente dos desenlaces posibles: éxito o fracaso. En cada ocasión, la posibilidad de lograrlo es la misma, representada por la letra p , y se utiliza el coeficiente binomial para determinar la probabilidad. Se utiliza en escenarios como la cantidad de artículos con fallas en un grupo, la cantidad de

respuestas acertadas en una prueba de selección múltiple o el desenlace de lanzamientos de una moneda (Ver figura 12) (Nova et al., 2023).

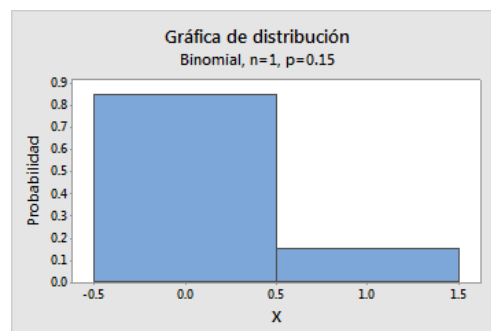
Figura 12
Distribución Binomial



Fuente: Soporte de Minitab® 21, n.d.

Distribución de Bernoulli: Es un concepto fundamental en estadística. Se trata de una situación particular dentro de la distribución binomial, donde se lleva a cabo una sola prueba con dos posibles desenlaces: logro (con una probabilidad p) o fallo (con una probabilidad de $1-p$). Se considera la distribución más elemental para representar sucesos binarios y se emplea en situaciones como el encendido de un aparato, la identificación de errores en un sistema o la contestación de un individuo en una encuesta de afirmativo o negativo (Ver figura 13) (Díaz, 2024).

Figura 13
Distribución Bernoulli

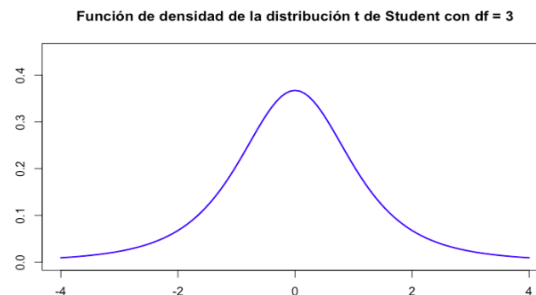


Fuente: Soporte de Minitab® 21, n.d.

Distribución de probabilidad t: Es una distribución de probabilidad continua que se usa, mayormente, para efectuar pruebas de hipótesis y fijar intervalos de confianza en casos donde la variabilidad poblacional está indeterminada y el tamaño de la muestra es reducido. Se asemeja a la distribución normal, sin embargo, sus colas son más extensas, lo que amplía el nivel de incertidumbre. Se utiliza principalmente en investigaciones estadísticas para contrastar promedios de muestras reducidas, como

en ensayos clínicos o evaluaciones de calidad de productos (Ver figura 14) (Turcios, 2015).

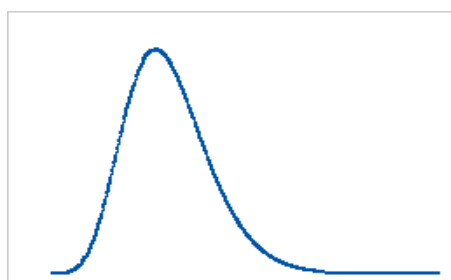
Figura 14
Distribución t de Student



Fuente: López, 2019.

Distribución de probabilidad chi-cuadrado: Es una distribución de probabilidad continua que se aprovecha sobre todo en análisis de independencia y bondad de ajuste, en el área estadística. Se describe como la adición de los cuadrados de variables aleatorias que son independientes y siguen una distribución normal estándar. Resulta imprescindible en pruebas de hipótesis como el test de chi-cuadrado en tablas de contingencia, el análisis de la varianza y la medición de la variabilidad en muestras. Su simetría es variable y su configuración está determinada por la cantidad de grados de libertad disponibles (Ver figura 15) (Saldaña, 2011).

Figura 15
Distribución Chi cuadrado



Fuente: Soporte de Minitab® 20, n.d.

Estas son las principales distribuciones de probabilidad, cada distribución tiene sus propios supuestos y limitaciones, es de suma importancia seleccionar la distribución adecuada analizando los datos históricos para caracterizar con exactitud la conducta de los datos.

Simulación Montecarlo (SMC)

La SMC crea un modelo matemático que emula el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo, permitiendo su análisis mediante experimentación controlada. Su nombre proviene del muestreo aleatorio empleado en los juegos de ruleta de Montecarlo (Azofeifa, 2004). La técnica de Montecarlo simula el comportamiento de una variable mediante números aleatorios. Su aplicación efectiva requiere datos históricos que reflejen su dinámica y relación con otras variables (Jacobs & Chase, 2014).

Los modelos de SMC analizan el funcionamiento de un sistema en el tiempo, considerando la influencia de cada período en el siguiente (Azofeifa, 2004). Al emular el comportamiento de una variable, permiten estimar ventas futuras, evaluar probabilidades de ganancia o identificar factores con mayor impacto en los resultados (J. Vergara, 2005).

La SMC se presenta como una herramienta que ofrece soluciones estimadas para una amplia gama de desafíos matemáticos, permitiendo la ejecución de experimentos que involucran la generación de números pseudoaleatorios en un ordenador. Este enfoque es adecuado para abordar una diversidad de problemas, independientemente de si son de naturaleza estocástica o determinista (Velásquez & Velásquez, 2012). Por otra parte, la SMC tiene amplias aplicaciones en campos como la ingeniería, biología, telecomunicaciones y finanzas, donde se utiliza para la gestión de proyectos, valoración de empresas, evaluación de inversiones y análisis de escenarios financieros. Asimismo, apoya decisiones estratégicas como el lanzamiento de productos, la optimización de inventarios y la estimación de tiempos de espera en servicios (Salazar & Alzate, 2018).

El proceso de simulación capacita para la generación de distribuciones de probabilidad relacionadas con una amplia gama de indicadores financieros. Esto habilita la realización de análisis que incorporan factores de riesgo en diversos aspectos de una empresa, permitiendo, en esencia, la transición del análisis financiero tradicional, que se basa en suposiciones determinísticas, a un entorno caracterizado por la incertidumbre. En virtud de esto, varios académicos sostienen que la SMC se convierte en un recurso valioso para el manejo de riesgos en las entidades (Medina & Restrepo, 2013).

La SMC permite identificar qué variables independientes influyen más en la variable dependiente, facilitando el control de factores clave para alinear resultados con los

objetivos organizacionales. Además, genera múltiples escenarios, requiriendo un análisis complementario con datos cuantitativos y cualitativos para precisar proyecciones futuras (Salazar & Alzate, 2018). A diferencia de la programación lineal o el diagnóstico de decisiones, no busca soluciones óptimas, sino que evalúa alternativas y compara sus resultados para medir el desempeño de sistemas definidos (Azofeifa, 2004).

Etapas

Las fases clave en la puesta en marcha de la SMC comprenden los siguientes pasos (Nielsen, 2016):

- Iniciar la planificación del proyecto, donde se selecciona la variable estocástica a analizar. En el contexto de este documento, nos enfocaremos en evaluar el progreso diario lineal, el cual tendrá un efecto directo en el lapso total del plan.
- Crear un valor de variabilidad extrema, distribuido de manera uniforme en el rango de 0 a 1.
- Vincular este valor extremadamente aleatorio a los atributos del modelo (como el rendimiento) mediante las funciones de distribución acumulativa correspondientes a estos atributos.
- Realizar múltiples repeticiones en un volumen sustancial para obtener una distribución de resultados confiable.

Ventajas

La principal fortaleza de este enfoque radica en que no produce un único valor como resultado, sino que genera una distribución de probabilidades que abarca diversos niveles de confianza. Esta característica brinda la capacidad de tomar decisiones informadas en relación con las posibles contingencias del proyecto. Otro beneficio significativo, que distingue este método de PERT, es su capacidad para explorar múltiples escenarios. La SMC puede evaluar varias rutas críticas potenciales para determinar la duración de un proyecto, lo que implica que la ruta crítica específica depende del escenario seleccionado, considerando las duraciones individuales de todas las actividades en el programa (Nielsen, 2016).

Desventajas

Un inconveniente fundamental de esta técnica radica en los requisitos concernientes a la cantidad y la excelencia de la información requerida para ejecutar el modelo. Se demanda una abundante cantidad de datos para llevar a cabo una simulación de calidad aceptable, y con frecuencia, estos datos no están disponibles o no se

encuentran accesibles. En muchos casos, se controlan variables diferentes en proyectos de construcción en comparación con las que se analizan en los estudios de simulación (Nielsen, 2016).

Otro aspecto desfavorable en comparación con las técnicas convencionales es el tiempo necesario para obtener los resultados. Mientras que los métodos determinísticos siguen un camino relativamente directo, la SMC involucra varias etapas antes de arrojar resultados definitivos. Dado que los plazos suelen ser limitados en los estudios de proyectos, es común descartar enfoques que, aunque proporcionan información valiosa, demandan más tiempo para su ejecución (Nielsen, 2016).

Beneficios de la simulación

En relación con las ideas de Azofeifa (2004), son los siguientes:

- Los modelos de simulación destacan por su capacidad de comprensión simplificada en comparación con numerosos modelos analíticos.
- A través de la simulación en un entorno informático, se adquiere una "experiencia" económica sin enfrentar riesgos genuinos. Además, los resultados se obtienen de manera expedita.
- Estos modelos de simulación permiten el análisis de sistemas altamente complicados, un alcance inalcanzable para los enfoques analíticos convencionales.

Software Crystal Ball

Oracle Crystal Ball es una herramienta de software desarrollada por Oracle Corporation que se utiliza para realizar análisis de riesgos y SMC en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Sus características principales incluyen (León et al., 2004):

- SMC: Crystal Ball utiliza la SMC para examinar cómo la variabilidad y la incertidumbre pueden afectar los descubrimientos de modelos de negocio. Permite a los usuarios realizar múltiples simulaciones para comprender mejor cómo diferentes variables pueden influir en los resultados, lo que es especialmente útil para evaluar el impacto de la incertidumbre en las decisiones comerciales.
- Análisis de sensibilidad: Esta cualidad faculta que los usuarios realicen evaluaciones de sensibilidad con el fin de establecer las variables que influyen más en los logros. Esto ayuda a centrarse en las áreas críticas de un modelo y

a comprender cómo cambios en ciertas variables pueden afectar a los resultados finales.

- Optimización de decisiones: Crystal Ball ofrece herramientas de optimización que ayudan a los usuarios a tomar decisiones informadas en situaciones de incertidumbre. Estas herramientas permiten encontrar las mejores decisiones, ya sea maximizando o minimizando ciertas métricas de interés, lo que es sustancial en la elección de opciones empresariales.
- Integración con Microsoft Excel: Una de las principales ventajas de Crystal Ball es su integración con Microsoft Excel, que permite construir y analizar modelos en un entorno conocido, facilitando el uso de herramientas de simulación y análisis dentro de las hojas de cálculo habituales.

En diversos sectores, como finanzas, ingeniería, gestión de proyectos y logística, Crystal Ball es una herramienta fundamental para analizar y controlar riesgos en la determinación de acciones corporativas. Es aplicado en una extensa variedad de sectores industriales. Con esta herramienta, las empresas pueden tomar decisiones más acertadas y potenciar la administración de riesgos al brindar un mayor entendimiento sobre cómo la incertidumbre puede impactar en los resultados empresariales (León et al., 2004).

2.3. Definición de términos

Simulación Montecarlo

Es un sistema probabilístico que permite simular contextos y examinar la indeterminación a través de la creación de diversas simulaciones o iteraciones aleatorias, apoyándose en distribuciones de probabilidad. Su fin es prever resultados y elegir alternativas basadas en información (Avlijaš, 2019).

Plan de minado

Es un programa estructurado que define las etapas de extracción de recursos minerales de una mina, especificando tiempos, volúmenes de producción, recursos asignados y métodos de operación (Blom et al., 2018).

Distribución de probabilidad

Es una función que especifica la forma en que se reparten los logros potenciales de una variable aleatoria, como la distribución normal o la triangular, que se usan en simulaciones para ilustrar la variabilidad de los parámetros (Glickman & Xu, 2009).

Probabilidad de cumplimiento

Es la medida cuantitativa de la certeza de lograr un objetivo específico, como alcanzar la producción planeada en un periodo determinado, bajo condiciones de incertidumbre (Leroy & Froelich, 2010).

Variables aleatorias

Son elementos clave que pueden asumir diferentes valores en una SMC, como el volumen de extracción, productividad de equipos, costos o condiciones geológicas (Zhang, 2020).

Iteraciones

Representan la cantidad de repeticiones o ejecuciones del modelo de simulación. A mayor número de iteraciones, mayor será la precisión del análisis probabilístico (Avlijaš, 2019).

Parámetros de entrada

Son los valores iniciales o condiciones que alimentan el modelo de simulación, como tiempo de extracción, capacidad de equipos y costos, los cuales varían aleatoriamente según su distribución de probabilidad (Edimu et al., 2011).

Análisis de sensibilidad

Se trata del método de analizar cómo las modificaciones en las variables de entrada influyen en los resultados del modelo, reconociendo las variables esenciales que impactan la ejecución del plan (Grznár et al., 2024).

Escenarios de incertidumbre

Son proyecciones posibles que contemplan diferentes combinaciones de condiciones operativas, geológicas o económicas, las cuales permiten analizar el comportamiento del plan de minado en situaciones variables (Sabour et al., 2008).

Riesgo

Es la certeza de que suceda un hecho no deseado, como retrasos en la producción, costos excedentes o incumplimiento de objetivos. La SMC ayuda a identificar y cuantificar estos riesgos (Inquilla-Mamani & Rodríguez-Limachi, 2019).

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Las hipótesis

Hipótesis general

La incorporación de modelos probabilísticos y la simulación Montecarlo en la formulación de un plan minero permitirá no solo evaluar la probabilidad de éxito en la ejecución del plan de explotación, sino también identificar las variables clave que influyen en su desarrollo.

3.2. Las variables

Variable Independiente:

Simulación Montecarlo.

Variable dependiente:

Probabilidad de cumplimiento de un plan de minado

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 1*Operacionalización de variables*

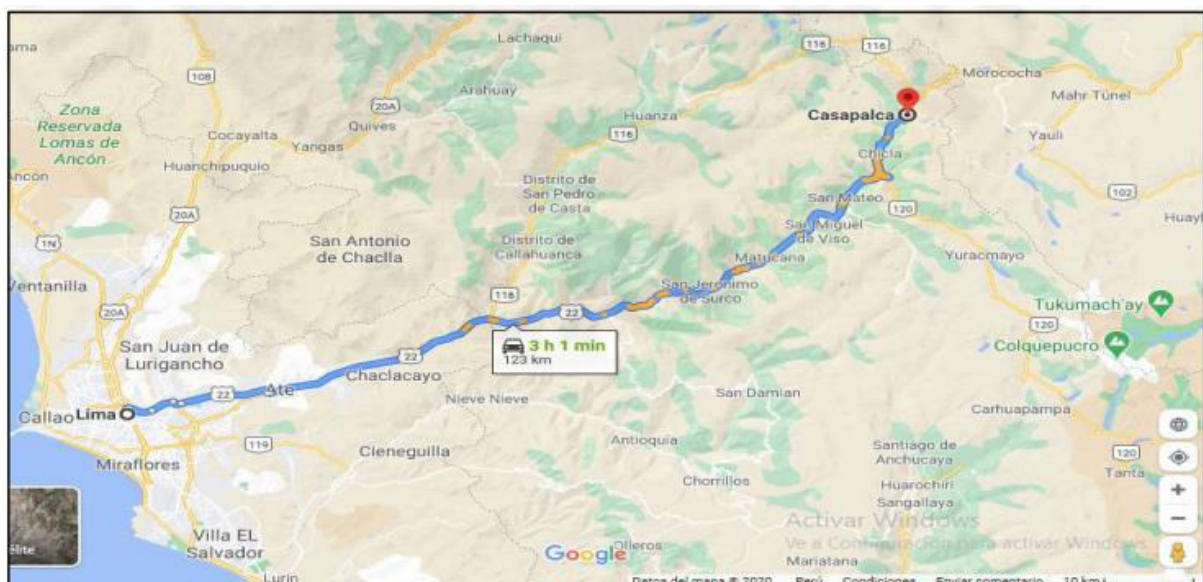
Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Simulación Montecarlo	Se define operacionalmente como una técnica que asigna probabilidades a variables de entrada para evaluar estrategias mineras. Sus dimensiones son método, que implica la simulación de escenarios; probabilidad, enfocada en el análisis de riesgos, y validación, basada en la comparación con datos reales.	Método	Simulación de escenarios
		Probabilidad	Análisis de riesgos
		Validación	Comparación con datos reales
Plan de minado	Se define operacionalmente como el proceso que optimiza la extracción minera considerando factores clave. Sus dimensiones son riesgo, que identifica posibles fallos; variables clave, que evalúa factores críticos, y planes de acción, que establece medidas de contingencia.	Riesgo	Identificación de fallos
		Variables Clave	Factores críticos
		Planes de Acción	Medidas de contingencia

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El trabajo investigativo se centró en el procedimiento de extracción de minerales en yacimientos subterráneos realizado por la compañía Los Quenuales, dentro del distrito de Chicla, en la provincia de Huarochirí, perteneciente al departamento de Lima. Esta zona se localiza a una altitud significativa de 4,250 msnm, en la región oriental de la urbe limeña, dentro de la cordillera Central, la cual forma parte de la cadena montañosa de los Andes en la sierra central. La distancia aproximada desde la capital hasta este punto es de 120 kilómetros, y el acceso principal se realiza por la carretera central, con un tiempo estimado de viaje de tres horas. La topografía del área se caracteriza por su relieve montañoso con elevaciones considerables, lo que genera un clima predominantemente frío y seco. La vegetación circundante resulta insuficiente, mientras que las precipitaciones se producen con más frecuencia entre los meses de noviembre y abril. Se ilustra en la figura 16 la posición y el acceso a la organización minera.

Figura 16
Ubicación y accesibilidad a la empresa minera



Aspecto geológico de la empresa minera

La ubicación del depósito se sitúa geográficamente en estratos superficiales conformados por rocas andesíticas de la formación Carlos Francisco, así como areniscas calcáreas pertenecientes a la formación Casapalca, que se caracteriza por

presentar capas de rocas rojas. En este espacio geográfico, se identifican formaciones mineralizadas en la configuración de vetas y masas, que se ven afectadas por dos sistemas dominantes de orientación, uno que se extiende en dirección Norte-Este y otro que se desplaza en sentido Este-Oeste, con ciertas alteraciones en la orientación Norte-Sur. La formación de estos minerales tuvo lugar en el periodo geológico terciario debido a la actividad hidrotermal con una presencia baja de sulfuros. Esta serie de eventos dio lugar a la creación de múltiples estructuras que posteriormente fueron llenadas y sustituidas por minerales con contenido de sulfuro (Acuña & Torres, 2021).

Estratigrafía

La estratigrafía se compone principalmente de areniscas, lutitas, calizas (conocidas como capas rojas), brechas y flujos volcánicos, extendiéndose a lo largo de una distancia que supera los 5000 metros (Acuña & Torres, 2021) (Ver figura 17).

- **Cretáceo**

De acuerdo con el análisis realizado por Farfán en 2015, se señala que el Grupo Machay no ha sido objeto de un estudio exhaustivo en la región circundante a Casapalca. No obstante, se ha observado que lo que destaca en dicha área son las calizas y las modificaciones que han experimentado, especialmente en la sección I (Acuña & Torres, 2021).

- **Terciario**

La Formación Casapalca, que engloba la estratificación más antigua presente en este sector, se encuentra representada en la zona. La aparición del anticlinal Casapalca, localizado en la dirección del río Rímac, jugó un rol crucial en la formación de las rocas sedimentarias, sobre todo, las calizas. Este proceso representó el inicio del desarrollo de múltiples estructuras geológicas. Se hace referencia a las "Capas Rojas", que se definen por la existencia de lutitas y areniscas calcáreas, lo que les otorga su característico matiz rojo, el cual se presenta de forma ocasional en el presente (Acuña & Torres, 2021).

Miembro Yauliyacu: El tufo de Yauliyacu se distingue por su relación con las formaciones volcánicas de Carlos Francisco en una secuencia coherente. Este estrato, de tonalidad rojiza, tiene su origen en procesos volcánicos (Acuña & Torres, 2021).

Rocas intrusivas

En cuanto a las rocas intrusivas, su importancia es de menor relevancia en esta investigación, dado que el enfoque principal se encuentra en las capas cercanas a la superficie (Acuña & Torres, 2021).

Geología estructural

De acuerdo con el mapeo geomecánico del nivel inferior del tajo 1017, se pueden identificar dos conjuntos de fallas con una duración limitada y un marcado ángulo de inclinación. De manera similar, se pueden apreciar dos conjuntos de diaclasas con un fuerte ángulo de inclinación y una extensión limitada, que no supera los 2 metros. No obstante, en lo que respecta a la sección superior, no se cuenta con datos significativos disponibles. Se prevé que la generación de bloques de tamaño medio, con dimensiones inferiores a 1 metro cúbico, posiblemente tenga lugar en la parte superior, lo que podría conllevar a una expansión excesiva del espacio excavado (Ver figura 18).

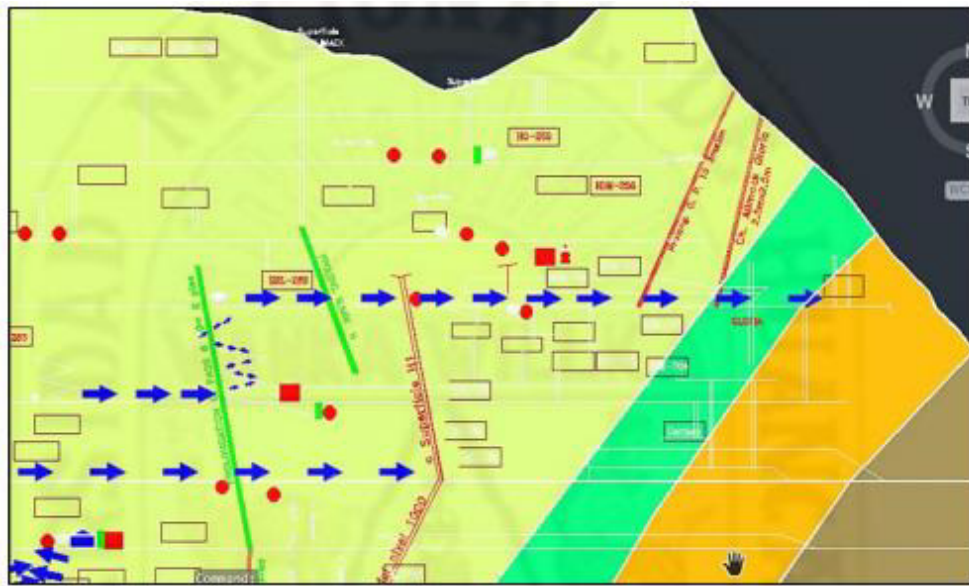
Figura 17

Estratigrafía de la empresa minera

ERA	Sistema	Etapa	Formación	MIEMBRO	POTENCIA (m)	GRÁFICO	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO		Flujo glacial		N.D.		Material acumulado por ríos y quebradas, erosionados de los depósitos glaciares.
			Glacial		N.D.		Morenas antiguas.
	TERCIARIO	Superior	Mt. Pico Negro		1000		Derrames andesíticos y basálticos intercalados con flujos de brechas y andesitas tobáceas.
			F. Río Blanco		600		Derrames andesíticos y riolíticos, flujos de brecha.
		Medio	F. Belavista		300		Tobas, areniscas tobáceas, aglomerados, brechas tobáceas, ocasionalmente tobas andesíticas.
							Calizas margosas y silicificadas, tobas finas, lutitas y limolitas.
		Inferior	F. Carlos Francisco	Yauliyacu	400 a 900		Tobas con intercalaciones de toba lapílicas, ocasionalmente capas de andesita, limolitas y areniscas tobáceas.
				Carlos Francisco	400 a 1000		Derrames andesíticos porfiríticos, intercalados con flujos de brecha volcánica y pórfidos.
				Tablachaca	400 a 700		Conglomerados, gravas y cantos, intercalados con tobas, brechas tobáceas, aglomerados y rocas porfiríticas.
			F. Casapalca	Carmen	100 a 250		Conglomerado cuarcítico, algo calcáreo en matriz arena limosa, ocasionalmente capas de arenisca y limolitas rojas.
				Capas Rojas	1300		Intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas rojas, alternadas ocasionalmente con areniscas calcáreas y areniscas guajaráneas.
MESOZOICO	CRETACEO	Superior	F. Jumash		250		Calizas estratificadas en capas medianas a gruesas, alternadas con horizontes de margas y lutitas.

Fuente: Acuña & Torres, 2021.

Figura 18
Geología Estructural Zona Alta



Fuente: Acuña & Torres, 2021.

Geología local

Las vetas se encuentran ubicadas en áreas específicas dentro de las formaciones volcánicas andesíticas de Carlos Francisco y las areniscas calcáreas de la formación Casapalca, también conocidas como capas rojas. Estas áreas albergan estructuras mineralizadas que se presentan en forma de vetas (Acuña & Torres, 2021).

Estructuras mineralizadas

La empresa minera experimenta una mineralización que se origina debido a (Acuña & Torres, 2021):

- 1.- Vetas: Originadas por la acumulación de minerales en grietas previamente existentes, con una extensión máxima que abarca un total de 5 kilómetros, de los cuales 4 kilómetros han sido objeto de exploración.
- 2.- Cuerpos: Se manifiestan en diversas configuraciones:
 - Stockworks.
 - Vetillas y diseminaciones laterales a la estratificación.
 - Sulfuros masivos presentes en conglomerados.

Alteración

El cambio más notable es la alteración hidrotermal, mostrada en las rocas que exhiben fisuras, a través de las cuales se generan las vetas (Acuña & Torres, 2021).

Modelo geológico

La sección alta de la veta conocida como 742_M - Tj_753, parte de la sección I, está vinculada al miembro Carlos Francisco (Ver figura 19) (Acuña & Torres, 2021):

Figura 19

Veta 742_M - Tj_753



Fuente: Acuña & Torres, 2021.

El propósito de este plan minero es continuar con las operaciones de extracción en las áreas concesionadas de Casapalca 6 y Casapalca 8, con una meta de producción anual de 1,500,000 toneladas métricas. Se espera alcanzar un promedio de leyes de contenido de Zinc (Zn) del 2.20%, Plomo (Pb) del 0.89%, Cobre (Cu) del 0.19% y Plata (Ag) de 2.68 onzas por tonelada (Acuña & Torres, 2021).

En la operación actual, se ha implementado la explotación totalmente mecanizada y se están utilizando subniveles tanto en los estratos inferiores como superiores, tanto en cuerpos minerales como en vetas. Se está considerando el uso del método de explotación por subniveles, pero es esencial evaluar con gran atención el pilar corona, debido a su proximidad a la superficie, ya que podría dar lugar a hundimientos. Además, se debe considerar el pilar de buzamiento que quedaría entre la zona minada anteriormente y la zona actualmente planificada para la extracción (Acuña & Torres, 2021).

Método de explotación en la empresa minera

Se recurre al método de SLS, la cual se fundamenta en los principios de diseño y perforación de bancos, con la finalidad de crear compartimentos en niveles inferiores y superiores que garanticen una estabilidad apropiada. . Estos compartimentos tienen alturas que oscilan entre 30 y 50 metros. Se pueden categorizar en dos grupos: el diseño de perforaciones en configuración radial y el diseño de perforaciones en

disposición paralela, también conocido como "Long-Blast-Hole" (Acuña & Torres, 2021).

Método taladros abanicos – Sub Level Cuerpos

Para llevar a cabo esta planificación minera, es esencial disponer de áreas dispersas donde la distancia entre los puntos de perforación varía a 15 metros o más. En los subniveles de perforación, la separación típica es de alrededor de 30 metros, y en esta área se llevan a cabo perforaciones en configuración radial, tanto en dirección positiva como negativa (Acuña & Torres, 2021). Este proceso es representado en el Esquema SLS semimecanizado (Ver figura 20), permitiendo una explotación eficiente y segura del yacimiento.

Figura 20

Esquema Sub Level Stopping semimecanizado



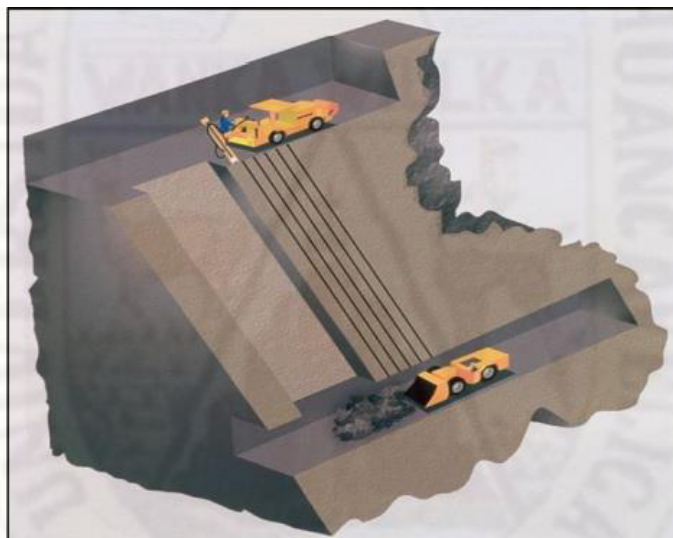
Fuente: Acuña & Torres, 2021.

Método taladros paralelos – Sub Level Vetos

Este enfoque se emplea en las secciones de vetas que tienen un espesor que varía desde menos de 1.50 metros hasta 3 metros, y requiere la excavación de cámaras con dimensiones de 3 metros por 3 metros. La distancia vertical entre un subnivel y otro es de 15.0 metros. Para iniciar la excavación en un nivel inicial y luego continuar en el nivel siguiente en paralelo, se emplean estructuras conocidas como "Chimeneas" o "slots" como espacios abiertos desde donde se inician las perforaciones. Este proceso es representado en el esquema SLS variante Long-Blast-Hole (LBH) (Ver figura 21), facilitando una extracción eficiente del mineral. (Acuña & Torres, 2021).

Figura 21

Esquema Sub Level Stopping variante Long-Blast-Hole (LBH)



Fuente: Acuña & Torres, 2021.

4.2. Diseño de investigación

Se adoptó un diseño no experimental de corte transversal, fundamentado en la esencia intrínseca de la indagación, ya que no implica manipulación de variables ni seguimiento a lo largo del tiempo. Se evaluaron dos escenarios en un momento específico: uno con variables determinísticas y otro con variables probabilísticas, con el objetivo de analizar la probabilidad de cumplimiento del plan de minado. Al no introducir cambios ni tratamientos en las variables, este diseño resulta adecuado para los fines del estudio. Conforme con Hernández et al. (2014) este diseño se distinguen por no intervenir intencionalmente en las variables, centrándose en la inspección directa de los sucesos en su contexto natural, con el objetivo de su análisis subsiguiente. Por otra parte, los estudios transversales consisten en la evaluación de personas en un momento específico. Por ende, el objetivo principal de estos estudios consiste en realizar un detallado examen de los factores y determinar de qué manera se afectan y relacionan entre ellos en un momento específico (Dagnino, 2014).

4.3. Población y Muestra

Población

La población se compuso de los registros correspondientes a varias variables clave para el tajo TJ_1017 durante la semana 50 de la minera Yauliyacu, que incluyen el tiempo de ciclo promedio (min), la flota de carguío y acarreo disponible (Tn/cuchara promedio), las leyes promedio (Oz Ag/tn), la disponibilidad mecánica promedio (%), las horas efectivas por guardia (h), las recuperaciones metalúrgicas por tajo (%) y la

utilización mecánica (%). Estas variables fueron recolectadas con el fin de evaluar la eficiencia y la productividad operativa del tajo en dicho periodo.

Muestra y muestreo

La muestra estuvo compuesta por el 100% del universo de estudio, es decir, por todos los elementos de la población, dado que se eligió el método no probabilístico por conveniencia para delimitarla. Tal como indica Otzen & Manterola (2017), en esta forma de muestreo, la elección de los sujetos no se apoya en la aleatoriedad, sino en las especificidades de la investigación y la comprensión del investigador, que toma en cuenta las demandas detectadas de manera directa.

4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información.

Procedimiento

FASE 1: Recopilación de datos

En la primera fase, se puso en práctica la recopilación de valores esenciales para respaldar el proceso de SMC aplicado a la cuantificación de la posibilidad de acatamiento del plan de minado en el tajo TJ_1017 durante la semana 50 en la minera Yauliyacu. Se identificaron variables clave que influyen en la planificación minera, incluyendo el tiempo de ciclo promedio (min), la flota de carguío y acarreo disponible (Tn/cuchara promedio), las leyes promedio (Oz Ag/tn), la disponibilidad mecánica promedio (%), las horas efectivas por guardia (h), las recuperaciones metalúrgicas por tajo (%) y la utilización mecánica (%). La toma de estos datos se realizó mediante fichas de registro específicas para cada variable, garantizando su trazabilidad y precisión. Posteriormente, se efectuó una revisión detallada de registros históricos y fuentes internas de la empresa para documentar los datos de manera sistemática, registrando la fecha de obtención, las fuentes de origen y otros detalles relevantes para su análisis y aplicación en la simulación.

FASE 2: Generación de bases de datos

Se realizó la elaboración de bases de datos basándose en las fuentes históricas recolectada durante la fase precedente. Cada banco de datos se diseñó de manera específica, centrándose en una variable particular y estructurándola de manera compatible con la metodología de la SMC.

FASE 3: Tratamiento estadístico

Implicó un análisis exploratorio de los datos recopilados, cuyo propósito radicaba en la identificación de valores atípicos, extremos o cualquier dato que pudiera distorsionar

los análisis subsiguientes. Los datos problemáticos fueron excluidos o sometidos a tratamiento, según fuera necesario.

FASE 4: Ajuste de datos

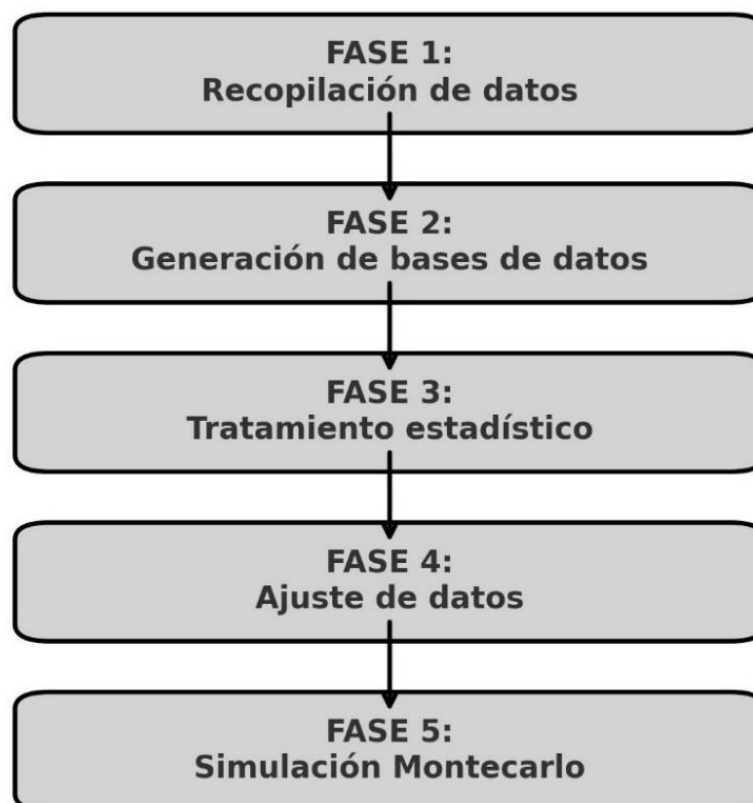
Se aplicó el juicio experto. Expertos en el campo minero intervinieron para corregir cualquier discrepancia o incoherencia detectada en los datos recopilados, asegurando su calidad y relevancia.

FASE 5: SMC

Se procedió a la implementación de la SMC. Los datos ajustados provenientes de las bases de datos se utilizaron para modelar diversos escenarios y evaluar la probabilidad de cumplimiento de un plan minero en condiciones variables. Este procedimiento de recolección de datos se diseñó cuidadosamente para respaldar de manera efectiva el análisis y la SMC en la exploración, asegurando que los logros alcanzados fueran de la más alta calidad y confiabilidad, lo que resulta esencial en el contexto de la aplicación de la SMC en la cuantificación de la probabilidad de cumplimiento de un plan de minado. La figura 22 muestra el procedimiento para la realización del presente estudio.

Figura 22

Procedimiento metodológico para la aplicación de la SMC en la evaluación del plan de minado



Técnica e instrumento para la recopilación de información

Técnica

Se refieren a los métodos y pasos utilizados por un investigador para obtener los datos esenciales que le permiten abordar las interrogantes (S. Hernández & Duana, 2020). En este estudio, se recurrió a las siguientes estrategias: observación y análisis documental.

La técnica de observación se utilizó para recopilar datos relacionados con variables específicas en el entorno minero. Los investigadores observaron directamente la operación minera y tomaron nota de las variables de interés, como la disponibilidad mecánica de los equipos, la productividad de los equipos, las horas efectivas de trabajo y otros factores operativos clave. Esta observación directa permitió obtener datos en tiempo real y, en muchos casos, datos más precisos y detallados que los que podrían recopilarse de otras fuentes. Para complementar la información obtenida a través de la observación, se realizó un análisis documental exhaustivo. Esta inspección directa facilitó el aprovechamiento de datos en tiempo real y, en varios casos, brindó datos más exactos y específicos que los que podrían ser recolectados de otras fuentes. Con el fin de mejorar el conocimiento obtenido mediante la observación, se materializó un análisis documental meticuloso. Esto implicó revisar registros y documentos previamente generados por la empresa minera, como informes de operación, registros de mantenimiento de equipos, informes de producción, informes financieros y cualquier otro documento relevante. Estos documentos proporcionaron datos históricos que abarcaron un período de tiempo significativo y permitieron una visión más completa de las variables clave.

Instrumentos

Siguiendo la descripción de Arias (2012), se entiende por medio de recolección de datos a toda forma, recurso o instrumento, tanto físico como digital, empleado para registrar, almacenar o documentar datos durante el desarrollo de una investigación. En esta tesis, se utilizaron las fichas de registros especialmente diseñada para recopilar datos relacionados con las variables clave en el entorno minero.

4.5. Análisis estadístico

En opinión de Bauce (2000), se describe como el procedimiento de recolectar, estructurar, analizar y mostrar datos con la finalidad de obtener datos importantes,

reconocer pautas y sostener la formulación de decisiones. Bajo esta perspectiva, el análisis estadístico se llevó a cabo utilizando hojas de cálculo de Excel, con el fin de recoger, sistematizar y estructurar evidencias cruciales relacionados con la planificación minera, incluyendo disponibilidad mecánica de equipos, productividad, horas efectivas de trabajo, tonelajes ejecutados, precio de los metales y recuperaciones metalúrgicas. Fue efectuada una revisión detallada de las cifras con la finalidad de detectar valores atípicos o inconsistencias que pudieran afectar la precisión del estudio, los cuales fueron corregidos o ajustados mediante juicio experto para garantizar su coherencia con la realidad operativa. Posteriormente, se implementó el análisis de riesgos utilizando la metodología de Simulación Montecarlo (SMC) en el software @RISK, construyendo modelos probabilísticos que permiten capturar la variabilidad inherente a los procesos de acarreo, disponibilidad mecánica y desempeño operativo del scoop. Para ello, se definieron distribuciones de probabilidad para cada variable crítica, alineadas con los rangos mínimos, más probables y máximos derivados del análisis estadístico preliminar. El modelo permitió ejecutar miles de iteraciones, generando una distribución de resultados sobre el rendimiento semanal esperado y la probabilidad de cumplimiento del plan de minado.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. Descripción general del proyecto minero

La pesquisa se realizó dentro de la zona de planificación de una destacada mina subterránea que se encuentra en la Sierra de Lima. Esta mina emplea el método de SLS para la obtención de minerales polimetálicos. El análisis se centró en la elaboración del plan de minado semanal bajo un enfoque determinístico, utilizando las variables operativas y metalúrgicas actualmente aplicadas por el Área de Planeamiento.

5.1.1. Escenario Actual: Determinístico

En el área de planeamiento actualmente se desarrollan planes de minado mediante el enfoque tradicional, empleando variables estocásticas. Las siguientes son algunas de las variables cruciales que participan un rol vital en la arquitectura de estos planes de extracción minera:

- Disponibilidad mecánica
- Ciclo de acarreo
- Leyes
- Recuperaciones metalúrgicas

Los planes de minado se realizan de la siguiente manera:

- En el Área de Planeamiento, se recopilan los KPI promedio de las diversas áreas involucradas en la elaboración del plan.
- Se crea una matriz en una hoja de cálculo que proporciona como resultado los ingresos proyectados para el período evaluado, ya sea semanal, mensual, semestral o anual.
- Estos ingresos proyectados se informan a la sede corporativa, generando una promesa de producción.

Ejemplo: Elaboración de un plan de minado con variables determinísticas.

Para efectos del estudio, se elaboró el plan de minado correspondiente a la semana 50 del año 2022, focalizado en la producción del tajo TJ_1017. Toda la información geométrica, operativa y económica utilizada se encuentra sustentada en los Anexos 1 al 4, los cuales complementan la interpretación de los resultados obtenidos.

Horas efectivas de trabajo

El análisis considera que los operadores desarrollan labores con una eficiencia promedio de 6 horas efectivas por guardia, valor obtenido del registro real de operaciones (ver Anexo 2, parámetros operativos).

Flota de carguío y acarreo disponible

La sección cuenta con scooptrams CAT R1300G, cuya capacidad de cuchara registrada en campo varía entre 4 y 5 toneladas, dependiendo del sistema de pesaje interno (véase Anexo 2 para las mediciones directas realizadas durante la semana). Estos equipos son responsables del traslado del mineral desde los tajos hacia los Ore Pass designados.

Tajos a programar

Para la semana analizada se programó la extracción de cuatro tajos: TJ_1017, TJ_1505, TJ_1013 y TJ_689, todos con valores pagables en plata, plomo y zinc, mientras que el Cu constituye un elemento penalizable. La valorización se expresa en plata equivalente. El presente análisis se centra específicamente en el rendimiento del TJ_1017 (ver Anexo 1 para su caracterización geométrica).

Distancias de acarreo

La Dirección de Topografía proporcionó los intervalos de distancia entre los puntos de extracción (tajos) y los lugares de descarga (orepass), los cuales se presentan en la Tabla 2. Esta información resulta esencial para la adecuada planificación y optimización del transporte de material, ya que permite gestionar de manera más eficiente los tiempos de ciclo y los costos operativos dentro de la mina. Asimismo, se realizó el análisis de la producción correspondiente al tajo TJ_1017, a fin de evaluar su desempeño y su contribución al sistema de acarreo.

Tabla 2

Distancias de acarreo, destinos del mineral, leyes de plata (Oz/tn) y recuperaciones metalúrgicas por tajo.

ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA (km)	LEY AG (Oz/Tn)	Recuperación Metalúrgica
TJ_1017	OP10	0.75	2.5	85%
TJ_1505	OP14	0.8	6.5	90%
TJ_1013	OP10	0.5	2.2	82%
TJ_689	OP10	0.3	1.5	80%

La información detallada de geometría, longitud, secciones del tajo y tonelaje explotable del TJ_1017 se encuentra en el Anexo 1, donde se muestran sus planos y coordenadas utilizadas para el cálculo de volumen $\times$ densidad.

Leyes promedio

El departamento de Geología realiza un muestreo diario de la calidad de los tajos evaluados. Durante la última semana se registraron leyes promedio en plata equivalente, las cuales se presentan en la Tabla 3. Estos datos son fundamentales para estructurar la producción, ya que permiten evaluar la factibilidad y rentabilidad de la extracción en cada área de la mina. Asimismo, se analizó la producción del tajo TJ_1017.

Disponibilidad mecánica

La disponibilidad mecánica representa el porcentaje de tiempo en el que el equipo está operativo y tiene la capacidad de cumplir los deberes para las que fue diseñado. Este indicador es monitoreado y reportado diariamente por el Área de Mantenimiento Mecánico, permitiendo evaluar el rendimiento y eficiencia de la flota. En el caso de los scooptrams involucrados en el plan semanal, los valores promedio de disponibilidad mecánica se especifican en la tabla 3.

Utilización mecánica

La utilización mecánica se define como el porcentaje del tiempo disponible en el que el equipo efectivamente desarrolla las acciones para las que fue creado. Este indicador es registrado por el Área de Productividad a partir de los registros de operaciones, los cuales son digitalizados diariamente. En el caso de los scooptrams involucrados en el plan semanal, los valores promedio de utilización mecánica se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Disponibilidad mecánica y utilización por equipo scooptram 4yd3 (CAT-R1300G)

EQUIPO	DM	UTILIZACIÓN
SC-1	90%	85%
SC-2	88%	90%
SC-3	85%	90%
SC-4	80%	80%

Los valores reales utilizados para la calibración del rendimiento se encuentran dentro del rango observado en operación, con DM entre 0.80 y 0.90 y utilización entre 0.80 y 0.90, de acuerdo con la información registrada en el Anexo 3.

Recuperaciones metalúrgicas por tajo

Las recuperaciones se determinaron a partir de los ensayos del laboratorio de Metalurgia. Para el TJ_1017, la recuperación considerada fue del 85%, tal como se aprecia en la Tabla 2. Toda la información operativa que alimenta el análisis económico se complementa con los valores del Anexo 4, donde se encuentran los precios de plata registrados en 2023 y el precio adoptado por la empresa (22 USD/oz troy), utilizado para la valorización determinística del plan semanal.

Cálculo de ingresos asociados al plan semanal para el Tj_1017

El cálculo de ingresos del tajo TJ_1017 se fundamenta en los parámetros operativos registrados en campo y en la información técnica recopilada por las áreas de Geología, Productividad, Mantenimiento y Metalurgia. Las variables empleadas, tiempo de ciclo, capacidad de cuchara, horas efectivas de trabajo, disponibilidad mecánica (DM) y utilización, provienen de los registros operativos detallados en el Anexo 2, mientras que los factores de disponibilidad y utilización están respaldados en el Anexo 3. La caracterización geométrica y el tonelaje explotable del tajo corresponde al levantamiento técnico presentado en el Anexo 1, que define las dimensiones y volumen real del panel mineralizado.

Tabla 4

Cálculo de productividad por tajo

ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA (km)	TIEMPO CICLO (min)	EQUIPO	HORAS EFFECTIVAS DE TRABAJO	DM	UTILIZACIÓN	TN/GUARDIA- DÍA
TJ_1017	OP10	0.75	15	SC-1	6	85%	90%	91.8
TJ_1505	OP14	0.8	16	SC-2	6	88%	90%	89.1
TJ_1013	OP10	0.5	10	SC-3	6	85%	90%	137.7
TJ_689	OP10	0.3	6	SC-4	6	80%	80%	192

Con el tonelaje semanal proyectado y la ley programada del tajo, se calcula la producción de finos de plata considerando la recuperación metalúrgica correspondiente. El valor económico se obtiene aplicando un precio fijo de 23 USD/Oz troy, decisión alineada con la política interna descrita en el Anexo 4, donde se detalla el comportamiento histórico del precio y la justificación del valor adoptado para efectos del análisis. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 5:

Tabla 5
Ingreso esperado por tajo

NIVEL	TAJO	LEY PROGRAMADA (Oz/tn)	TN PROGRAMADO	FINOS PROGRAMADOS (Oz Ag)	INGRESO PROGRAMADO (USD)
1000	TJ_1017	2.5	1,285	2,731	60,083
1400	TJ_1505	6.5	1,247	7,297	160,540
1000	TJ_1013	2.2	1,928	3,478	76,511
800	TJ_689	1.5	2,688	3,226	70,963

El tajo TJ_1017 genera un ingreso estimado de USD 60,083.00 para la semana evaluada. No obstante, este valor puede variar debido a la dispersión natural de las variables operativas, como fluctuaciones en las leyes, fallas mecánicas, cambios en los tiempos de ciclo o variaciones en la dureza del mineral, variabilidad evidenciada en los registros técnicos incluidos en los Anexos 2, 3 y 4. Esta condición justifica la necesidad de emplear posteriormente un enfoque probabilístico mediante simulación Montecarlo, que permite incorporar explícitamente la variabilidad real observada en las operaciones.

5.1.2. Escenario Propuesto: Uso de variables probabilísticas

Se propone elaborar el plan de minado utilizando variables probabilísticas con su respectiva distribución de probabilidad ajustada.

Las variables esenciales que se usan para producir un plan de minería son las mismas que en el presente, aunque cada una contará con su propia distribución de probabilidad:

- Disponibilidad mecánica
- Ciclo de acarreo
- Leyes
- Recuperaciones metalúrgicas

Para el desarrollo de los planes de minado, se sugirió el siguiente enfoque:

- El Área de Planeamiento, respaldada por los departamentos de Operaciones Mina, Mantenimiento Mecánico, Geología y Metalurgia, se encargó de registrar la evolución histórica de cada variable crucial para la planificación en bases de datos.
- Cada base de datos fue sometida a un análisis exploratorio de datos.

- A cada variable se le asignó una distribución de probabilidad, la cual se determinó a través de juicio experto o datos estadísticos.
- Se procedió a la ejecución de la corrida, generando como resultado un valor con un rango de variación y su correspondiente probabilidad de cumplimiento.

Para la estimación del plan de minado, se ofrecen seguidamente los siguientes datos promedios:

Horas efectivas de trabajo

De acuerdo con los informes de prácticas históricos, se ha observado que las horas efectivas de trabajo oscilan en un rango que va desde 5.5 horas por guardia hasta 6.3 horas por guardia, siendo 6 horas por guardia el valor más probable. Para representar esta distribución, se ha optado por utilizar la distribución triangular, basándose en el juicio experto. En la SMC, el juicio de experto se emplea para estimar los parámetros de una distribución cuando los datos históricos son insuficientes o inaccesibles, permitiendo definir valores clave como el mínimo, el más probable y el máximo en una distribución triangular. Este método es ampliamente utilizado en la dirección de riesgos y proceso decisional en ingeniería y economía, ya que permite modelar incertidumbres basándose en el conocimiento y experiencia de especialistas en el área (Vose, 2008). A criterio de Pritsker & O'Reilly (1999), la utilización del juicio de experto en simulaciones mejora la precisión de los resultados cuando la recolección de datos empíricos no es factible, asegurando que las estimaciones reflejen la realidad operativa de los procesos analizados. En este marco, como lo ilustra la figura 23, se explica la distribución triangular para las jornadas laborales efectivas, donde se especifican claramente los valores mínimo, más probable y máximo, proporcionando una visión más precisa del rango de tiempo en que se podrían realizar las actividades.

Figura 23

Distribución triangular para horas efectivas de trabajo



Tonelaje por cuchara

En la unidad, se dispone de scooptrams RG1300G (CAT) para llevar a cabo las labores de carga y transporte de mineral desde los tajos hasta los Ore pass disponibles. De acuerdo con el sistema de pesaje de la cuchara de los equipos, se ha establecido que la capacidad mínima de carga es de 4 toneladas por cuchara, mientras que la capacidad máxima es de 5.2 toneladas por cuchara de scooptram, siendo 4.5 toneladas por cuchara el valor más probable. Para modelar esta distribución, se ha optado por utilizar la distribución triangular, en base al análisis estadístico.

Procedimiento estadístico

El análisis estadístico se realizó para verificar que los datos tomados en campo se adecuan al comportamiento de la distribución Triangular.

El procedimiento general fue el siguiente:

A. Tratamiento previo de la base de datos

La base de datos analizada corresponde a registros tomados directamente en campo, durante el seguimiento operativo de las labores de acarreo con scoop en mina Yauliyacu.

Cada registro contiene el tonelaje descargado por cuchara (Tonelaje_cuchara), identificado con su respectivo equipo (SC-1 a SC-4), además del origen ("TJ_1017") y destino ("OP-10"). Ver tabla en Anexos.

Antes del análisis estadístico, se realizaron las siguientes acciones de tratamiento y validación de datos:

- Depuración de registros:
Se eliminaron observaciones incompletas, duplicadas o con valores atípicos evidentes, verificando coherencia con los reportes de despacho diario.
- Homogeneización de unidades:
Todos los tonelajes se expresaron en toneladas métricas (t), con dos decimales.
- Codificación y ordenamiento:
Se asignaron los códigos de scoop y se organizó la información en una hoja de cálculo para su procesamiento en Python 3.10 y Microsoft Excel 2021.
- Validación de consistencia:
Se verificó que los valores se encuentren dentro del rango operativo habitual observado para los scoops (entre 4.0 y 5.2 t por cuchara).

B. Cálculo de parámetros estadísticos muestrales

Una vez validada la base de datos, se calcularon los parámetros estadísticos descriptivos para la variable Tonelaje_cuchara, con las siguientes fórmulas:

Tabla 6
Parámetros estadísticos descriptivos

Parámetro	Fórmula	Resultado	Función y utilidad
Media ($\bar{x}$)	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	4.55 t	Representa el tonelaje promedio descargado por cuchara. Su utilidad radica en reflejar la capacidad media efectiva de los scoops en condiciones normales de operación.
Mediana	Valor central del conjunto de datos ordenado	4.53 t	Indica el valor central de la muestra; útil para detectar sesgos o asimetrías en la distribución de los datos.
Moda	Valor con mayor frecuencia	4.48 t	Corresponde al valor más repetido. Es útil para identificar el tonelaje típico más frecuente durante la operación.
Varianza (s^2)	$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	0.13 t ²	Mide la dispersión de los datos respecto a la media; valores bajos indican estabilidad operativa.
Desviación estándar (s)	$s = \sqrt{s^2}$	0.36 t	Mide la variabilidad o consistencia de los registros individuales. En este caso, muestra una variación baja, lo que evidencia uniformidad en las cargas por cuchara.
Coefficiente de variación (CV)	$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$	7.9 %	Mide la dispersión relativa. Un CV menor al 10% refleja un proceso estable y controlado.
Rango (R)	$R = x_{max} - x_{min}$	1.20 t	Diferencia entre los valores extremos observados (5.20 – 4.00). Útil para conocer el intervalo de variación operativa.

Interpretación de los resultados

Los indicadores obtenidos evidencian que la variable Tonelaje_cuchara presenta una baja dispersión y un comportamiento estable, lo que implica un control operativo adecuado en la etapa de carguío.

El coeficiente de variación del 7.9% sugiere una buena repetitividad de carga entre los scoops, mientras que la cercanía entre la media y la mediana confirma una distribución aproximadamente simétrica, sin sesgos importantes.

Figura 24

Histograma de datos toneladas_cuchara

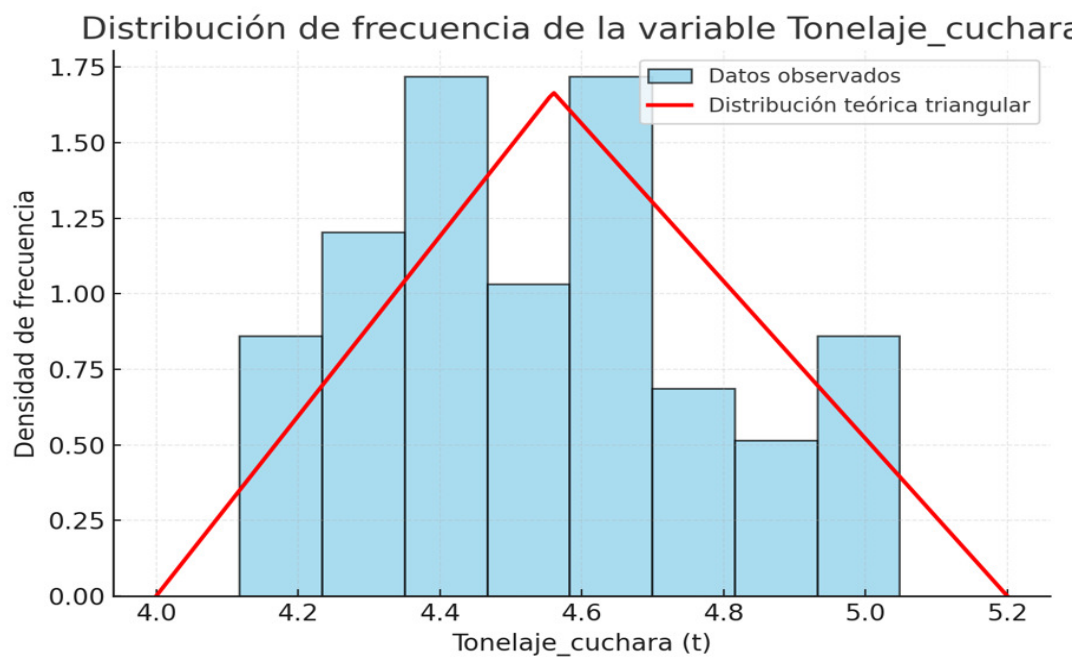
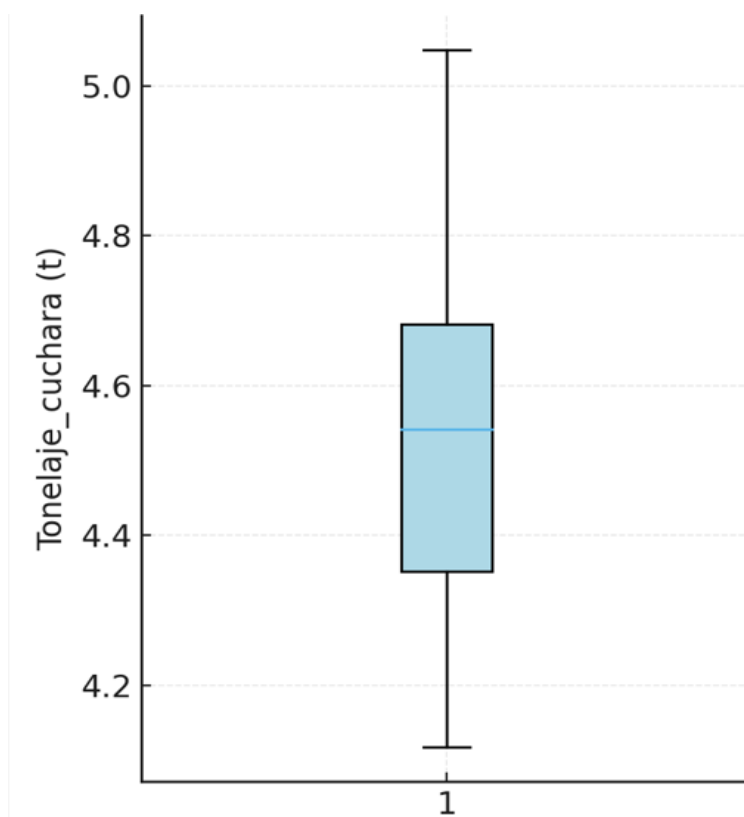


Figura 25

Boxplot de datos BD_tn_cuchara



C. Prueba de normalidad Kolmogorov–Smirnov

Para verificar el tipo de distribución que siguen los datos y determinar si podían ser tratados mediante técnicas paramétricas, se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov–Smirnov (K–S) utilizando el software Python 3.10 (librería `scipy.stats`).

Fundamento teórico

La prueba K–S compara la función de distribución acumulada empírica $F_n(x)$ obtenida de los datos, con la función de distribución teórica $F(x)$ correspondiente a una distribución normal, según las siguientes expresiones:

$$D = \max |F_n(x) - F(x)|$$

donde:

$F_n(x)$: distribución acumulada empírica,

$F(x)$: distribución teórica (normal),

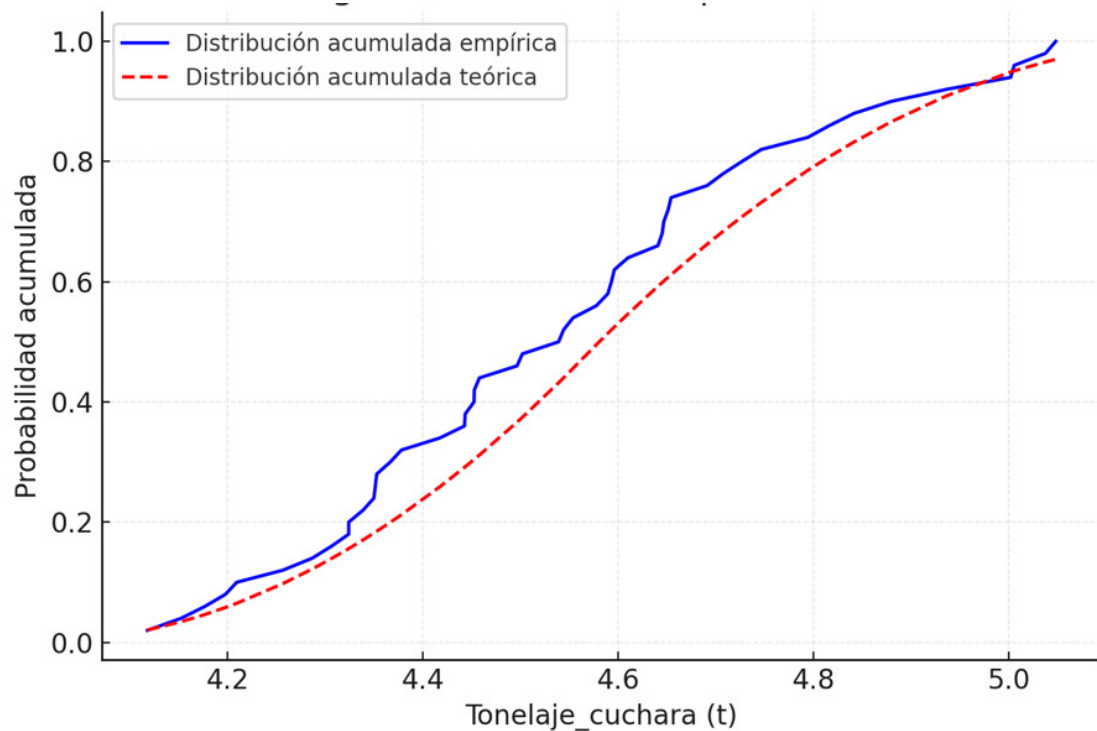
D : mayor diferencia entre ambas distribuciones.

El p-valor obtenido se interpreta como la probabilidad de que los datos provengan de la distribución teórica.

- **Criterio de decisión**
- Si $p > 0.05$: no se rechaza la hipótesis nula → los datos **siguen una distribución normal**.
- Si $p \leq 0.05$: se rechaza la hipótesis nula → los datos **no siguen una distribución normal**.

Figura 26

Comparación de distribuciones acumuladas



Ejecución en Python

La prueba se ejecutó con el siguiente comando:

```
from scipy import stats
```

```
D, p_valor = stats.kstest(datos['Tonelaje_cuchara'], 'norm', args=(media, desviacion))
```

El análisis arrojó un estadístico $D = 0.085$ y un $p\text{-valor} = 0.72$, indicando que no existen diferencias significativas entre la distribución observada y la distribución normal teórica al nivel de confianza del 95%.

Esto permite asumir que la variable Tonelaje_cuchara se comporta conforme a una distribución aproximadamente normal, por lo que pueden aplicarse métodos estadísticos paramétricos en los análisis posteriores.

D. Conclusión del análisis estadístico

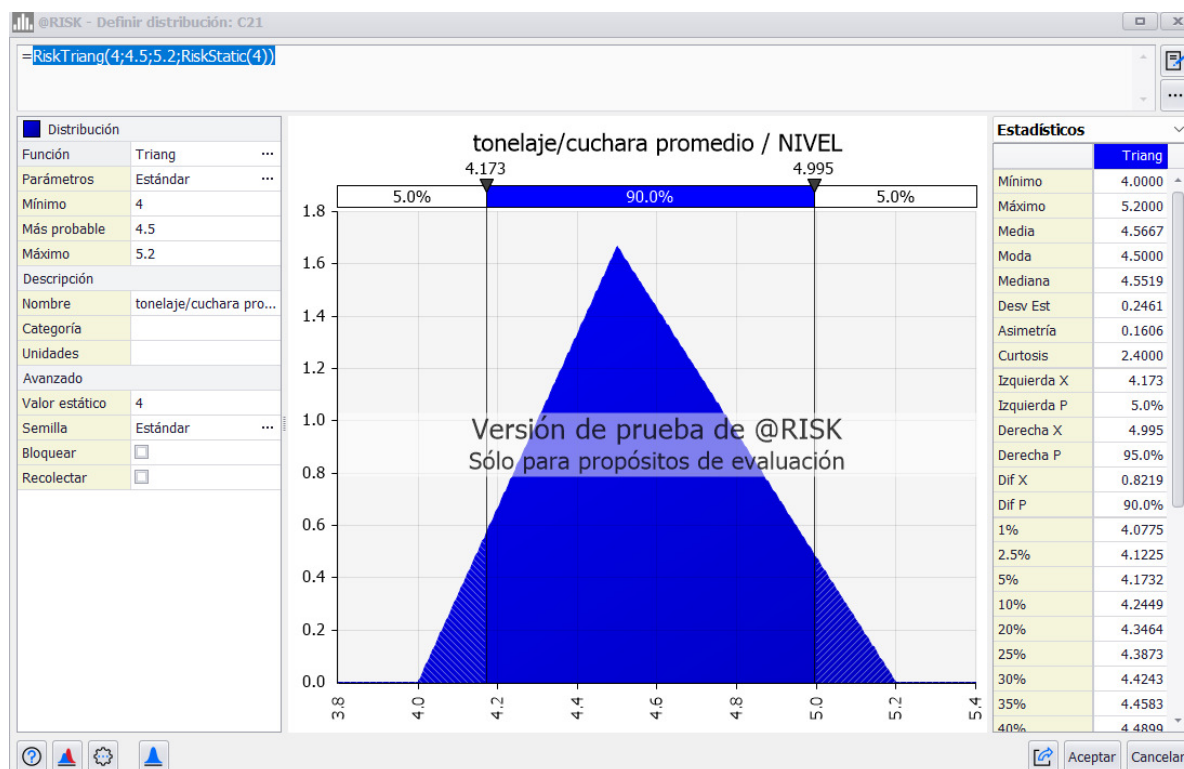
El tratamiento y análisis estadístico de la variable Tonelaje_cuchara permitió verificar la consistencia de los datos recolectados en campo y confirmar su adecuación a una distribución triangular.

Los parámetros muestrales calculados (media, desviación estándar, coeficiente de variación) reflejan una operación estable, con una variabilidad controlada dentro de los límites operativos de la flota de scoops.

En este contexto, como se ilustra en la figura 27, se muestra el tonelaje por cuchara, donde se visualizan los rangos establecidos: mínimo, más probable y máximo, permitiendo una representación clara de la capacidad de carga de cada scooptram para el transporte de mineral.

Figura 27

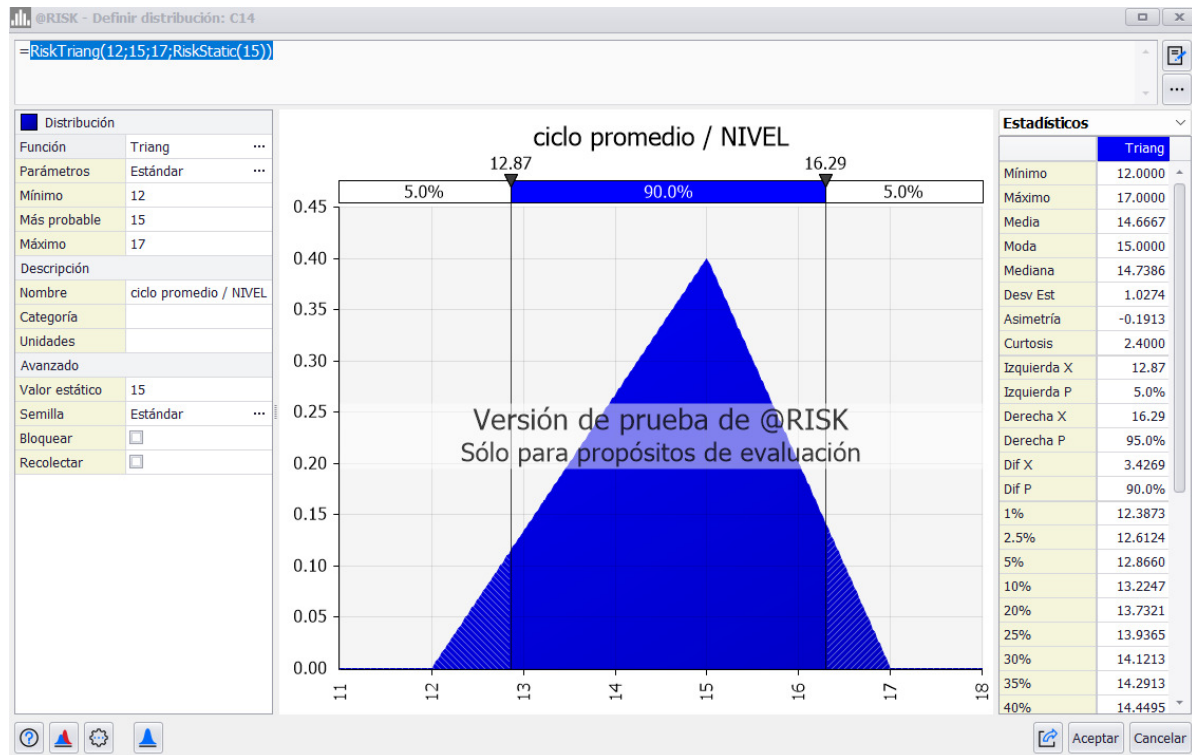
TonELAJE por cuchara de scooptram R-1300G



Tiempos de ciclo de acarreo

Se lleva a cabo de manera regular la medición del tiempo de un ciclo de acarreo desde cada tajo hasta su respectivo Ore pass. Los tiempos de ciclo registrados para el tajo TJ_1017 varían en un rango que abarca desde 12 minutos por cuchara hasta 17 minutos por cuchara, y el valor más probable se sitúa en los 15 minutos por cuchara. Para modelar esta distribución, se ha decidido emplear la distribución triangular, fundamentada en el juicio experto. En este sentido, como se observa en la Figura 28, se indica la distribución triangular para el ciclo de acarreo, que muestra de forma detallada los tiempos estimados, desde el registro inferior hasta el superior, con el dato más probable reflejando la situación más común en el proceso de acarreo.

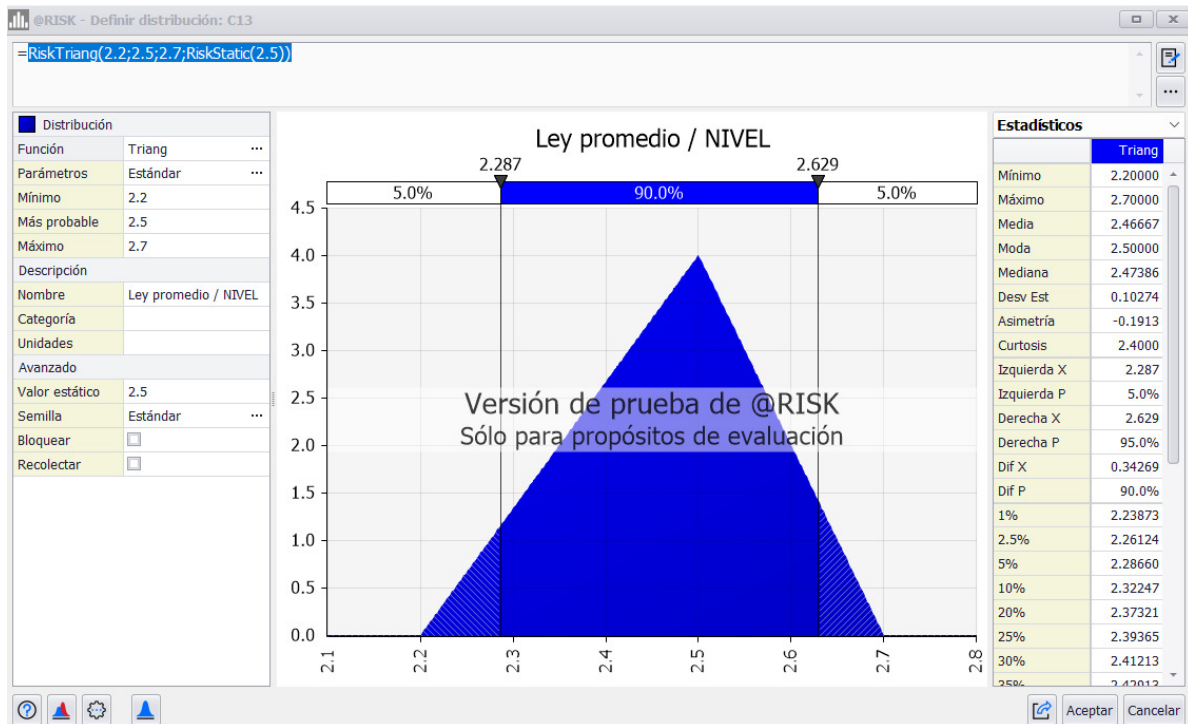
Figura 28
Distribución triangular para el ciclo de acarreo



Leyes promedio

El departamento de Geología efectúa un muestreo diario de la calidad del tajo TJ_1017. En función de los datos recopilados en el último mes, las leyes minerales presentan un rango que va desde un mínimo de 2.2 Oz Ag/tn hasta un máximo de 2.7 Oz Ag/tn, siendo 2.5 Oz Ag/tn el valor más frecuente. Para modelar esta distribución, se ha optado por utilizar la distribución triangular. En este contexto, como se ilustra en la figura 29, se refleja la distribución triangular para las leyes promedio del tajo, que refleja de manera clara el rango de las leyes minerales, con los valores mínimo, más frecuente y máximo, lo que permite una representación precisa de la variabilidad de las leyes a lo largo del tiempo.

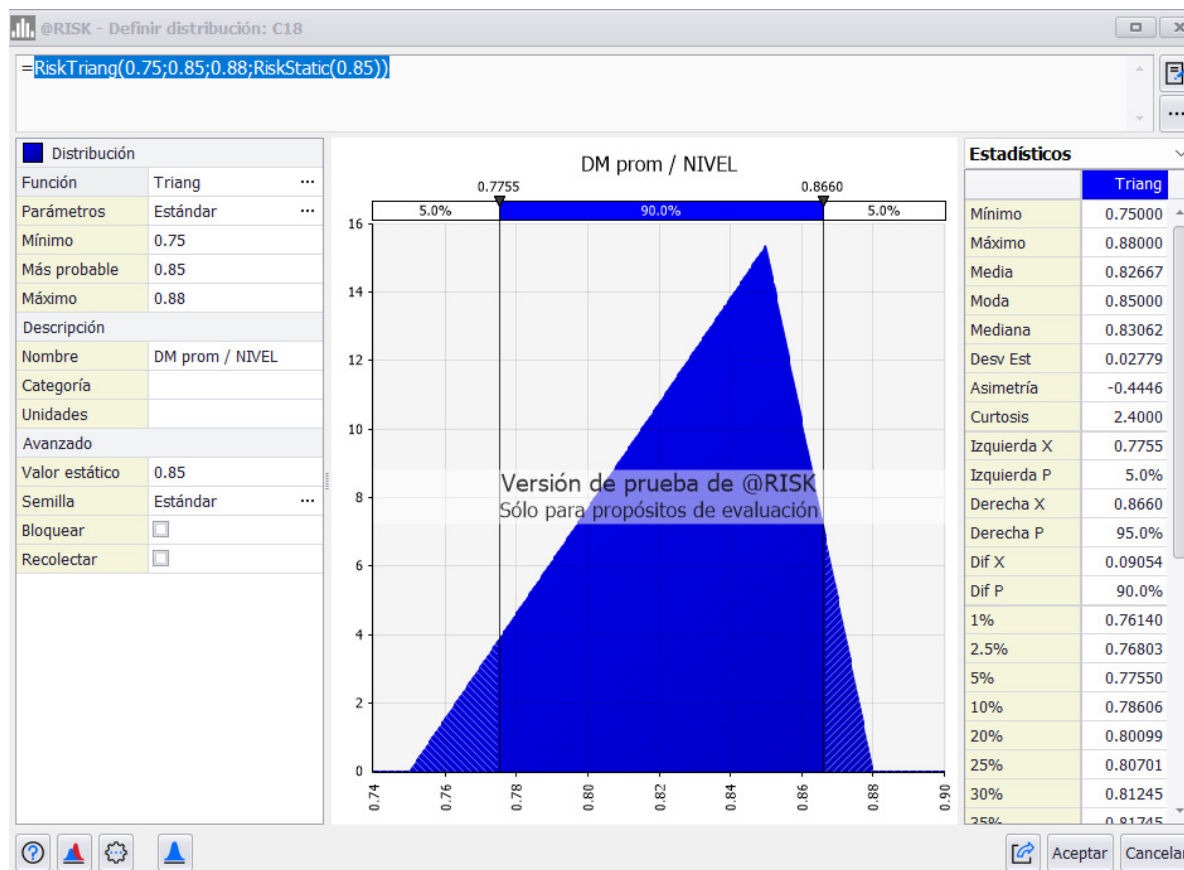
Figura 29
Distribución triangular para leyes promedio del tajo



Disponibilidad mecánica

Los valores registrados para el scooptram asignado al tajo TJ_1017 muestran una variación que se extiende desde un mínimo del 75% hasta un máximo del 88%, siendo 85% el valor más probable. Para representar esta distribución, se ha optado por utilizar la distribución triangular, basándose en el juicio experto. La figura 30 exhibe, en este marco, la distribución triangular para la disponibilidad mecánica, donde se visualizan los valores mínimo, más probable y máximo, permitiendo una representación precisa de la disponibilidad del equipo y su impacto en el proceso de acarreo.

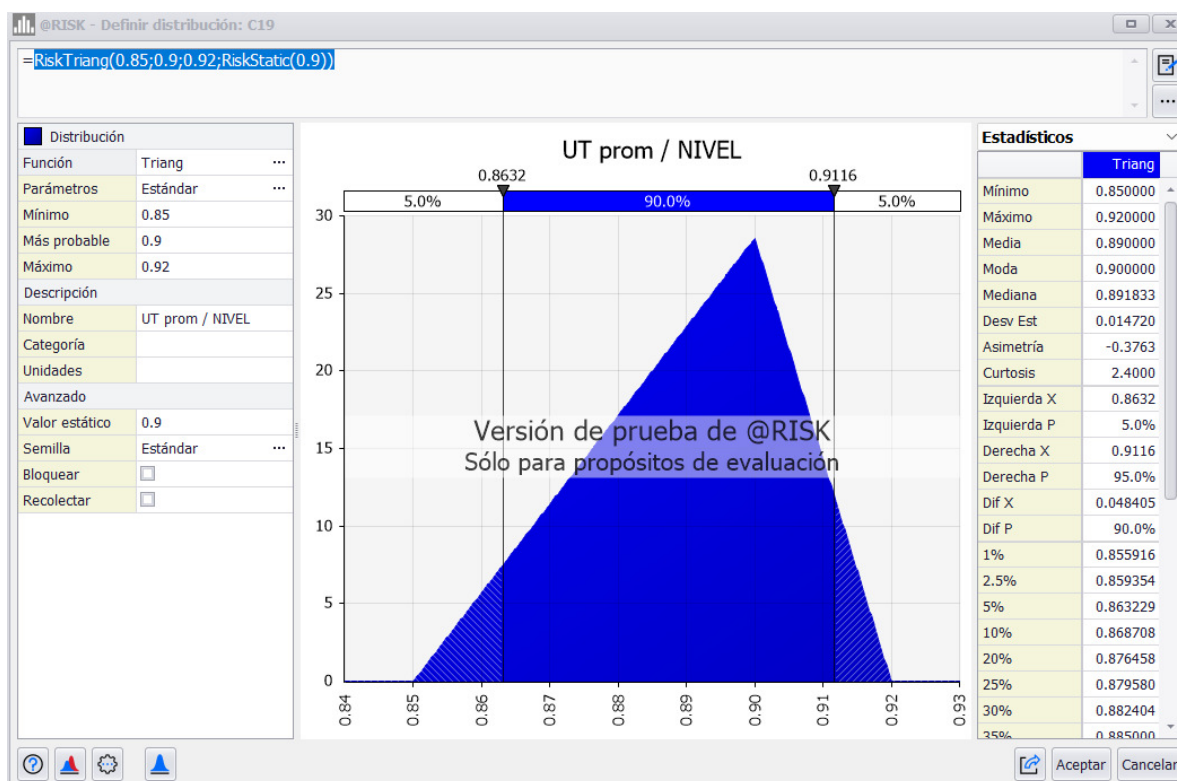
Figura 30
Distribución triangular para disponibilidad mecánica



Utilización mecánica

Los valores registrados para el scooptram asignado al tajo TJ_1017 varían desde un mínimo del 85% hasta un máximo del 92%, siendo 90% el valor más probable. Para modelar esta distribución, se ha optado por utilizar la distribución triangular, basándose en el juicio experto. En esta situación, la figura 31 ejemplifica la distribución triangular para la utilización mecánica, donde se especifican los valores mínimo, más probable y máximo, proporcionando una representación detallada de la utilización del equipo y su comportamiento esperado durante las operaciones de acarreo.

Figura 31
Distribución triangular para utilización mecánica



Precio de la plata

Según los registros del precio internacional de la plata publicados por el Banco Central de Costa Rica (BCCR), durante el año 2023 la cotización diaria de la plata fluctuó entre aproximadamente 20,7 y 25,9 USD por onza troy, mostrando variaciones constantes propias del comportamiento del mercado global de metales preciosos. A pesar de esta volatilidad, el área comercial de la empresa establece un precio fijo de 22 USD/Oz troy para todo el año 2023. Esta decisión se justifica porque un valor fijo permite simplificar los cálculos de ingresos y costos, estabilizar las proyecciones financieras y reducir la exposición a riesgos derivados de la variabilidad diaria del mercado.

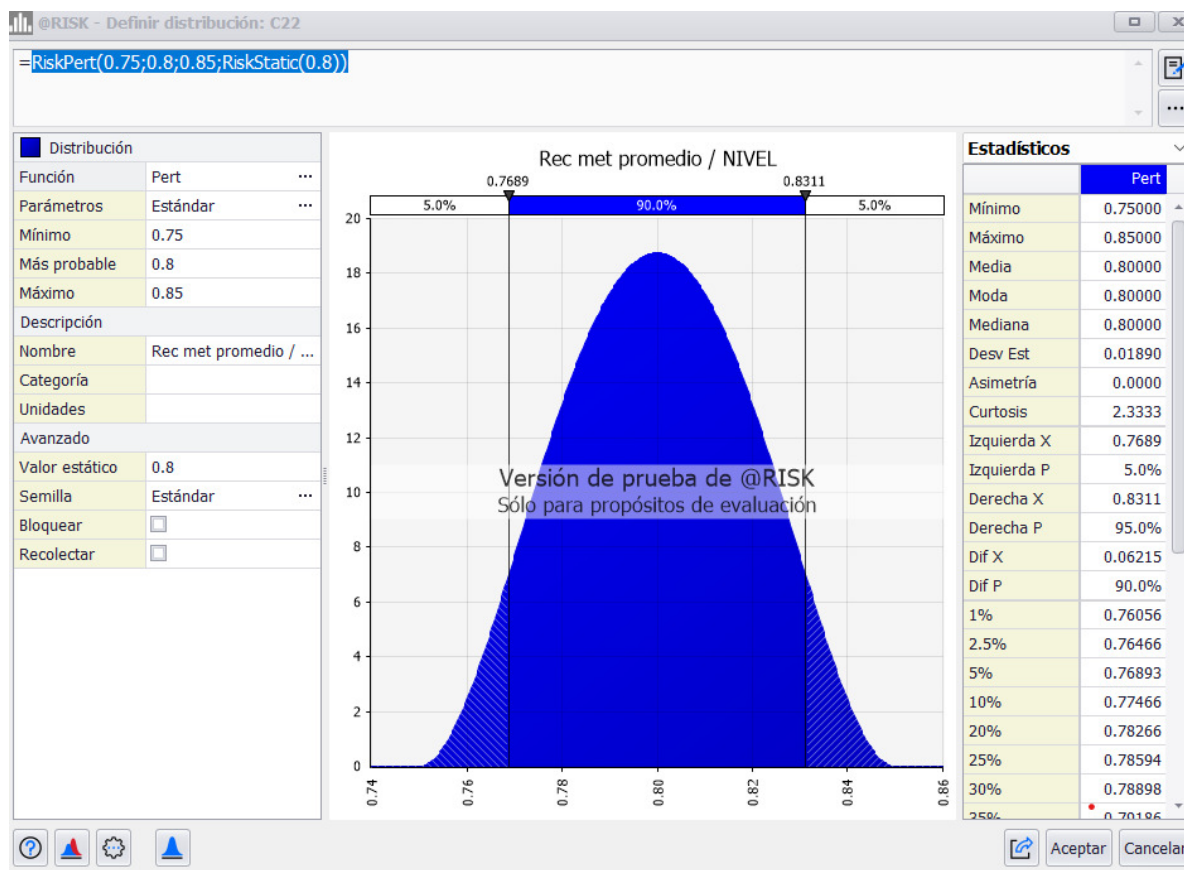
Recuperaciones metalúrgicas por tajo

La unidad de Metalurgia efectúa análisis con las pruebas que se remiten al laboratorio para medir la recuperación metalúrgica de cada una. Los valores medios del TJ_1017 fluctúan entre un mínimo de 75% y un máximo de 85%, siendo el valor más probable el 80%. Se asigna la distribución PERT en base al juicio experto. En este contexto, como se presenta en la figura 32, se exhibe la distribución PERT para la recuperación metalúrgica, detallando los valores mínimo, más probable y máximo, lo que permite

modelar de manera precisa las fluctuaciones en la recuperación de los metales en el tajo TJ_1017.

Figura 32

Distribución pert para el precio de la plata



Cálculo de ingresos asociados al plan semanal (escenario probabilístico)

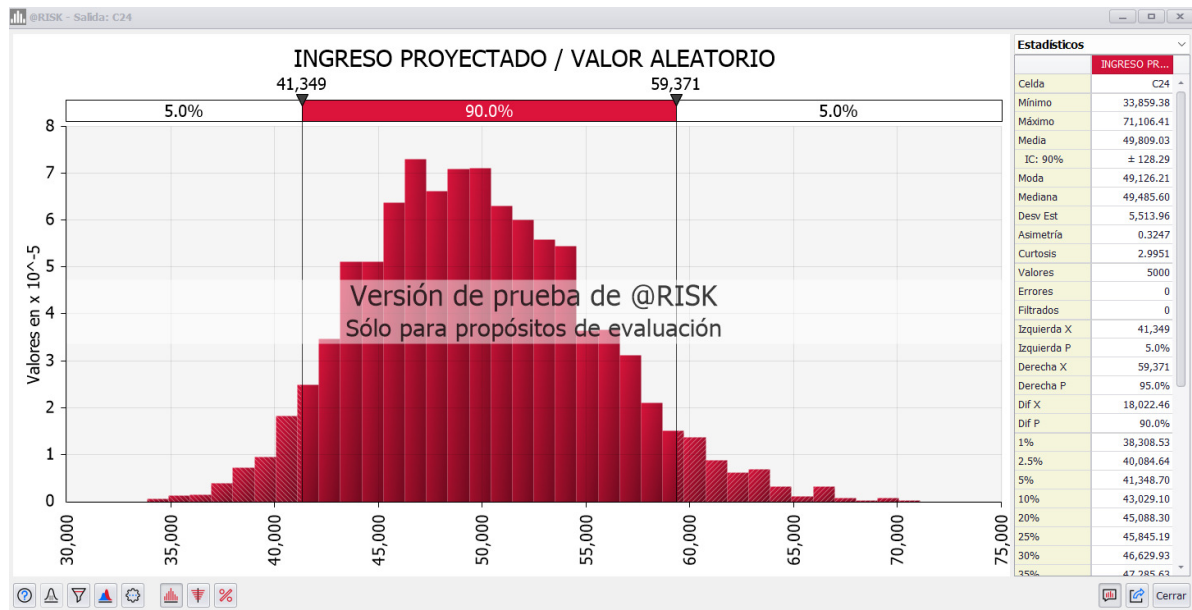
Con las variables probabilísticas recopiladas, se procede a la generación del plan de minado semanal y al cálculo del ingreso asociado a dicho plan. Este cálculo se realiza considerando el tonelaje por guardia que el equipo de acarreo en el tajo TJ_1017 puede proporcionar, teniendo en cuenta las variables y sus respectivos márgenes de variabilidad: capacidad de cuchara promedio, horas efectivas de trabajo promedio, disponibilidad mecánica promedio y utilización promedio. Para facilitar este proceso, se utilizan los valores aleatorios generados para los inputs del cálculo, los cuales se encuentran detallados en la tabla 7, que presenta las variaciones de cada una de las variables involucradas, permitiendo una representación precisa de los posibles escenarios de producción e ingresos.

Tabla 7*Valores aleatorios para los inputs del cálculo*

Variables Probabilísticas	Valor Aleatorio	Min	Más probable	Max
Ciclo Promedio (min)	16.32	12	15	17
Tn/cuchara promedio	5.08	4	4.5	5.2
Rendimiento Promedio (tn/hr)	13.67	—	—	—
Horas efectivas/día	5.91	5.5	6	6.3
Rendimiento promedio (tn/semana)	1544.34	—	—	—
DM (Disponibilidad Mecánica)	0.81	0.75	0.85	0.88
Utilización	0.89	0.85	0.9	0.92
Rendimiento Real promedio (tn/semana)	1107.29	—	—	—
Precio de la plata (USD / Oz troy)	22	20.7	22	25.93

A partir del tonelaje por guardia, se puede calcular el volumen a explotar durante la semana, tomando en cuenta tanto la ley promedio como la recuperación metalúrgica, lo que nos permite estimar la cantidad de finos a obtener en ese periodo. Además, el precio de la plata utilizado por el Área de Planeamiento para el año actual es de 22 dólares por onza troy, lo que nos brinda la información necesaria para calcular el ingreso asociado al plan semanal. Con estos datos, se llevaron a cabo 5000 iteraciones con el software @Risk, aplicando la SMC para explorar los diversos escenarios posibles en el desarrollo del plan semanal en el tajo TJ_1017. Como se detalla en la figura 33, esta examinación permitió evaluar la variabilidad de los ingresos considerando distintos escenarios operativos y de mercado, cuantificando el rango de posibles ingresos y su distribución de probabilidad, por lo que ofrece un medio esencial para la elaboración de decisiones tácticas en el ámbito de la dirección minera.

Figura 33
Ingreso proyectado con software @Risk



Probabilidad de alcanzar la meta de USD 60,083.00 en el escenario determinista del plan de minado.

En función de la figura 34, la probabilidad de alcanzar al menos USD 60,083.00, mencionados en el escenario determinista, es del 95.9%. Esto indica que se trata de un escenario altamente probable, ya que el valor se encuentra dentro de un rango de confianza elevado. Además, este resultado respalda la viabilidad del plan de minado, evidenciando que las proyecciones económicas son consistentes con la distribución de probabilidad presentada.

Figura 34
Probabilidad de cumplimiento del plan de minado

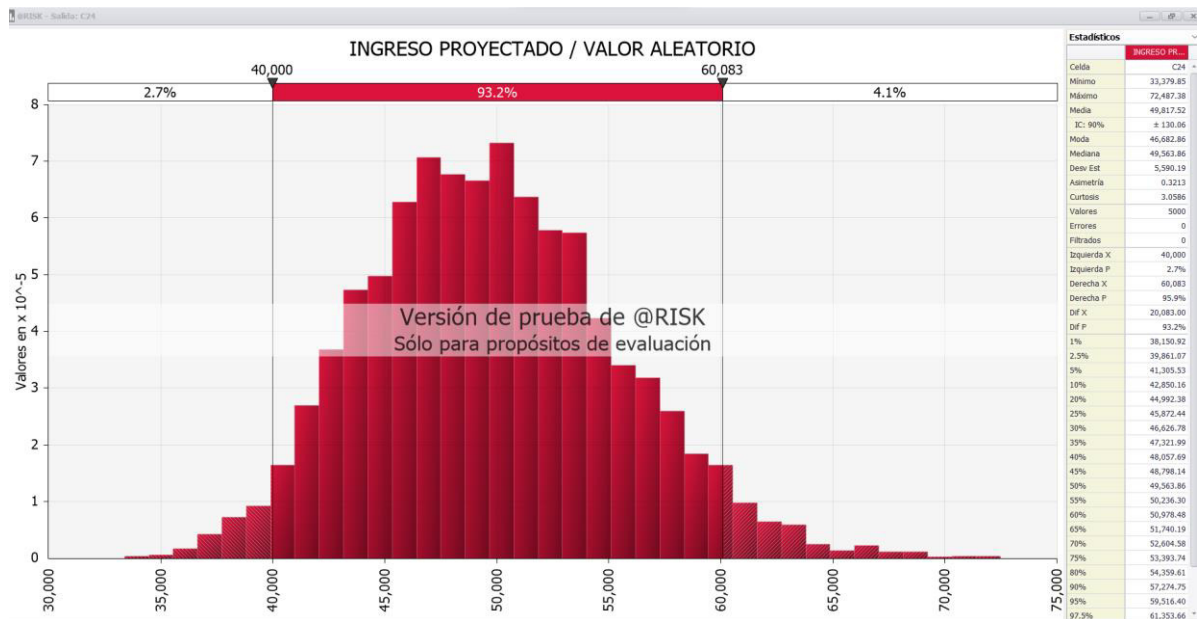
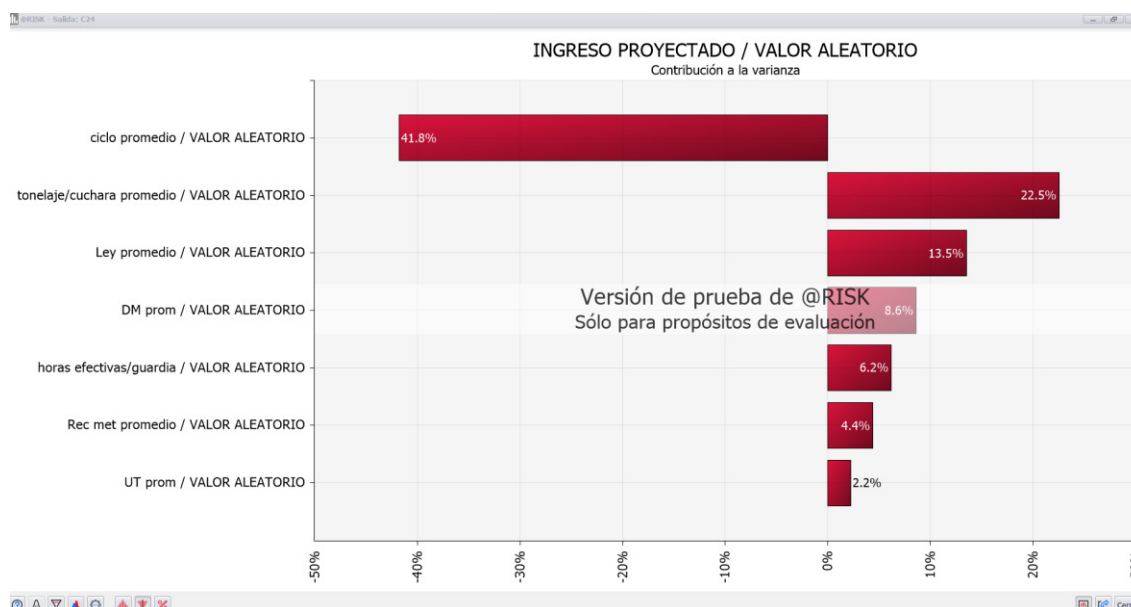


Gráfico de tornado

Conforme a la figura 35, el gráfico de tornado permitió identificar las variables más sensibles del modelo. En este sentido, el ancho de la barra en el gráfico indica la repercusión de cada variable en el producto final, lo que proporciona información valiosa sobre aquellas que generan una mayor incertidumbre en los resultados económicos. A partir de esta identificación, es posible diseñar planes de acción orientados a reducir la variabilidad de dichas variables, con el objetivo de optimizar la estabilidad y previsibilidad del plan de minado.

Figura 35

Variables con mayor impacto en el cumplimiento del plan (Gráfico tornado).



Las variables que ejercen un mayor impacto en el resultado económico son las siguientes, enumeradas en orden de relevancia: el tiempo de ciclo, el tonelaje por cuchara, la ley promedio, la disponibilidad mecánica, las horas efectivas por guardia, la recuperación metalúrgica y la utilización efectiva.

Plan de acción propuesto

Con el fin de minimizar la variabilidad en los resultados económicos del plan de minado, se presenta el siguiente plan de acción, dirigido a abordar cada una de las variables aleatorias mencionadas.

- **Ciclo promedio**

- ✓ Para reducir el tiempo de ciclo, se requiere implementar una campaña sostenible de mantenimiento de las vías de acarreo. De esta manera, se garantizará que las vías estén en óptimas condiciones, permitiendo al equipo operar a su máxima velocidad
- ✓ Otra alternativa sería implementar dumper y así aumentar el número de cucharas por hora transportadas al Orepass.

- **Tonelaje/cuchara**

- ✓ Para aumentar las toneladas por cuchara se debe tener mineral con una granulometría fina; para lograr este objetivo se debe respetar el esquema de voladura de cada tajo propuesto por el Área de Control de Minado para evitar la generación de “bancos”.
- ✓ Se plantea incrementar en un 15% el tonelaje por cuchara mediante la optimización del diseño de voladuras y control de granulometría.

- **Ley promedio**

- ✓ Con el objetivo de mejorar la ley promedio, se recomienda la estrategia de explotar los tramos con leyes más altas y dejar los tramos de menor ley como pilares, siempre considerando el impacto en la reducción del tonelaje.
- ✓ Se priorizarán tramos con mayor ley por encima de 2.5 g/t para optimizar el valor económico de la extracción.

- **Disponibilidad mecánica**

- ✓ El equipo muestra una disponibilidad mecánica con valores mínimos del 75% debido a su antigüedad, ya que ha estado en operación durante 3 años. La alternativa más viable y económica consiste en sustituir el equipo de carga.
- ✓ Se efectuará el cambio de maquinaria obsoleta con el propósito de maximizar la eficacia en las operaciones y acortar los intervalos de paro.

- **Horas efectivas**

- ✓ Con el fin de aumentar la cantidad de horas efectivas por guardia, es necesario abordar la reducción de los tiempos muertos del equipo.
- ✓ Se plantean diversas alternativas para abordar esta situación, entre las cuales se incluyen: Implementar el transporte del personal mediante camionetas con la meta de aminorar los periodos de traslado; capacitar a nuevos operadores de scooptram para llevar a cabo cambios en caliente durante el horario de almuerzo, colaborando con los operadores titulares y; realizar el transporte de materiales, como pernos y mallas electrosoldadas, utilizando equipos especializados, evitando la utilización de los scooptrams para estas tareas, entre otras posibles soluciones.

- ✓ Se propone aumentar en un 10% las horas efectivas por guardia mediante el uso de camionetas para transporte de personal y capacitación de operadores.
- **Recuperación metalúrgica**
 - ✓ Con el propósito de mejorar la recuperación metalúrgica, se recomienda enfocarse en la extracción de los tramos con menor cantidad de contaminantes y preservar los tramos con una mayor concentración de contaminantes como pilares.
 - ✓ Se plantea incrementar en un 8% la recuperación metalúrgica enfocándose en áreas con menor contaminación.
- **Utilización efectiva**
 - ✓ Con el objetivo de aumentar la utilización efectiva, es esencial abordar la reducción de los tiempos muertos del equipo.
 - ✓ Se instaurará una plataforma de vigilancia en simultáneo con el objetivo de identificar y minimizar los lapsos de inactividad en la operación.
 - ✓ Se procederá a la optimización de la planificación de mantenimiento preventivo con el objetivo de disminuir las interrupciones no planificadas y elevar la disponibilidad del equipo.

Con las mejoras propuestas en el plan de acción para optimizar las variables clave que afectan los resultados económicos, como el tiempo de ciclo, tonelaje por cuchara, ley promedio, disponibilidad mecánica y horas efectivas, se espera un incremento significativo en la probabilidad de éxito del plan de minado en la minera Yauliyacu. Actualmente, la probabilidad de alcanzar el ingreso proyectado de USD 60,083.00 en el tajo TJ_1017 es del 95.9%, pero con la implementación de mejoras en las variables clave, se espera un aumento significativo en esta probabilidad. El tiempo de ciclo promedio tiene un impacto del 41.8% en la variabilidad, por lo que optimizarlo mediante el mantenimiento sostenible de vías de acarreo y la incorporación de dumper podría reducir significativamente la incertidumbre. La flota de carguío y acarreo disponible, que tiene una contribución del 22.5%, se optimizará respetando el esquema de voladura y buscando una granulometría fina del mineral para incrementar el tonelaje por cuchara. Además, la mejora de la ley promedio (13.5%) se logrará mediante la explotación de tramos de mayor ley, lo que aumentará la calidad del mineral extraído. En cuanto a la disponibilidad mecánica (8.6%), se optimizará reemplazando equipos obsoletos y mejorando el mantenimiento preventivo.

Asimismo, se reducirán los tiempos muertos (6.2%) mediante capacitación de operadores y el uso de equipos especializados, lo que incrementará las horas efectivas por guardia. Como cierre, el aumento en las recuperaciones metalúrgicas por tajo (4.4%) y la mejora en la utilización mecánica (2.2%) también contribuirán a la eficiencia general del proceso. Con estas mejoras en las variables clave, la probabilidad de alcanzar el ingreso proyectado aumentará en un 2.8%, elevándose a un 98.7%, lo que asegura un cumplimiento casi seguro del plan de minado y optimiza la estabilidad operativa.

Contrastación de hipótesis

Ho (Hipótesis Nula): La incorporación de modelos probabilísticos y la simulación Montecarlo en la formulación de un plan minero permitirá no evaluar la probabilidad de éxito en la ejecución del plan de explotación, ni identifican las variables clave que influyen en su desarrollo.

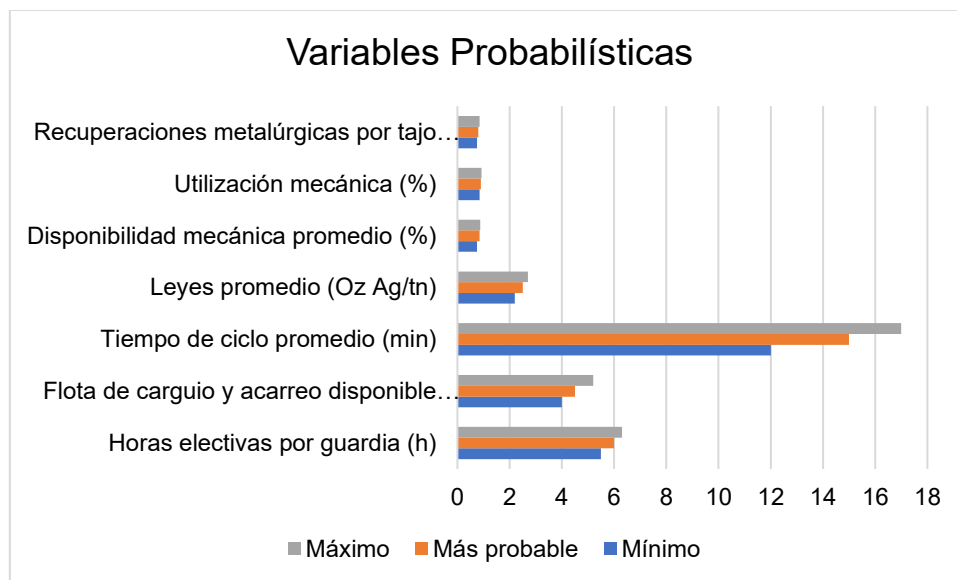
H1 (Hipótesis Alternativa): La incorporación de modelos probabilísticos y la simulación Montecarlo en la formulación de un plan minero permitirá no solo evaluar la probabilidad de éxito en la ejecución del plan de explotación, sino también identificar las variables clave que influyen en su desarrollo.

La contrastación de hipótesis realizada confirma que la incorporación de modelos probabilísticos y la SMC, mediante el uso del programa @RISK, facilitó la valoración de la posibilidad de éxito en el desarrollo del plan minero y las variables clave que influyen en su desarrollo. En el escenario probabilístico optimizado, el ingreso estimado del tajo TJ_1017 fue de USD 60,083.00, igual al escenario determinístico, lo que valida la precisión del modelo. Además, el análisis del programa @RISK determinó los valores más probables de las variables clave (Ver figura 33): 6 horas electivas por guardia, una capacidad promedio de flota de 4.5 toneladas por cuchara, un tiempo de ciclo promedio de 15 minutos, una ley promedio de 2.5 Oz Ag/tn, una disponibilidad mecánica promedio del 85%, una utilización mecánica del 90% y una recuperación metalúrgica del 80%. Se plantearon acciones estratégicas para reducir la variabilidad y optimizar los resultados económicos, como incrementar en un 15% el tonelaje por cuchara, priorizar tramos con mayor ley por encima de 2.5 g/t, y mejorar la disponibilidad mecánica reemplazando maquinaria obsoleta. También se propone aumentar en un 10% las horas efectivas por guardia mediante el uso de camionetas para transporte de personal y capacitando a operadores, así como incrementar en un 8% la recuperación metalúrgica enfocándose en áreas con menor contaminación.

Estas medidas no solo reducen la incertidumbre, sino que garantizan mayor estabilidad en los resultados económicos, confirmando la H1 y rechazando la Ho.

Figura 36

Valores más probables encontrados para las variables probabilísticas mediante el programa @RISK



CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

En correspondencia con el primer objetivo específico, en la indagación ejecutada se detectó que el riesgo en el plan de minado de la minera Yauliyacu varía significativamente dependiendo del enfoque utilizado. Mientras que el método determinista permite calcular un ingreso basado en valores promedio de variables operativas, este no refleja la incertidumbre inherente a la minería, lo que puede generar desviaciones en los resultados esperados. En contraste, el análisis probabilístico, mediante la SMC, permitió calcular la probabilidad de conseguir el ingreso proyectado, brindando una visión más realista del comportamiento de las variables clave y de su impacto en la planificación. Sin embargo, aunque este enfoque reduce la incertidumbre, no la elimina por completo, lo cual pone de evidencia que resultan indispensables medidas de control para aminorar los factores críticos identificados, como el tiempo de ciclo, el tonelaje por cuchara y la ley mineral. Al comparar estos hallazgos con los de Spanidis et al. (2021), se observa que, aunque su estudio se concentra en la dirección de riesgos relacionados con catástrofes naturales en la minería a cielo abierto, la metodología utilizada comparte similitudes con el enfoque probabilístico aplicado en esta averiguación. En ambos casos, la SMC permitió examinar la variabilidad de factores clave y su impacto en la operación minera, favoreciendo la formulación de determinaciones sustentadas en datos. No obstante, mientras que Spanidis et al. enfocaron su análisis en eventos externos, como deslizamientos o inundaciones, el presente estudio se centra en riesgos operativos internos, como variaciones en la eficiencia del equipo y la recuperación metalúrgica. Esta diferencia pone en evidencia que, aunque el uso de modelos probabilísticos es útil en distintos escenarios mineros, la naturaleza de los riesgos evaluados influye en la selección de herramientas adicionales para su mitigación. Por otro lado, el trabajo académico de Li et al. (2021) enfatiza la relevancia de la variabilidad de parámetros geotécnicos en la estabilidad de los pilares en minas subterráneas, utilizando también la SMC para calcular la posibilidad de fallo. En este caso, se destaca que la resistencia del pilar, medida a través del índice GSI, es determinante en su estabilidad, lo que es comparable con el presente estudio en términos del impacto de ciertas variables críticas en la confiabilidad de la planificación minera. No obstante, mientras que Li et al. enfocaron su análisis en la seguridad estructural, el presente estudio prioriza la evaluación del impacto económico de las

variaciones operativas, lo que sugiere que ambos enfoques, aunque distintos, pueden ser complementarios en el manejo integral de riesgos en la explotación subterránea.

En el segundo objetivo específico, se estableció que las variables de mayor importancia en la falta de cumplimiento del plan de minado son el tiempo de ciclo promedio (41.8%), la flota de carguío y acarreo disponible (22.5%) y las leyes promedio del mineral (13.5%), seguidas de la disponibilidad mecánica promedio (8.6%) y las horas electivas por guardia (6.2%). Estos descubrimientos son comparables con los datos de Hou et al. (2023), quienes utilizaron un modelo de simulación para optimizar la asignación camión-cargador en una mina subterránea de China, demostrando que una mejor distribución del transporte sin rieles reducía eventos de colisión, aumentaba la velocidad de traslado y mejoraba la eficiencia operativa. De manera similar, Cardozo et al. (2023) aplicaron la SMC en la selección de accesos mineros, concluyendo que la variabilidad en las distribuciones de probabilidad influye en la estabilidad de las decisiones, enfatizando la necesidad de evaluar la dispersión de los coeficientes de variación en escenarios con incertidumbre. La comparación de tales estudios muestra que, en la minera Yauliyacu, atenuar la variabilidad en los tiempos de ciclo y disponibilidad de equipos y mejorar el transporte podrían mitigar el fallo del plan de minado. La puesta en marcha de la SMC también faculta no únicamente prever el impacto de las variables cruciales, sino también plantear tácticas que maximicen la solidez en las operaciones y la previsibilidad de los resultados, lo cual resalta el valor de una dirección eficaz de los recursos y la incertidumbre en minería subterránea.

Finalmente, en correspondencia al objetivo específico 3, en la indagación actual, se ha identificado que el análisis de riesgos mediante SMC ha proporcionado una visión detallada de las variables que afectan de forma directa la realización de la estrategia de minado en la minera Yauliyacu. El tiempo de ciclo, con un impacto del 41.8%, se destacó como la variable más influyente en la variabilidad de los ingresos, seguida por el tonelaje por cuchara y las leyes promedio del mineral. De manera similar, en el estudio de Bustillos (2024) en la mina Marcapunta SW, el análisis de la estabilidad geomecánica mostró cómo las características del terreno impactan directamente en la eficiencia de la operación minera. Sin embargo, mientras que Bustillos se centró en la optimización de la estabilidad geomecánica a través de un diseño de cámaras y pilares más eficientes, la presente investigación destaca la importancia de la eficiencia

operativa y las condiciones logísticas para mejorar la probabilidad de alcanzar los ingresos proyectados. A través de la optimización de la flota de carguío, la mejora en el mantenimiento de las vías de acarreo y el fortalecimiento del programa de mantenimiento preventivo, la investigación ha propuesto un enfoque que se complementa con los estudios previos.

Torres & Rondon (2023) también dirigieron su análisis en el perfeccionamiento del plan de extracción minera, pero priorizando el incremento de las reservas minerales y el beneficio económico a largo plazo. Su estudio permitió redefinir el diseño de preparación y el secuenciamiento de minado, lo que resultó en un VAN positivo y significativo de USD 163.6 millones. Si bien la rentabilidad a largo plazo es un objetivo común en los tres estudios, la diferencia radica en el enfoque operativo y la prioridad de la eficiencia en tiempo real versus las perspectivas a largo plazo. En este sentido, la presente investigación pone un énfasis especial en reducir los tiempos muertos, mejorar la capacitación de operadores y optimizar las horas efectivas por guardia, lo cual está alineado con las estrategias operativas sugeridas por Torres & Rondon (2023) para mejorar la viabilidad operativa. Sin embargo, mientras que el estudio de Torres & Rondon se enfocó en optimizar el uso de recursos y equipos a largo plazo, en la investigación actual se propone una mejora inmediata en las operaciones diarias, centrada en la optimización del flujo de trabajo y en la reducción de las fluctuaciones operativas. Sin embargo, se destacó que la subjetividad juega un papel importante en el modelo de simulación, ya que orienta los resultados hacia un comportamiento específico del mercado. Para abordar esta subjetividad, se recopilaron opiniones de expertos en la materia y se creó una guía para utilizar el modelo de simulación. Esto facilita que los especialistas tomen elecciones de inversión más sustentadas y resguarden su capital en el mercado bursátil.

La ejecución de la SMC en la minería, como se aprecia en múltiples estudios, conlleva efectos relevantes para perfeccionar las decisiones y optimizar las operaciones mineras. Cardozo et al. (2023) y Hou et al. (2023) destacan cómo este enfoque reduce la subjetividad y permite la evaluación de incertidumbres, lo cual es fundamental en la selección de métodos de transporte y asignación de recursos en minas subterráneas, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa y seguridad. En estudios como los de Pinado (2021) y Medinaceli & Medinaceli (2021), se observa que la SMC facilita la valoración de la estabilidad de taludes y la probabilidad de fallos en diversos

escenarios, lo cual es crucial para asegurar el bienestar y durabilidad en el funcionamiento de las minas. Además, emplear esta metodología en indagaciones de riesgo, como la que Soles (2020) llevó a cabo, permite mejorar la factibilidad económica de las iniciativas mineras al detectar potenciales pérdidas y optimizar los márgenes de ganancia.

El trabajo de Spanidis et al. (2021) y Li et al. (2021) también subraya que simular resulta crucial tanto en el diseño de pilares de roca como en la gestión de riesgos, lo que ayuda a crear tácticas para mitigar los impactos de eventos catastróficos y a optar por alternativas ante estos sucesos. En este sentido, para el presente estudio, los hallazgos previos proporcionan una sólida base para reforzar la planificación minera, permitiendo evaluar la probabilidad de cumplimiento de los planes de minado mediante la cuantificación de incertidumbres, maximizando el empleo de recursos, verificando la estabilidad geomecánica, y mitigando los riesgos económicos y operativos. De esta manera, la SMC se consolida como un instrumento fundamental para fomentar la protección, la rentabilidad y la sustentabilidad en el sector minero actual.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La SMC aplicada al plan de minado en la minera Yauliyacu permitió evaluar la probabilidad de alcanzar el ingreso proyectado de USD 60,083.00 y determinar los factores que generan mayor variabilidad en los resultados. Se identificó que el tiempo de ciclo promedio, el tonelaje por cuchara y la ley promedio del mineral tienen el mayor impacto en el desempeño económico, lo que resalta la importancia de optimizar estas variables. Actualmente, la probabilidad de cumplimiento del plan es del 95.9%, pero mediante estrategias como la mejora en el transporte, la optimización del mantenimiento de equipos y la priorización de zonas con mayor ley, se estima un incremento de esta probabilidad a 98.7%. Esto demuestra que el uso de Montecarlo no solo facilita la identificación de riesgos, sino que también permite diseñar acciones para mejorar la estabilidad y eficiencia del proceso minero, reduciendo la incertidumbre operativa y fortaleciendo la planificación estratégica.

El análisis del plan de minado en la minera Yauliyacu mediante enfoques determinista y probabilístico evidencia la relevancia de considerar la incertidumbre operativa en la proyección organizativa. Mientras que el método determinista estima un ingreso de USD 60,083.00 basado en valores fijos de variables clave, la simulación probabilística revela que la probabilidad real de alcanzar esta cifra es del 95.9%, mostrando un margen de riesgo. Factores como el tiempo de ciclo, el tonelaje por cuchara y la ley mineral son los principales determinantes de la variabilidad. Esto pone en evidencia la trascendencia de tácticas de optimización para atenuar desviaciones e intensificar la fiabilidad del plan de extracción minera.

La SMC puesta en práctica en la operación en el tajo TJ_1017 durante la semana 50 del año 2022 permitió cuantificar los riesgos asociados al incumplimiento del plan de minado. Se determinó que el tiempo de ciclo es el factor con mayor influencia, representando el 41.8% de la variabilidad en los ingresos, seguido por la flota de carguío y acarreo con un 22.5% y la ley del mineral con un 13.5%. Otros factores como la disponibilidad mecánica (8.6%) y las horas efectivas por guardia (6.2%) también impactan en el desempeño. Para verificar la estabilidad en las funciones y que se logren las metas económicas, es fundamental optimizar estos elementos a través de una reparación de equipos y optimizaciones en la programación, además de minimizar el tiempo muerto.

Para incrementar la probabilidad de éxito del plan de minado en la minera Yauliyacu, se propone optimizar las variables de mayor impacto en la variabilidad de los ingresos. Actualmente, la probabilidad de alcanzar los USD 60,083.00 es del 95.9%, pero con estrategias como la reducción del tiempo de ciclo (41.8%), el incremento del tonelaje por cuchara (22.5%) y la priorización de zonas con mayor ley (13.5%), se estima que este porcentaje aumente en 2.8%, alcanzando un 98.7%. Adicionalmente, la mejora en el mantenimiento de equipos y la capacitación de operadores permitirá reducir tiempos muertos e incrementar la productividad, asegurando una operación minera más estable y predecible.

Recomendaciones

Dado que los factores críticos como el tiempo de ciclo, el tonelaje por cuchara y la ley promedio del mineral tienen un alto impacto en la variabilidad de los ingresos, es recomendable introducir una plataforma de vigilancia en línea con el momento exacto para estos parámetros. Esto permitiría identificar rápidamente cualquier desviación operativa y tomar decisiones informadas para optimizar los procesos. Asimismo, se debe promover la capacitación constante de los operadores y mejorar las rutas de acarreo y transporte, colaborando con un mejoramiento de la efectividad operativa y reduciendo la incertidumbre.

La simulación probabilística ha demostrado que existe una alta probabilidad de alcanzar el ingreso proyectado de USD 60,083.00 con un 95.9% de confiabilidad. No obstante, a causa de la incertidumbre existente en variables fundamentales como el tiempo de ciclo y la ley mineral, se indica implementar una revisión más detallada de dichas variables a través de la aplicación de escenarios de simulación continuos. Esta metodología simplificaría el logro de una mayor exactitud en las proyecciones y la adaptación de los métodos de planificación minera, teniendo en cuenta las variaciones y riesgos conectados a estas variables operativas.

La evaluación de Montecarlo efectuado en el tajo TJ_1017 identificó los componentes que producen un impacto mayor en la variabilidad de los ingresos, tales como el tiempo de ciclo (41.8%) y el tonelaje por cuchara (22.5%). Se propone la adopción de mejoramientos en los equipos de carga y traslado de materiales, concediendo prioridad a la actualización o sustitución de equipos anticuados. Aparte de eso, la optimización del planeamiento de mantenimiento y la formación en la administración de equipos pueden disminuir los periodos de inactividad, lo cual provocaría un efecto positivo en el rendimiento y la disponibilidad de los equipos.

Con el fin de elevar las probabilidades de éxito de la iniciativa de extracción y obtener una tasa de cumplimiento del 98.7%, se sugiere la ejecución de una estrategia integral que no solo guíe su enfoque hacia la mejora del rendimiento por medio de la minimización del tiempo de ciclo y el tamaño de material transportado por pala, sino además privilegie la obtención de mineral en regiones con elevada concentración mineral. Es imperativo añadir un robusto esquema de mantenimiento preventivo para los equipos y efectuar una vigilancia continua de los indicadores clave durante su operación. Así, se avalará la eficacia de la operación de extracción y la constancia y fiabilidad de los pros financieros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, M., & Torres, F. (2021). *Evaluación geomecánica para la recuperación de pilares de la zona alta, sección i en la empresa minera los quenuales s.a. - unidad minera yauliyacu*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/20.500.13080/1234>
- Agarwal, J. (2007). Structural integrity: hazard, vulnerability and risk. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 1(1/2/3), 1–18. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2007.013867>
- Amos, G., & Boahen, S. (2024). Corporate Social Responsibility in the Mining Industry: Exploring Perspectives of Host Communities in a Developing Country. *European Journal of Business Management and Research*, 9(2), 25–34. <https://www.ejbm.org/index.php/ejbm/article/view/2164>
- Arbaiza, L., Cateriano, J., & Irene Meza. (2014). *Modelo de desarrollo sostenible en la pequeña minería subterránea : caso Kinacox*. <https://repositorio.esan.edu.pe/items/26890d4a-7c5d-4d5d-b75e-9dc956d2d4c3>
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica* (Sexta edic). <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigación-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>
- Atlas Copco. (2007). *Mining Methods in Underground Mining (2nd ed.)*. https://miningandblasting.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/09/mining_methods_underground_mining.pdf
- Avlijaš, G. (2019). *Examining the Value of Monte Carlo Simulation for Project Time Management. Management Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 24(1), 11–23. <https://doi.org/10.7595/management.fon.2018.0004>
- Azofeifa-Z., C. E. (2004). *Aplicación de la Simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel*. *Revista Tecnología En Marcha*, 17(1), pág. 97–109. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1438
- Badii, M., & Castillo, J. (2009). *Distribuciones probabilísticas de uso común*. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 4(1), 149–178. https://www.researchgate.net/publication/228677262_Distribuciones_probabilisticas_de_uso_comun_Probabilistic_distributions_of_common_use
- Badii, M., Castillo, J., Landeros, J., & Cortez, K. (2007). *Papel de la estadística en la investigación científica*. *Innovaciones de Negocios*, 4(1), 107–145. <http://eprints.uanl.mx/12472/1/A5.pdf>
- Bastante, F., Taboada, J., & Ordóñez, C. (2004). Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. *Engineering Geology*, 73(1–2), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.12.002>
- Bernabé, H. (2021). Terminología para reportes de recursos minerales y reservas de mena. *Instituto de Ingenieros de Minas Del Perú*, 133–136. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac->

detail.pl?biblionumber=49834

- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (Pearson (ed.); Tercera ed). <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigación-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>
- Blom, M., Pearce, A., & Stuckey, P. (2018). Short-Term Planning for Open Pit Mines: A Review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(9), 1–24. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1448248>
- Botín, J. (2019). Gestión de riesgo en decisiones de inversión minera: un enfoque global. *Boletín Geológico y Minero*, 130(1), 67–80. [10.21701/bolgeomin.130.1.005](https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.1.005)
- Brady, B., & E Brown. (2013). *Rock Mechanics For Underground Mining* (Springer (ed.); 2ª Edición). https://books.google.com.pe/books?id=cRv_CAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Brady, T., Martin, L., & Pakalnis, R. (2005). Empirical approaches for opening design in weak rock masses. *Sage Journals*, 114(1), 13–20. <https://doi.org/10.1179/037178405X44494>
- Bustillos, H. (2024). *Plan de minado de la mina Marcapunta SW, para optimizar el diseño de cámaras y pilares – Cía. minera El Brocal S.A.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4169>
- Cardozo, F., Campos, H., Petter, C., & Ambrós, W. (2023). Application of Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) in Underground Mining Access Selection. *Mining*, 3(4), 773–785. <https://doi.org/10.3390/mining3040042>
- Cerda, C. (2016). *Análisis de riesgo asociado a incertidumbre operacional en planes mineros para minería a cielo abierto* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143123>
- Chura, H. (2017). *Optimizar el planeamiento a largo plazo de la mina a tajo abierto Tacaza - CIEMSA empleando los softwares mineros Gemcom Whittle y MineSight* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/10161>
- Cuba, M. (2023). *Optimización del ciclo de minado para incrementar los beneficios económicos aplicando programación lineal en la empresa SEPROCAL S.A.C.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3622>
- Cuello, C., & Lastra, L. (2023). *Propuesta de un Plan De Gestión de Riesgos de Fatalidad para Proyectos Mineros, Basado en la Metodología Pmbok®.* <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/3502>
- Fernández, O. (2018). *Evaluación de riesgos de un proyecto de inversión minera y su aplicación a un proyecto de mediana minería* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151992>
- Fontanelli, O., Mansilla, R., & Miramontes, P. (2020). Distribuciones de probabilidad

- en las ciencias de la complejidad: una perspectiva contemporánea. *Inter Disciplina*, 8(22), 11–37.
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2020.22.76416>
- Gertsch, R., & Bullock, R. (1998). *Techniques In Underground Mining. Selections From Underground Mining Methods Handbook* (SME (ed.)).
<https://archive.org/details/techniques-in-underground-mining-selections-from-underground-mining-methods-handbook/page/n1/mode/1up>
- Glickman, T., & Xu, F. (2009). Practical risk assessment with triangular distributions. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 13(3), 313–327.
 10.1504/IJRAM.2009.030702
- Grznár, P., Gregor, M., & Mozol, Š. (2024). A Comprehensive Analysis of Sensitivity in Simulation Models for Enhanced System Understanding and Optimisation. *Processes*, 12(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/pr12040716>
- Harraz, H. (2014). *Sublevel Stoping Underground Mining Methods*.
 10.13140/RG.2.1.4585.0483
- Hartman, H., & Mutmansky, J. (2002). *Introductory Mining Engineering* (John Wiley & Sons(ed.);2daEdición).
https://books.google.com.pe/books?id=jPdF6K0at4YC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Hernández, B., & Huerta, J. (2013). La relación entre la variable aleatoria y la variable estadística. Un análisis epistemológico disciplinar. *Probabilidad Condicionada: Revista de Didáctica de La Estadística*, 2, 383–390.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4770351>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de Investigación* (M. Hill (ed.); Sexta edic). <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2. Hernandez, Fernandez y Baptista-Metodología Investigacion Cientifica 6ta ed.pdf>
- Hernández, S., & Duana, D. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de Las Ciencias Económico Administrativas Del ICEA*, 9(17), 51–53. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icea/article/view/6019>
- Herrera, J. (2020). *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior*.
https://oa.upm.es/62726/1/METODOS_MINERIA_INTERIOR_LM1B4T4R0-20200406.pdf
- Hou, J., Li, G., Chen, L., Wang, H., & Hu, N. (2023). Optimization of Truck–Loader Matching Based on a Simulation Method for Underground Mines. *Sustainability*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su15010216>
- IIMP. (2022). *El planeamiento minero fue clave para mitigar los impactos de la pandemia en minas peruanas*. Instituto de Ingenieros de Minas Del Perú.
<https://iimp.org.pe/noticias/el-planeamiento-minero-fue-clave-para-contener-los-impactos-de-la-pandemia-en-minas-peruanas-afirma-experto>
- Imasiku, K., & Ntagwirumugara, E. (2021). Sustainable energy supply and business collaborations for sustainability, resilience and competitiveness in the Zambian

- copper industry after Covid-19. *Journal of Energy in Southern Africa*, 32(1), 97–108. 10.17159/2413-3051/2021/v32i1a8362
- Inquilla-Mamani, J., & Rodríguez-Limachi, O. (2019). Análisis de riesgo mediante el método de simulación de Montecarlo aplicado a la inversión pública en el sector educativo peruano. *Praxis*, 15(2), 163–176. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7437386>
- Kivinen, S., Vartiainen, K., & Kumpula, T. (2018). People and Post-Mining Environments: PPGIS Mapping of Landscape Values, Knowledge Needs, and Future Perspectives in Northern Finland. *Land*, 7(4), 1–23. 10.3390/land7040151
- Lagos, G., Espinoza, D., Moreno, E., & Amaya, J. (2011). Robust Planning for an Open-Pit Mining Problem under Ore-Grade Uncertainty. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 37, 15–20. 10.1016/j.endm.2011.05.004
- León, D., Quintero, I., & Zuluaga, W. (2004). *Crystal Ball*. http://www.fce.unal.edu.co/media/files/UIFCE/Finanzas/Crystal_Ball_1.pdf
- Leroy, Y., & Froelich, D. (2010). Qualitative and quantitative approaches dealing with uncertainty in life cycle assessment (LCA) of complex systems: Towards a selective integration of uncertainty according to LCA objectives. *International Journal of Design Engineering*, 3(2), 1–17. 10.1504/IJDE.2010.034862%0A
- Li, C., Zhou, J., Armaghani, D., & Li, X. (2021). Stability analysis of underground mine hard rock pillars via combination of finite difference methods, neural networks, and Monte Carlo simulation techniques. *Underground Space*, 6(4), 379–395. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.05.005>
- Lifeder. (n.d.). *Distribución uniforme continua: características, ejemplos, aplicaciones*. Lifeder. <https://www.lifeder.com/distribucion-uniforme-continua/>
- López, J. (2019). *Distribución t de Student*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-t-de-student.html>
- Luna, H. (2011). Minería subterránea y superficial y beneficio de minerales en el Perú. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4699328-mineria-subterranea-y-superficial-en-el-peru-beneficios-del-desarrollo-minero-en-el-contexto-mundial> <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4699328-mineria-subterranea-y-superficial-en-el-peru-beneficios-del-desarrollo-minero-en-el-contexto-mundial>
- Medinaceli, R., & Medinaceli, R. (2021). Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 6(1), 33–48.
- Movil, M. (2021). *A methodology to evaluate the impact of major geological faults on the stability of backs in open stopes using DEM* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182953>
- Murray, J., & Cranswick, R. (2024). *Mineral Resources vs. Mineral Reserves. Key insights and implications for private equity mining investment*. RCF Partners Blog. <https://resourcecapitalfunds.com/insights/rcf-partners-blog/mineral-resources-reserves/>
- Nielsen, S. (2016). *Aplicación del método de Monte Carlo para programación de*

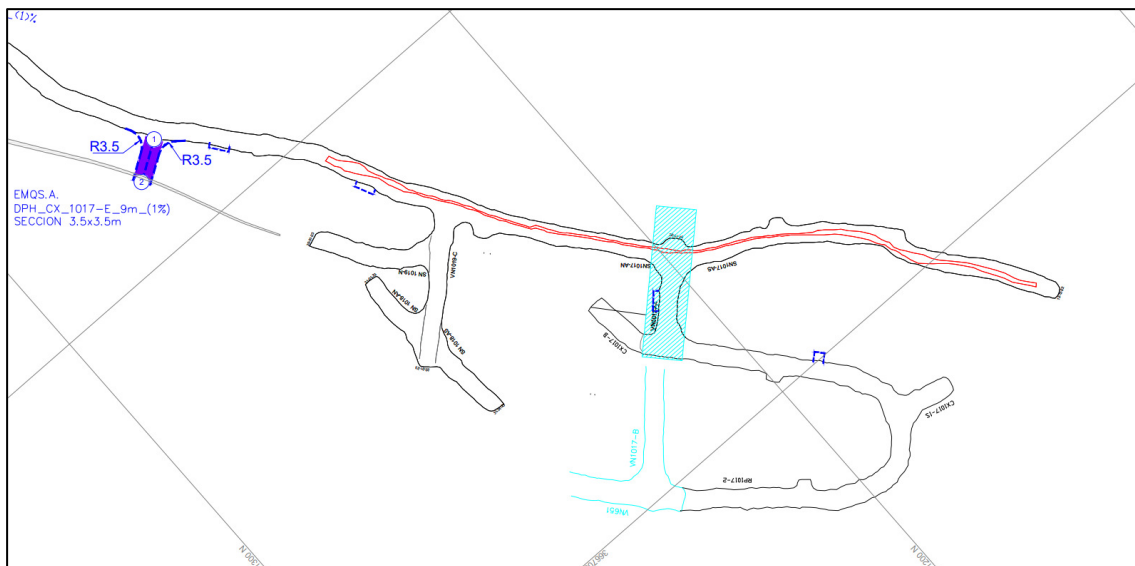
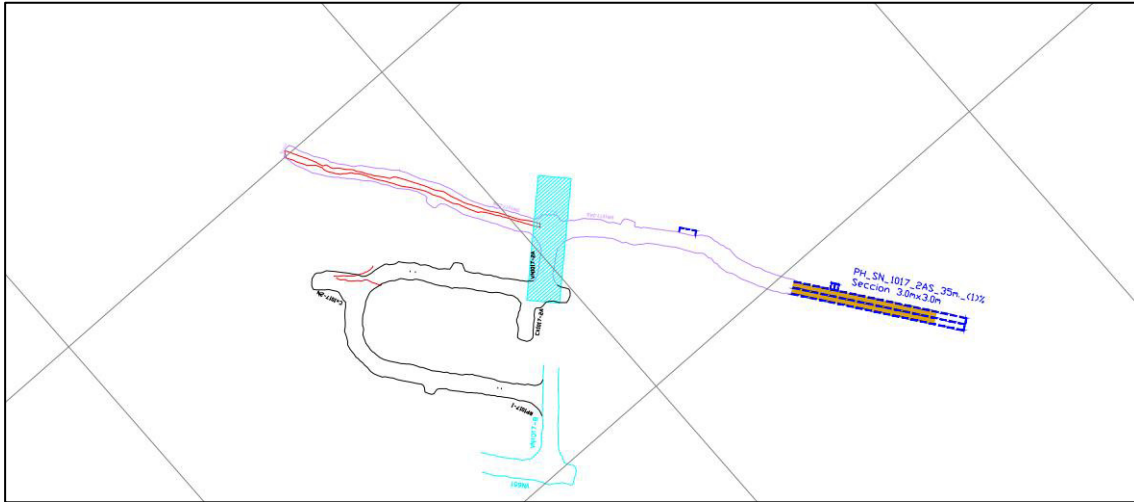
- túneles en roca. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139902>
- Nores, M. (2021). Un recorrido por las distribuciones de probabilidad. *Revista de Educación Matemática (RevEM)*, 36(2), 7–43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8832996>
- Nova, M., Sorza, E., & Zabala, L. (2023). *Distribuciones discretas de probabilidad: fórmulas de cálculo y problemas de aplicación*. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/ebf77652-a03f-47ae-9953-754461dd003c>
- Oh, C., Shin, J., & Ho, S. (2023). Conflicts between mining companies and communities: Institutional environments and conflict resolution approaches. *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, 32(2), 638–656. <https://doi.org/10.1111/beer.12522>
- Oraee, K., & Bangian, A. (2007). *Economic Comparison of Drilling Systems in Sublevel Stopping Method*. https://www.researchgate.net/publication/43770886_Economic_Comparison_of_Drilling_Systems_in_Sublevel_Stopping_Method
- Ortiz, J., & Emery, Y. (2004). *Categorización de recursos y reservas mineras*. https://www.researchgate.net/publication/311828465_Categorizacion_de_recursos_y_reservas_mineras
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Pinado, M. (2021). *El método Monte Carlo en la evaluación de la estabilidad física de taludes mineros de material granular*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7445>
- Pritsker, A., & O'Reilly, J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSim* (John Wiley & Sons (ed.)). https://books.google.com.pe/books?id=1bp2aT1KJsEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Ramírez, Y., Reymer, D., & Lanata, M. (2023). *Identificación y control de indicadores clave de desempeño en la planificación minera a corto plazo mediante la simulación Montecarlo con Crystal Ball* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/668810>
- Ramos, W. (2017). *Desarrollo de herramientas de diseño para minería por Sublevel Stopping y su impacto económico en un proyecto minero* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146656>
- Rodó, L. (2019). *Distribución normal*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html>
- Rodríguez, F., Castro, K., Huilipán, S., & Soto, D. (2013). *Incidencia de la visualización en la comprensión del concepto de distribución de datos* [Universidad del Bio-Bio]. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1848>

- Sabour, S., Dimitrakopoulos, R., & Kumral, M. (2008). Mine design selection under uncertainty. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 117(2), 53–64. 10.1179/174328608X343065
- Soles, E. (2020). *Aplicación de la simulación de Montecarlo en el análisis de riesgo de un proyecto de tratamiento de efluentes industriales*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Soporte de Minitab® 20. (n.d.). *Distribución de chi-cuadrada*. Soporte de Minitab® 20. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/distributions/chi-square-distribution/>
- Soporte de Minitab® 21. (n.d.-a). *Distribución binomial*. Soporte de Minitab® 21. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/distributions/binomial-distribution/>
- Soporte de Minitab® 21. (n.d.-b). *Distribución de Bernoulli*. Soporte de Minitab® 21. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/distributions/bernoulli-distribution/>
- Spanidis, P.-M., Roumpos, C., & Pavlidakis, F. (2021). A Fuzzy-AHP Methodology for Planning the Risk Management of Natural Hazards in Surface Mining Projects. *Sustainability*, 13(4), 1–23.
- The JORC Code. (2012). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*. https://www.jorc.org/docs/JORC_Code_2012_Spanish_translation_March_2018.pdf
- Toribio, C. (2019). *Minado por sub level stoping en vetas angostas para optimizar la rentabilidad del TJ 882 en la Compañía Minera Kolpa S.A. – Huancavelica – 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5190>
- Torres, V., & Rondon, D. (2023). *Optimización del plan de minado para la explotación subterránea y superficial en el largo plazo del proyecto Romina* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/671253>
- Turcios, R. A. S. (2015). T-Student. Usos y abusos. *Revista Mexicana de Cardiología*, 26(1), 59–61.
- Valencia, R. (2019). *Planeamiento de minado a corto plazo del mes de abril de 2013 en la Unidad Minera Arasi S.A.C. proyecto Jesica, ubicado en el distrito de Ocuvi, provincia de Lampa en el departamento de Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11408>
- Velásquez, S., & Velásquez, R. (2012). Modelado con variables aleatorias en simulink utilizando simulación montercarlo. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 16(64), 203–211.

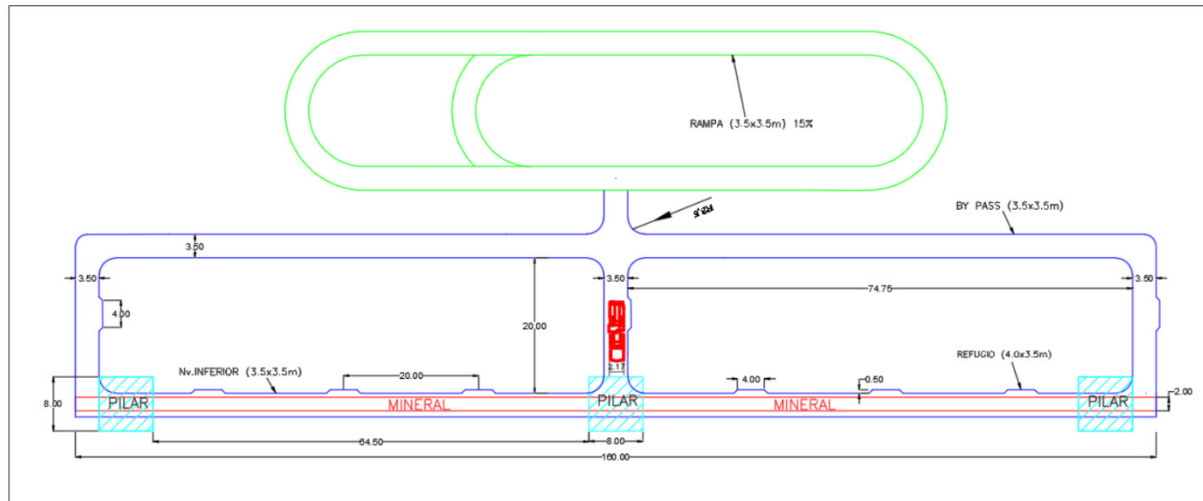
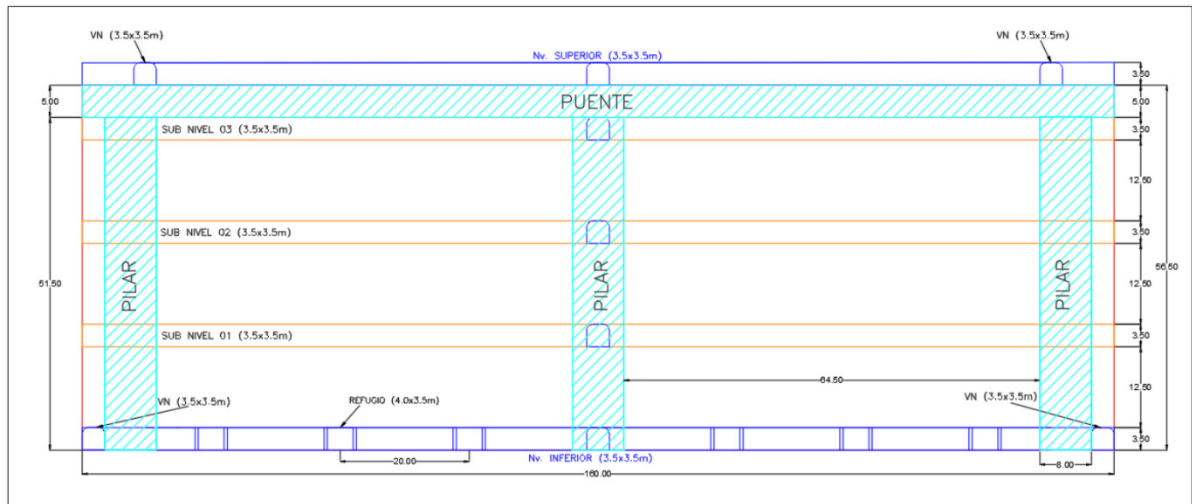
- Vergara, I. (2023). *Minería subterránea: Definición y ventajas*. Ingenium. <https://ingenium.edu.pe/blog/mineria/mineria-subterranea-definicion-y-ventajas/>
- Vergara, J. (2005). Aplicación de la simulación de Montecarlo en la planeación financiera. *Panorama Económico*, 13, 124–130.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (1998). *Probabilidad y estadística para ingenieros* (Pearson Educación (ed.); 6a ed.). https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9DWw696jLbMC&oi=fnd&pg=PR10&dq=+Distribución+uniforme:+Es+una+distribución+en+la+que+todos+los+valores+tienen+la+misma+probabilidad+de+ocurrencia.&ots=FYWbMIM1EN&sig=Ako_O_WPSGp9P06p4sM1qaNJ5g0#v=onepage&q=Distribución+uniforme
- Yana, R. (2014). *Planeamiento de minado a mediano y largo plazo Empresa Minera Santa Luisa S.A. proyecto Mina Atalaya* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/b796d05c-beb8-403f-95f8-1ead0a3d6edd>
- Zhang, J. (2020). Modern Monte Carlo methods for efficient uncertainty quantification and propagation: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 13(2). 10.1002/wics.1539

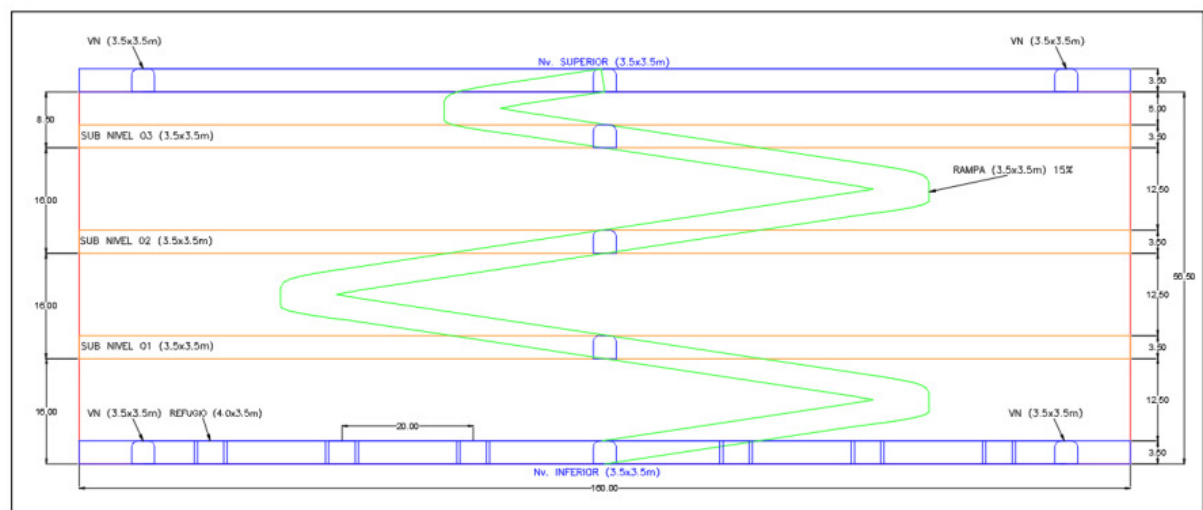
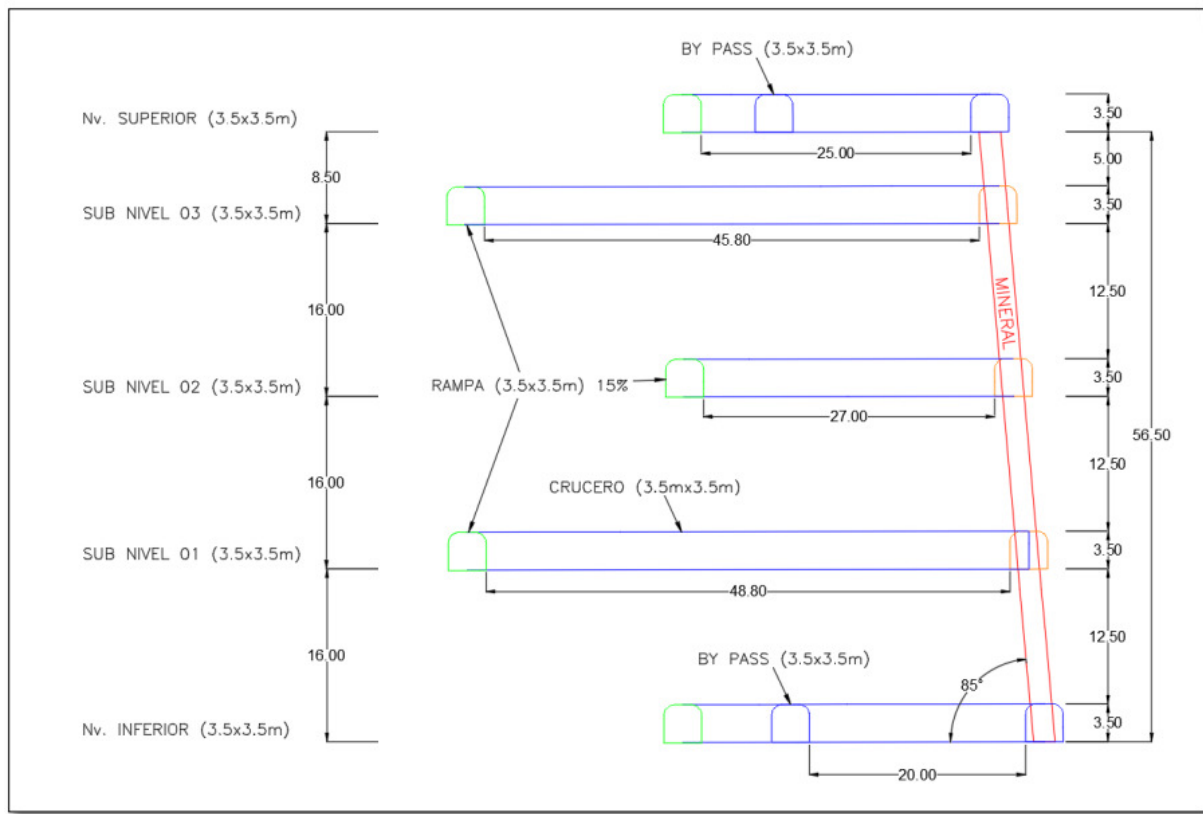
ANEXOS

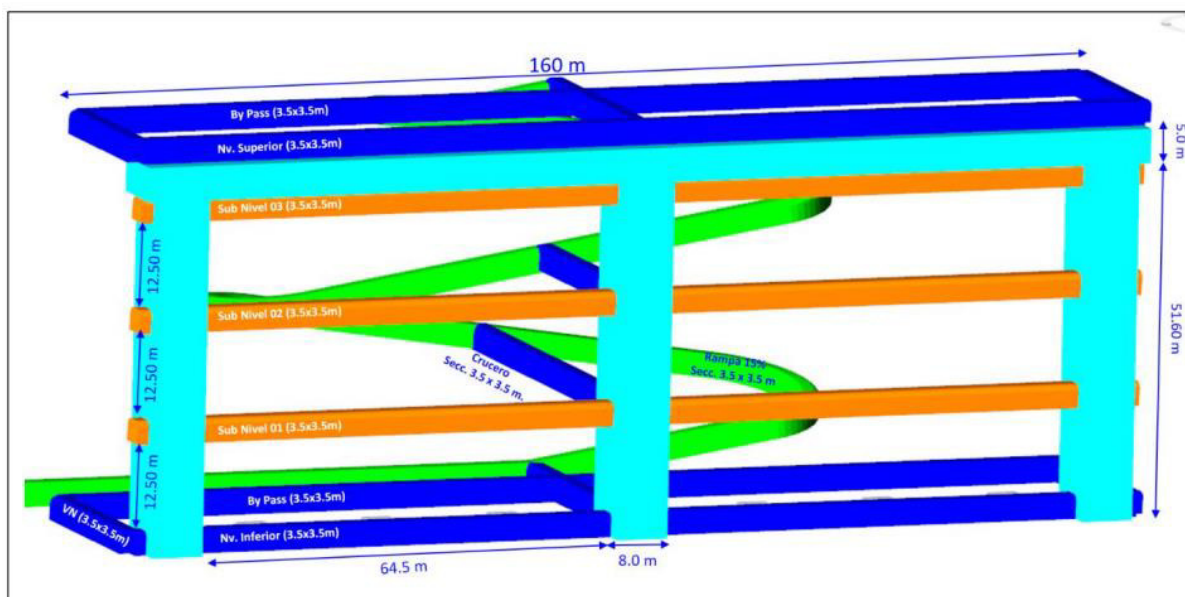
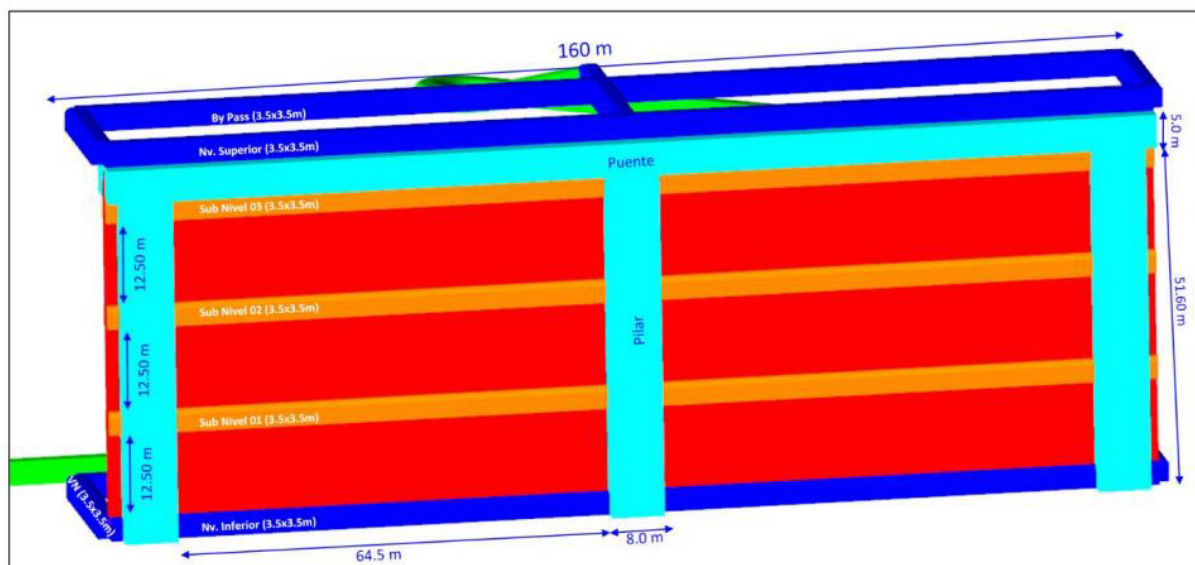
Anexo 1. Plano del TJ_1017

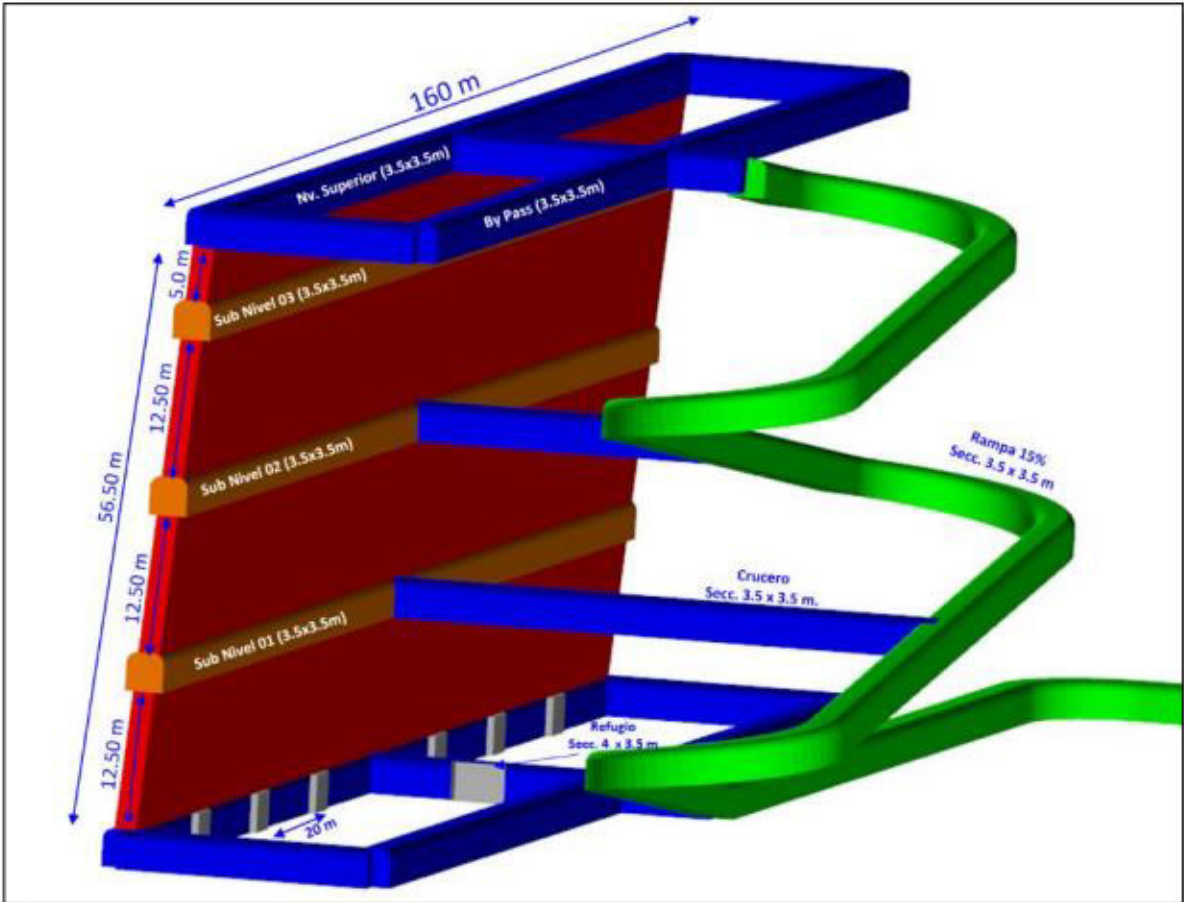


Anexo 2. Explotación por sublevel stoping para vetas

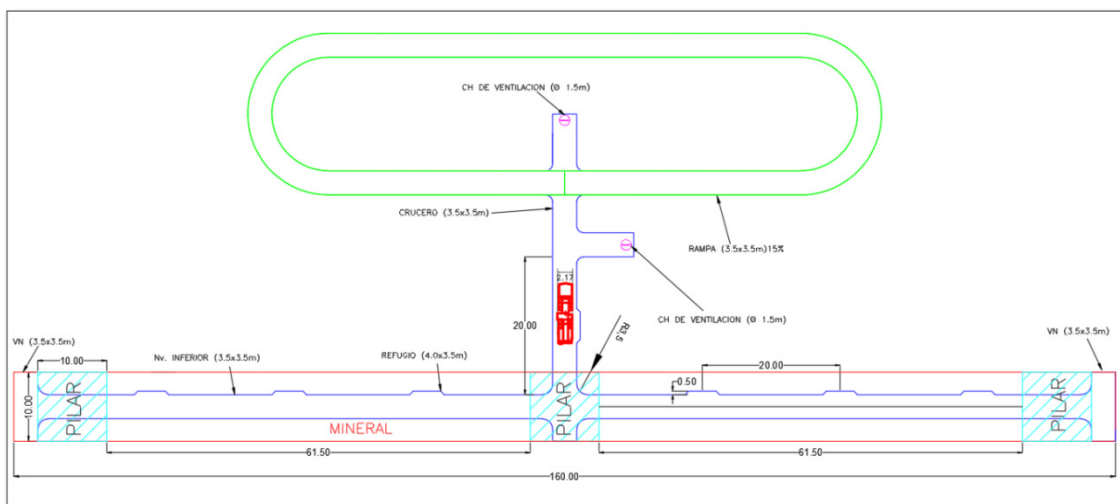
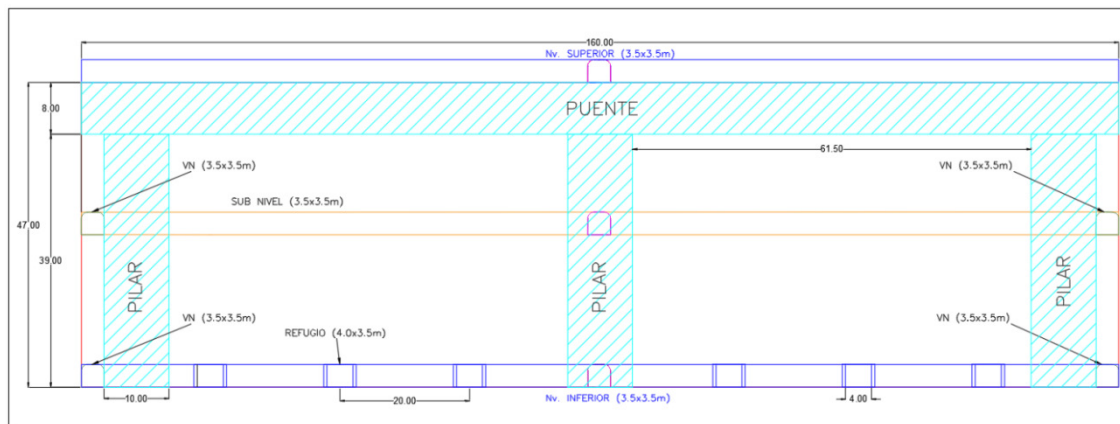


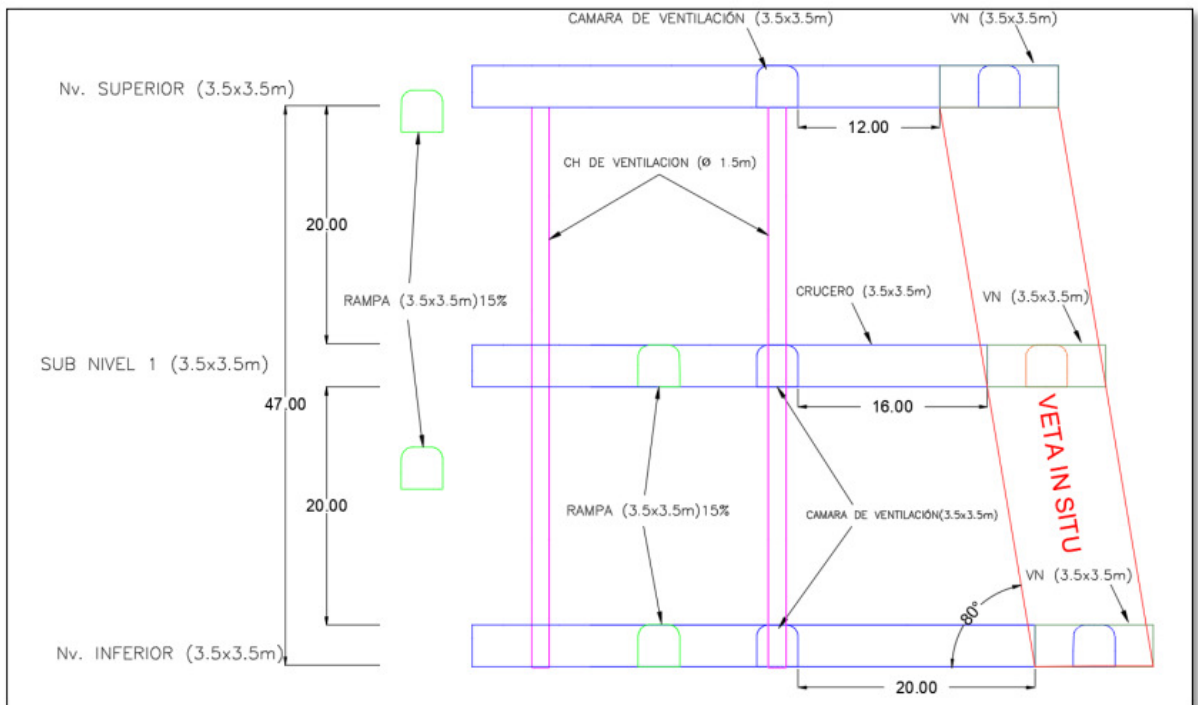
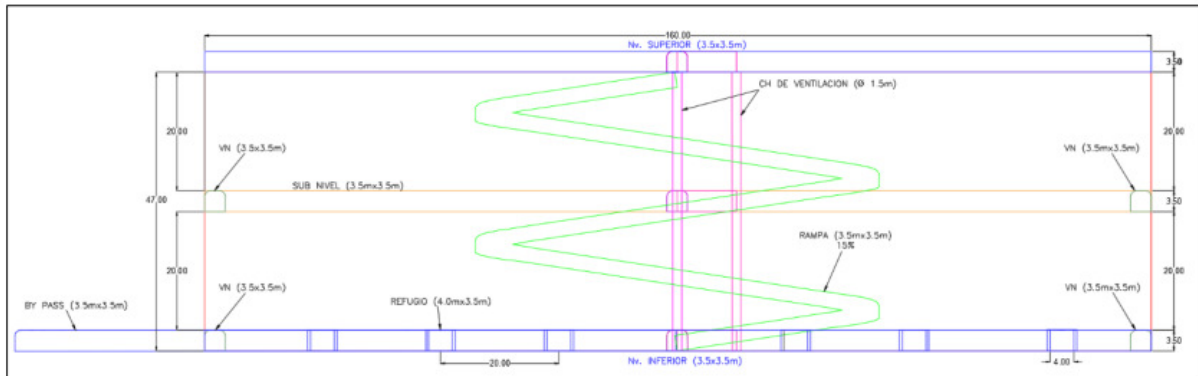


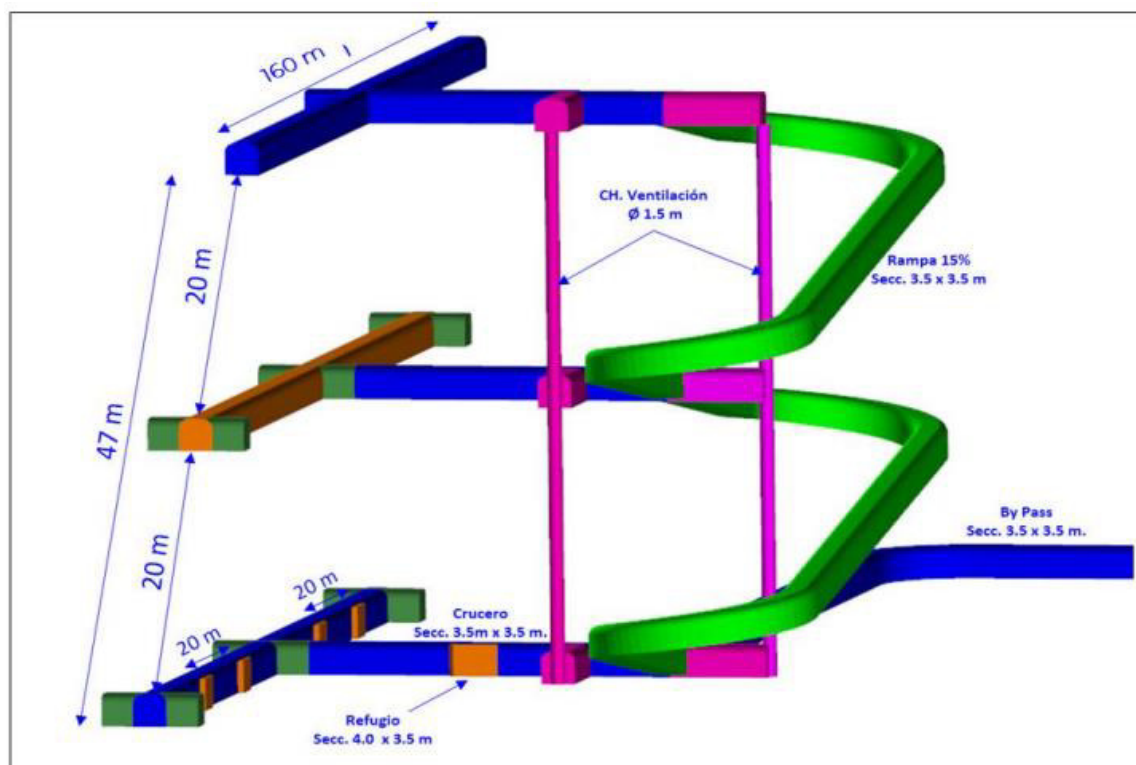
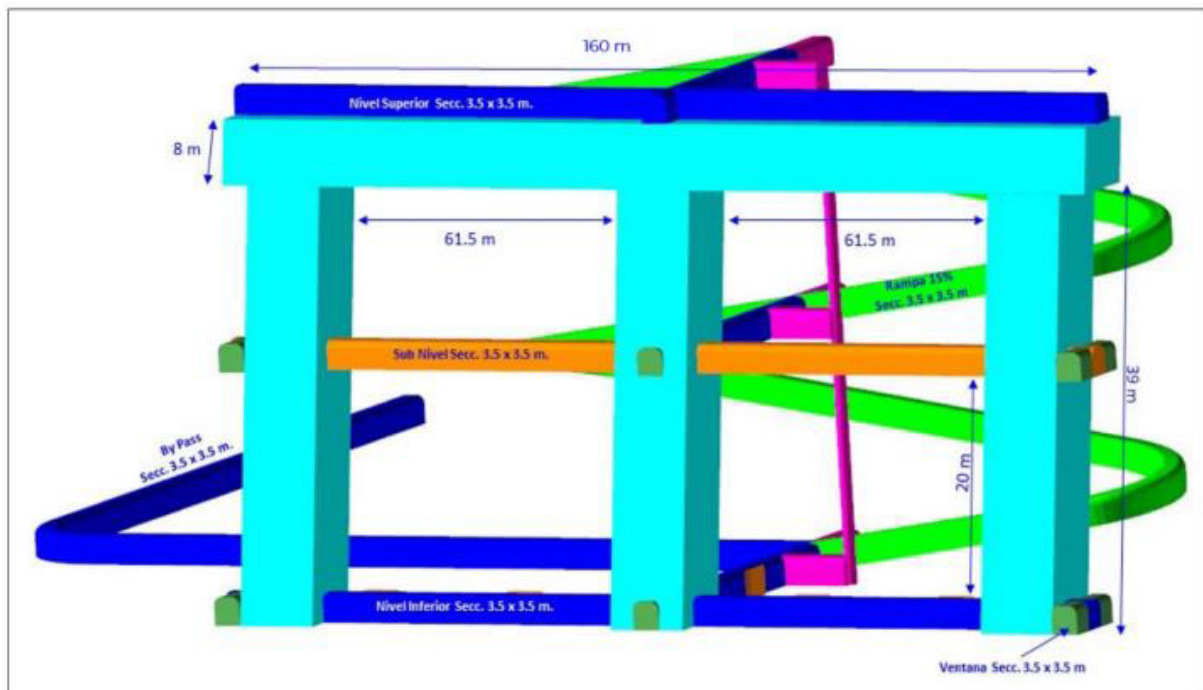


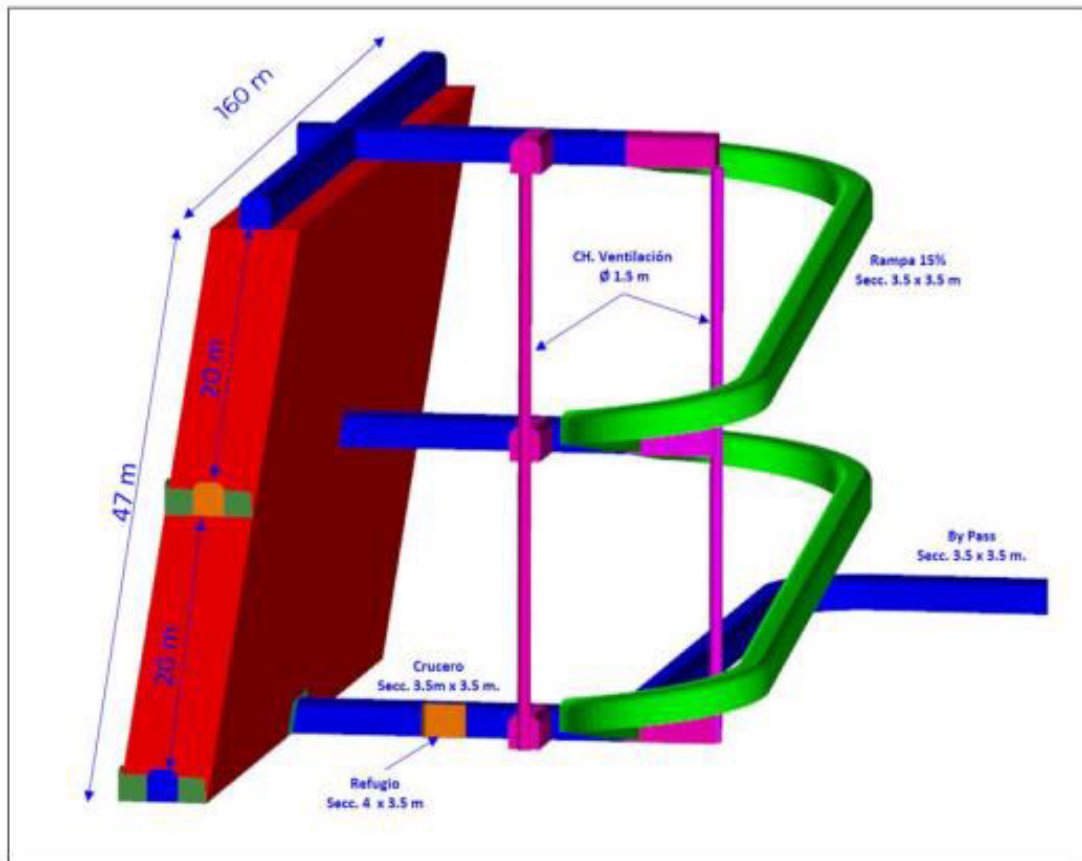


Anexo 3. Explotación por sublevel stopping para cuerpos









Anexo 4. Base de datos: toneladas por cuchara de scooptram

Fecha	Scoop	Tonelaje_c	Origen	Destino
12/12/2022	SC-1	4.28	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-2	4.89	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-3	4.96	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-4	4.51	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-1	4.47	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-2	4.39	TJ_1017	OP-10
12/12/2022	SC-3	4.66	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-4	4.54	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-1	5.02	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-2	4.79	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-3	4.51	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-4	4.79	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-1	4.16	TJ_1017	OP-10
13/12/2022	SC-2	4.75	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-3	4.04	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-4	4.41	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-1	4.62	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-2	4.93	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-3	4.42	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-4	4.38	TJ_1017	OP-10
14/12/2022	SC-1	4.66	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-2	5.1	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-3	4.52	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-4	4.27	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-1	4.93	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-2	4.98	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-3	4.4	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-4	4.56	TJ_1017	OP-10
15/12/2022	SC-1	4.3	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-2	4.09	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-3	4.43	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-4	5.11	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-1	4.55	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-2	4.87	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-3	4.2	TJ_1017	OP-10
16/12/2022	SC-4	4.4	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-1	4.52	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-2	4.75	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-3	4.94	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-4	4.48	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-1	4.95	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-2	4.54	TJ_1017	OP-10
17/12/2022	SC-3	4.79	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-4	4.9	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-1	4.53	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-2	4.84	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-3	4.4	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-4	4.44	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-1	4.25	TJ_1017	OP-10
18/12/2022	SC-2	4.56	TJ_1017	OP-10

Anexo 4. Carta de autorización de uso de información

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE INFORMACIÓN

Lima, 03 de febrero de 2023

Yo, Pablo de la Cruz identificado con DNI N° (completar), en mi calidad de Gerente General de la U.M. Yauliyacu de la empresa Alpayana S.A, con RUC N° 20100108292 ubicada en el distrito de Chicla Provincia de Huarochirí.

Otorgo la autorización al señor Roque Gonzales Mera identificado con DNI N° 70269657, bachiller de la carrera de Ingeniería de minas para que utilice la siguiente información de la empresa: Ciclos de acarreo, leyes de mineral de los tajos, recuperaciones metalúrgicas, precio proyectado de los metales y problemas operativos que afectan la productividad en la unidad minera.

La información mencionada será brindada con la finalidad que pueda desarrollar la tesis para optar el título profesional de Ingeniero de minas.

EMPRESA MINERA LOS QUENUALES S.A.
Unidad Yauliyacu


PABLO DE LA CRUZ
Gerente General