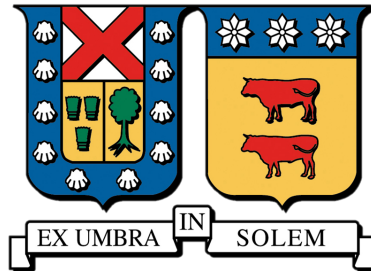


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



INTEGRACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO EN LA DEFINICIÓN DE SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

Autora:
María José Fernanda Duarte Cofré

Memoria de Título para optar al título profesional de:

Ingeniera Civil de Minas

Profesor Guía:
Ing. Gonzalo Nelis Suazo

Agradecimientos

A mis padres, Lilia y Camilo, por su amor y apoyo incondicional, por inculcarme desde pequeña la importancia del estudio y de soñar en grande. Sin su arduo trabajo y sacrificio a lo largo de los años, esto no habría sido posible. Eternamente agradecida por acompañarme en este largo camino, que en ocasiones parecía cuesta arriba, pero su aliento constante y fe en mí me llevaron a alcanzar la meta.

A mi hermana Renata, por su paciencia infinita durante mis años universitarios, por siempre hacer más amenas mis jornadas de estudio y por preparar esos ricos postres que fueron un alivio indispensable en las madrugadas de trabajo.

A toda mi familia, porque este logro es de todos.

A mi profesor guía, Gonzalo Nelis por su invaluable ayuda, su conocimiento y su apoyo durante este año. Gracias por brindarme tantas oportunidades y estar siempre dispuesto a guiarme cuando lo necesité.

A Sebastián, mi compañero de vida y eterno cómplice en este proceso. Desde el día uno tu presencia ha sido fuente de alivio en los momentos más difíciles. Gracias por sostenerme cuando lo necesité y nunca dejar de apoyarme hasta la recta final, sé que seguiremos caminando juntos.

A mis amigos y amigas por todas las risas y buenos momentos, siempre los llevaré conmigo.

INTEGRACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO EN LA DEFINICIÓN DE SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

Por: María José Fernanda Duarte Cofré

Resumen

Esta investigación desarrolla y valida un modelo matemático de optimización lineal diseñado para la planificación minera en operaciones subterráneas utilizando el método de sublevel stoping. El modelo integra tanto la velocidad de extracción como el peligro sísmico asociado, factores críticos cuya relación no es considerada en la creación de planes de producción, y se suele considerar sobre la marcha en la planificación minera actual. Aunque este enfoque convencional permite considerar conocimiento experto, resulta ineficiente ante la complejidad de las variables y restricciones involucradas. En contraste, el modelo propuesto ofrece una solución más sistemática, eficiente y adaptable a diversas configuraciones operativas.

La metodología del trabajo se realizó en tres etapas: una validación del modelo en un caso simplificado para evaluar su precisión, también con simulaciones controladas para analizar el impacto de parámetros clave como tasas de extracción y riesgo sísmico, y su aplicación en un caso realista con condiciones más representativas, considerando caserones de leyes variables y desarrollos de distintas longitudes.

En los resultados, se analiza cómo el modelo genera secuencias de extracción dinámicas y ajustadas a las restricciones operativas, permitiendo una evaluación detallada de los efectos de las configuraciones de parámetros. Además, se presentan planes de producción que reflejan la capacidad del modelo para equilibrar los objetivos económicos con la estabilidad operativa, destacando su potencial para generar estrategias eficientes y seguras en minería subterránea.

El modelo fue testeado en el caso realista, que contempló un diseño con 55 caserones y distintos niveles de peligro sísmico. Los resultados indicaron que el VAN puede incrementarse en un 11 % y el tiempo total de extracción reducirse en un 13 % al ajustar los parámetros relacionados con el riesgo sísmico en el programa, demostrando así el impacto directo de estas configuraciones en la planificación minera.

Este estudio contribuye a la planificación al demostrar la relevancia de los modelos matemáticos en la optimización de operaciones subterráneas. Asimismo, se plantea la posibilidad de futuros desarrollos que integren variables adicionales, como la fortificación del macizo rocoso, para avanzar hacia prácticas mineras más seguras, sostenibles y rentables.

INTEGRATION OF SEISMIC HAZARD IN THE DEFINITION OF EXTRACTION SEQUENCE

By: María José Fernanda Duarte Cofré

Abstract

This study develops and validates a mathematical optimization model designed to enhance mine planning in underground operations utilizing the sublevel stoping method. The model incorporates seismic hazard and extraction rates as critical variables, factors traditionally overlooked in manual mine planning. While conventional methods allow for expert knowledge integration, they often fall short in addressing the complexity of operational restrictions and variables. In contrast, the proposed model offers a systematic and efficient approach capable of adapting to diverse configurations.

The methodology consisted of three main stages: first, the model was validated in a simplified scenario with a reduced number of stopes and developments to ensure its alignment with the defined constraints and objectives. Then, controlled simulations were performed, varying key parameters such as extraction rates and maximum tonnage limits to evaluate their impact on production plans. Finally, the model was applied to a realistic case study, incorporating stopes with variable grades and developments of different lengths to examine its adaptability to more complex and representative operational conditions.

The model was tested in the realistic case study, which included a design with 55 stopes and various levels of seismic hazard. Results showed that by adjusting the seismic hazard parameters, the Net Present Value (NPV) could increase by 11 % and the total extraction time could decrease by 13 %, demonstrating the significant impact of these configurations on mine planning.subterránea.

This research highlights the importance of integrating advanced mathematical tools into underground mine planning. By enabling a more detailed analysis of operational constraints and economic objectives, this approach represents a substantial step forward in designing extraction strategies. The model's ability to generate dynamic production plans tailored to diverse operational setups reinforces its potential as a key tool to optimize efficiency and sustainability in modern mining operations.

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Introducción General	8
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Ojetivo general	9
1.2.2. Objetivos específicos	9
1.3. Alcances	9
1.3.1. Alcances	9
2. Antecedentes	10
2.1. Sublevel stoping	10
2.1.1. Secuenciamiento de caserones	11
2.2. Modelos de optimización	14
2.2.1. Peligro sísmico	17
3. Metodología	20
3.1. Metodología	20
3.2. Modelo propuesto	21
3.2.1. Sets	21
3.2.2. Parámetros	21
3.2.3. Variables de decisión	22
3.2.4. Función objetivo	23
3.2.5. Restricciones	23
4. Resultados y discusión	26
4.1. Resultados preliminares	26
4.1.1. Variación 1: Tasas de extracción S	30
4.1.2. Variación 2: Límite de probabilidad máxima $Prob$	31
4.1.3. Variación 3: Tonelaje por periodo T	32
4.1.4. Variación 4: Avance de desarrollos por periodo T	32
4.2. Análisis de los resultados preliminares	33
4.2.1. Caso 1: Variación de tasas de extracción (S)	33
4.2.2. Caso 2: Variación de límite de probabilidad máxima ($Prob$)	34
4.2.3. Caso 3: Variación de tonelaje máximo	34
4.2.4. Caso 4: Variación de límite de desarrollos por periodo.	35
4.3. Resultados realistas	36

4.3.1. Diseño de mina	36
4.3.2. Cubicación de caserones y desarrollos	37
4.3.3. Restricciones	39
4.3.4. Plan de producción	40
5. Conclusiones	46
A. Anexos	47
1. Caserones por periodo simulación A en variación de tasas de extracción . . .	47
2. Caserones por periodo simulación B en variación de tasas de extracción. . .	49
3. Caserones por periodo simulación E en variación de probabilidad máxima sísmica.	51
4. Caserones por periodo simulación F en variación de probabilidad máxima sísmica.	53
5. Caserones por periodo simulación H en variación de probabilidad máxima sísmica.	55
6. Tonelaje por periodo simulación I en variación de tonelaje máximo.	57
7. Tonelaje por periodo simulación L en variación de tonelaje máximo.	58
8. Desarrollos por periodo simulación M en variación de límite de desarrollos por periodo	59
9. Desarrollos por periodo simulación N en variación de límite de desarrollos por periodo	62
10. Desarrollos por periodo simulación O en variación de límite de desarrollos por periodo	65
11. Caserones por periodo simulación 1.	68
12. Caserones por periodo simulación 2.	69
13. Caserones por periodo simulación 3.	70
14. Caserones por periodo simulación 4.	71

Índice de figuras

2.1. Vista isométrica caserón. (Villaescusa 2014)	11
2.2. Vista tridimensional de un corte inicial utilizado para habilitar el secuenciamiento ascendente en sublevel stoping. (Villaescusa 2014) (Imagen de WMC Resources, Kalgoorlie, Australia).	12
2.3. Vista longitudinal de secuenciamiento ascendente con pilares. (Villaescusa 2014).	12
2.4. Dilución planeada y no planeada. (Scoble y Moss 1994).	13
2.5. Flujo de material en caso de estudio de Nehring.	15
2.6. Flujo de red aplicado a la planificación minera. (Epstein 2012)	16
2.7. Secuencia de extracción entregada como resultado: (a) secuencia de extracción de caserones por periodo, y (b) ley de oro por caserón. (Furtado e Faria 2021)	17
2.8. Elevación media de eventos sísmicos y momento sísmico acumulado	18
2.9. Ejemplo de evolución temporal de sectores Vanesa y Margot.	18
4.1. Precedencias establecidas para zona 1.	26
4.2. Precedencias establecidas para zona 2.	27
4.3. Precedencias establecidas para zona 3.	27
4.4. Modelo de optimización con número acotado de caserones.	28
4.5. Evaluación de peligro sísmico para Mina Raura	29
4.6. Peligro asociado por rangos en toneladas para versión A de tasas de extracción..	30
4.7. Peligro asociado por rangos en toneladas para versión B de tasas de extracción.	31
4.8. Caso de estudio realista ilustrado.	37
4.9. Zonas ilustradas según características económicas por colores.	38
4.10. Restricciones de precedencia por colores.	39
4.11. Secuencia de producción de simulación 1.	41
4.12. Secuencia de producción de simulación 2.	43
4.13. Secuencia de producción de simulación 3.	44
4.14. Secuencia de producción de simulación 4.	45
A.1. Tonelaje por periodo de simulación I.	57
A.2. Tonelaje por periodo simulación L.	58

Índice de cuadros

4.1. Versión A de tasas de extracción para modelo de optimización.	30
4.2. Versión B de tasas de extracción para modelo de optimización.	31
4.3. Simulaciones con variación en las tasas de extracción.	33
4.4. Resultados variación de tasas de extracción.	33
4.5. Simulaciones con variación en el límite de probabilidad sísmica.	34
4.6. Resultados variación límite de probabilidad máxima.	34
4.7. Simulaciones con variación en el tonelaje de extracción máximo permitido. .	35
4.8. Resultados variación de tonelaje de extracción máximo permitido.	35
4.9. Simulaciones con variación en el límite de avance de desarrollos por periodo.	36
4.10. Resultados variación de límite de avance de desarrollos por periodo.	36
4.11. Características económicas por colores.	38
4.12. Características de zonas y precedencias por colores.	40
4.13. Datos de entrada para simulación 1.	41
4.14. Resultados simulación 1.	41
4.15. Datos de entrada para simulación 2.	42
4.16. Resultados simulación 2.	42
4.17. Datos de entrada para simulación 3.	43
4.18. Resultados simulación 3.	43
4.19. Datos de entrada para simulación 4.	44
4.20. Resultados simulación 4.	44
A.1. Caserones por periodo de simulación A.	48
A.2. Caserones por periodo de simulación B	50
A.3. Caserones por periodo de simulación E.	52
A.4. Caserones por periodo de simulación F.	54
A.5. Caserones por periodo de simulación H.	56
A.6. Desarrollos por periodo de simulación M.	61
A.7. Desarrollos por periodo de simulación N.	64
A.8. Desarrollos por periodo de simulación O.	67
A.9. Caserones por periodo de simulación 1.	68
A.10. Caserones por periodo de simulación 2.	69
A.11. Caserones por periodo de simulación 3.	70
A.12. Caserones por periodo de simulación 4.	71

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción General

En minería subterránea, existe considerable evidencia de que las velocidades de extracción de mineral impactan significativamente el macizo rocoso, pudiendo desencadenar eventos sísmicos. Este fenómeno, conocido como sismicidad inducida, se presenta cuando la actividad minera profundiza y aumenta el campo tensional en el macizo rocoso. Factores como las condiciones geológicas y estructurales de la roca agravan este fenómeno, que en casos extremos se manifiesta como estallidos de roca. Dichos eventos no solo representan un riesgo crítico para la seguridad de los trabajadores, sino que también pueden ocasionar interrupciones operacionales, pérdidas económicas y daños en la infraestructura minera.

A pesar de que la relación entre velocidad de extracción y peligro sísmico es conocida, esta suele ser abordada de manera reactiva y operativa, sin integrarse de forma proactiva en las etapas tempranas de la planificación minera. Este enfoque puede limitar la capacidad de las operaciones subterráneas para anticiparse a riesgos y optimizar los planes de producción bajo condiciones seguras y sostenibles.

La planificación minera, una disciplina esencial en la industria. Tradicionalmente se ha basado en cálculos manuales que, aunque permiten incorporar conocimiento experto, pueden ser ineficientes ante escenarios complejos. En los últimos años, los modelos de programación lineal han ganado relevancia al automatizar la toma de decisiones y reducir problemas asociados con la planificación manual. No obstante, los modelos existentes frecuentemente omiten considerar el factor de peligro sísmico. El presente estudio propone un modelo de optimización lineal aplicado a sublevel stoping, que integra el impacto de las velocidades de extracción en la estabilidad del macizo rocoso. A través de su validación en escenarios de validación y reales, se busca que este modelo que incorpora el peligro sísmico en planes de producción desarrolle estrategias que ayuden a mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

1.2. Objetivos

1.2.1. Ojetivo general

- Cuantificar el impacto del riesgo sísmico en los planes de producción y desarrollo en sublevel stoping mediante un modelo de programación matemática.

1.2.2. Objetivos específicos

- Validar los resultados del modelo en un caso de estudio controlado.
- Aplicar el modelo en un caso de estudio realista, evaluando el efecto de restricciones de riesgo sísmico en la secuencia de producción y desarrollo.
- Analizar la solución óptima del modelo para determinar la relación entre la velocidad de extracción y el riesgo sísmico en sublevel stoping en terminos de VAN y tiempo de ejecución del plan de extracción.

1.3. Alcances

1.3.1. Alcances

- Se trabajará en faenas de sublevel stoping.
- No se modelarán riesgos de peligro sísmico y se usará información ya disponible.
- No se considerarán otros tipos de riesgos geomecánicos.
- Se generarán planes de producción a nivel de mediano plazo.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Sublevel stoping

El método de cámaras por subniveles, también conocido como sublevel stoping es el más utilizado en Chile (Molina [2013](#)). Se caracteriza por ser una técnica de explotación minera subterránea utilizada en yacimientos de características específicas.

Este método se adapta particularmente bien a depósitos minerales verticales o semivericales, con un buzamiento muy pronunciado (mayor al ángulo de reposo) y cuerpos mineralizados de media a gran potencia. Además, es fundamental que tanto la roca de caja como el mineral sean competentes y resistentes, y que los límites del mineral sean regulares para mantener una dilución baja. (Rojas [2016](#))

Para desarrollar el sublevel stoping se crean caserones de gran dimensión mediante labores de perforación y tronadura. La arquitectura de este procedimiento incluye la construcción del caserón dentro del cuerpo mineralizado y la orientación de estos puede ser longitudinal, cuando la potencia del yacimiento no sobrepasa el ancho del caserón, o transversal cuando la dirección del retroceso es perpendicular al rumbo del cuerpo mineral. (Molina [2013](#)).

Las labores de desarrollo y preparación en minería tienen como objetivo principal proporcionar acceso al cuerpo mineral, lo que permite definir las unidades básicas de explotación y facilitar su extracción. En el nivel superior del caserón, existen galerías de perforación desde donde se realizan las perforaciones descendentes, mientras que en el nivel inferior se encuentran las galerías, estocadas y piques.

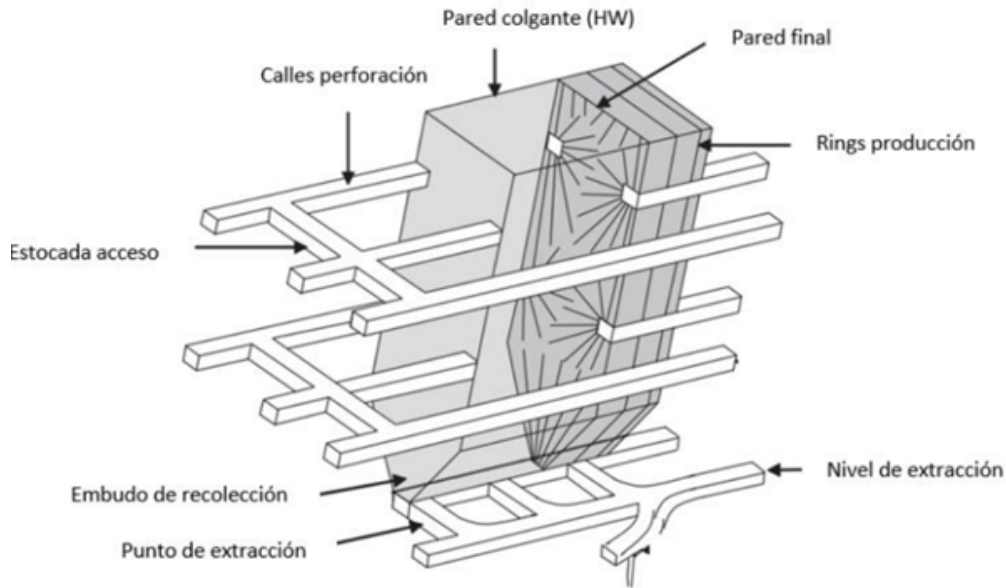


Figura 2.1: Vista isométrica caserón. (Villaescusa 2014)

En sublevel stoping, la planificación de un plan de producción implica la consideración de múltiples variables que se relacionan entre sí. Entre estos se encuentran la estimación de reservas, el diseño de pilares y subniveles, las secuencias globales de extracción, los sistemas de manejo de mineral, y las necesidades de ventilación y relleno. Estas variables deben ser analizadas en conjunto para garantizar la estabilidad del macizo rocoso, la continuidad operativa, y la rentabilidad económica. (Villaescusa 2014)

Una correcta planificación del secuenciamiento de extracción es fundamental para alcanzar los objetivos de producción durante la vida útil del yacimiento. Habitualmente esta secuencia está determinada por la ley del mineral, los requisitos operativos y los esfuerzos inducidos. (Potvin y Hudyma 2000)

2.1.1. Secuenciamiento de caserones

El secuenciamiento adecuado de los caserones es vital para maximizar la estabilidad del macizo rocoso durante la extracción. Aunque la literatura sobre criterios de estabilidad específicos para el análisis del secuenciamiento es limitada, los estudios existentes, como los de (Martin y Kaiser 2003) y (Henning y Mitri 2007), demuestran la importancia de considerar variables críticas como la orientación del tensor de esfuerzos, la razón de aspecto y la inclinación del caserón. Algunos factores y estrategias a considerar en la planificación del secuenciamiento son:

- **Secuencia ascendente:** En el método de *sublevel stoping*, la extracción generalmente se realiza de manera ascendente. Esta estrategia aprovecha la gravedad para que el material extraído de los niveles superiores caiga hacia los inferiores, facilitando su recolección y transporte. Sin embargo, este tipo de secuencia no es la única posible.

En cuerpos mineralizados muy diseminados o con geometrías particulares, pueden aplicarse otras secuencias que se adapten mejor a las características del yacimiento, sin necesariamente seguir un orden ascendente estricto.

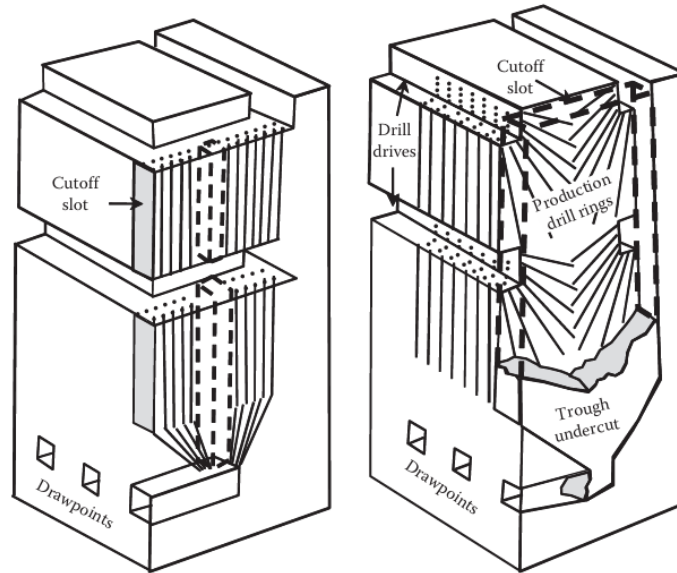


Figura 2.2: Vista tridimensional de un corte inicial utilizado para habilitar el secuenciamiento ascendente en sublevel stoping. (Villaescusa 2014) (Imagen de WMC Resources, Kalgoorlie, Australia).

- **Manejo de pilares:** Entre los caserones adyacentes se dejan pilares de mineral que actúan como soportes estructurales. Estos pilares pueden ser recuperados en una etapa posterior de la explotación, una vez que las cámaras contiguas hayan sido rellenadas y puedan contribuir al sostenimiento del macizo rocoso.

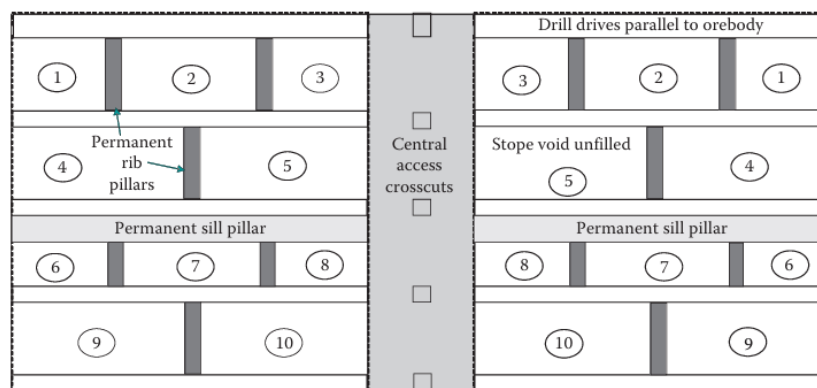


Figura 2.3: Vista longitudinal de secuenciamiento ascendente con pilares. (Villaescusa 2014).

- **Control de dilución y recuperación:** La regularidad de los límites del cuerpo mine-

realizado es esencial para minimizar la dilución y maximizar la recuperación del mineral. Un buen secuenciamiento debe considerar estos factores para diseñar esquemas de perforación precisos, donde los barrenos se realicen enteramente dentro del mineral, evitando así la inclusión de material estéril.

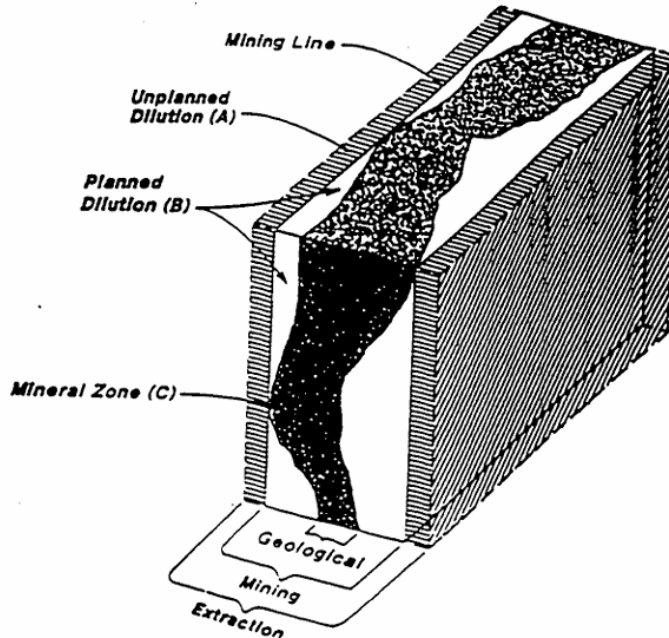


Figura 2.4: Dilución planeada y no planeada. (Scoble y Moss 1994).

- **Orden de desarrollo de labores:** Es ideal considerar el orden de desarrollo de las labores para asegurar que los caminos hacia los caserones estén disponibles cuando se necesiten. Esto implica planificar las rutas de acceso y los servicios necesarios, de manera que coincidan con el progreso de la explotación. Un buen orden de desarrollo minimiza el tiempo y los costos asociados con el desplazamiento y mejora la eficiencia operativa.
- **Secuencia de explotación de otros caserones:** La planificación debe tener en cuenta el orden de explotación de los caserones adyacentes o cercanos. La secuencia debe ser tal que se mantenga la estabilidad estructural y se optimice el uso de los recursos y equipos. Además, la secuencia debe evitar la creación de áreas inestables o propensas a colapsos.
- **Velocidad de explotación:** La velocidad a la cual se explotan los caserones también es un factor crítico. Una extracción demasiado rápida puede desestabilizar el macizo rocoso, mientras que una velocidad demasiado lenta puede resultar en ineficiencias y costos adicionales. La velocidad debe ser tal que permita un control adecuado del entorno geotécnico y un flujo constante de mineral.
- **Peligro sísmico:** El peligro sísmico es otro factor que debe ser considerado en el secuenciamiento, aunque no es comúnmente estudiado. Las operaciones mineras pueden

inducir sismicidad, y es esencial planificar las actividades para minimizar este riesgo. Esto incluye evitar la concentración de esfuerzos en áreas críticas y monitorear constantemente la actividad sísmica para ajustar las operaciones según sea necesario.

2.2. Modelos de optimización

La planificación minera tradicionalmente ha sido abordada mediante cálculos manuales, que, si bien permiten incorporar el conocimiento experto, también pueden tender a ser ineficientes para analizar gran cantidad de variables y restricciones. Es por ello por lo que, en los últimos años, debido a la existencia de múltiples variables, restricciones y objetivos en la planificación de un proyecto, es común resolver las problemáticas y establecer el plan de acción utilizando programas lineales.

Un modelo de optimización lineal es un método matemático de resolución de problemas que busca optimizar (maximizar o minimizar) un resultado seleccionando los valores de un conjunto de variables de decisión, respetando restricciones de recursos y condiciones técnicas. (Boirivant 2008). Estos programas representan de manera matemática los problemas de optimización, definidos por una función objetivo y restricciones específicas. Sin embargo, la complejidad aumenta al considerar múltiples fuentes de incertidumbre y variables, lo que hace que la resolución tradicional sea difícil. Por ello, se recurre a la implementación del algoritmo Simplex, que permite resolver eficientemente los problemas de programación lineal.

Son varios los autores que han implementado modelos de optimización lineal en el área minera en sublevel stoping. Por ejemplo, (Trout 1995) desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta (MIP) con el objetivo de maximizar el Valor Actual Neto (VAN), integrando múltiples variables operativas y restricciones, como la secuencia de operación y la calidad de la producción. Este modelo analizó cómo las condiciones geomecánicas y el diseño de las minas influían en la eficiencia de extracción, logrando un aumento significativo del VAN en comparación con métodos manuales, obteniendo como resultado la optimización de la secuencia de extracción, lo que permitió una mejor asignación de recursos y mayores beneficios económicos.

(Nehring 2010) amplió el enfoque de el modelo de Trout al desarrollar un modelo dinámico para la programación de producción a corto plazo, también utilizando programación lineal entera mixta. El objetivo principal fue minimizar la desviación respecto a las metas de producción, incorporando restricciones como capacidad de los equipos, secuencias de extracción naturales y disponibilidad de recursos. Este modelo destacó por su capacidad de adaptarse rápidamente a condiciones cambiantes y reasignar equipos de manera eficiente. Los resultados mostraron una mejora del 6,5 % en la precisión de las metas de producción, generando soluciones óptimas en menos de un minuto. La figura 2.5 representa cómo los modelos de optimización abordan la complejidad de las operaciones mineras. Este esquema muestra el flujo de material en la operación conceptual del modelo, destacando los puntos clave de transferencia, como los caserones, las rutas de transporte subterráneo y el triturador principal.

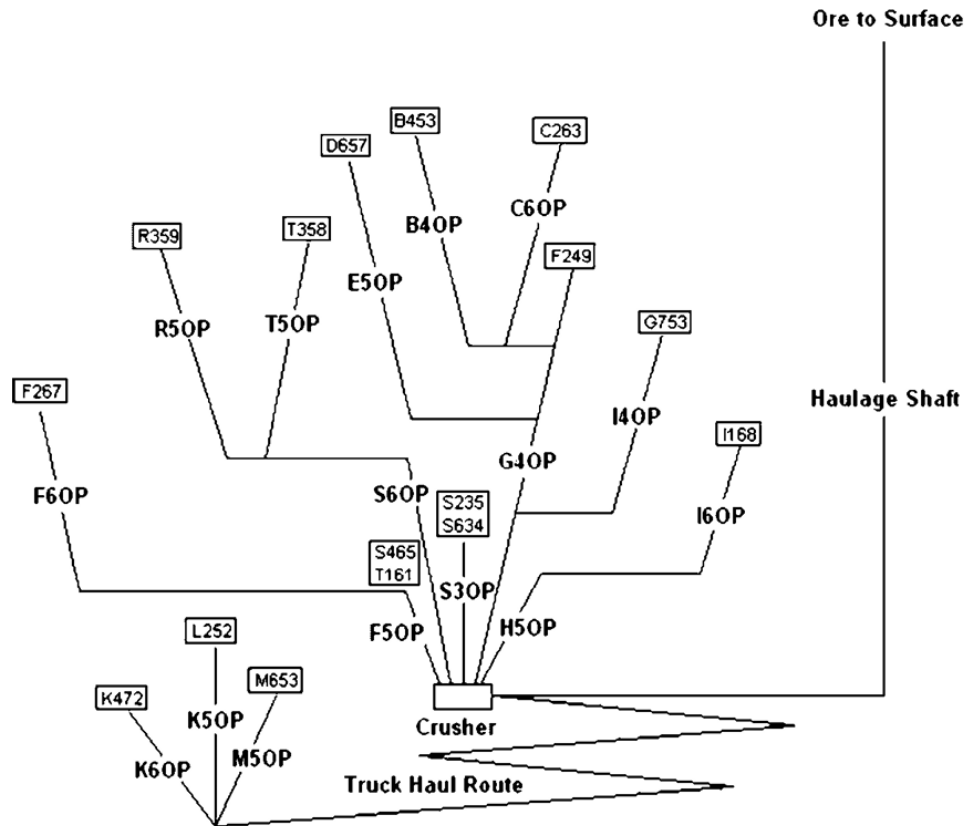


Figura 2.5: Flujo de material en caso de estudio de Nehring.

(Epstein 2012) desarrolló un modelo para maximizar el valor presente neto de la producción minera a largo plazo con restricciones operativas y físicas. Este modelo integró procesos de extracción en minas subterráneas y a cielo abierto, junto con las plantas de procesamiento que comparten múltiples yacimientos. Entre las características del modelo, se destacan la consideración de restricciones como capacidades de transporte y procesamiento, limitaciones ambientales, y la necesidad de balancear la producción entre diferentes etapas de la cadena de suministro. Un resultado significativo fue el aumento del 8 % en el VAN en pruebas realizadas en la División Norte de Codelco, de los un 5 % se atribuye a la optimización del modelo. En la Figura 2.6 se representa el flujo de material desde la extracción en minas subterráneas y a cielo abierto hasta las plantas de procesamiento. Cada nodo del diagrama simboliza etapas clave como puntos de extracción, trituración, transporte y procesamiento final, mientras que los arcos indican los flujos de material, asociados con capacidades y costos. Así ilustra cómo el modelo optimiza la asignación de recursos entre minas y plantas, destacando la importancia de integrar todas las etapas de la operación para maximizar la eficiencia y el valor económico.

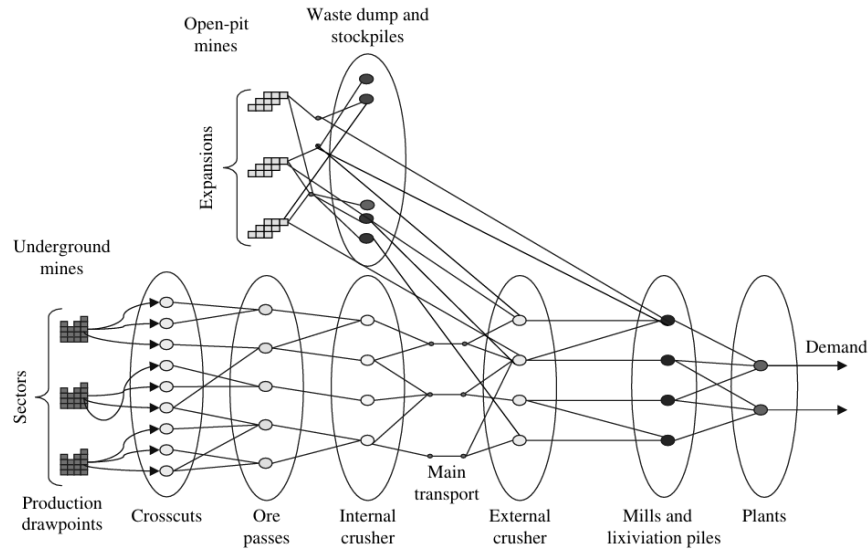


Figura 2.6: Flujo de red aplicado a la planificación minera. (Epstein 2012)

Por otro lado, (Campeau 2020) asignar eficientemente recursos y maximizar la producción en periodos cortos de tiempo con su modelo. El modelo utiliza programación lineal entera mixta, lo que permite interrumpir y reasignar actividades para mejorar la flexibilidad y eficiencia. Entre las características clave, el modelo considera restricciones en los equipos, los trabajadores y las relaciones de precedencia, aunque no aborda incertidumbres geológicas o económicas directamente. El modelo permitió reducir los tiempos de inicio de producción hasta en un 32.5 % en escenarios de alta complejidad.

Y (Furtado e Faria 2021) desarrollan un modelo para integrar el diseño de caserones y la programación de la producción a largo plazo en minas subterráneas con incertidumbre en la ley del mineral. El objetivo principal fue maximizar el Valor Actual Neto (VAN), reducir costos de desarrollo y manejar riesgos asociados al incumplimiento de metas de producción. Consideró restricciones geotécnicas, capacidades de transporte y procesamiento, y utilizando simulaciones geoestadísticas incorporó la variabilidad del yacimiento, lo que lo hace más robusto frente a incertidumbres en comparación con métodos secuenciales. Su implementación logró un aumento del 11 % en el VAN y una reducción de dos años en la vida útil de la mina al compararse con métodos tradicionales. La Figura 2.7 ilustra el diseño y secuencia de extracción de caserones, destacando cómo el modelo mejora la eficiencia operativa al alinear el diseño con las metas de producción y las restricciones geotécnicas.

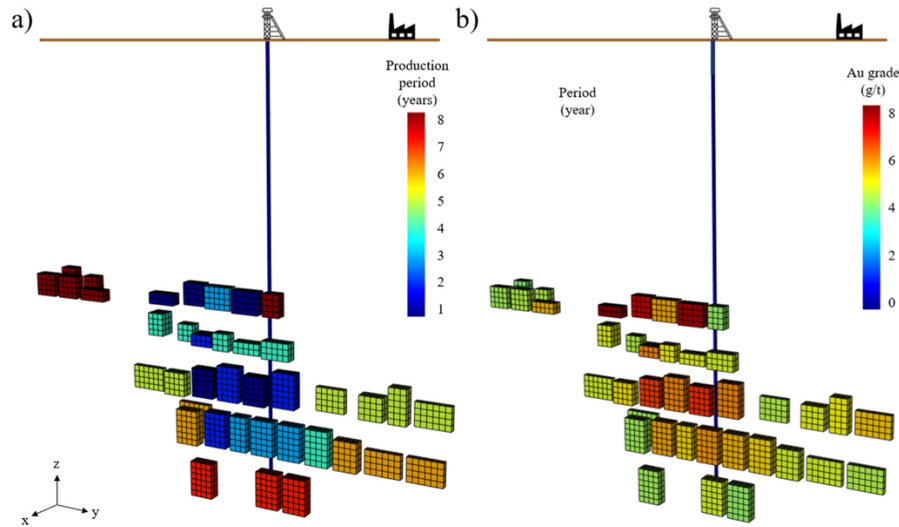


Figura 2.7: Secuencia de extracción entregada como resultado: (a) secuencia de extracción de caserones por periodo, y (b) ley de oro por caserón. (Furtado e Faria 2021)

2.2.1. Peligro sísmico

Se puede evidenciar que, a pesar de la existencia de muchos modelos de programación lineal en la industria mineral, son pocos los autores que se centran en el peligro sísmico, lo cual corresponde a una temática relevante a la hora de hablar de la extracción, puesto que la sismicidad tiene estrecha relación con el volumen de roca extraído como indica (Jarufe 2023) en su investigación. Mientras más se profundiza la operación minera, más aumenta el campo tensional en el macizo rocoso y, por ende, genera sismicidad inducida por la minería, ya que los esfuerzos inducidos por las excavaciones movilizan los planos estructurales cercanos a los caserones. La sismicidad inducida puede afectar la seguridad de los trabajadores y la estabilidad de la mina, por lo que su integración en la planificación minera es crucial para mitigar riesgos y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones.

(Jarufe 2023) realiza un análisis de la sismicidad inducida en la Mina Raura, situada en la Cordillera Central del Perú, conocida por la extracción de minerales polimetálicos y ubicada a altitudes que oscilan entre 4300 y 5700 metros sobre el nivel del mar. Este análisis reveló una clara relación entre la profundidad de la mina, la producción y la sismicidad inducida. A medida que las operaciones se profundizan, aumenta tanto el momento sísmico acumulado como el número de eventos sísmicos de magnitud significativa. Este incremento en el peligro sísmico se visualiza en la Figura 2.8, que muestra la elevación media de los eventos y el momento sísmicos acumulados, en donde se observa cómo a medida que se profundiza, la actividad minera aumenta el momento sísmico generado.

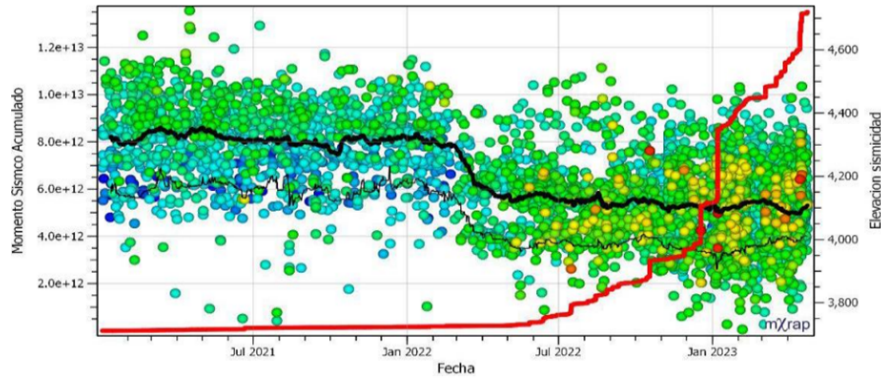


Figura 2.8: Elevación media de eventos sísmicos y momento sísmico acumulado (Jarufe 2023)

Además, se observó que los eventos sísmicos de mayor magnitud tienden a ocurrir poco después de las tronaduras y cerca de las zonas donde se han realizado estos procesos. Esto sugiere una correlación directa entre el volumen de roca extraído y la sismicidad generada. La Figura 2.9 muestra la evolución temporal de la producción y el momento sísmico acumulado en los sectores Vanesa y Margot de la Mina Raura, ilustrando claramente esta relación, donde la línea azul corresponde a la producción de cada sector y la línea morada muestra el momento sísmico acumulado.

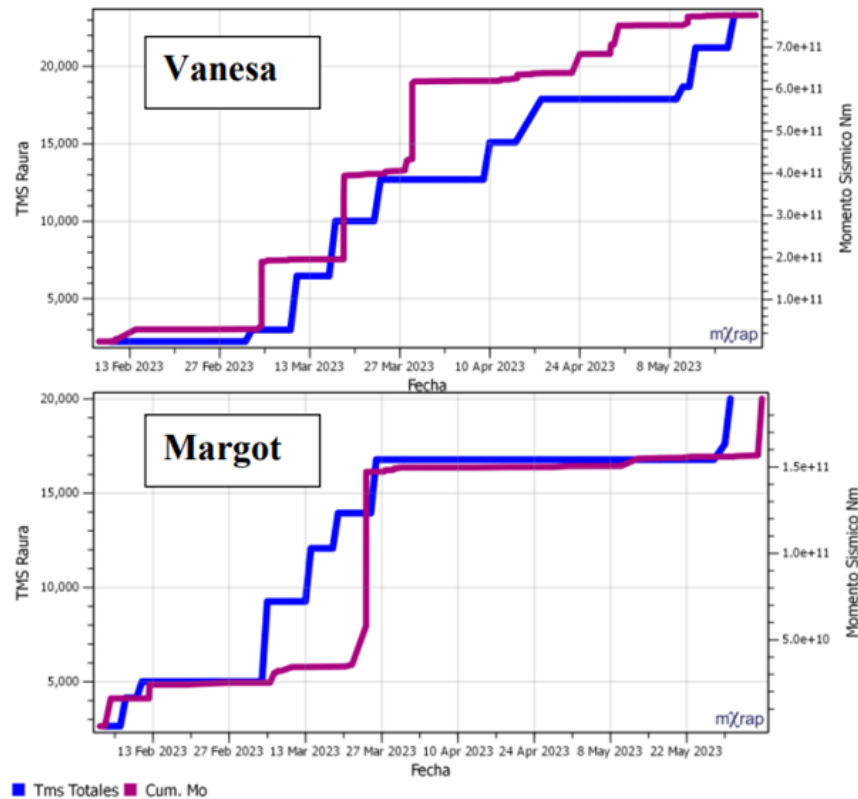


Figura 2.9: Ejemplo de evolución temporal de sectores Vanesa y Margot. (Jarufe 2023)

El estudio concluye que existe una relación lineal entre la producción en toneladas y el momento sísmico, lo que permite prever la sismicidad inducida y tomar medidas preventivas para mitigar sus efectos. Integrar el peligro sísmico en la definición de la secuencia de extracción resulta esencial en la planificación minera, ya que facilita la anticipación de riesgos y el diseño de estrategias operativas orientadas a minimizar la sismicidad inducida. Tam-

bién existen otros estudios que mencionan esta relación, como (Pizarro [2018](#)) que menciona cómo en minería subterránea, la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso, generada por la extracción de mineral, suele estar acompañada de eventos sísmicos que impactan la estabilidad de la mina. Factores como el volumen de material extraído, la profundidad de las operaciones y las características estructurales del macizo desempeñan un papel clave en la ocurrencia de sismicidad inducida. Y se concluye que, a medida que las operaciones mineras alcanzan mayores profundidades, los períodos de actividad sísmica tienden a prolongarse, lo que puede limitar el acceso a ciertas áreas y causar pérdidas en la productividad.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología

Esta investigación sigue una metodología estructurada para validar y aplicar un modelo de programación lineal, con el objetivo de determinar la relación óptima entre la velocidad de extracción y el riesgo sísmico en operaciones de sublevel stoping.

La metodología propuesta consta de los siguientes pasos:

- **Validación del modelo de optimización** en una situación minera a pequeña escala con un número acotado de caserones y labores de desarrollo, esto permitirá verificar analíticamente que las ecuaciones responden al problema propuesto en un caso simplificado.
- **Validación de resultados en un caso controlado** donde se definirán diversas zonas con niveles diferenciados de peligro sísmico y se evaluará si el modelo responde a las tasas de avance y a los cambios de secuencia, esperando que modelo priorice tasas de avance más lentas en zonas de alto riesgo sísmico.
- **Aplicación a un caso de estudio real** implementando el modelo en un caso de estudio con datos reales de una operación minera para un yacimiento específico, como su modelo geológico, leyes, número de caserones y desarrollos exactos, para así realizar una evaluación del efecto de imponer riesgos sísmicos máximos en la secuencia de desarrollo y extracción a gran escala.
- **Análisis de tiempos de cómputo** evaluando el tiempo del modelo en función del número de caserones, las labores de desarrollo, y el horizonte de planificación, con el fin de determinar si existen oportunidades de mejora en la resolución, identificando posibles cuellos de botella y oportunidades de mejora u otros enfoques para reducir los tiempos de procesamiento.

3.2. Modelo propuesto

En la presente sección se describe el modelo de optimización utilizado para integrar el peligro sísmico en la planificación de la secuencia de extracción minera en el método sublevel stoping. Este modelo busca maximizar el valor actual neto (VAN) y la producción de la mina.

A continuación, se detallan los parámetros, variables y restricciones del modelo:

3.2.1. Sets

Proporcionar la estructura e información necesaria para formular y resolver un problema de optimización, es posible planteando sets y parámetros que definan los elementos claves sobre los cuales se tomarán las decisiones. Estos proporcionan los datos necesarios para formular las restricciones y la función objetivo del modelo.

- **S (Caserones):** Representa las diferentes áreas de la mina que pueden ser explotadas.
- **T (Periodos):** Define los intervalos de tiempo en los que se planifican las actividades.
- **D (Actividades de desarrollo):** Representa las labores necesarias para preparar los caserones para la extracción.
- **R (Tasas de extracción):** Describe las diferentes velocidades a las que se puede extraer el material, así se logra modelar distintas estrategias de extracción.
- **A (Riesgos sísmicos):** Permite considerar diferentes niveles de riesgo sísmico en la planificación.

3.2.2. Parámetros

- **Ton_s (Toneladas del caserón s):** Indica la cantidad de material disponible en cada caserón.
- **Ton_{total} (Límite total de movimiento mina por periodo):** Define el máximo volumen de material que puede ser extraído en un periodo t .
- **$DevLimit$ (Límite de actividades de desarrollo por periodo):** Establece cuántas actividades de desarrollo se pueden realizar simultáneamente.
- **V_{st} (Beneficio económico al extraer una tonelada del caserón s en el periodo t):** Indica el valor económico de extraer material en un periodo específico.
- **$Rate_{Min}$ y $Rate_{Max}$ (Límites de tasas de extracción):** Definen los rangos permitidos de extracción para cada tasa.
- **$Prob$ (Probabilidad de superar el nivel de peligro sísmico α si se escoge la tasa R):** Indica el riesgo sísmico asociado con cada tasa de extracción.
- **$SemiscLimit$ (Probabilidad máxima admisible para el nivel de riesgo α):** Establece los límites de riesgo sísmico aceptables.

Ahora, sea S el conjunto de caserones, T el conjunto de periodos, D el conjunto de actividades de desarrollo, y R el conjunto de tasas de extracción disponibles y α el conjunto de riesgos sísmicos. Sea Ton_s las toneladas del caserón $s \in S$, Ton_total el límite total de movimiento mina por periodo, $DevLimit$ el límite de actividades de desarrollo por periodo, y v_{st} el beneficio económico de extraer una tonelada del caserón $s \in S$ en el periodo $t \in T$. Se define como $rate_r^{Min}$ y $rate_r^{Max}$ los límites superiores e inferiores de extracción asociados a la tasa $r \in R$. Además, $Prob_{r\alpha}$ es la probabilidad de superar el nivel de peligro sísmico $\alpha \in \alpha$ si se escoge la tasa $r \in R$. Finalmente, $SemiscLimit_\alpha$ es la probabilidad máxima admisible para el nivel de riesgo $\alpha \in \alpha$.

La extracción está gobernada por un conjunto de precedencias: $P_{DS} \subset D \times S$ es el conjunto de pares ordenados (d, s) donde para comenzar la extracción del caserón $s \in S$, debe haberse terminado el desarrollo $d \in D$. A su vez, los conjuntos $P_{DD} \subset D \times D$ y $P_{SS} \subset S \times S$ describen las precedencias entre desarrollos y caserones respectivamente.

3.2.3. Variables de decisión

Para definir el problema y formular matemáticamente las restricciones y la función objetivo, se tienen variables de decisión que serán el núcleo del modelo de optimización.

1. Tiempo de desarrollo del caserón:

$$x_{st} = \begin{cases} 1 & \text{si el caserón } s \text{ se inicia en el periodo } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

2. Tiempo de desarrollo de labores:

$$y_{dt} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad de desarrollo } d \text{ se realiza en el periodo } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

3. Toneladas extraídas del caserón en un periodo determinado:

$$w_{st} = \text{toneladas extraídas del caserón } s \text{ en el periodo } t$$

4. Elección del modelo de una tasa de riesgo:

$$z_{rts} = \begin{cases} 1 & \text{si la tasa } r \text{ se selecciona para el caserón } s \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

3.2.4. Función objetivo

El modelo de optimización busca maximizar el beneficio económico total obtenido de la extracción de material de los caserones a lo largo de todos los periodos. Cada término $w_{st}v_{st}$ representa el beneficio obtenido de extraer una cierta cantidad (w_{st}) de material del caserón s en el periodo t multiplicado por el beneficio económico correspondiente v_{st} .

$$\max \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} w_{st}v_{st} \quad (3.1)$$

3.2.5. Restricciones

Las restricciones de un modelo de optimización lineal son fundamentales para asegurar que las soluciones sean viables dentro del contexto real del problema, sin ellas, el modelo podría proponer soluciones que no sean aplicables o prácticas. En este caso, se tienen las restricciones según: los límites en las tasas de avance para cumplir con un nivel de riesgo sísmico predeterminado, la capacidad máxima de extracción, las tasas de avance permitidas y las precedencias entre sectores de la mina. Se detallan de la siguiente forma:

- **Precedencia caserón – desarrollo:** Para explotar un caserón, la labor aledaña debe estar desarrollada.

$$x_{st} \leq \sum_{p=1}^t y_{dp} \quad \forall t \in T, (d, s) \in P_{SD} \quad (3.2)$$

- **Precedencia caserón – caserón:** Un caserón no puede ser explotado antes que sus caserones precedentes.

$$x_{at} \leq \frac{1}{\text{Ton}_s} \sum_{p=1}^t w_{bp} \quad \forall t \in T, (b, a) \in P_{SS} \quad (3.3)$$

- **Precedencia desarrollo – desarrollo:** Un desarrollo no se puede desarrollar sin que su anterior esté desarrollado.

$$y_e \leq \sum_{p=1}^t y_{fp} \quad \forall t \in T, (f, e) \in P_{DD} \quad (3.4)$$

- **Límite de desarrollo:** El número de desarrollos por período está limitado.

$$\sum_{d \in D} y_{dt} \leq \text{DevLimit} \quad \forall t \in T \quad (3.5)$$

- **Empezar una vez el caserón:** Cada caserón solo puede comenzar a explotarse una vez.

$$\sum_{t=1}^T x_{st} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (3.6)$$

- **Desarrollar una vez:** Cada desarrollo solo puede realizarse una vez.

$$\sum_{t=1}^T y_{dt} \leq 1 \quad \forall d \in D \quad (3.7)$$

- **Extraer después de empezar:** Antes de extraer un caserón, este debe haber sido desarrollado en un tiempo anterior o igual a la extracción.

$$w_{st} \leq \text{Ton}_s \sum_{p=1}^t x_{sp} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (3.8)$$

- **Límite de tonelaje de caserón:** Las toneladas extraídas del caserón en cada periodo no deben ser mayores a las toneladas totales del caserón.

$$\sum_{t=1}^T w_{st} \leq \text{Ton}_s \quad \forall s \in S \quad (3.9)$$

- **Límite total de extracción por periodo:** La suma de todas las toneladas de los caserones debe ser menor o igual al movimiento de mina.

$$\sum_{s=1}^S w_{st} \leq \text{Ton_total} \quad \forall t \in T \quad (3.10)$$

- **Límite mínimo de extracción:** Obliga al modelo a escoger un rango mínimo de una tasa de probabilidad de peligro sísmico.

$$\sum_{r \in R} z_{rst} \cdot \text{rate}_r^L \leq w_{st} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (3.11)$$

- **Límite máximo de extracción:** Obliga al modelo a escoger un rango máximo de una tasa de probabilidad de peligro sísmico.

$$\sum_{r \in R} z_{rst} \cdot \text{rate}_r^U \geq w_{st} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (3.12)$$

- **Una tasa por periodo:** Solo se puede escoger una tasa de probabilidad de peligro sísmico por periodo.

$$\sum_{r \in R} z_{rst} = 1 \quad \forall t \in T, s \in S \quad (3.13)$$

- **Límite sísmico:** La tasa de extracción debe mantenerse dentro de los límites sísmicos establecidos.

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} z_{rst} \cdot \text{Prob}_r^\alpha \leq \text{SemiscLimit}_\alpha \quad \forall t \in T \quad (3.14)$$

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Resultados preliminares

Para su validación, el modelo de optimización lineal se definió con un caso controlado de 50 caserones y 100 desarrollos, simulando una operación minera de mediana escala. Esta configuración permitió evaluar el comportamiento de las variables e identificar posibles errores. Los caserones y desarrollos se dividieron en tres zonas principales, caracterizadas por diferencias en las leyes del mineral, beneficios económicos y restricciones operativas de precedencia. Este enfoque facilita analizar cómo las combinaciones de parámetros impactan los resultados en términos de producción y cumplimiento de restricciones. Entiéndase S1 como caserón 1 y D1 como desarrollo 1, respectivamente.

Las distintas zonas se caracterizan de la siguiente manera:

- **Zona 1:** Esta zona, conformada por los primeros 20 caserones y 40 desarrollos de baja ley y bajo beneficio económico, opera bajo un secuenciamiento lineal y cronológico. Sus precedencias permiten que el caserón S2 solo pueda extraerse si el S1 fue extraído en el mismo período o en uno anterior, y el desarrollo D2 solo podría realizarse tras completarse el D1. Adicionalmente, el caserón S1 requiere la ejecución previa de los desarrollos D1 y D2, ya que estos garantizan el acceso.

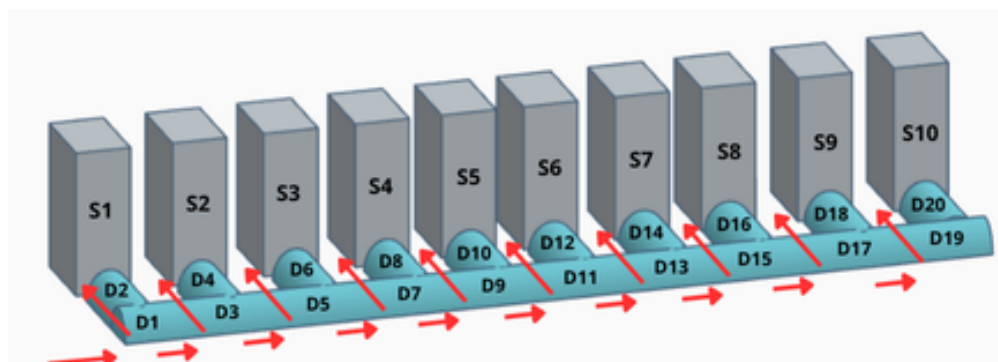


Figura 4.1: Precedencias establecidas para zona 1.

- **Zona 2:** Incluye los caserones 21 al 40 y los desarrollos 41 al 80, todos con mediana ley y medio beneficio económico. En esta zona, las precedencias arman una estrategia que prioriza la construcción completa de las calles antes de comenzar la extracción de los caserones, permitiendo trabajar simultáneamente en los dos niveles de la zona. No existen restricciones de precedencia entre los caserones.

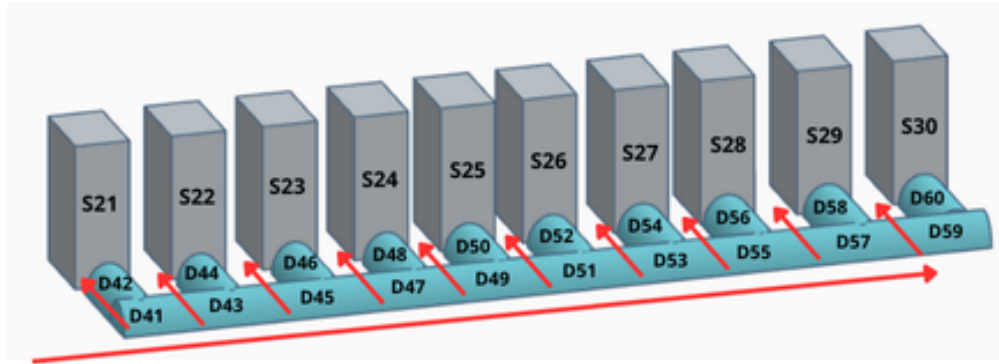


Figura 4.2: Precedencias establecidas para zona 2.

- **Zona 3:** Corresponde a los caserones 41 al 50 y los desarrollos 81 al 100 caracterizados con una alta ley y alto beneficio económico. Aquí, la precedencia operativa favorece un avance máximo en los desarrollos antes de extraer los caserones. Es decir, los desarrollos asociados al caserón sucesor deben estar finalizados para permitir su extracción. La precedencia es similar a la de la Zona 1 y sigue el mismo orden, pero, a diferencia de esta, no se realiza una extracción secuencial de los caserones. En su lugar, se extraen caserones intercalados, lo que implica que, si se busca desarrollar una calle, es necesario asegurar que el caserón antecesor a esta esté completamente desarrollado. Similar a la Zona 2, no se establecen restricciones de precedencia estrictas entre los caserones.

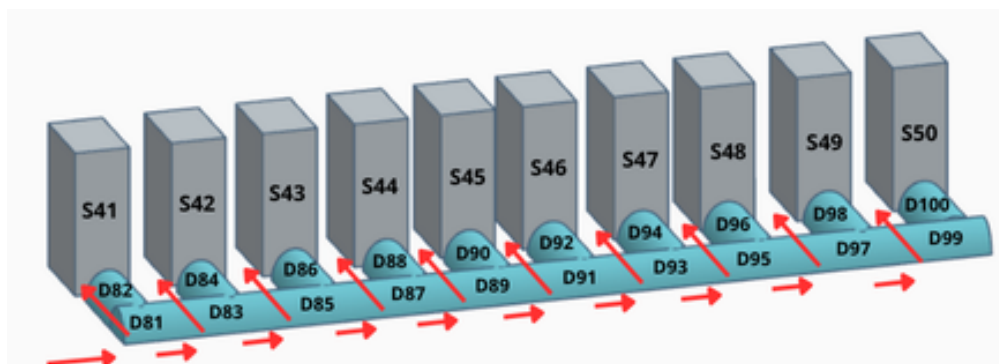


Figura 4.3: Precedencias establecidas para zona 3.

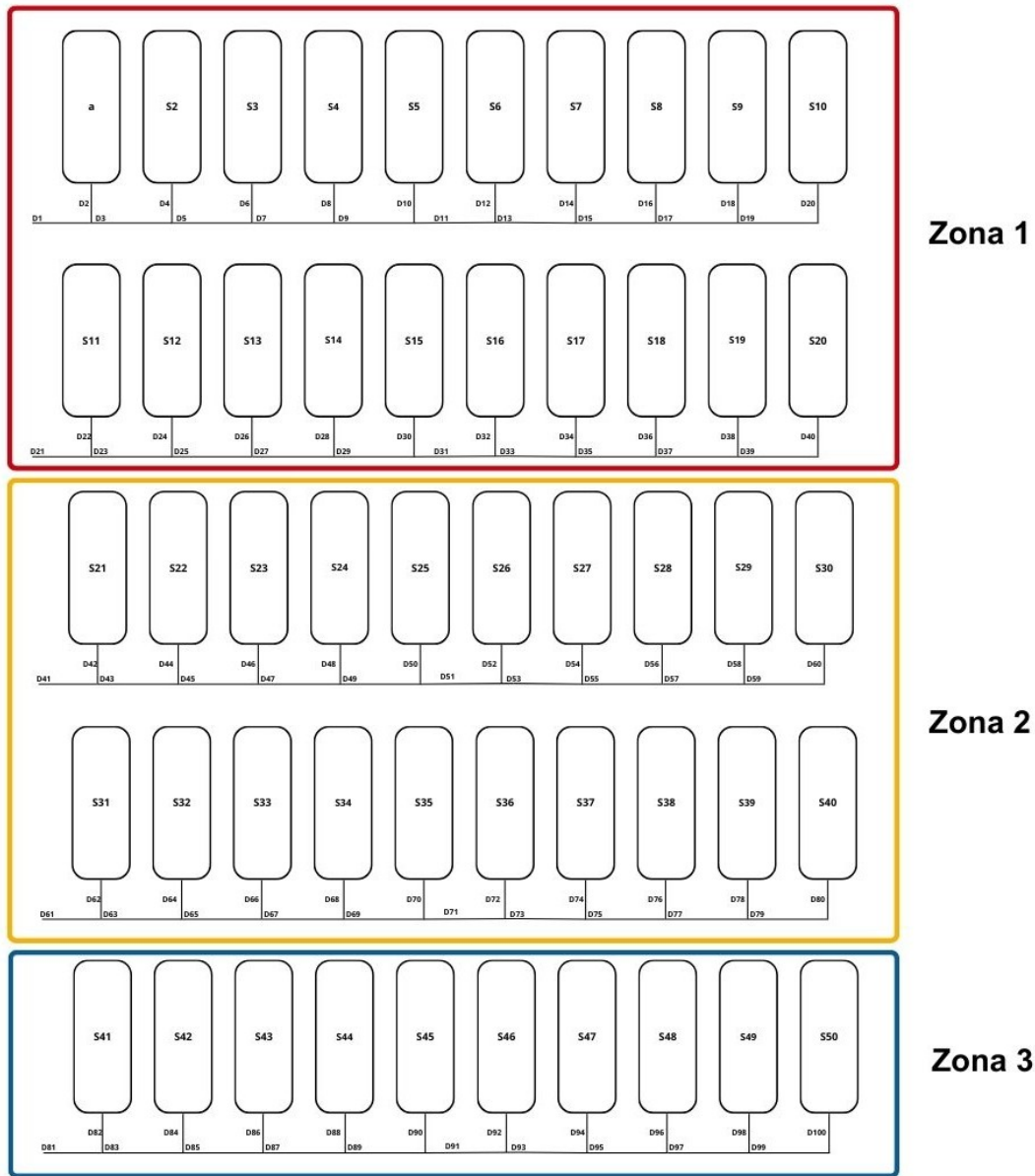


Figura 4.4: Modelo de optimización con número acotado de caserones.

Una vez caracterizados los datos del diseño de la mina y la ubicación de caserones y desarrollos, el siguiente paso en el modelo fue definir como dato de entrada la relación entre la tasa de producción R y el peligro sísmico, que actúa como límite para las tasas de extracción. Para este estudio, estas tasas y sus respectivos rangos se determinaron utilizando el gráfico de evaluación de peligro sísmico desarrollado por Jarufe para la Mina Raura. En esos términos se entenderán las siguientes variaciones en distintos casos:

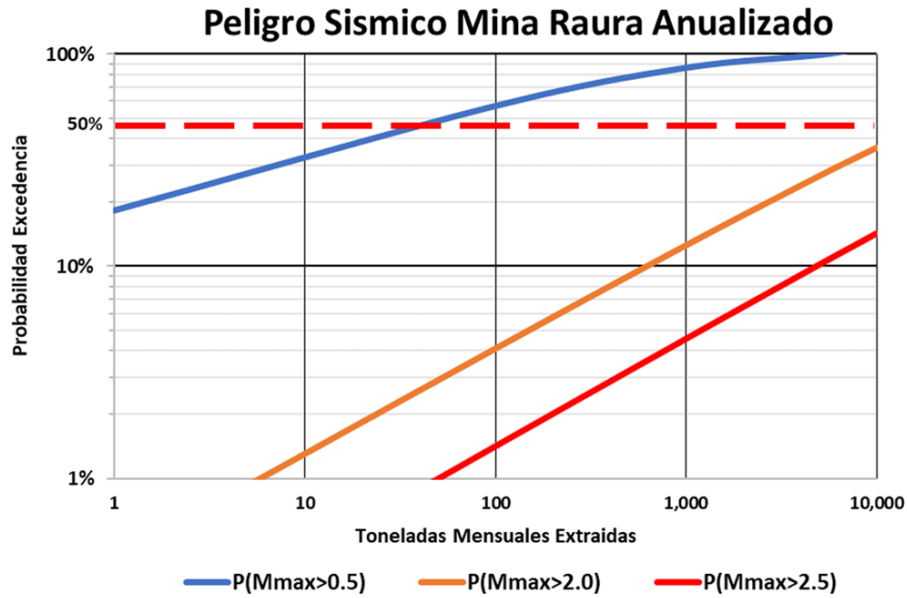


Figura 4.5: Evaluación de peligro sísmico para Mina Raura (Jarufe 2023)

En la Figura 4.5 se representan distintas probabilidades de alcanzar magnitudes sísmicas específicas mediante curvas de colores, en función de las toneladas extraídas mensualmente. Trazando líneas sobre el gráfico, fue posible identificar puntos clave que permitieron derivar las tasas de peligro (probabilidad de provocar un sismo) y asociarlas a rangos de tonelaje, definidos por valores mínimos y máximos. Estos rangos establecen los límites dentro de los cuales se puede realizar la extracción mensual de forma segura, considerando los riesgos sísmicos inherentes al macizo rocoso.

Con la relación entre la tasa de producción y el peligro sísmico determinada, el modelo cuenta con todos los datos de entrada necesarios para su operación. Considerando las restricciones de precedencia establecidas para los resultados preliminares, el modelo puede generar un plan de producción que define los períodos de extracción de los caserones y la construcción de los desarrollos. Además, proporciona información sobre la tasa de extracción, el tonelaje extraído y los metros avanzados por período, abarcando todos los intervalos de tiempo previstos para la ejecución de la obra.

Para evaluar el comportamiento del modelo y su sensibilidad, se analizará cómo varía el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, complementado con un análisis de GAP que determinará la diferencia entre el mejor plan de producción posible y el obtenido. Estos resultados se generarán mediante la variación de distintos parámetros del modelo, considerando dos configuraciones para cada uno y explorando diversas combinaciones.

4.1.1. Variación 1: Tasas de extracción S

Se definieron dos configuraciones: la versión A, con rangos más restringidos, limitada a cinco opciones para determinar el tonelaje a extraer, y la versión B, con ocho rangos permisibles, lo que otorga al modelo mayor flexibilidad en la selección.

En ambas versiones, el peligro asociado se expresa como el porcentaje de probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico, basado en los datos obtenidos de la Figura 4.5. Se utilizó el límite de 2.0, representado por la curva naranja de este mismo gráfico, como referencia de probabilidad de ocurrencia para el cálculo de los niveles de peligro. Este peligro incrementa a medida que aumenta la cantidad de toneladas extraídas, reflejando la relación directa entre la producción y el riesgo sísmico.

■ **Versión A:**

Tasa	Rango en toneladas	Peligro asociado
0	0, 0	0
1	50, 100	3
2	100, 500	5
3	500, 1000	10
4	1000, 3000	16

Cuadro 4.1: Versión A de tasas de extracción para modelo de optimización.

La Figura 4.6 ilustra la intersección entre las líneas verticales, que definen los rangos de tonelaje a extraer, y la línea naranja que representa la probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud 2.0. El eje Y indica los distintos rangos de peligro asociado de cada tasa.

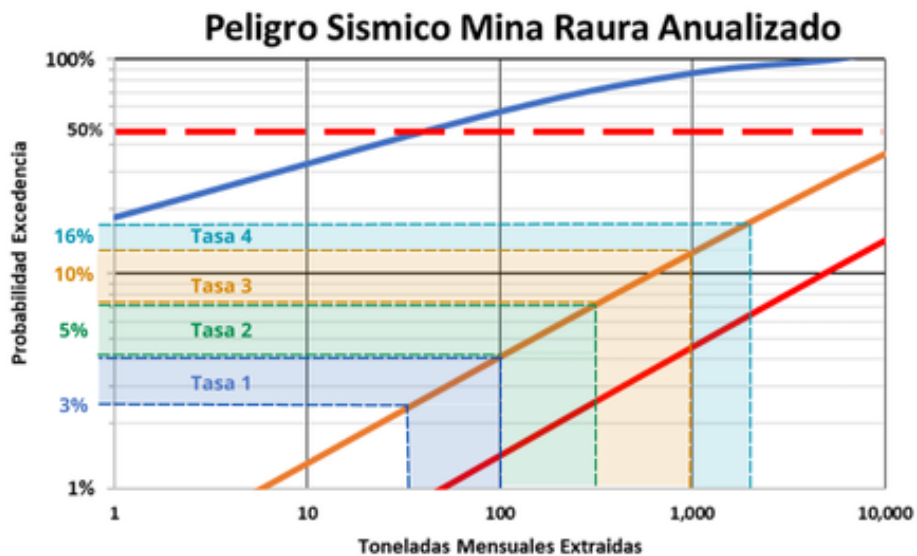


Figura 4.6: Peligro asociado por rangos en toneladas para versión A de tasas de extracción..

■ Versión B:

Tasa	Rango en toneladas	Peligro asociado
0	0, 0	0
1	2, 10	2
2	80, 100	4
3	300, 500	7
4	800, 1000	14
5	1200, 1700	16
6	2000, 2500	18
7	2500, 3000	19

Cuadro 4.2: Versión B de tasas de extracción para modelo de optimización.

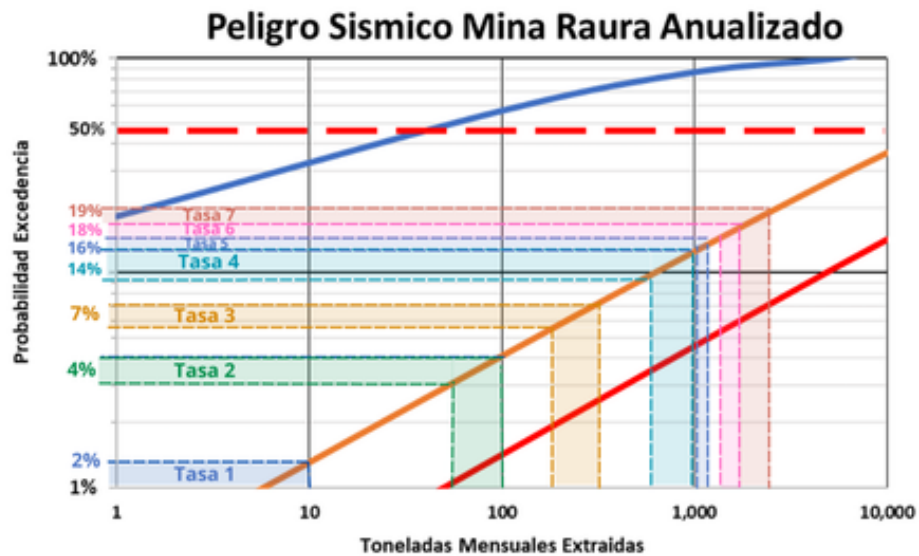


Figura 4.7: Peligro asociado por rangos en toneladas para versión B de tasas de extracción.

4.1.2. Variación 2: Límite de probabilidad máxima *Prob*

Al variar en el modelo el límite de probabilidad de superar el nivel de peligro sísmico, se permite la posibilidad de trabajar con tasas de extracción asociadas a un mayor riesgo. Por ejemplo, si el modelo selecciona la versión B y opta por la tasa de extracción número 7, esta estaría vinculada a una probabilidad del 19 % de generar un evento sísmico en el yacimiento. Sin embargo, al modificar el límite de peligro, se permite al modelo seleccionar tasas adicionales, incluso aquellas que superen el peligro máximo previamente establecido para una tasa específica. De esta forma, se definen dos configuraciones: la versión A, que establece un límite máximo basado en el peligro correspondiente a cada tasa dentro de su rango, y la versión B, que eleva este límite, permitiendo trabajar con niveles de peligro superiores a los establecidos para ambas versiones de tasas.

- **Versión A:** 16 % de probabilidad máxima de ocurrencia sísmica.
- **Versión B:** 24 % de probabilidad máxima de ocurrencia sísmica.

4.1.3. Variación 3: Tonelaje por periodo T

Establecer un límite global de tonelaje por período es esencial para garantizar la coherencia de los planes de producción generados por el modelo. Sin esta restricción, el modelo podría proponer escenarios no realistas, como la extracción simultánea de todos los caserones en un único período. Este límite no solo asegura planes operativos lógicos y factibles, sino que también permite evaluar el impacto de la extracción sobre la estabilidad del macizo rocoso.

Evaluar cómo responde el modelo, cuya función objetivo es maximizar el Valor Actual Neto (VAN) mientras mantiene la estabilidad del macizo rocoso, frente a modificaciones en el límite máximo de tonelaje permitido por período, puede ofrecer resultados valiosos para analizar su comportamiento. En este análisis preliminar, los caserones se definieron con una capacidad de 3000 toneladas, estableciendo dos versiones de variación que permiten desarrollar múltiples caserones simultáneamente en cada período.

- **Versión A:** 18000 toneladas máximas a extraer por periodo.
- **Versión B:** 12000 toneladas máximas a extraer por periodo.

4.1.4. Variación 4: Avance de desarrollos por periodo T

El avance de los desarrollos en una operación minera suele estar condicionado por la disponibilidad de equipos y cuadrillas. Sin una restricción en el avance máximo permitido, el modelo podría generar escenarios poco realistas, como la construcción de todas las calles y zanjas del diseño en un solo período. Por ello, al igual que con el tonelaje máximo, es necesario establecer un límite para el avance de los desarrollos por período, asegurando planes operativos factibles.

En este análisis preliminar, los desarrollos se definieron con una longitud de 1000 metros, y los límites de avance se determinaron según las siguientes configuraciones de variación:

- **Versión A:** 12000 metros máximos de avance por periodo.
- **Versión B:** 8000 metros máximos a avance por periodo.

Con estas configuraciones, el modelo puede avanzar entre 12 y 18 desarrollos diferentes por período, dependiendo de la versión aplicada y respetando siempre las restricciones de precedencia. Esto le permite distribuir el avance de manera flexible, ya sea concentrando la longitud máxima en un único desarrollo extenso que lo requiera o dividiéndolo entre varios desarrollos para alcanzar distintas zonas del diseño.

4.2. Análisis de los resultados preliminares

Considerando las cinco posibles variaciones, es posible generar múltiples combinaciones entre ellas. Sin embargo, dado que muchas presentan comportamientos similares, se seleccionaron únicamente los resultados más representativos. Estos incluirán la diferencia económica, el porcentaje de diferencia entre los planes de producción (GAP), la cantidad de períodos contemplados en el plan de producción y una verificación de si se completó la extracción de todos los caserones y la realización de cada desarrollo.

4.2.1. Caso 1: Variación de tasas de extracción (S)

Existen dos pares de variaciones en las tasas de extracción, donde cada par comparte los mismos parámetros internos, pero cada simulación dentro del par utiliza versiones diferentes: la versión A y la versión B de las tasas de extracción. Tanto el par A-B como el par C-D se espera que generen planes de producción distintos, reflejándose en diferencias en los resultados económicos, el análisis de GAP y los tiempos requeridos para completar la operación.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
A	Versión A	24 %	12,000	12,000
B	Versión B	24 %	12,000	12,000
C	Versión A	24 %	12,000	8,000
D	Versión B	24 %	12,000	8,000

Cuadro 4.3: Simulaciones con variación en las tasas de extracción.

Los resultados muestran que, al trabajar con tasas de extracción más limitadas y con menos rangos disponibles, el modelo genera planes de producción más cortos en duración, como se muestra en el Anexo A.1 en comparación al Anexo A.2. Esto se debe a que, con menos opciones, el modelo tiende a priorizar rutas de extracción más secuenciales y ordenadas, lo que ayuda a que las operaciones sean más eficientes.

Al reducirse el tiempo total del plan, el VAN aumenta, ya que los ingresos se obtienen en menos tiempo, disminuyendo el efecto del descuento sobre el valor del dinero. Esto demuestra que las tasas más acotadas permiten al modelo optimizar no solo la planificación operativa, sino también los resultados económicos al enfocarse en estrategias de extracción más rápidas y directas.

Simulación	Periodos totales	Caserones explotados	Desarrollos terminados	VAN	GAP %
A	43	50	100	$40,8 \times 10^3$	0.00 %
B	48	50	100	$36,9 \times 10^3$	0.00 %
C	43	50	100	$40,5 \times 10^3$	0.05 %
D	48	50	100	$36,8 \times 10^3$	0.00 %

Cuadro 4.4: Resultados variación de tasas de extracción.

4.2.2. Caso 2: Variación de límite de probabilidad máxima (*Prob*)

Los pares E-F y G-H comparten los mismos parámetros, excepto por el límite de probabilidad sísmica máxima permitida. Las simulaciones F y H presentan planes de producción más cortos en términos de períodos y un mayor beneficio económico. Esto se debe a que, al permitir un límite de probabilidad sísmica más alto, el modelo tiene acceso a un rango mayor de tasas de extracción y puede trabajar en la extracción de caserones de forma simultánea. Esta reducción en el tiempo total de operación no solo acelera la producción, sino que también mejora el VAN al generar ingresos en un período más corto.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
E	Versión A	16 %	18,000	12,000
F	Versión A	24 %	18,000	12,000
G	Versión B	19 %	18,000	8,000
H	Versión B	24 %	18,000	8,000

Cuadro 4.5: Simulaciones con variación en el límite de probabilidad sísmica.

Los anexos [A.3](#), [A.4](#) y [A.5](#) evidencian la diferencia en el secuenciamiento que produce la variación de los límites de probabilidad sísmica máxima. En este caso, mayor probabilidad sísmica implica mejor VAN y menores tiempos en la producción.

Simulación	Periodos totales	Caserones explotados	Desarrollos terminados	VAN ($\times 10^3$)	GAP (%)
E	49	50	100	36.0	0.00
F	43	50	100	40.8	0.00
G	49	50	100	36.0	0.00
H	48	50	100	36.8	0.00

Cuadro 4.6: Resultados variación límite de probabilidad máxima.

4.2.3. Caso 3: Variación de tonelaje máximo

Los pares de simulaciones I-J y K-L se diseñaron para analizar el impacto de variar el tonelaje máximo permitido por caserón. Dentro de cada par, las simulaciones I y J, al igual que K y L, se diferencian únicamente en este parámetro. Sin embargo, entre los pares existen otras variaciones significativas: el par I-J se caracteriza por una menor probabilidad sísmica permitida y un avance máximo más restringido en los desarrollos en comparación con el par K-L. Estas configuraciones permiten evaluar cómo las diferencias en el tonelaje máximo, combinadas con variaciones en las restricciones operativas, influyen en los resultados del modelo en términos de duración del plan de producción, VAN y aprovechamiento de los desarrollos y caserones.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
I	Versión A	16 %	18,000	8,000
J	Versión A	16 %	12,000	8,000
K	Versión B	24 %	18,000	12,000
L	Versión B	24 %	12,000	12,000

Cuadro 4.7: Simulaciones con variación en el tonelaje de extracción máximo permitido.

En los resultados, se observa que, a pesar de las diferencias en el tonelaje máximo entre los pares, los períodos totales de los planes de producción no varían. Tanto los caserones como los desarrollos se completan en su totalidad en cada simulación. Esto ocurre porque, al utilizar la misma tasa de extracción y el mismo porcentaje de probabilidad sísmica, el modelo extrae un tonelaje máximo similar en ambos pares. Por ejemplo, en el caso de una probabilidad sísmica del 16 %, el tonelaje máximo por período está limitado a 3,000 toneladas. Aunque el modelo permite trabajar con un mayor tonelaje máximo, las restricciones impuestas por los rangos de la tasa de extracción no permiten operar con múltiples caserones en paralelo en este caso. Como se aprecia en el Anexo A.1.

En contraste, el par K-L, con un límite superior de probabilidad sísmica, habilita al modelo para trabajar con un rango más amplio de tasas de extracción. Esto permite completar la explotación de un caserón y avanzar parcialmente con otro en el mismo período, reduciendo la duración total del plan en un período y generando un mayor VAN. Evidenciado en el Anexo A.2.

Simulación	Periodos totales	Caserones explotados	Desarrollos terminados	VAN ($\times 10^3$)	GAP (%)
I	49	50	100	36.0	0.00
J	49	50	100	36.0	0.00
K	48	50	100	36.9	0.01
L	48	50	100	36.9	0.00

Cuadro 4.8: Resultados variación de tonelaje de extracción máximo permitido.

Sin embargo, las diferencias en los períodos totales entre los pares son mínimas. Esto se debe a que, aunque el modelo puede extraer más tonelaje en una simulación del par K-L, el límite en el avance máximo permitido de desarrollos restringe el progreso en las calles y zanjas de la mina. Por lo tanto, aumentar el tonelaje máximo permitido sin reducir las restricciones en la probabilidad sísmica no genera un impacto significativo en la duración total de los planes de producción.

4.2.4. Caso 4: Variación de límite de desarrollos por periodo.

Los pares de simulaciones M-N y O-P se diseñaron para evaluar el impacto del avance máximo permitido en los desarrollos. En este caso, y siguiendo la configuración de los resultados preliminares, cada desarrollo se definió con una longitud de 1,000 metros. Los resultados obtenidos muestran que al incrementar el límite de avance máximo permitido por el modelo, los planes de producción entregados presentan un mayor Valor Actual Neto (VAN). Esto sugiere que una mayor flexibilidad en el avance de los desarrollos contribuye a optimizar los resultados económicos del proyecto.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
M	Versión A	24 %	18,000	12,000
N	Versión A	24 %	18,000	8,000
O	Versión B	24 %	18,000	12,000
P	Versión B	24 %	18,000	8,000

Cuadro 4.9: Simulaciones con variación en el límite de avance de desarrollos por periodo.

En los Anexos A.6, A.7 y A.8 se evidencia que las simulaciones con mayor avance máximo permitido en conjunto a una tasa de extracción más limitada permite elaborar planes de producción más cortos en duración.

Simulación	Periodos totales	Caserones explotados	Desarrollos terminados	VAN ($\times 10^3$)	GAP (%)
M	43	50	100	40.8	0.00
N	43	50	100	40.5	0.00
O	48	50	100	36.9	0.00
P	48	50	100	36.8	0.00

Cuadro 4.10: Resultados variación de límite de avance de desarrollos por periodo.

4.3. Resultados realistas

En los casos preliminares, los análisis se realizaron considerando una misma ley de corte y un beneficio económico uniforme para cada zona del yacimiento. Sin embargo, en condiciones reales, los caserones y las zonas de una mina presentan variaciones significativas en sus leyes de mineral. Aunque es posible clasificar las zonas según categorías como alta, media o baja ley, basándose en cálculos estadísticos como el promedio de las leyes, los planes de producción rara vez consideran una misma ley de corte para todo un subnivel.

En este capítulo, se presenta un nuevo caso de estudio que incorpora datos más realistas, reflejando la heterogeneidad propia de los yacimientos. Este análisis considera variaciones en los valores económicos y una configuración del yacimiento menos homogénea y simétrica que la utilizada en los resultados preliminares. El objetivo es evaluar cómo estas condiciones más representativas afectan la planificación y los resultados obtenidos por el modelo de optimización.

4.3.1. Diseño de mina

El modelo de optimización matemática para el caso realista se basa en un diseño de mina compuesto por 38 caserones y 87 desarrollos. Estos desarrollos se clasifican en calles, zanjas, conexiones y un acceso principal, cada uno con características específicas en cuanto a su longitud.

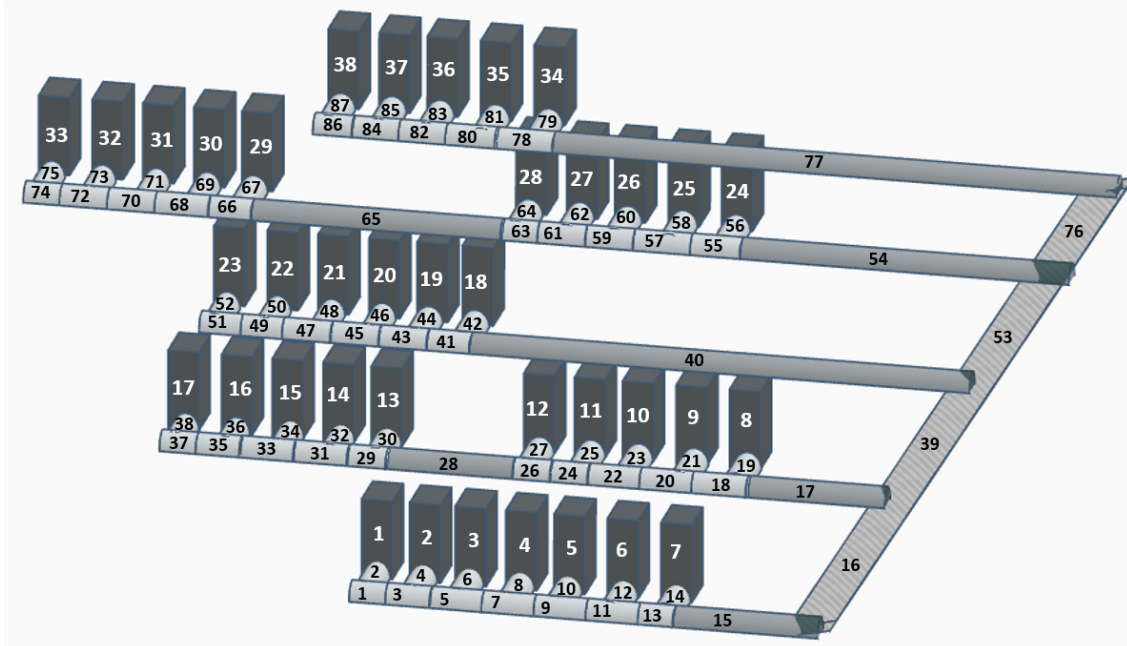


Figura 4.8: Caso de estudio realista ilustrado.

Las calles y zanjas tienen una longitud uniforme de 1000 metros, mientras que las conexiones presentan variaciones que van desde 3000 a 5000 metros. Por su parte, el acceso principal se extiende a lo largo de 6000 metros.

4.3.2. Cubicación de caserones y desarrollos

En el caso realista, cada uno de los 50 caserones cuenta con una ley y un beneficio económico diferentes. Sin embargo, para su análisis, los caserones se organizan en zonas conformadas por grupos de 5 a 6 unidades, las cuales comparten una misma clasificación de ley: alta, media o baja. Esta agrupación facilita la evaluación económica de las zonas, respetando las particularidades de cada caserón. En la figura correspondiente, estas zonas se distinguen mediante colores, que representan su caracterización económica de manera visual y clara.

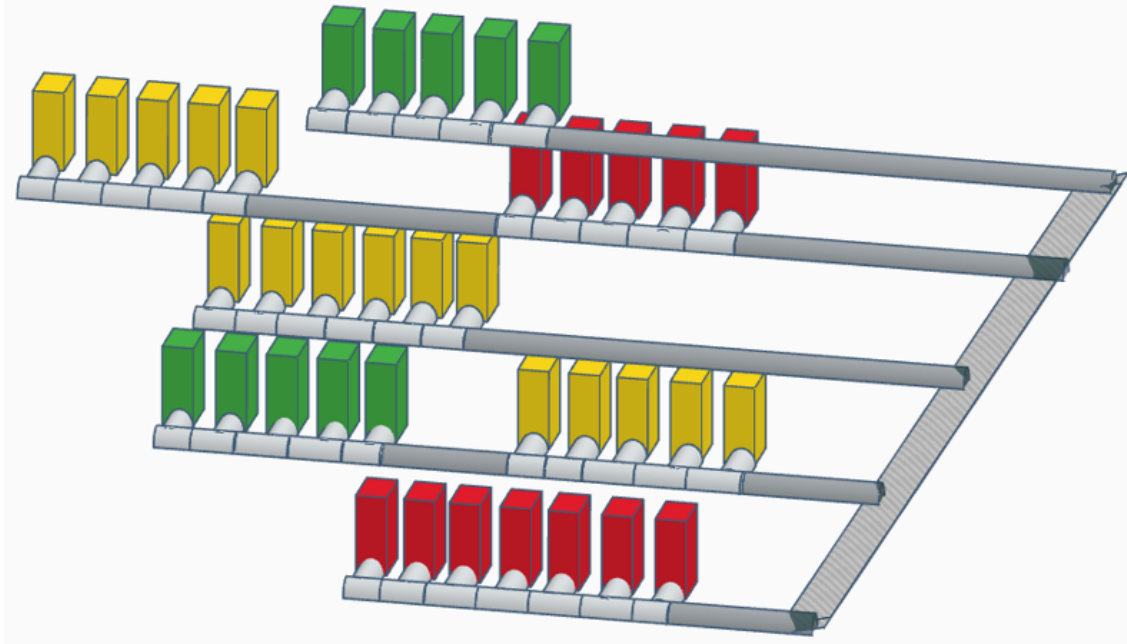


Figura 4.9: Zonas ilustradas según características económicas por colores.

El modelo realista incorpora valores económicos distintos para cada caserón, con el objetivo de representar de manera más fiel las condiciones reales de una operación minera al momento de calcular el VAN del proyecto. En este diseño, las zonas más rentables, caracterizadas por una alta ley, se ubican en las áreas más alejadas y elevadas del yacimiento. Esta disposición busca incrementar la complejidad del proceso de selección de caserones por parte del modelo, obligándolo a considerar las restricciones operativas y de precedencia antes de acceder a estos sectores.

Por otro lado, las zonas de beneficio económico intermedio se encuentran ubicadas en el centro del diseño. Esta ubicación estratégica permite analizar si el modelo decide explotar estas áreas de forma temprana mientras planifica el acceso hacia las zonas de mayor rentabilidad. Finalmente, las zonas con menor ley se sitúan de manera que obstaculizan el acceso directo a las áreas más rentables. Esta configuración permite evaluar el comportamiento del modelo y observar cómo estructura el plan de producción, considerando tanto las restricciones de precedencia como la optimización económica.

Color	Característica
Verde	Alta ley y alto beneficio económico
Amarillo	Media ley y medio beneficio económico
Rojo	Baja ley y bajo beneficio económico

Cuadro 4.11: Características económicas por colores.

4.3.3. Restricciones

Si el modelo se caracteriza únicamente por zonas con distintos beneficios económicos, es esperable que, al buscar optimizar la función objetivo, priorice de inmediato la extracción de las zonas con mejor ley y mayor rentabilidad. Sin embargo, este enfoque podría generar planes de producción no realistas y operativamente inviables. Por esta razón, resulta fundamental incorporar restricciones de precedencia que orienten el funcionamiento del modelo. Estas restricciones permiten que el modelo comprenda la disposición física del yacimiento y la secuencia lógica de extracción, dado que no se trabaja con un modelo de bloques detallado, sino con un esquema definido de caserones y desarrollos. De este modo, se establece un orden estructurado que respeta las condiciones operativas del diseño minero, que en este caso se representará por colores para su comprensión.

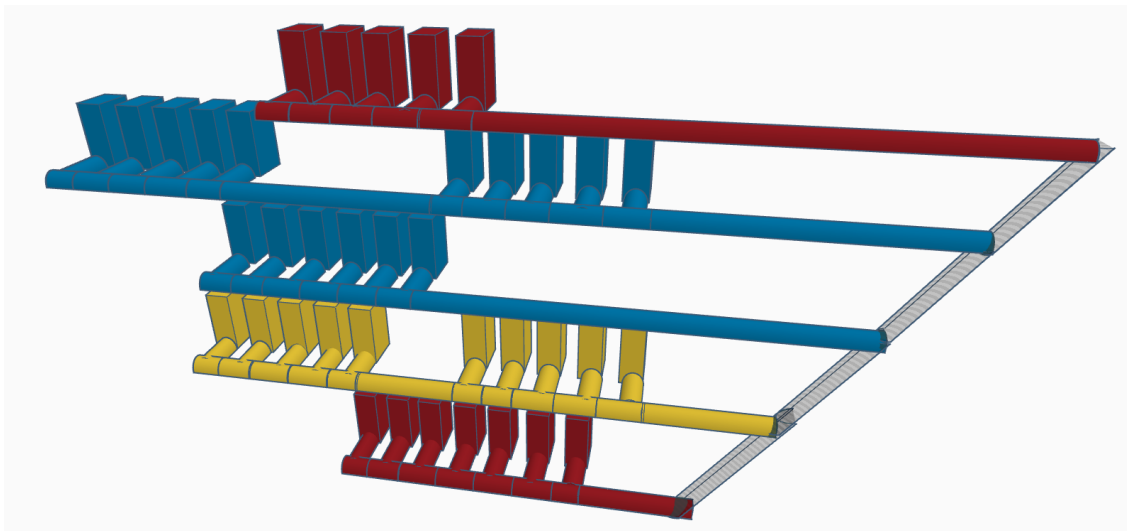


Figura 4.10: Restricciones de precedencia por colores.

- **Zona 1:** Esta zona está compuesta por los primeros 7 caserones, que presentan una baja ley, y por los caserones 34 al 38, ubicados en el nivel más profundo del diseño y caracterizados por tener la mejor ley del caso de estudio. Los desarrollos asociados incluyen los tramos del 1 al 15 y del 77 al 87. La operación en esta zona sigue un secue-
ciamiento lineal y ordenado, donde las restricciones de precedencia exigen completar un caserón o desarrollo antes de iniciar el siguiente. Por ejemplo, el desarrollo D2 solo puede realizarse tras finalizar el D1, y el caserón S2 únicamente puede extraerse si el S1 ha sido extraído en el mismo período o en uno anterior. Además, el caserón S1 requiere que los desarrollos D1 y D2 estén finalizados para garantizar el acceso.
- **Zona 2:** Comprende los caserones 8 al 12, con leyes intermedias, y los caserones 13 al 17, clasificados con baja ley. Los desarrollos que corresponden a esta zona abarcan desde el 17 hasta el 38. La estrategia operativa en esta área prioriza la finalización de las calles antes de comenzar con la extracción de los caserones. A diferencia de la Zona 1, aquí no se establecen restricciones de precedencia entre los caserones, lo que permite mayor flexibilidad en la secuencia de extracción.

- **Zona 3:** Incluye los caserones 18 al 23 y 29 al 33, ambos con leyes intermedias, y los caserones 24 al 28, clasificados con baja ley. Los desarrollos correspondientes se extienden desde el 40 hasta el 75. En esta zona, las restricciones de precedencia se centran en los desarrollos, exigiendo completar los accesos asociados a un caserón antes de iniciar su extracción. Es decir, el desarrollo del caserón sucesor debe estar concluido para permitir su explotación. Al igual que en la Zona 2, no se aplican restricciones de precedencia entre los caserones, lo que facilita una mayor simultaneidad en la planificación de extracción.

Color	Zona	Característica
	Zona 1	Secuenciamiento lineal
	Zona 2	Preferencia de desarrollo de calles
	Zona 3	Preferencia de avance

Cuadro 4.12: Características de zonas y precedencias por colores.

4.3.4. Plan de producción

En esta subsección se presentan las simulaciones realizadas y los planes de producción generados por el modelo, representados de forma gráfica para facilitar su interpretación. Los caserones se muestran organizados por períodos de extracción, y cada período está destacado con un color distinto, lo que permite visualizar claramente el secuenciamiento temporal definido por el modelo. Esta representación gráfica proporciona una herramienta visual efectiva para comprender el producto final del modelo de optimización.

A diferencia de los resultados preliminares, donde se analizaron las variaciones de los parámetros de forma individual, en esta sección se comparan planes de producción completos obtenidos a partir de simulaciones que combinan distintos parámetros. Este enfoque permite evaluar las diferencias en los planes generados, destacando los cambios en las secuencias de extracción y su impacto en la estructura temporal del proyecto.

Estas simulaciones incorporan las variaciones de parámetros utilizadas en los resultados preliminares, manteniendo las mismas configuraciones para los principales parámetros analizados. Cada simulación combina distintos niveles de restricciones y permisibilidad para parámetros clave como las tasas de extracción, el peligro sísmico, el tonelaje máximo y el avance de desarrollos.

Simulación #1

Esta simulación utiliza la versión más restringida de las tasas de extracción y el mayor límite de peligro sísmico permitido por la tabla de tasas. Además, considera el máximo tonelaje y avance en desarrollos definidos en las variaciones de parámetros. En resumen, este plan de producción permite avanzar y extraer al máximo permitido dentro del caso de estudio, aunque está limitado por un bajo porcentaje de posibilidad de ocurrencia de un evento sísmico.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
1	Versión A	16 %	18,000	12,000

Cuadro 4.13: Datos de entrada para simulación 1.

La simulación 1 genera un plan de producción que abarca un total de 36 períodos (Anexo A.9), respetando las restricciones de avance máximo y manteniendo la estabilidad del macizo rocoso en todo momento considerando las tasas de extracción establecidas. Durante los primeros períodos, el modelo prioriza el avance en la mayor cantidad posible de desarrollos, comenzando por el desarrollo D1 y otros dentro de los límites permitidos. Aunque esta estrategia inicial no se enfoca inmediatamente en la extracción de caserones de mayor valor económico, permite abrir camino hacia las zonas más rentables del yacimiento.

Simulación	Periodos totales	VAN	GAP
1	36	$20,1 \times 10^3$	0.00 %

Cuadro 4.14: Resultados simulación 1.

En esta etapa inicial, el modelo extrae caserones ubicados en zonas menos valiosas para garantizar una ganancia mínima mientras avanza en el desarrollo de calles y zanjas. Esta decisión estratégica refleja el objetivo del modelo de equilibrar la rentabilidad con la necesidad de construir accesos hacia las áreas de mayor beneficio económico.

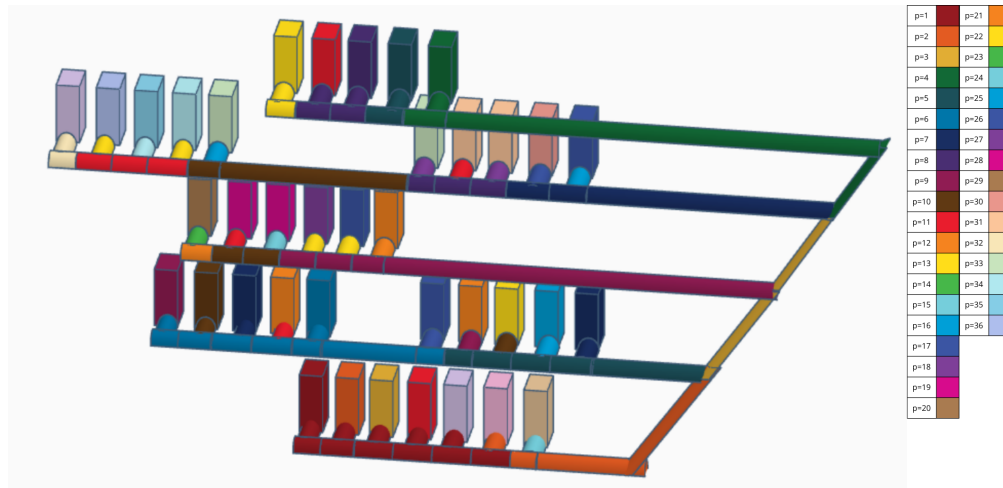


Figura 4.11: Secuencia de producción de simulación 1.

Una vez completados los desarrollos clave, el modelo comienza a priorizar la extracción de caserones en las zonas más rentables, asegurando que cada caserón sea completamente extraído en un solo período. El plan de producción no contempla períodos sin actividad, ya que todos incluyen tanto labores de obra como extracción. Además, no se realizan extracciones de caserones en paralelo, respetando las limitaciones operativas del diseño minero.

Simulación #2

En esta simulación se emplea la versión más acotada de las tasas de extracción, caracterizada por un número reducido de rangos disponibles. Se permite el máximo avance de desarrollos, pero el tonelaje extraído por período es el más bajo permitido. Sin embargo, esta configuración se complementa con el mayor nivel de permisibilidad sísmica considerado, alcanzando un 24 % de probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
2	Versión A	24 %	12,000	12,000

Cuadro 4.15: Datos de entrada para simulación 2.

La simulación 2 genera un plan de producción que se desarrolla en 32 períodos (Anexo A.10), presentando una secuencia de extracción estructurada que prioriza inicialmente los caserones más rentables. Una vez extraídos estos caserones, el modelo continúa con aquellos de mediana ley. Sin embargo, en el caso del subnivel 4, los caserones de mediana ley se dejan para el final, ya que su ubicación en zonas más alejadas y menos accesibles retrasa su extracción respecto al resto.

A diferencia de la simulación 1, los parámetros definidos en esta configuración permiten la extracción de caserones en paralelo. Esto significa que el modelo puede completar la extracción de un caserón y, en el mismo período, comenzar con la extracción de otro distinto. En particular, los caserones ubicados en el subnivel 2 se extraen de manera escalonada a lo largo de varios períodos, ya que el modelo respeta las restricciones de precedencia que priorizan el avance de los desarrollos antes de iniciar la extracción.

Simulación	Periodos totales	VAN	GAP
2	32	$22,4 \times 10^3$	0.00 %

Cuadro 4.16: Resultados simulación 2.

La posibilidad de realizar trabajos simultáneos, habilitada por el aumento del límite de probabilidad sísmica, optimiza el uso del tiempo y de los recursos operativos, permitiendo una mayor flexibilidad en la planificación. Este enfoque reduce la duración total del plan de producción en comparación con simulaciones más restrictivas, al tiempo que asegura el cumplimiento de las restricciones geotécnicas y operativas.

En general, la simulación 2 demuestra cómo la combinación de parámetros más permisivos puede mejorar la eficiencia de la planificación, permitiendo al modelo alcanzar un equilibrio entre la optimización económica y las limitaciones técnicas propias del diseño de mina en el método de sublevel stoping.

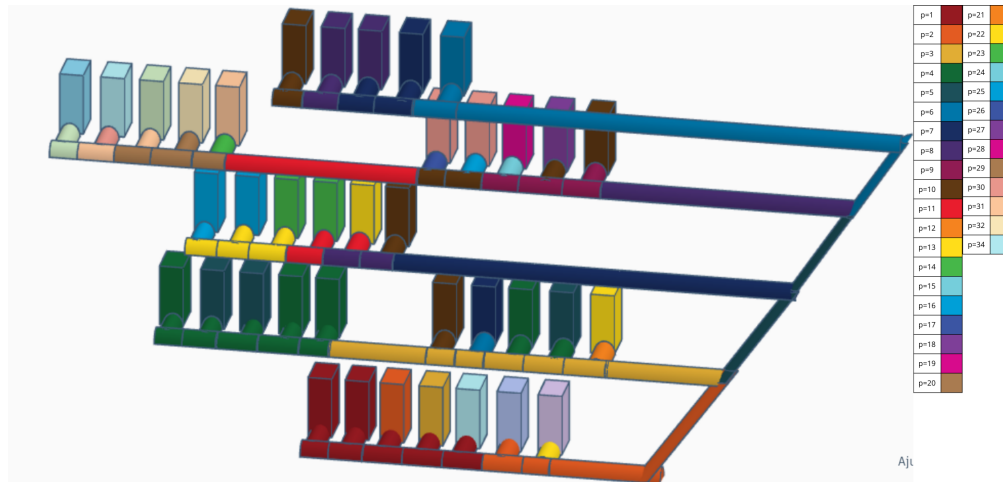


Figura 4.12: Secuencia de producción de simulación 2.

Simulación #3

Esta simulación utiliza la versión menos restrictiva de las tasas de extracción, lo que permite trabajar con múltiples rangos de tonelaje. Sin embargo, todos los demás parámetros están fijados en sus valores mínimos, incluyendo el porcentaje de probabilidad sísmica, el tonelaje máximo de extracción, y el avance de desarrollos.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
3	Versión B	19 %	12,000	8,000

Cuadro 4.17: Datos de entrada para simulación 3.

La simulación 3 presenta un enfoque más estructurado y gradual en la secuencia de producción, lo que resulta en un mayor tiempo requerido para completar el desarrollo de calles y zanjas. Durante esta etapa inicial, el modelo prioriza la extracción de caserones cercanos a las áreas en desarrollo, seleccionando aquellos de mayor rentabilidad para ser extraídos al comienzo (Anexo A.11). Sin embargo, a diferencia de otras simulaciones, no busca acceder inmediatamente a las zonas más altas del diseño, sino que sigue una secuencia más ordenada y progresiva.

Una vez completado el desarrollo de los dos primeros niveles, el modelo comienza a avanzar hacia los niveles superiores. En esta fase, prioriza la extracción de los caserones del último nivel, que son los más rentables del diseño, antes de descender nuevamente a niveles inferiores. Tras completar los caserones del último nivel, el modelo continúa la extracción de manera secuencial y organizada, sin priorizar necesariamente los recursos de mayor ley, sino manteniendo un flujo de trabajo continuo y lógico.

Simulación	Periodos totales	VAN	GAP
3	37	$17,5 \times 10^3$	0.00 %

Cuadro 4.18: Resultados simulación 3.

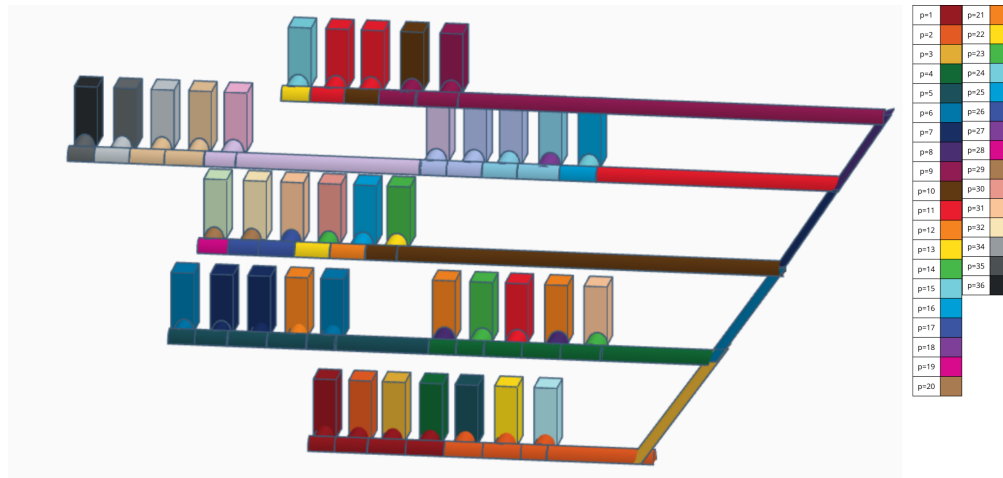


Figura 4.13: Secuencia de producción de simulación 3.

Es importante destacar que los caserones del nivel más bajo, que corresponden a áreas de menor ley, se extraen completamente antes de que algunos caserones de mediana ley en otros niveles hayan sido terminados. Este comportamiento refleja la naturaleza más ordenada y estructurada de esta simulación, donde la planificación no se centra exclusivamente en maximizar la rentabilidad inmediata, sino en mantener un equilibrio operativo entre extracción y desarrollo a lo largo de todo el plan de producción.

Simulación #4

En contraste con la simulación anterior, esta configuración permite los valores máximos en todos los parámetros. Utiliza la versión menos restrictiva de las tasas de extracción y un nivel máximo de permisibilidad sísmica del 24 %. Además, considera el mayor tonelaje permitido para la extracción de caserones y el máximo avance de desarrollos por período.

Simulación	Tasa de extracción	Probabilidad sísmica permitida	Tonelaje máximo	Avance máximo
4	Versión B	24 %	18,000	12,000

Cuadro 4.19: Datos de entrada para simulación 4.

El plan de producción de la simulación 4 se completa en 32 períodos y destaca por ser la más flexible, gracias a los parámetros permisivos en riesgo sísmico y tonelaje máximo permitido (Anexo A.12). Esto permite que varios caserones se desarrollen y extraigan en paralelo, dependiendo de su ubicación y valor económico. Los caserones con mayor ley se extraen completos en un solo período y son priorizados en los primeros ciclos del plan.

Simulación	Periodos totales	VAN	GAP
4	32	$20,4 \times 10^3$	0.01 %

Cuadro 4.20: Resultados simulación 4.

Después de los primeros períodos, el modelo combina la extracción de caserones de mediana y alta ley, maximizando la rentabilidad en cada etapa. Sin embargo, en algunos casos, los caserones de baja ley se extraen antes que los de mediana ley debido a su proximidad a los accesos desarrollados. Esto ocurre porque, mientras se avanza en las calles, el modelo prefiere extraer caserones cercanos para recuperar parte de la inversión en los desarrollos y mantener ingresos constantes.

Los desarrollos iniciales se enfocan en habilitar el acceso hacia las zonas más rentables. Una vez alcanzadas estas áreas, el modelo avanza hacia los niveles restantes, siguiendo un orden más cronológico. Las labores que se realizan en paralelo son, en su mayoría, desarrollos más cortos, ya que su longitud permite cumplir con los límites de avance por período. Por otro lado, los accesos principales, debido a su mayor longitud, se realizan de manera individual, ocupando todo el avance permitido por el modelo en un período específico.

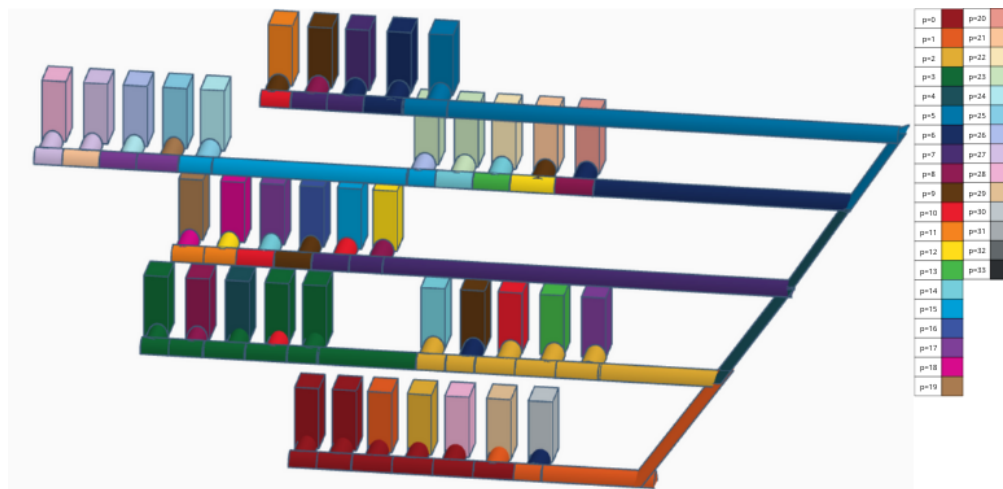


Figura 4.14: Secuencia de producción de simulación 4.

En general, esta simulación refleja cómo el modelo aprovecha las condiciones más permisivas para trabajar de manera eficiente, priorizando caserones rentables y ajustando la planificación para cumplir con las restricciones de desarrollos y tonelaje. Esto permite generar un plan de producción más dinámico y rentable, manteniendo un balance entre la extracción de recursos y el avance de las obras.

Capítulo 5

Conclusiones

El modelo matemático de optimización presentado en este trabajo, demuestra ser una herramienta valiosa para la planificación en operaciones subterráneas. Este enfoque no solo permite mejorar significativamente los tiempos de planificación, logrando obtener un plan de producción completo en cuestión de horas, sino que también supera ampliamente en efectividad a los métodos manuales. Las simulaciones realizadas evidenciaron cómo la variación de parámetros clave, como las tasas de extracción, el tonelaje máximo permitido, el avance de los desarrollos y el riesgo sísmico, impacta directamente en los planes de producción generados. Estas variaciones influyen tanto en la duración de los planes como en el Valor Actual Neto (VAN) obtenido, demostrando la capacidad del modelo para adaptarse a distintas configuraciones operativas y restricciones.

El análisis realista destaca la importancia de un enfoque estructurado y flexible. Los modelos con parámetros más permisivos generan planes de producción más dinámicos y rentables, priorizando la extracción de caserones de mayor ley en menos períodos. En cambio, configuraciones más restrictivas promueven una secuencia de trabajo más ordenada y conservadora, lo que, aunque prolonga los tiempos de ejecución, garantiza la estabilidad del macizo rocoso y minimiza los riesgos asociados a la sismicidad inducida. Este balance entre rentabilidad, seguridad y operatividad subraya la utilidad de los modelos matemáticos como una herramienta clave para la toma de decisiones estratégicas en minería subterránea. Sin embargo, los resultados también reflejan que las simulaciones con mejores beneficios económicos suelen ser aquellas que aplican menos restricciones al modelo. Esto plantea un desafío fundamental: determinar si es viable asumir mayores riesgos para maximizar la rentabilidad o si es preferible priorizar la integridad del sistema minero y la seguridad operativa. Esta decisión no solo impacta el VAN, sino que también debe considerar los costos asociados a la fortificación del macizo. En escenarios donde se busque aumentar el beneficio económico incrementando la probabilidad de sismicidad inducida, será indispensable fortalecer las estructuras de soporte en paralelo al avance de las obras.

Por ello, este estudio da espacio a futuras investigaciones que consideren incorporar parámetros adicionales, como la fortificación del macizo. Esto permitirá evaluar de manera más integral los costos y beneficios asociados a estrategias que involucren mayores riesgos sísmicos, ofreciendo soluciones más completas para la industria minera.

Apéndice A

Anexos

1. Caserones por periodo simulación A en variación de tasas de extracción

Caserones	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	25
Stope 3	25
Stope 4	26
Stope 5	28
Stope 6	29
Stope 7	29
Stope 8	30
Stope 9	31
Stope 10	32
Stope 11	33
Stope 12	34
Stope 13	35
Stope 14	36
Stope 15	37
Stope 16	38
Stope 17	39
Stope 18	40
Stope 19	41
Stope 20	42
Stope 21	10
Stope 22	3
Stope 23	5
Stope 24	2
Stope 25	2

Caserones	Periodo
Stope 26	3
Stope 27	3
Stope 28	3
Stope 29	8
Stope 30	2
Stope 31	3
Stope 32	4
Stope 33	2
Stope 34	7
Stope 35	13
Stope 36	6
Stope 37	10
Stope 38	14
Stope 39	4
Stope 40	2
Stope 41	0
Stope 42	0
Stope 43	1
Stope 44	3
Stope 45	4
Stope 46	5
Stope 47	5
Stope 48	6
Stope 49	8
Stope 50	9

Cuadro A.1: Caserones por periodo de simulación A.

2. Caserones por periodo simulación B en variación de tasas de extracción.

Caserones	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	29
Stope 3	30
Stope 4	31
Stope 5	32
Stope 6	33
Stope 7	34
Stope 8	35
Stope 9	36
Stope 10	37
Stope 11	38
Stope 12	39
Stope 13	40
Stope 14	41
Stope 15	42
Stope 16	43
Stope 17	44
Stope 18	45
Stope 19	46
Stope 20	47
Stope 21	25
Stope 22	12
Stope 23	9
Stope 24	14
Stope 25	15
Stope 26	2
Stope 27	7
Stope 28	14
Stope 29	7
Stope 30	12
Stope 31	19
Stope 32	9
Stope 33	5
Stope 34	13
Stope 35	8
Stope 36	11
Stope 37	9
Stope 38	13

Caserones	Periodo
Stope 39	24
Stope 40	4
Stope 41	0
Stope 42	1
Stope 43	2
Stope 44	3
Stope 45	3
Stope 46	5
Stope 47	6
Stope 48	6
Stope 49	8
Stope 50	8

Cuadro A.2: Caserones por periodo de simulación B

3. Caserones por periodo simulación E en variación de probabilidad máxima sísmica.

Caserones	Periodo
Stope 1	21
Stope 2	31
Stope 3	31
Stope 4	32
Stope 5	34
Stope 6	35
Stope 7	35
Stope 8	37
Stope 9	37
Stope 10	38
Stope 11	40
Stope 12	40
Stope 13	42
Stope 14	43
Stope 15	44
Stope 16	45
Stope 17	46
Stope 18	47
Stope 19	48
Stope 20	49
Stope 21	17
Stope 22	6
Stope 23	23
Stope 24	16
Stope 25	23
Stope 26	19
Stope 27	15
Stope 28	17
Stope 29	10
Stope 30	12
Stope 31	5
Stope 32	10
Stope 33	9
Stope 34	22
Stope 35	12
Stope 36	4
Stope 37	8
Stope 38	5

Caserones	Periodo
Stope 39	3
Stope 40	29
Stope 41	0
Stope 42	1
Stope 43	1
Stope 44	3
Stope 45	3
Stope 46	5
Stope 47	6
Stope 48	7
Stope 49	7
Stope 50	9

Cuadro A.3: Caserones por periodo de simulación E.

4. Caserones por periodo simulación F en variación de probabilidad máxima sísmica.

Caserones	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	25
Stope 3	25
Stope 4	27
Stope 5	28
Stope 6	28
Stope 7	29
Stope 8	30
Stope 9	31
Stope 10	32
Stope 11	33
Stope 12	34
Stope 13	35
Stope 14	36
Stope 15	37
Stope 16	38
Stope 17	39
Stope 18	40
Stope 19	41
Stope 20	42
Stope 21	4
Stope 22	2
Stope 23	2
Stope 24	10
Stope 25	3
Stope 26	17
Stope 27	3
Stope 28	14
Stope 29	10
Stope 30	3
Stope 31	3
Stope 32	20
Stope 33	3
Stope 34	2
Stope 35	14
Stope 36	13
Stope 37	2
Stope 38	4

Caserones	Periodo
Stope 39	5
Stope 40	4
Stope 41	0
Stope 42	0
Stope 43	1
Stope 44	3
Stope 45	3
Stope 46	4
Stope 47	6
Stope 48	7
Stope 49	8
Stope 50	8

Cuadro A.4: Caserones por periodo de simulación F.

5. Caserones por periodo simulación H en variación de probabilidad máxima sísmica.

Caserón	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	30
Stope 3	31
Stope 4	32
Stope 5	33
Stope 6	34
Stope 7	34
Stope 8	35
Stope 9	36
Stope 10	37
Stope 11	38
Stope 12	39
Stope 13	40
Stope 14	41
Stope 15	42
Stope 16	43
Stope 17	44
Stope 18	45
Stope 19	46
Stope 20	47
Stope 21	10
Stope 22	13
Stope 23	17
Stope 24	5
Stope 25	7
Stope 26	21
Stope 27	5
Stope 28	10
Stope 29	10
Stope 30	10
Stope 31	12
Stope 32	4
Stope 33	16
Stope 34	10
Stope 35	4
Stope 36	12
Stope 37	14
Stope 38	5

Caserón	Periodo
Stope 39	14
Stope 40	12
Stope 41	0
Stope 42	1
Stope 43	2
Stope 44	3
Stope 45	4
Stope 46	5
Stope 47	6
Stope 48	7
Stope 49	7
Stope 50	9

Cuadro A.5: Caserones por periodo de simulación H.

6. Tonelaje por periodo simulación I en variación de tonelaje máximo.

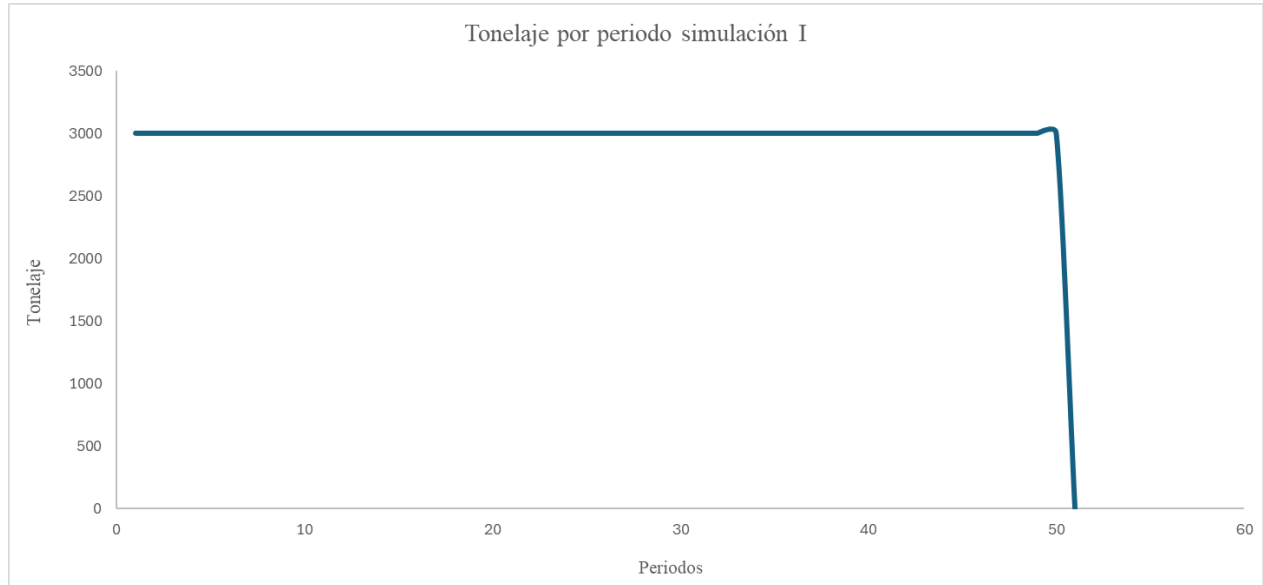


Figura A.1: Tonelaje por periodo de simulación I.

7. Tonelaje por periodo simulación L en variación de tonelaje máximo.

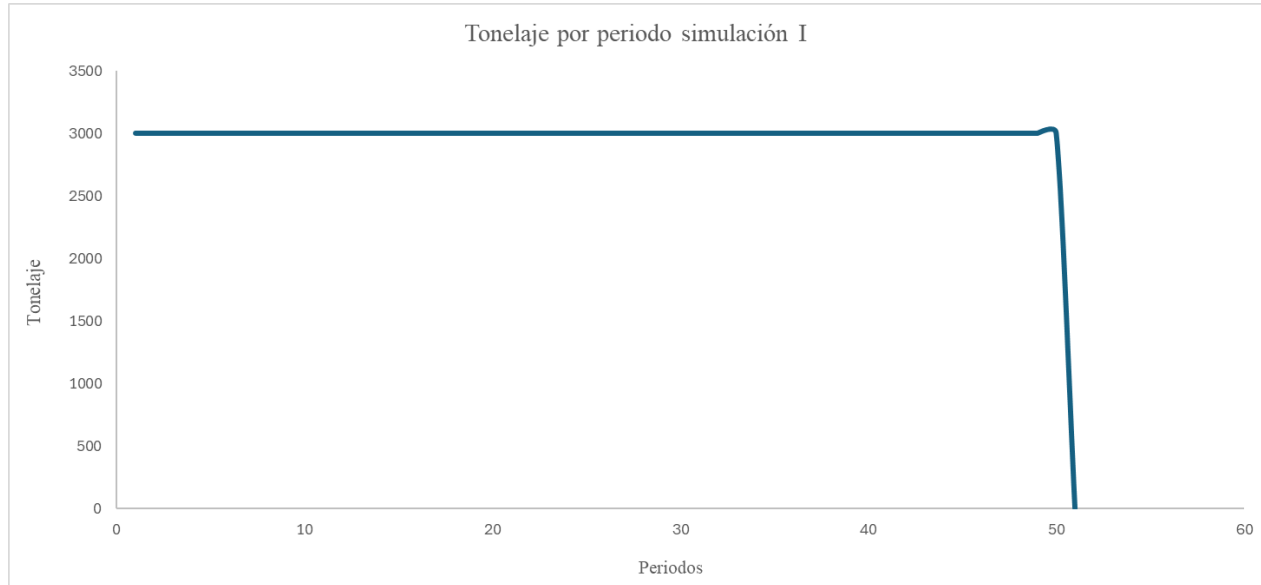


Figura A.2: Tonelaje por periodo simulación L.

8. Desarrollos por periodo simulación M en variación de límite de desarrollos por periodo

Desarrollos	Periodo
Development 1	0
Development 2	0
Development 3	3
Development 4	3
Development 5	3
Development 6	3
Development 7	3
Development 8	4
Development 9	4
Development 10	4
Development 11	4
Development 12	5
Development 13	5
Development 14	8
Development 15	9
Development 16	9
Development 17	9
Development 18	11
Development 19	11
Development 20	11
Development 21	11
Development 22	11
Development 23	11
Development 24	11
Development 25	11
Development 26	12
Development 27	13
Development 28	13
Development 29	13
Development 30	13
Development 31	14
Development 32	16
Development 33	17
Development 34	17
Development 35	17
Development 36	37
Development 37	38
Development 38	38

Desarrollos	Periodo
Development 39	38
Development 40	39
Development 41	1
Development 42	4
Development 43	1
Development 44	2
Development 45	1
Development 46	2
Development 47	1
Development 48	10
Development 49	1
Development 50	2
Development 51	1
Development 52	16
Development 53	2
Development 54	3
Development 55	2
Development 56	4
Development 57	2
Development 58	9
Development 59	2
Development 60	2
Development 61	0
Development 62	3
Development 63	0
Development 64	20
Development 65	0
Development 66	3
Development 67	0
Development 68	2
Development 69	1
Development 70	14
Development 71	1
Development 72	10
Development 73	1
Development 74	2
Development 75	1
Development 76	1
Development 77	1
Development 78	5
Development 79	2
Development 80	2

Desarrollos	Periodo
Development 81	0
Development 82	0
Development 83	0
Development 84	0
Development 85	0
Development 86	0
Development 87	3
Development 88	3
Development 89	3
Development 90	3
Development 91	4
Development 92	4
Development 93	4
Development 94	4
Development 95	4
Development 96	7
Development 97	6
Development 98	6
Development 99	8
Development 100	8

Cuadro A.6: Desarrollos por periodo de simulación M.

9. Desarrollos por periodo simulación N en variación de límite de desarrollos por periodo

Desarrollos	Periodo
Development 1	0
Development 2	0
Development 3	6
Development 4	6
Development 5	8
Development 6	8
Development 7	8
Development 8	8
Development 9	9
Development 10	9
Development 11	9
Development 12	9
Development 13	11
Development 14	11
Development 15	18
Development 16	18
Development 17	18
Development 18	19
Development 19	19
Development 20	19
Development 21	19
Development 22	25
Development 23	25
Development 24	26
Development 25	26
Development 26	26
Development 27	28
Development 28	28
Development 29	29
Development 30	29
Development 31	29
Development 32	29
Development 33	29
Development 34	29
Development 35	30
Development 36	30
Development 37	32
Development 38	33

Development 39	36
Development 40	40
Development 41	1
Development 42	4
Development 43	1
Development 44	6
Development 45	3
Development 46	5
Development 47	3
Development 48	3
Development 49	3
Development 50	9
Development 51	3
Development 52	9
Development 53	3
Development 54	21
Development 55	4
Development 56	7
Development 57	4
Development 58	8
Development 59	4
Development 60	4
Development 61	1
Development 62	3
Development 63	1
Development 64	3
Development 65	1
Development 66	6
Development 67	2
Development 68	5
Development 69	2
Development 70	10
Development 71	2
Development 72	4
Development 73	2
Development 74	6
Development 75	2
Development 76	2
Development 77	2
Development 78	5
Development 79	4
Development 80	4

Development 81	0
Development 82	0
Development 83	0
Development 84	0
Development 85	0
Development 86	0
Development 87	1
Development 88	2
Development 89	1
Development 90	1
Development 91	5
Development 92	5
Development 93	5
Development 94	5
Development 95	7
Development 96	7
Development 97	7
Development 98	7
Development 99	8
Development 100	8

Cuadro A.7: Desarrollos por periodo de simulación N.

10. Desarrollos por periodo simulación O en variación de límite de desarrollos por periodo

Desarrollos	Periodo
Development 1	0
Development 2	0
Development 3	2
Development 4	3
Development 5	3
Development 6	3
Development 7	3
Development 8	3
Development 9	3
Development 10	4
Development 11	4
Development 12	4
Development 13	4
Development 14	4
Development 15	4
Development 16	4
Development 17	5
Development 18	5
Development 19	6
Development 20	6
Development 21	6
Development 22	6
Development 23	6
Development 24	6
Development 25	6
Development 26	6
Development 27	6
Development 28	7
Development 29	7
Development 30	7
Development 31	7
Development 32	7
Development 33	7
Development 34	7
Development 35	7
Development 36	7
Development 37	8
Development 38	8

Development 39	8
Development 40	8
Development 41	0
Development 42	6
Development 43	0
Development 44	5
Development 45	1
Development 46	4
Development 47	1
Development 48	5
Development 49	1
Development 50	6
Development 51	2
Development 52	5
Development 53	2
Development 54	7
Development 55	2
Development 56	2
Development 57	2
Development 58	3
Development 59	2
Development 60	2
Development 61	0
Development 62	4
Development 63	0
Development 64	5
Development 65	0
Development 66	5
Development 67	0
Development 68	5
Development 69	0
Development 70	1
Development 71	1
Development 72	3
Development 73	1
Development 74	5
Development 75	1
Development 76	1
Development 77	1
Development 78	5
Development 79	2
Development 80	2

Development 81	0
Development 82	0
Development 83	0
Development 84	1
Development 85	1
Development 86	1
Development 87	2
Development 88	2
Development 89	3
Development 90	3
Development 91	3
Development 92	4
Development 93	3
Development 94	5
Development 95	4
Development 96	5
Development 97	4
Development 98	6
Development 99	7
Development 100	7

Cuadro A.8: Desarrollos por periodo de simulación O.

11. Caserones por periodo simulación 1.

Caserones	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	1
Stope 3	2
Stope 4	10
Stope 5	34
Stope 6	35
Stope 7	36
Stope 8	6
Stope 9	15
Stope 10	12
Stope 11	11
Stope 12	16
Stope 13	5
Stope 14	11
Stope 15	6
Stope 16	9
Stope 17	8
Stope 18	11
Stope 19	16
Stope 20	18
Stope 21	20
Stope 22	20
Stope 23	22
Stope 24	16
Stope 25	25
Stope 26	26
Stope 27	26
Stope 28	28
Stope 29	28
Stope 30	29
Stope 31	30
Stope 32	32
Stope 33	32
Stope 34	3
Stope 35	4
Stope 36	7
Stope 37	10
Stope 38	12

Cuadro A.9: Caserones por periodo de simulación 1.

12. Caserones por periodo simulación 2.

Caserones	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	0
Stope 3	1
Stope 4	2
Stope 5	27
Stope 6	29
Stope 7	30
Stope 8	12
Stope 9	4
Stope 10	3
Stope 11	6
Stope 12	9
Stope 13	3
Stope 14	3
Stope 15	4
Stope 16	4
Stope 17	3
Stope 18	9
Stope 19	15
Stope 20	16
Stope 21	16
Stope 22	18
Stope 23	18
Stope 24	9
Stope 25	20
Stope 26	21
Stope 27	23
Stope 28	23
Stope 29	24
Stope 30	25
Stope 31	26
Stope 32	27
Stope 33	28
Stope 34	5
Stope 35	6
Stope 36	7
Stope 37	7
Stope 38	9

Cuadro A.10: Caserones por periodo de simulación 2.

13. Caserones por periodo simulación 3.

Caseron	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	1
Stope 3	2
Stope 4	3
Stope 5	4
Stope 6	12
Stope 7	26
Stope 8	21
Stope 9	11
Stope 10	10
Stope 11	13
Stope 12	11
Stope 13	5
Stope 14	11
Stope 15	6
Stope 16	6
Stope 17	5
Stope 18	13
Stope 19	15
Stope 20	20
Stope 21	22
Stope 22	23
Stope 23	24
Stope 24	15
Stope 25	29
Stope 26	30
Stope 27	30
Stope 28	31
Stope 29	32
Stope 30	33
Stope 31	34
Stope 32	35
Stope 33	37
Stope 34	8
Stope 35	9
Stope 36	10
Stope 37	10
Stope 38	14

Cuadro A.11: Caserones por periodo de simulación 3.

14. Caserones por periodo simulación 4.

Caserón	Periodo
Stope 1	0
Stope 2	0
Stope 3	1
Stope 4	2
Stope 5	33
Stope 6	34
Stope 7	35
Stope 8	3
Stope 9	3
Stope 10	3
Stope 11	6
Stope 12	4
Stope 13	3
Stope 14	10
Stope 15	3
Stope 16	8
Stope 17	4
Stope 18	9
Stope 19	12
Stope 20	17
Stope 21	18
Stope 22	19
Stope 23	20
Stope 24	8
Stope 25	23
Stope 26	25
Stope 27	26
Stope 28	26
Stope 29	28
Stope 30	28
Stope 31	29
Stope 32	30
Stope 33	32
Stope 34	5
Stope 35	6
Stope 36	7
Stope 37	9
Stope 38	10

Cuadro A.12: Caserones por periodo de simulación 4.

Bibliografía

- Boirivant, J. (2008). «La programación lineal aplicación de la pequeñas y medianas empresas.» En: *Revista Reflexiones*.
- Campeau, LP. (2020). «Short-term planning optimization model for underground mines.» En: *Computers & Operations Research*.
- Epstein, R. (2012). «Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines.» En: *Operations Research*.
- Furtado e Faria, M. (2021). «Integrated stochastic optimization of stope design and long-term underground mine production scheduling.» En: *Resources Policy*.
- Henning, J. y H. Mitri (2007). «Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping.» En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Jarufe, J. (2023). «Sismicidad inducida en Mina Raura y su aplicación a la planificación minera». En: *Congreso SCMR*.
- Martin, C.D. y P.K. Kaiser (2003). «Stress, instability and design of underground excavations». En: *Pergamon*.
- Molina, R. (2013). «Catastro de prácticas operacionales y de diseño para la mediana minería subterránea en Chile.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile*.
- Nehring, M. (2010). «Dynamic short term production scheduling and machine allocation in underground mining using mathematical programming.» En: *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*.
- Pizarro, G (2018). *Modelos estadísticos de peligro sísmico aplicados a minería de panel caving*. Universidad de Chile.
- Potvin, Y. y M. Hudyma (2000). «Open Stope Mining in Canada». En: *Massmin 2000 Paper*.
- Rojas, B. (2016). «Procedimiento para la construcción de modelos numéricos en minería por sublevel stoping». En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile*.
- Scoble, M. y A. Moss (1994). «Dilution in underground bulk mining: implications for production management». En: *Geological Society, London, Special Publications*.
- Trout, LP. (1995). «Underground mine production scheduling using mixed integer programming.» En: *Massmin 2000*.
- Villaescusa, E (2014). *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. CRC Press.