



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

OPTIMIZACIÓN DE PLANES MINEROS EN MINAS EXPLOTADAS POR PANEL
CAVING INCLUYENDO ACTIVIDADES DE PREPARACIÓN MINERA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

JAVIER ALBERTO VÁSQUEZ CANDIA

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

PROFESOR CO-GUÍA:
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSE ASCENCIO CASTILLO
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA
POR: JAVIER ALBERTO VÁSQUEZ CANDIA
FECHA: ABRIL 2018
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

OPTIMIZACIÓN DE PLANES MINEROS EN MINAS EXPLOTADAS POR PANEL CAVING INCLUYENDO ACTIVIDADES DE PREPARACIÓN MINERA

Una práctica común en minería es descomponer el proceso de planificación en diferentes tareas y, por lo tanto, abordar el proceso general de forma desacoplada e independiente. Esto, trae consigo que el plan de producción final no necesariamente captura el máximo valor de un proyecto pues, como las etapas en los procesos de planificación se llevan a cabo secuencialmente, las decisiones se van realizando con información desagregada en cada proceso y los modelos no capturan la complejidad de los próximos pasos aguas abajo, por lo tanto, las decisiones posteriores son sujetas a la inicial.

Lo anterior, motiva a desarrollar una investigación que permita entender y proponer alternativas para resolver el desacople entre un programa de extracción y el agendamiento de preparación, más aún cuando este desacople causa un exceso de inversión en desarrollo minero y fortificación porque el área preparada no es usada en el periodo (G. Díaz y E. Morales, 2008) o la extracción planificada se ve afectada debido a la falta de área preparada.

El objetivo es proponer una metodología de optimización que incorpore las actividades de preparación en un agendamiento de producción en una mina explotada por Panel Caving.

La metodología considera la integración de los aspectos operacionales más relevantes en la construcción de un plan minero en una mina explotada por Panel Caving, usando programación entera mixta (MIP).

Se crearon 2 casos de estudios. El primer caso tuvo por objetivo determinar una estrategia para optimizar los tiempos de resolución de los agendamientos de producción. De los 4 ejercicios del caso estudio 1, se determinó que las discretizaciones de columnas de bloques permiten disminuir los tiempos de cómputo sin perder de vista los aspectos técnicos que gobiernan el proceso de caving.

El objetivo del caso estudio 2 fue integrar las actividades de preparación en un único problema de agendamiento. Para ello, se realizaron 3 ejercicios donde se compara la metodología propuesta por esta tesis con la manera tradicional de realizar la planificación en Panel Caving.

De los resultados, la metodología tradicional de planificación arrojó resultados que podrían ser infactibles si las restricciones de preparación son incluidas en la planificación de la producción, debido a que no las considera como parámetros de entrada. En cambio, la metodología propuesta permite determinar la óptima apertura de puntos de extracción por periodo, donde se obtienen diferencias respecto a una estrategia operacional de apertura de puntos de hasta 33 %, en valor, lo que equivale a 100 millones de dólares de diferencias por este fenómeno.

Las posibles extensiones de este trabajo son simular los resultados del agendamiento para evaluar la factibilidad del plan de producción y evaluar otras estrategias de constructibilidad como el tipo de hundimiento.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF MASTER IN MINING
ENGINEERING**

BY: JAVIER ALBERTO VÁSQUEZ CANDIA

DATE: APRIL 2018

THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA

**OPTIMIZATION OF MINE PLANNING PANEL CAVING MINES
INCLUDING DEVELOPMENT ACTIVITIES**

A common practice in mining is to break down the planning process into different tasks to address the overall process in a disaggregated and independent way. This means that the production plan does not necessarily capture the maximum value of the project, because as the stages in the planning processes are carried out sequentially, the decisions are made with disaggregated information in each process and the models do not capture the complexity of the steps downstream, as a result, subsequent decisions are subject to the initial. It is necessary to develop a research to understand and propose alternatives to solve the decoupling between an extraction program and scheduling development, especially when this uncoupling causes over investment in mining development and fortification because the prepared area is not used in the period (G. Diaz and Morales E., 2008) or the planned extraction is affected due to lack of prepared area. The objective is to propose an optimization methodology that integrates the development activities in a production schedule of a mine operated by Panel Caving. The methodology considers the most relevant operational aspects in the computation of a mining plan of a Panel Caving mine, using mixed integer programming (MIP). This work considers two case studies. The first case was aimed at determining a strategy to optimize the resolution times of production schedules. From the 4 exercises of the case study 1, it was determined that the discretizations of columns of blocks allow to reduce the computation times without altering the technical aspects that govern the caving process. The second case of study seeks to integrate development activities into a single scheduling problem. To achieve this goal, 3 exercises were carried out in which the methodology proposed is compared with the traditional way of planning in Panel Caving. The results indicate that considering the developing constraint within the traditional planning methodology could yield unfeasible results, mainly due to not considering input parameters. On the other hand, the proposed methodology allows to determine an optimal incorporation of drawbells per period. The differences that exist between both methodologies are up to 33 % in the incorporation of drawbells (in value) and 100 million dollars in the economic value. The possible extensions of this work are to simulate the results of the scheduling to evaluate the feasibility of the production plan and evaluate other constructability strategies such as the type of caving.

A mi amada Laura por su motivación, paciencia y amor durante este proceso.

Agradecimientos

A mi amada Laura por el incondicional apoyo que me ha brindado durante estos años de estudio, y por el cariño y la inimaginable paciencia durante este proyecto. Gracias por motivarme a continuar estudiando y apoyarme cuando lo necesité, por aconsejarme y darme ánimo y fuerza en momentos difíciles.

A mi madre quién me apoyó durante todas las etapas de mi vida.

A mi hermana María José por su preocupación y ánimo que me ayudaron a sobrepasar situaciones complicadas.

A mi tía Raquel y tío Héctor por apoyar mis decisiones y entregarme tranquilidad y comprensión durante este periodo de estudio.

A dona Maria das Graça por apoyarme en los momentos difíciles. Gracias por confiar en mi.

A mi profesor guía, Nelson Morales, por darme la oportunidad de pertenecer al Laboratorio de Planificación Minera Delphos. Gracias por todas las oportunidades brindadas para desarrollarme como estudiante de postgrado y como pensador crítico ante las metodologías tradicionales de la minería.

Al profesor José Ascencio, por orientarme en mis decisiones académicas y por la disposición a atender mis solicitudes e inquietudes. Gracias por los consejos entregados que me permitieron tomar buenas decisiones sobre mi formación académica y profesional.

A mi profesor Co-guía, Javier Cornejo, por apoyarme en esta investigación y entregarme los lineamientos de la industria para sostener este estudio.

A mis compañeros del laboratorio Delphos quienes me apoyaron y alentaron en las tardes de estudio del laboratorio.

Finalmente, agradezco a la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile y a todas las personas que de alguna u otra manera han sido parte de mi formación personal y profesional.

Este trabajo fue financiado gracias al Advanced Mining Technology Center (Proyecto Basal FB0809)

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Descripción del Problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura de la Tesis	4
2. Antecedentes Bibliográficos	6
2.1. Minería Subterránea	6
2.2. Métodos Mineros Subterráneos	6
2.3. Sistema Minero Panel Caving	9
2.3.1. Campo de Aplicación	9
2.3.2. Descripción del Método	10
2.3.3. Layout de la Mina	11
2.3.4. Estado Tensional del Macizo Rocosó en Producción	11
2.3.5. Velocidad de Extracción	12
2.3.6. Variables Consideradas en las Variantes de Panel Caving	13
2.3.7. Variantes de Hundimiento Panel Caving	14
2.4. Desarrollo y Preparación Minera	19
2.4.1. Excavaciones Mineras	19
2.4.2. Obras Civiles	21
2.4.3. Montaje	23
2.5. Planificación Minera en Panel Caving	23
2.6. Investigación de Operaciones en Minería	26
2.6.1. Investigación de Operaciones en Minería Subterránea	26
2.7. Estudios Similares	28
2.7.1. Contribución de la Tesis	30
3. Herramienta de Agendamiento y Planificación UDESS	32
3.1. Funcionamiento de UDESS	32
3.1.1. Actividades	33
3.1.2. Restricciones	33
3.1.3. Función Objetivo	34
3.1.4. Resultados	35

4. Metodología	36
4.1. Metodología	36
4.2. Principales Supuestos	37
4.3. Modelamiento en UDESS	37
4.3.1. Generalidades del Modelamiento en Panel Caving	37
4.3.2. Metodología del Modelamiento	39
4.3.3. Modelamiento de la Etapa de Producción	40
4.3.4. Modelamiento de la Etapa de Preparación	43
5. Caso Estudio 1: Análisis y Resultados	48
5.1. Parámetros de Entrada	48
5.1.1. Modelo de Bloques	49
5.1.2. Criterios Económicos	49
5.1.3. Criterios de Planificación	50
5.1.4. Consideraciones Geométricas y Geomecánicas	51
5.2. Ejercicio 1: Optimización de Actividades de Producción	52
5.2.1. Resultados del Caso de Estudio 1	52
5.2.2. Análisis de Resultados Caso Estudio 1	53
5.3. Ejercicio 2: Discretización de Columnas	54
5.3.1. Resultados Ejercicio 2	55
5.3.2. Análisis de Resultados Ejercicio 2.	56
5.4. Ejercicio 3: Discretización de Columnas y Punto de Inicio de Hundimiento	57
5.4.1. Resultados Ejercicio 3	58
5.4.2. Análisis de Resultados Ejercicio 3.	58
5.5. Ejercicio 4: Discretización de Columnas y Velocidades de Extracción	59
5.5.1. Resultados Ejercicio 4	59
5.5.2. Análisis de Resultados Ejercicio 4.	60
6. Caso Estudio 2: Análisis y Resultados	61
6.1. Ejercicio 5: Planificación Tradicional	62
6.2. Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional	62
6.3. Ejercicio 7: Metodología Propuesta	62
6.4. Estrategia Operacional de Apertura de Bateas	63
6.5. Metodología de Trabajo para los Ejercicios 5, 6 y 7	64
6.5.1. Metodología del Ejercicio 5	64
6.5.2. Metodología del Ejercicio 6	64
6.5.3. Metodología del Ejercicio 7	65
6.6. Parámetros de Entrada para Planificación de Producción	66
6.6.1. Modelo de Bloques	66
6.6.2. Criterios Económicos	67
6.6.3. Criterios de Planificación	68
6.6.4. Consideraciones Geométricas y Geomecánicas	68
6.7. Parámetros de Entrada - Planificación de Preparación Minera	69
6.7.1. Malla de Extracción, Layout de la Mina y Diseño Minero	69
6.7.2. Criterios de Desarrollo y Preparación	70
6.7.3. Secuencia de Apertura de Puntos	70
6.8. Resultados Ejercicio 5: Planificación Tradicional	71

6.9. Resultados Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional	74
6.9.1. Agendamiento de Producción	74
6.9.2. Agendamiento de Preparación	75
6.9.3. Ingresos, Costos y Valor Presente Neto del Agendamiento	77
6.9.4. Comparación Ejercicio 5 y 6	79
6.10. Resultados Ejercicio 7: Metodología Propuesta	82
6.10.1. Agendamiento de Producción	82
6.10.2. Agendamiento de Preparación	84
6.10.3. Ingresos, Costos y VPN del Agendamiento	86
6.10.4. Comparación Metodología Propuesta con ejercicios 5 y 6	88
7. Conclusiones y Trabajo Futuro	95
7.1. Caso Estudio 1	95
7.2. Caso Estudio 2	95
7.3. Trabajo futuro	97
Bibliografía	98

Índice de tablas

2.1. Variables que Influyen en el método de explotación	7
2.2. Distancias Permisibles según el tipo de variantes de Panel Caving	14
4.1. Ejemplo de un Archivo de Actividades de Producción preparado para UDESS	42
4.2. Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Producción incluidas en el Modelamiento	46
4.3. Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Hundimiento incluidas en el Modelamiento	46
4.4. Rendimientos de Preparación y Desarrollo	47
5.1. Características Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 1	49
5.2. Parámetros Económicos del Caso de Estudio 1	50
5.3. Perfil de Velocidad de Extracción según la Altura de Columna	50
5.4. Resumen Casos Seleccionados de Agrupamiento de Niveles	55
5.5. Perfiles de Velocidad Caso Estudio 2. Experimento 3	59
6.1. Restricciones de los ejercicios del Caso EStudio 2	63
6.2. Escenarios que definen la estrategia operacional de apertura de bateas por periodo.	63
6.3. Desglose de las Actividades y sus Atributos imputados para los Ejercicios 5 y 6.	65
6.4. Nomenclatura de los Experimentos en Caso Estudio 2	66
6.5. Características Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 1	67
6.6. Perfil de Velocidad de Extracción según la Altura de Columna	68
6.7. Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Producción incluidas en el Modelamiento	69
6.8. Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Hundimiento incluidas en el Modelamiento	70
6.9. Criterios de Rendimientos en Preparación y Desarrollo	70
6.10. Valor Presente Neto de los Planes de Producción Metodología Tradicional . .	73
6.11. Valor Presente Neto de los Planes de Producción Ejercicio 6	79
6.12. Valor Presente Neto de los Planes de Producción con Metodología Propuesta	87
6.13. Agendamiento de Producción según la Metodología Propuesta	87
6.14. Tabla Comparativa de los valores capturados entre la Metodología Propuesta y la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación	94

Índice de ilustraciones

2.1. Variables que Influyen en el método de explotación	8
2.2. Vista Isométrica de los métodos Block Caving y Panel Caving	9
2.3. Equipo LHD realizando actividades productivas en un Panel Caving	10
2.4. Esquema niveles productivos en Panel Caving	11
2.5. Comportamiento de los esfuerzos en distintas zonas del frente	12
2.6. Geometría del frente de extracción	13
2.7. Ángulo de Extracción	14
2.8. Panel Caving con Hundimiento Convencional (vista de perfil)	15
2.9. Panel Caving con Hundimiento Convencional(vista isométrica)	15
2.10. Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Convencional	16
2.11. Panel Caving con Hundimiento Previo(vista de perfil)	16
2.12. Panel Caving con Hundimiento Previo (vista isométrica)	16
2.13. Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Previo	17
2.14. Panel Caving con Hundimiento Avanzado (vista de perfil)	17
2.15. Panel Caving con Hundimiento Avanzado (vista isométrica)	18
2.16. Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Avanzado	18
2.17. Procesos de la Preparación Minera	19
2.18. Perforación Mecanizada con Equipo	21
2.19. Punto de Extracción	22
2.20. Punto de Vaciado	23
2.21. Esquema del Proceso de Planificación Minera	24
2.22. Proceso de Planificación de Block y Panel Caving	24
2.23. Esquema de Valor Respecto al Horizonte de Planificación	25
3.1. Tipos de Precedencias	34
4.1. Diseño Conceptual del Modelamiento en Panel Caving	38
4.2. Modelamiento de una columna en UDESS	39
4.3. Metodología de Trabajo en UDESS	40
4.4. Metodología de Trabajo en Actividades de Producción en UDESS	41
4.5. Consideraciones Geométricas y Geomecánicas como Restricciones de Precedencia en las Actividades de Producción	43
4.6. Ciclo Minero para el Desarrollo Horizontal	44
4.7. Metodología de Trabajo en Actividades de Preparación y Desarrollo en UDESS	44

4.8. Ejemplo de Incorporación de Área como Secuencia de Apertura de Puntos	47
5.1. Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 1	49
5.2. Beneficio por Columna del Footprint	51
5.3. Incorporación de Área Caso Estudio 1	51
5.4. Plan de Produccion para el Caso Estudio 1	52
5.5. Secuenciamiento del Plan de Producción Caso Estudio 1	53
5.6. Idea Conceptual para la Discretización	54
5.7. Plan de Producción para los modelos discretizados	55
5.8. Propagación del hundimiento - Caso Estudio 2 (periodo 7)	56
5.9. Valor Objetivo, Gap y Tiempo de Resolución Casos Discretizados	57
5.10. Estrategia de Incorporación de Área y Secuenciamiento. Caso Estudio 2	58
5.11. VPN entre Secuencia 1 y Secuencia 2	58
5.12. Plan de Producción con 3 Perfiles de Velocidades de Extracción.	59
5.13. Perfiles de Velocidades. Secuencia 1	60
6.1. Metodología para realizar los ejercicios 5 y 6	65
6.2. Metodología para realizar los ejercicios 7	66
6.3. Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 3	67
6.4. Beneficio Acumulado por Columna del Footprint (millones de dolares)	68
6.5. Malla de Extracción Nivel de Producción	69
6.6. Estrategia de Apertura de Bateas	71
6.7. Comparación de Planes de Producción Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional (Ejercicio 5)	72
6.8. Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 para las 3 Estrategias según Planificación Tradicional	72
6.9. Comparación de Costos de Preparación por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional	73
6.10. Comparación de Planes de Producción Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional (Ejercicio 6)	74
6.11. Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 para las 3 Estrategias según Planificación Tradicional con Preparación	75
6.12. Comparación Agendamiento de Desarrollo Horizontal Nivel de Producción y Hundimiento para los 3 escenarios. Ejercicio 6.	75
6.13. Comparación Agendamiento de Sistema de Traspaso para los 3 escenarios. Ejercicio 6.	76
6.14. Comparación Agendamiento de Fortificación de Intersección de Calle y Galería Zanja y Fortificación de Puntos de Extracción para los 3 escenarios. Ejercicio 6.	77
6.15. Comparación Agendamiento de Construcción de Carppeta de Rodado y Muros de Confinamiento para los 3 escenarios. Ejercicio 6.	77
6.16. Comparación de Ingreso de Producción por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación	78
6.17. Comparación de Costos de Preparación por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación	79
6.18. Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, Estrategia Pesimista.	80

6.19. Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, EStrategia Normal.	81
6.20. Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, experimento.	81
6.21. Comparación Valor Presente Neto de los ejercicios 5 y 6 para todos los excenarios.	82
6.22. Plan de Producción Metodología Propuesta.	83
6.23. Envoltente de Extracción Metodología Propuesta Periodo 3 y 6	83
6.24. Envoltente de Extracción y ángulo de Extracción Metodología Propuesta Pe- riodo 8	84
6.25. Envoltente de Extracción y ángulo de Extracción Metodología Propuesta Pe- riodo 12	84
6.26. Plan de Desarrollo Horizontal en Nivel de Hundimiento y Producción Meto- dología Propuesta	85
6.27. Plan de Construcción de Bateas y Sistema de Traspaso Metodología Propuesta	85
6.28. Plan de Construcción de Carpeta de Rodado y Puntos de Extracción Metodo- logía Propuesta	86
6.29. Plan de Construcción de Bateas y Sistema de Traspaso Metodología Propuesta	86
6.30. Ingresos y Costos de Preparación por Año según la Metodología Propuesta	87
6.31. Comparación entre Plan de Producción de Metodologia Propuesta y Estrategia Pesimista del Ejercicio 5 y 6	88
6.32. Comparación entre Plan de Producción de Metodologia Propuesta y Estrategia Normal del Ejercicio 5 y 6	89
6.33. Comparación entre Plan de Producción de Metodologia Propuesta y Estrategia Optimista del Ejercicio 5 y 6	89
6.34. Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 ente Planificación Tradi- cional con Preparación y Metodología Propuesta	90
6.35. Comparación Agendamientos de Desarrollo Horizontal Nivel de Producción (NP) y Hundimiento (UCL) entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta	90
6.36. Comparación Agendamientos de Sistemas de Traspaso y Fortificación de Pun- tos de Extracción entre Planificación Tradicional con Preparación versus Me- todología Propuesta	91
6.37. Comparación Agendamientos de Fortificacion de Intersecciones y Carpeta de Rodado entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta	92
6.38. Comparación Costos de Preparación entre Metodologia Propuesta y Estrategia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6	92
6.39. Comparación Ingresos de Producción entre Metodología Propuesta y Estrate- gia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6	93
6.40. Comparación Valor Presente Neto Planes de Producción entre Metodologia Propuesta y Estrategia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6	94

Capítulo 1

Introducción

En Chile, la minería de cobre ha sido fundamental para el desarrollo del país debido a la gran presencia de yacimiento cupríferos en el subsuelo nacional, los cuales han sido explotadas desde hace más de 100 años. No por nada, Chile se ha convertido en un país minero que ha alcanzado un nivel de desarrollo tal que ha permitido producir más del 32 % de la producción de cobre mundial en promedio, en los últimos 10 años (Statistics, 2016).

Hoy día, la industria nacional minera es considerada una prestigiosa fuente de experiencia y conocimiento que se ha forjado a través de la historia de estos años por medio del aprendizaje, los desafíos y oportunidades que se han presentado.

Muchas personas conocen la complejidad y diversidad de las disciplinas que interactúan en esta industria. La forma en que se explotan los yacimientos se ha llevado a cabo a través de métodos superficiales y subterráneos, predominando aún en la actualidad el primero, no obstante atendida la característica no renovable de los minerales, se prevé que en el futuro y dada la profundidad donde se encontrarán los depósitos, la extracción subterránea cobrará cada vez mayor relevancia.

Dicho lo anterior, las investigaciones recientes se han orientado a la resolución de problemáticas relacionadas al complejo desafío que constituye la extracción de mineral a profundidades cada vez mayores. Existen en la actualidad diversos métodos de explotación subterránea, sin embargo aquellos que han adquirido mayor relevancia son los métodos por Hundimiento Masivo o Caving, dentro de los cuales podemos encontrar diferentes variantes, como lo son el Block, Sublevel y Panel Caving, este último considerado como el más idóneo para yacimientos a grandes profundidades con roca competente, en particular mineral primario.

El método Panel Caving, del cual se centrará esta investigación, es un sistema de explotación subterráneo masivo basado en la gravedad. Su principio básico es generar un corte en la base del macizo rocoso tal que permitan hundirlo de manera controlada, es decir, quebrar el macizo rocoso y propagar las estructuras mediante perforación, tronadura y preacondicionamiento, para luego recuperar el mineral quebrado en los puntos de extracción (Laubscher, 1994).

La planificación en Panel Caving consiste en definir el orden de extracción de los bloques buscando siempre extraer los bloques que presentan las mayores leyes al inicio para maximizar el Valor Presente Neto (VPN). Por lo tanto, se torna un desafío mayor pues para que esto ocurra es necesario contar con una infraestructura que permita recuperar el mineral en los puntos de extracción.

Por lo tanto, es necesario una planificación de todas las actividades y tareas requeridas para alcanzar el éxito del proyecto. En ese sentido, el orden en el cual los bloques son extraídos y la construcción de los niveles productivos que soporta la recuperación de mineral y aseguran el acceso y la extracción, debe ser tomada en cuenta en cualquier proceso de planificación de minas.

Finalmente, el proceso global de planificación minera es complejo, teniendo en vista que para alcanzar un resultado es común resolverlo de forma fragmentada e independiente porque existen factores técnicos-económicos que deben ser considerados.

1.1. Descripción del Problema

En el contexto de esta tesis, la planificación minera para Panel Caving tiene que tomar en cuenta tanto los factores técnicos como económicos para obtener el mejor plan minero. Además de responder a las preguntas de temporalidad de dónde, cuándo y cómo extraer el mineral, también tiene que considerar las actividades de desarrollo y preparación para alcanzar un plan minero factible.

Si consideramos una mina explotada por Panel Caving, puede ocurrir que la incorporación de área requerida para un periodo este sobreestimada. Por un lado, este evento genera un exceso de inversión puesto que la construcción de los niveles productivos no será utilizada en ese periodo, y por otro lado, deficiente gestión de los recursos disponibles para desarrollar esa actividad. Si consideramos el caso contrario, puede ocurrir que la incorporación de área requerida sea insuficiente generando falta de área para la producción, generando problemas en el cumplimiento de la producción (agotamiento prematuro de puntos de extracción y sin disponibilidad de mineral para contingencias).

Generalmente, la desagregación de los procesos de planificación en diferentes etapas es una practica común en la industria, por esta razón la elaboración del programa de producción y de preparación minera son realizados de manera desacoplada. Ejemplo de lo anterior es la metodología de planificación minera usada en Codelco El Teniente, donde la planificación y la preparación son procesos secuenciales.

Lo anterior significa que el plan de producción final no necesariamente captura el máximo valor de un proyecto, o peor aún, no es suficientemente operativo. De hecho, como las etapas en los procesos de planificación se llevan a cabo secuencialmente, las decisiones se van realizando con información agregada en cada proceso y los modelos no capturan la complejidad de los próximos pasos aguas abajo, por lo tanto, las decisiones posteriores son sujetas a la inicial. En términos globales, estos resultados pueden ser sub-óptimos.

Otro punto a considerar en los procesos de planificación es que no existe una metodología que permita integrar las etapas de manera simultánea ni herramientas computacionales que muestren la forma de resolver los programas de producción y agendamientos de preparación y desarrollo minero, ni menos acoples de éstos en el plan final, teniendo que considerar datos determinísticos históricos para planificar los nuevos programas.

Por lo tanto, la motivación de este paper viene del desacople que existe entre el programa de extracción (dónde, cuándo y cómo extraer un bloque) y el programa de preparación y desarrollo de minas (conjunto de actividades de excavación, obras civiles, infraestructura y montaje llevados a cabo para realizar la extracción de mineral). Más específicamente, la motivación nace cuando este desacople causa un exceso de inversión o la extracción planificada se ve afectada debido a la falta de área preparada.

Este trabajo tiene como objetivo resolver el problema de producción subterránea de una mina Panel Caving considerando tanto las actividades de preparación y desarrollo como de producción simultáneamente. En ese sentido, se intenta proponer una metodología que integre ambos procesos.

Para apoyar la resolución de este problema, se utilizará la herramienta computacional Universal Delphos Sequencer and Scheduling - UDESS, que es un agendador y planificador de actividades que considera las precedencias físicas, la capacidad de producción y las restricciones operativas con el objetivo de maximizar el NPV en el horizonte de planificación considerado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Proponer una metodología basada en programación matemática que permita optimizar un plan de producción de una mina Panel Caving considerando la Producción y Preparación Minera simultáneamente.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar las principales actividades de Producción y Preparación de una mina Panel Caving, considerando un desglose de actividades anuales de los niveles de producción y hundimiento.
- Determinar estrategias para optimizar la etapa de Producción.
- Modelar el orden de apertura de los puntos de extracción y la etapa de extracción de acuerdo a la condiciones técnicas y económicas, y geométricas y geomecánicas.
- Modelar las actividades de preparación y desarrollo minero de los niveles de hundimiento y producción.

- Secuenciar las actividades de preparación y desarrollo minero entre sí, y en cada una de ellas.
- Utilizar la herramienta computacional UDESS para optimizar un plan de producción y un plan de producción más actividades de preparación.

1.3. Alcances

Los principales alcances de este estudio son:

- Se utiliza una herramienta computacional UDESS basado en un modelo de optimización. No se desarrolla o crea un nuevo modelo de optimización.
- El estudio considera que la selección del piso económico de hundimiento y el footprint son información conocida.
- La altura máxima de extracción disponible para la extracción será de 250 metros. Esta altura no tiene relación con la altura económicamente extraíble, pues el agendamiento entregará dicha altura.
- La dilución del modelo de bloques será computado antes de ingresarlo a la metodología.

1.4. Estructura de la Tesis

La estructura de esta tesis es la siguiente. En el Capítulo 1 se presenta la introducción del proyecto, abordando el problema que motiva la investigación y los objetivos que se desean alcanzar.

En el Capítulo 2 se presenta el análisis bibliográfico de este estudio, junto con los aspectos más importantes del método de explotación Panel Caving y sus variantes, y los requerimientos para la Preparación Minera. Además, se muestra la forma tradicional de hacer planificación subterránea en estos métodos. Luego, se muestra la investigación de operaciones aplicada en minería subterránea.

En el Capítulo 3 se presenta el modelo de optimización de agendamiento minero UDESS. En el Capítulo 4 se presenta la metodología propuesta para obtener los resultados analizados en el capítulo posterior. Se muestra el modelamiento en UDESS para realizar un agendamiento conjunto entre Planificación y Preparación Minera. Además, se entregan las simplificaciones que se realizaron, la forma de cómo fueron modeladas ambas etapas, las restricciones para el caso de estudio y los supuestos que se utilizaron.

En el Capítulo 5 y 6 se presenta la implementación de la metodología propuesta basado en cuatro casos estudios. En el Capítulo 5 se muestra el primer caso de estudio que consiste en resolver de manera tradicional la planificación de la producción en un experimento piloto. En el Capítulo 6 se presenta el segundo caso de estudio que consiste en proponer una discretización de columnas de bloques y medir el impacto que tiene en el Plan de Producción

y su Valor Presente Neto (VPN). También se realiza un experimento sobre cómo influye el cambio de Secuencias de Extracción y Perfiles de Velocidad de Extracción. El caso de estudio 3 consiste en realizar la optimización del plan de preparación y desarrollo, y finalmente, el último caso estudio mide la inclusión de la Preparación Minera a un Plan de Producción, de manera de resolver ambas situación simultáneamente.

Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de este trabajo y las recomendaciones de los trabajos futuros.

Capítulo 2

Antecedentes Bibliográficos

2.1. Minería Subterránea

El concepto de *Minería Subterránea* se puede definir como el arte de extraer recursos minerales, construyendo y desarrollando labores mineras para recuperar el mineral de interés. Una definición más formal es la entregada por ((*Introductory Mining Engineering* 1987)), donde establece que la minería subterránea es toda aquella explotación de mineral en la cual la operación es llevada a cabo debajo de la superficie.

Para conseguir el objetivo de recuperar el metal de interés, debe considerarse la estrategia de extracción. Los métodos mineros subterráneos se emplean para recuperar el metal cuando la profundidad del depósito, la tasa de remoción estéril/mineral o ambas son excesivas para una explotación superficial.

Pero para llegar a decidir si un yacimiento tiene el potencial de ser explotado, muchas variables deben ser consideradas para tomar la decisión. Según (Contreras, 2007), las principales variables que influyen en el proceso de seleccionar si el yacimiento será explotado de manera subterránea son las Características del Yacimiento, las Condiciones del Entorno y los Parámetros de Explotación(ver Figura 2.1). Además, según (Ortiz, 2008), las variables definidas en la Figura 2.1 pueden ser desglosadas según la tabla 2.1.

2.2. Métodos Mineros Subterráneos

En cuanto a los métodos mineros subterráneos, éstos pueden ser clasificados según la importancia que tiene el sistema de soporte (fortificación) en el funcionamiento del sistema de explotación. De acuerdo a esto, los métodos mineros subterráneos se pueden dividir en 3 categorías: autosoportados, soportados y por hundimiento (*Introductory Mining Engineering* 1987).

1. Autosoportados: Son métodos de explotación que no requiere un sistema de soporte

Tabla 2.1: Variables que Influyen en el método de explotación. *Fuente: (Ortiz, 2008) y (Contreras, 2007)*

Ítem	Subítem	Variable
Características del Yacimiento	Características Espaciales	Tamaño (alto, potencia, largo)
		Forma (tabular, lenticular, masivo, irregular)
		Disposición (inclinado, manto)
		Profundidad (media, extremos, razón de sobrecarga)
	Condiciones Geológicas e Hidrogeológicas	Requerimientos de drenaje, bombeo
		Mineralogía
		Mineralogía y petrografía (óxidos y sulfuros)
		Composición química
		Estructura del depósito (pliegues, fallas, discontinuidades, intrusiones)
		Planos de debilidad (grietas, fracturas, clivaje)
		Uniformidad, alteración, meteorización (zonas, límites)
	Condiciones Geotécnicas	Aguas subterráneas e hidrología (ocurrencia, flujo, nivel freático)
		Propiedades elásticas
		Comportamiento plástico o viscoelástico
		Estado de los esfuerzos (originales, modificados por la excavación)
		Consolidación, compactación, competencia
Parámetros de Explotación	Consideraciones Económicas	Otras propiedades físicas (gravedad específica, poros, porosidad, permeabilidad)
		Reservas (tonelaje y ley)
		Tasa de producción
		Vida de la mina (desarrollo y explotación)
		Productividad
	Factores Tecnológicos	Costos
		Porcentaje de recuperación
		Dilución
		Flexibilidad a cambios en la interpretación o condiciones
		Selectividad
Condiciones del Entorno	Factores Medioambientales	Concentración o dispersión de frentes de trabajo
		Capital, mano de obra, mecanización
		Control de excavaciones para mantener integridad de las mismas (seguridad)
		Subsistencia y efectos en superficie
		Control atmosférico (ventilación, control de calidad de aire, calor, humedad)
		Fuerza Laboral (contratos, capacitación, salud y seguridad, calidad de vida, condiciones de comunidad)
		Temperatura
		Altitud
		Precipitaciones
		Terreno
		Infraestructura Eléctrica y Vial
Accesibilidad		
Proximidad a zonas urbanas		

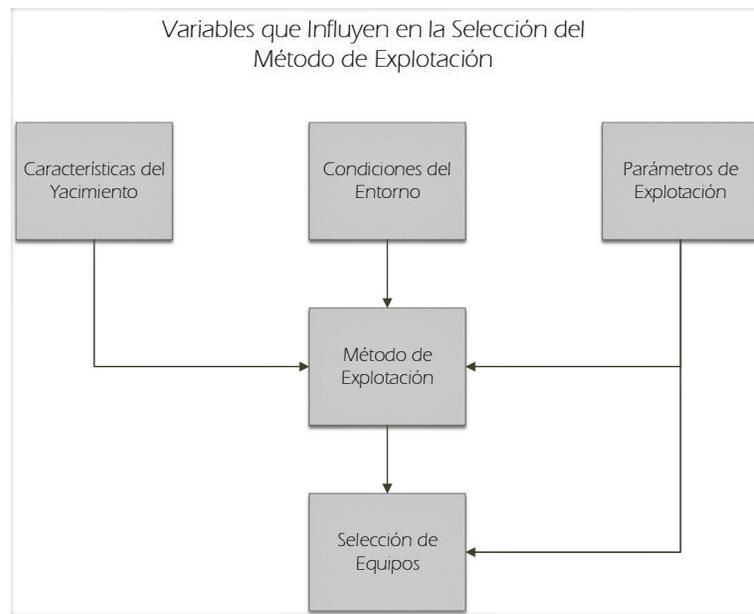


Figura 2.1: Variables que Influyen en el método de explotación. *Fuente: (Contreras, 2007)*

artificial para la estabilidad de las labores mineras y solamente dependen de las paredes de la excavación y los pilares naturales que se formen. Los métodos subterráneos que se incluyen en esta categoría son:

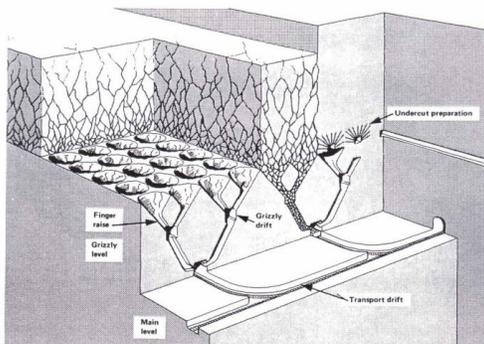
- Room and pillar
 - Stope and pillar
 - Shrinkage stoping
 - Sublevel stoping
2. Soportados: son aquellos métodos que requieren una cantidad sustancial de soporte artificial para mantener la estabilidad de excavaciones y de la mina. Los métodos subterráneos que se incluyen en esta categoría son:
- Cut and fill
 - Bench and fill
3. Por hundimiento¹: son métodos asociados a inducir y controlar el hundimiento de un cuerpo mineralizado masivo y su roca caja simultáneamente. Los métodos subterráneos que se incluyen en esta categoría son:
- Sublevel caving
 - Block caving
 - Panel caving

¹(Laubscher, 1994) definió el término minería de caving para referirse a todas las operaciones en que el cuerpo mineralizado se fractura y hunde naturalmente después de hacerle un corte en la base, para luego recuperar el material quebrado a través de puntos de extracción

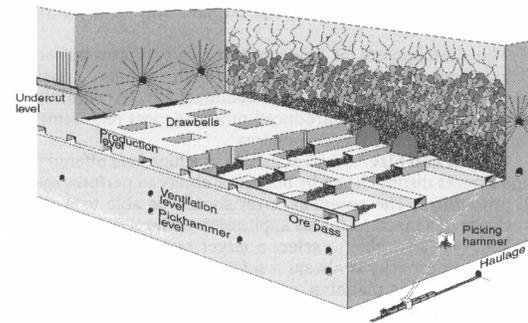
2.3. Sistema Minero Panel Caving

Según la clasificación de la sección anterior, el sistema de explotación *Panel Caving* es un método minero subterráneo por hundimiento. Es una técnica en la cual la gravedad es usada en conjunto con los esfuerzos internos de la roca para fracturar y quebrar el macizo rocoso en rocas de menor tamaño que puede ser recuperadas por los mineros (Hamrin, 2001).

El término *Panel* se refiere a la forma de panel o lonja en que la mina es explotada, donde el cuerpo mineralizado es extraído de manera continua sin dividirlo en Unidades Básicas de Explotación (UBE) como en el método Block Caving, por lo que la incorporación de área es sistemática y continua. También hace referencia al layout de la mina del nivel de producción. Por otro lado, el término *Caving* se refiere a que el hundimiento del macizo rocoso es inducido a través de la socavación en la parte inferior, permitiendo recuperarlo en los puntos de extracción.



(a) Vista Isométrica Block Caving Gravitacional con Parrillas. Fuente: (AtlasCopco, 1968)



(b) Vista Isométrica Panel Caving. Fuente: (AtlasCopco, 1968)

Figura 2.2: Vista Isométrica de los métodos Block Caving y Panel Caving

2.3.1. Campo de Aplicación

Panel Caving es una técnica aplicable a yacimientos diseminados, emplazados en profundidad, de grandes dimensiones tanto en la vertical como horizontal, que posee baja ley y una mineralización de tipo masiva. Respecto a la calidad del macizo rocoso, éste puede presentar baja frecuencia de fractura, roca competente, que cuente con condiciones de hundibilidad y una superficie que permita la subsidencia (Hamrin, 2001). Es un método minero aplicada a condiciones de altos esfuerzos.

Según Cavieres (1999), el método Panel Caving ha tomado mayor relevancia que el Block Caving, debido a la profundización de las operaciones por el envejecimiento de los yacimientos, y a que las reservas de mineral secundario se han ido agotando y, por lo tanto, las explotaciones se han ido internando continuamente en mineral primario, cuya característica principal es la fragmentación gruesa y alta dureza.

2.3.2. Descripción del Método

Una vez realizado los accesos a la zona de interés mediante rampas de accesos, se da inicio al *Desarrollo Minero* y *Preparación Minera* de los niveles de hundimiento, producción, ventilación y transporte (ver Sección 2.3.3). El Desarrollo Minero es conformada por los Excavaciones Mineras y la Preparación Minera por las Obras Civiles, Fortificación Definitiva y el Montaje de infraestructura, las cuales son etapas secuenciales que se ejecutan en cada nivel para construir la infraestructura que soportará la producción.



(a) Equipo LHD transportando mineral al punto de vaciado. *Fuente: Propia*



(b) Equipo LHD descargando mineral en el punto de vaciado, el cual está equipado con un martillo picador. *Fuente: Propia*

Figura 2.3: Equipo LHD realizando actividades productivas en un Panel Caving

Antes de iniciar la *Producción*, es necesario realizar la *Preparación Minera* del sector, es decir, contar con una cantidad mínima de área preparada, la cual debe estar fortificada según las condiciones del macizo rocoso. En el caso particular del nivel de producción, los trabajos de fortificación son intensivo debido al efecto del abutment stress sobre dicho nivel.

Una vez preparada el área, se debe generar el hundimiento que se logra mediante perforación y tronadura de tiros radiales en las galerías de hundimiento. Una técnica usada en los últimos años es el pre-acondicionamiento que consiste en preparar el macizo rocoso antes de hundirlo para mejorar la fragmentacion y disminuir la intensidad de la sismicidad.

Usando la gravedad, el mineral quebrado cae por las bateas de las galerías zanjadas, y un equipo Load-Haul-Dump (LHD) lo transporta por las calles de producción a un pique de traspaso, el cual permite controlar la granulometría mediante parrillas instaladas en la boca del ore pass (bolones o colpas de gran tamaño son reducidas con un martillo picador). El mineral cae por los ore pass desde el nivel de producción al nivel de transporte y el material es cargado a correas transportadoras, trenes o camiones de bajo perfil para ser llevado al siguiente proceso.

Esta secuencia de actividades es aplicada hasta hundir toda el área de interés.

2.3.3. Layout de la Mina

Los métodos mineros de extracción tipo Caving consisten de varios niveles operativos que permiten extraer mineral en los puntos de extracción. Las infraestructuras más importantes de una mina explotada por Panel Caving son, a lo menos, 4; Nivel de Hundimiento, Nivel de Producción, Nivel de Ventilación y Nivel de Transporte. (Charles A. Brannon y Casten, 2011).

1. **Nivel de Hundimiento:** Es un conjunto de galerías horizontales que permiten generar el fracturamiento de la roca a través de perforación y tronadura.
2. **Nivel de Producción:** Es un conjunto de desarrollos mineros, obras civiles y montaje que permite la recuperación de mineral quebrado a través de puntos de extracción. Las bateas permiten conectar el nivel de hundimiento con este nivel y aunque hay una variedad de posibles layout de extracción, existen dos mallas mayormente empleadas: Malla Henderson y Malla El Teniente. Esta última dispone de galerías zanjas desarrolladas a 60° con respecto a las galerías de producción.
3. **Nivel de Ventilación:** Conjunto de desarrollos horizontales y verticales que permiten inyectar aire fresco e eyectar aire contaminado a/de los demás niveles.
4. **Nivel de Acarreo:** Conjunto de desarrollos, montajes y obras civiles que permite el manejo de material (camiones, LHD, correas transportadoras, trenes o una combinación de estos).

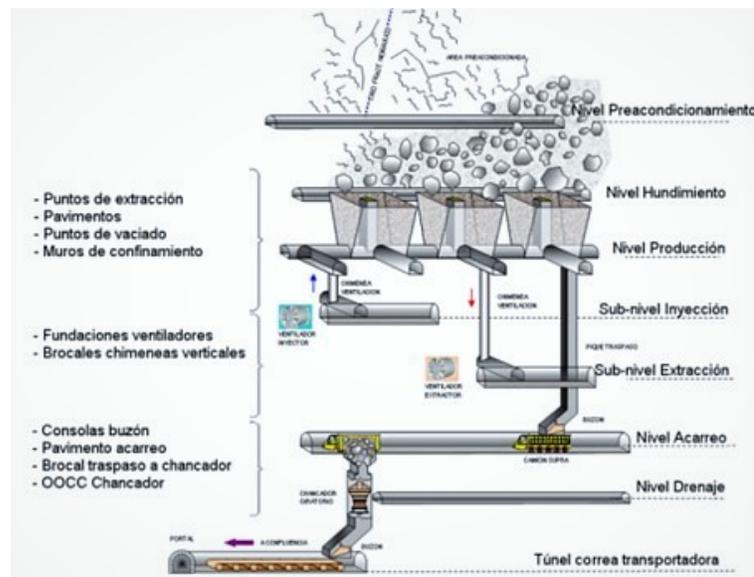


Figura 2.4: Esquema de los niveles productivos en métodos mineros por hundimiento.

2.3.4. Estado Tensional del Macizo Rocoso en Producción

No hay aspecto más importante en la planificación minera de un Panel Caving que el estado tensional del macizo rocoso. Esto, porque los esfuerzos inducidos producto de los desarrollos mineros y la extracción del mineral quebrado (producto de la fragmentación inducida por

el hundimiento), provocan desequilibrios de tensiones que requiere ser atendidas para evitar problemas de seguridad. Según el frente de explotación (ver Figura 2.5) en el cual se encuentre, el estado tensional del Macizo Rocosó puede ser clasificado de la siguiente forma:

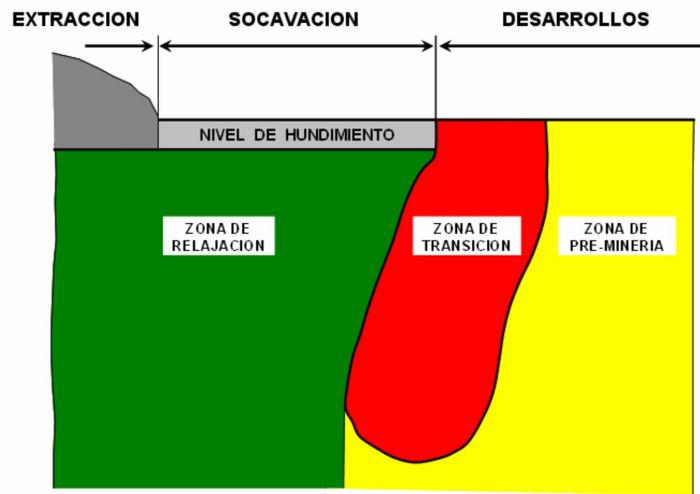


Figura 2.5: Comportamiento de los esfuerzos en distintas zonas según los frentes en explotación del método Panel Caving. *Fuente: (Rojas, 2001)*

1. **Zona de Relajación:** En esta zona el macizo rocoso se encuentra con el sector socavado y fuera del efecto generado por el avance del frente, en ella los esfuerzos han variado lo cual es graficado por una disminución paulatina del esfuerzo principal máximo y de confinamiento.
2. **Zona de Pre-minería:** En esta zona el macizo rocoso se encuentra alejado de la minería asociada al avance del frente, por lo que no "percibe" el efecto del frente de socavación y el estado tensional es relativamente constante en cuanto a magnitud y orientación de esfuerzos, por lo tanto se establece una condición de equilibrio del macizo rocoso y permite la realización de desarrollos y construcciones de preparación minera.
3. **Zona de Transición:** Es la zona del macizo rocoso, en donde el estado tensional presenta continuos cambios (en cuanto a magnitud y orientación), generando la zona más sensible para que obras mineras sufran daños por este efecto. Esto sucede, como consecuencia del avance del frente de socavación y afecta notoriamente a la condición geomecánica de la roca.

2.3.5. Velocidad de Extracción

La velocidad de extracción es la razón entre al altura que se extrae versus el tiempo que se demora en extraerse. Se puede medir en $\frac{m}{año}$ o $\frac{ton}{m^2-dia}$.

De acuerdo al estado en que una columna de roca se encuentra, ya sea en quiebre o liberada, se establece la velocidad de extracción.

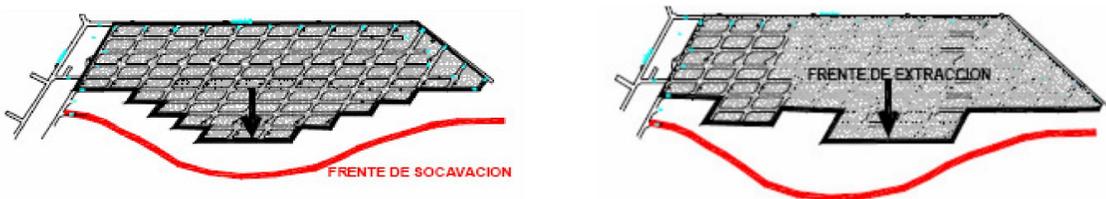
Ambos estados están relacionados con la velocidad de extracción. La velocidad de ramp

up (velocidad de crecimiento) es utilizada en la primera etapa de extracción y comienza con valores menores, del orden de 0,15 a 0,25 $[\frac{ton}{m^2-dia}]$ y va aumentando gradualmente hasta medida que alcanza el X % de la altura de columna (altura de liberación). Un criterio bastante usado en el industria y que proviene de la minería experimental es considerar que extraído el 30 % de la columna de roca, ésta se ha liberado.

Luego, la columna entra al estado liberado cuando alcanza la velocidad de régimen, cuyos valores son cerca a 0,70 a 1,00 $[\frac{ton}{m^2-dia}]$.

2.3.6. Variables Consideradas en las Variantes de Panel Caving

1. **Geometría Frentes / Secuenciamiento Minero:** Se debe llevar una geometría cóncava en la dirección del frente de hundimiento, es decir, el centro de curvatura debe estar dentro de la zona hundida. Con esto se logra un frente más estable, al evitar concentraciones de esfuerzo (Butcher, 2000). Respecto al avance de crecimiento se debe considerar un ángulo mayor a 30° entre la orientación de los frentes (socavación y extracción) y la dirección de las estructuras mayores para evitar la formación de cuñas (E.T. Brown, 2002). Además, el avance de la extracción debe ser concordante con la socavación en orientación y geometría, es decir que se debe llevar una franja "constante" entre ambos frentes (ver Figura 2.6).



(a) Geometría de frente de extracción concordante con la socavación

(b) Geometría de frente de extracción NO concordante con la socavación

Figura 2.6: Geometría del frente de extracción

2. **Distancias Permisibles:** En la zona de transición (ver sección 2.3.4) se produce una interacción de los esfuerzos respecto de la distancia al frente de socavación. Según la variante existen distintas distancias asociadas a la seguridad en fortificación, a la preparación minera y desfases entre avances.
 - $D1$: Desfase entre el Frente de Extracción y Socavación, conocida como "losa", se mide desde la ultima batea abierta hasta el ultimo pilar socavado midiéndose a cota piso del nivel de hundimiento.
 - $D2$: La Franja de Seguridad ($D2$) se ubica justo delante del frente de hundimiento. En esta franja debe estar instalada toda la fortificación definitiva ya que es una zona de seguridad, la cual es un área de mínima exposición del personal y equipo delante del frente de hundimiento. Depende de la variante, la altura de columna de roca y calidad del macizo rocoso del sector puede variar entre 15 a 75 metros.
 - $D3$: Distancia Relativa al Frente de Socavación. Se considera generalmente como un valor practico de 25 metros, el cual se operativiza según el ancho correspondiente a una zanja.

Para las distintas variantes, las distancias son las siguientes:

Tabla 2.2: Distancias Permisibles según el tipo de variantes de Panel Caving.

Variante	Desfase entre Frente de Extracción y Frente de Socavación (D1) [m]	Franja de Seguridad (D2) [m]	Distancia Relativa al Frente de Socavación (D3) [m]
Hundimiento Convencional	No aplica	60 - 70	25
Hundimiento Previo	45 - 90	50 - 70	25
Hundimiento Avanzado	15 - 70	50 - 70	25

3. **Ángulo de Extracción:** El ángulo de extracción se mide considerando la batea que será incorporada a la producción y el último punto de extracción en quiebre (zona de extracción en quiebre, menor al 30 % de extracción de la altura sólida de mineral primario). Visto del punto de vista del control geométrico del *Cave Back*, es la relación entre la velocidad de extracción y la velocidad de preparación (J. Contreras, 2016)

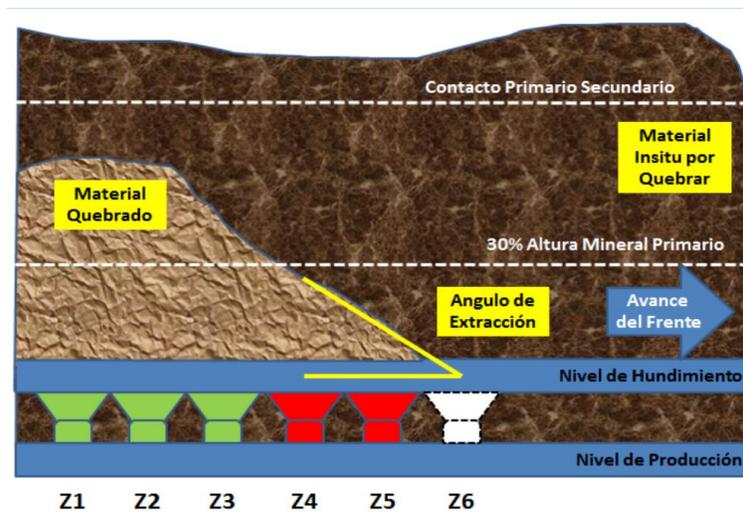


Figura 2.7: Ángulo de Extracción. Fuente: J. Contreras, 2016

2.3.7. Variantes de Hundimiento Panel Caving

Panel Caving con Hundimiento Convencional

Esta variante de explotación es la más conocida. Los frentes de socavación y de extracción, prácticamente coinciden con su avance (uno encima del otro) y el nivel de producción esta completamente preparado y desarrollado delante del frente de socavación (ver Figura 2.8 y 2.9).



Figura 2.8: Vista de Perfil de la Variante Panel Caving con Hundimiento Convencional.
Fuente: (Cavieres, 1999)

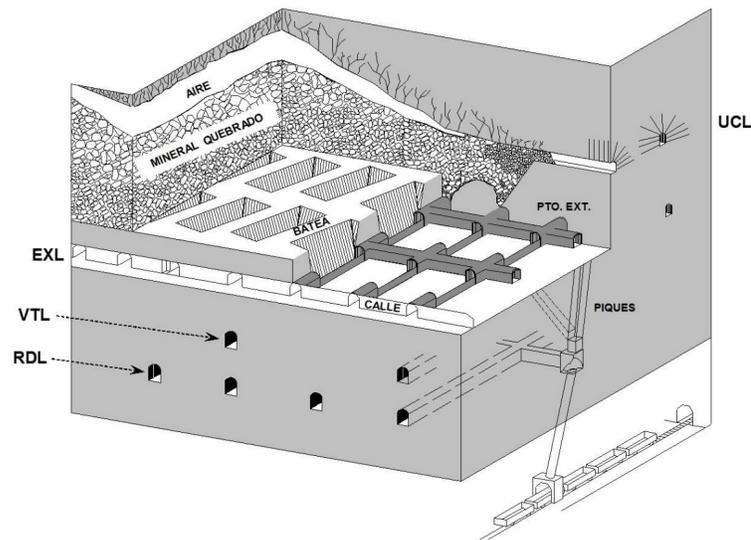


Figura 2.9: Vista Isométrica de la Variante Panel Caving con Hundimiento Convencional.
Fuente: (Charles A. Brannon y Casten, 2011)

La *Secuencia Operacional* del Panel Caving con Hundimiento Convencional es como sigue:

1. Los desarrollos, para todos los niveles, se encuentran adelantados respecto al frente de socavación a una distancia que depende de las características de cada sector productivo. En el nivel de producción los desarrollos contempla la calle, la respectiva armada y la conexión del pilar, todo realizado delante del frente de socavación. Todo debe contar con fortificación definitiva.
2. Se realiza la preparación de bateas, primero se desarrollan las chimeneas piloto y posteriormente se hace ingreso al jumbo para realizar las perforaciones de zanjas, donde ambos desarrollos no son conectadas a piso del Nivel de Hundimiento.
3. Se procede a la voladura de zanjas mediante 2 fases, según diseño general, dejando una "losa" de 3 metros aproximadamente.
4. Se avanza con el frente de socavación (previa perforación radial con tiros de levante y tiros negativos). La socavación de paradas termina de abrir las bateas lo que permite recepcionar el esponjamiento de la socavación e iniciar las actividades de extracción del mineral.

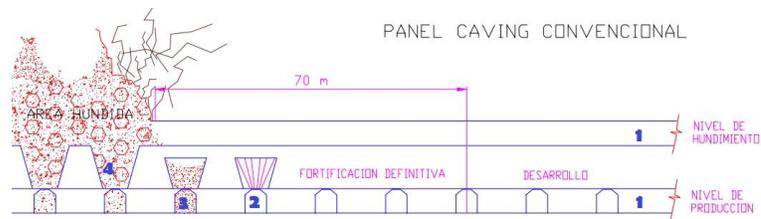


Figura 2.10: Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Convencional. Fuente: (Cavieres, 1999)

Panel Caving con Hundimiento Previo

En esta variante el frente de socavación va adelantado respecto al frente de preparación. Las labores del nivel de producción se terminan de desarrollar y preparar bajo área socavada. Por lo tanto, dado que la zona de transición se forma delante del frente de socavación, el nivel de producción no sufre efectos del abutment stress (ver Figura 2.11 y 2.12).

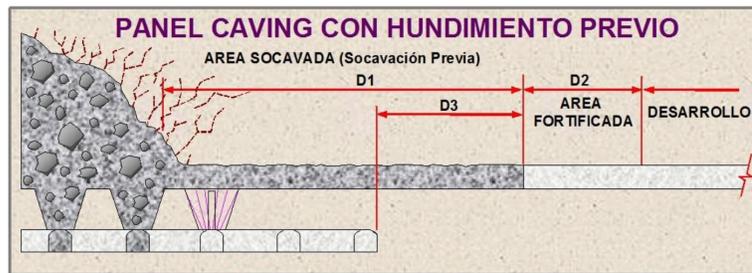


Figura 2.11: Vista de Perfil de la Variante Panel Caving con Hundimiento Previo. Fuente: (Cavieres, 1999)

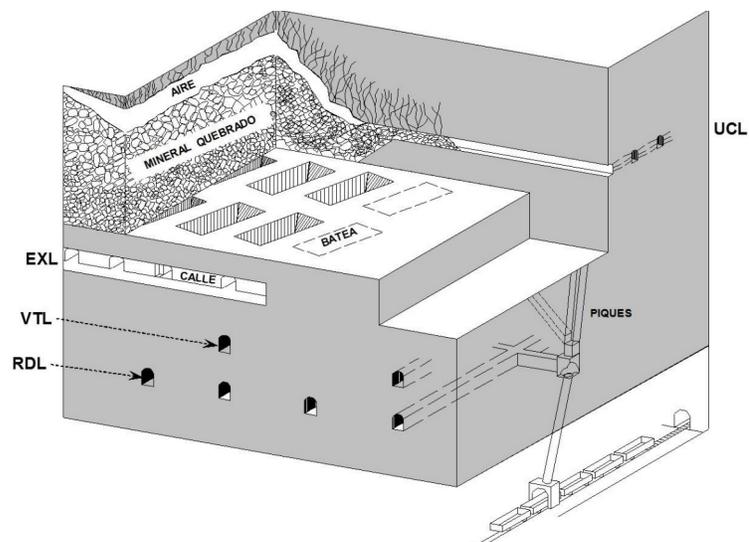


Figura 2.12: Vista Isométrica de la Variante Panel Caving con Hundimiento Previo. Fuente: (Charles A. Brannon y Casten, 2011)

La *Secuencia Operacional* del Panel Caving con Hundimiento Previo es como sigue:

1. Se realizan los desarrollos en el nivel de hundimiento.
2. Se socava el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de socavación hasta que se ubica por delante de los futuros frentes de extracción y de preparación.
3. Se desarrollan todas las labores del nivel de producción, considerando realizar los desarrollos, construcciones y extracción de mineral bajo área socavada.
4. Se realiza la perforación y posterior voladura de la zanja, la cual es desarrollada bajo área socavada.
5. Se inician las actividades de extracción de mineral, a una cierta distancia de los frentes de socavación y de preparación.

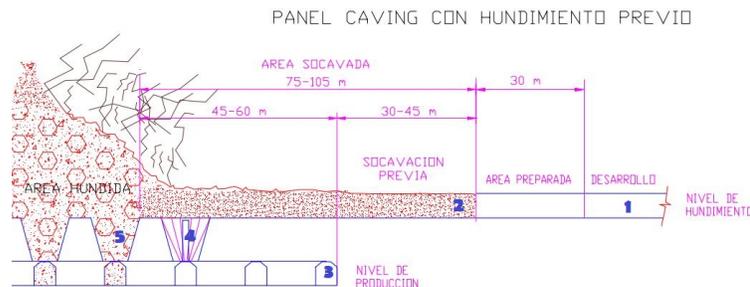


Figura 2.13: Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Previo. Fuente: (Cavieres, 1999)

Panel Caving con Hundimiento Avanzado

En esta variante de explotación, el frente de socavación va adelantado con respecto al frente de extracción, y algunas de las labores del nivel de producción (fundamentalmente calles de producción, sistemas de traspaso y accesos) están desarrolladas por delante del frente de socavación, sin embargo, las bateas no se abren hasta que se ubiquen bajo área socavada (ver Figura 2.14 y 2.15).

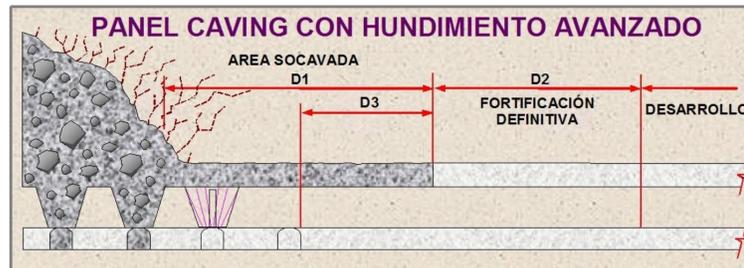


Figura 2.14: Vista de Perfil de la Variante Panel Caving con Hundimiento Avanzado. Fuente: (Cavieres, 1999)

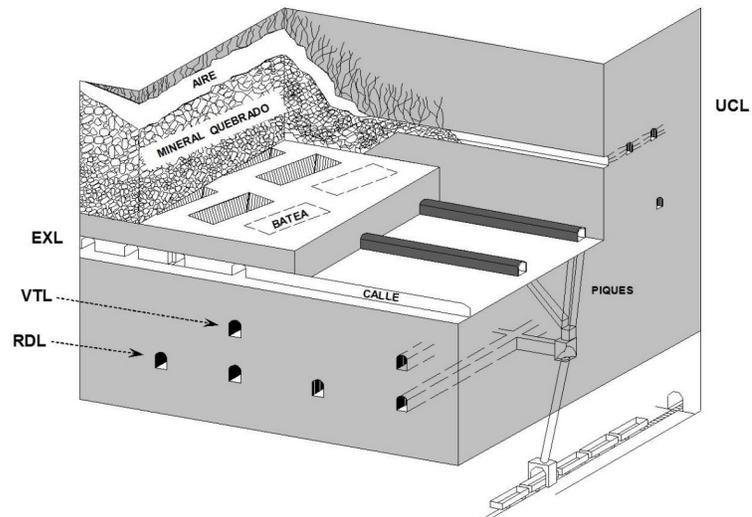


Figura 2.15: Vista Isométrica de la Variante Panel Caving con Hundimiento Avanzado.
Fuente: (Charles A. Brannon y Casten, 2011)

La *Secuencia Operacional* del Panel Caving con Hundimiento Avanzado es como sigue:

1. Se realizan los desarrollos del nivel de hundimiento y solo algunas labores del nivel de producción, generalmente calles con armada de zanja (sin conectar pilar).
2. Se socava el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de socavación hasta que éste se ubica a cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. En el caso de utilizarse un hundimiento avanzado solo por calles, entonces se desarrollan las restantes labores del nivel de producción (normalmente las galerías zanjas), en el sector que se ubica ahora bajo área socavada.
4. Se realiza la perforación y posterior voladura de la zanja, la cual es desarrollada bajo área socavada.
5. Se inician las actividades de extracción de mineral, a una cierta distancia de los frentes de socavación y de preparación.



Figura 2.16: Secuencia Operacional de Actividades en Panel Caving con Hundimiento Avanzado. Fuente: (Cavieres, 1999)

2.4. Desarrollo y Preparación Minera

Según (G. Díaz y E. Morales, 2008), *Preparación Minera* puede ser entendida y definida como un conjunto de actividades de desarrollo de túneles y construcción de infraestructura minera, obras civiles, mecánica y eléctrica, y de instrumentación, de ingeniería y montaje de diferentes niveles o sectores, que serán usados para incorporar un área que permite la continuidad de la explotación. En ese sentido, (Camhi, 2012), clasificó las actividades de la *Preparación Minera* en tres tipos principales de tareas: *Excavaciones Mineras*, *Obras Civiles* y *Montaje de Infraestructura*. De manera secuencial, la *Preparación Minera* comienza con el desarrollo y fortificación de las galerías, piques y chimeneas, luego se realiza la instalaciones de infraestructura de obras civiles (carpeta de rodado, fortificación de punto de extracción, etc.) y finalmente se montan los equipos tales como martillo picadores, alimentadores, entre otros. Es importante señalar que la finalización de todas las actividades anteriores permiten la obtención de un m^2 preparado para iniciar su explotación (ver Figura 2.17).



Figura 2.17: Procesos de la Preparación Minera. Fuente: (Camhi, 2012)

2.4.1. Excavaciones Mineras

Las *Excavaciones Mineras* o también llamadas Obras Mineras, corresponden a los desarrollos horizontales y verticales que se deben realizar en todos los niveles productivos. Esta categoría incluye la fortificación (perno, malla y shotcrete), saneamientos de galerías y la estabilización de sectores. Sin embargo, esta fortificación no es definitiva en el nivel de producción.

Desarrollos Horizontales

Es práctica aceptada en la industria, realizar los *Desarrollos Horizontales* con perforación y tronadura debido a las condiciones del entorno y las ventajas que presenta respecto de otras técnicas. El ciclo comienza con la perforación mediante equipos mecanizados (jumbos). Tras la tronadura y ventilación de la frente, un equipo LHD se encarga de transportar la marina hacia los vaciaderos. Luego, la acuñadura de las frentes se realiza manualmente desde

un elevador hidráulico o con equipos acuñadoras para evitar la exposición de caída de rocas a trabajadores. Terminado esto, la fortificación de la galería se ejecuta con perno, malla y shotcrete, según el grado de estabilidad requerido, finalizando el ciclo.

Desarrollos Verticales

Los *Desarrollos Verticales* son tareas que permiten construir los piques de traspaso (ore pass), que dan lugar a los puntos de vaciados en el nivel del producción, y las chimeneas de ventilación. En el caso del pique de traspaso, debido al uso que tiene esta labor minera, dentro de las actividades propias a la excavación, se incluyen el desquinche y fortificación del sector donde se realizará la descarga del LHD, el ensanche del diámetro del pique (1.5 m a 3.4 m) debido a la capacidad de los equipos, y la fortificación y blindaje (placas de desgaste). También, se debe considerar que en esta labor se instalará toda la infraestructura para controlar la granulometría (martillo picador) y brocal de punto de vaciado para mitigar los daños del LHD al punto de vaciado.

Generalmente, para realizar la perforación de los desarrollos verticales se utiliza la perforación mecanizado. Según las ubicaciones de los desarrollos verticales y los diámetros de perforación, puede ser a través de equipos Raise Borer o Blind Hole.

Básicamente la operación con el equipo Raise Borer consiste en perforar, de forma descendente, un tiro piloto desde una superficie superior, donde se instala el equipo, hasta un nivel inferior. Posteriormente se conecta en el nivel inferior el escariador el cual actúa en ascenso, excavando por corte y cizalle, el pique o chimenea.

Por otro lado, la perforación con el sistema Blind Hole consiste en instalar el equipo en el nivel inferior y en perforar el tiro guía 60 centímetros adelantado del escariador, que va excavando a sección completa. El material excavado cae por gravedad al nivel de la máquina y es guiado por un colector para prevenir riesgos.



(a) Perforación Mecanizada con Equipo Raise Borer. *Fuente:(Contreras, 2007)*



(b) Perforación Mecanizada con Equipo Blind Hole. *Fuente:(Camhi, 2012)*

Figura 2.18: Perforación Mecanizada con Equipo Raise Borer y Blind Hole

2.4.2. Obras Civiles

Las *Obras Civiles* son las obras basadas principalmente en hormigón armado y la armadura. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento (éste último es una fortificación definitiva de una zona en producción).

Puntos de Extracción

Existen principalmente dos tipos de construcción de puntos de extracción: marcos de acero concretados y bóvedas de hormigón armado. En ambas metodologías, la calle zanja debe estar conectada. En la primera metodología, se comienza con el desquinche en el piso para nivelar, y luego, se instala un emplantillado de hormigón en el piso. Posteriormente, se instalan los marcos de acero que se conectan al piso con pernos y tuercas, y a las paredes de la zanja. Finalmente, se realiza el vaciado de hormigón alrededor de las armaduras.



(a) Construcción de Punto de Extracción. *Fuente: (Contreras, 2007)*



(b) Punto de Extracción en Producción. *Fuente: Propia*

Figura 2.19: Punto de Extracción

Carpeta de Rodado

Las carpetas de rodado son obras civiles que permite habilitar el piso por donde transitan los equipos LHD tanto en la calle de producción como en el punto de extracción. Para la construcción, se realiza el levantamiento topográfico, escarpe y limpieza de piso (a roca viva), y luego se instala el Hormigón de Relleno (emplantillado). Finalmente, una vez conseguido el relleno, se procede a la colocación de la Carpeta de Rodado.

Fortificación de Intersección Calle/Zanja y Pilares

La fortificación de la Intersección de la Calle y Zanja, y los pilares son obras civiles que refuerzan dichas zonas con cables de acero. Para la instalación de los cables, se perforan tiras de diámetro adecuado que permita lecharlos a columna completa, con cuña, barril, separadores y planchuelas.

Muros de Confinamiento

Corresponden a obras civiles de hormigón armado para reforzar los pilares formados por las calles y las galerías de zanjas. Esta es una alternativa a la fortificación de pilares y en terreno se utiliza una o la otra.

Punto de Vaciado

Respecto a la construcción del punto de vaciado en el nivel de producción, las actividades que se desarrollan son el desquinche y fortificación de la zona para permitir la descarga del LHD en el sector (alzamiento del cucharón), la construcción del brocal de punto de vaciado

para mitigar los daños del equipo al punto y la preparación del montaje necesario para habilitar el martillo picador en el punto y la parrilla.



Figura 2.20: Punto de Vaciado. *Fuente: Propia*

2.4.3. Montaje

El *Montaje* o también llamadas Obras de Infraestructura, son tareas correspondientes a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto determinado. Normalmente se ejecutan posterior a las obras civiles y culminan con la habilitación ya sea local o remota de un elemento determinado. Ejemplos de estas actividades son el montaje y habilitación de buzones de carguío y Plate Feeders, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

2.5. Planificación Minera en Panel Caving

La planificación minera surge como una disciplina que ordena de manera estratégica la minería para transformar los recursos minerales en reservas mineras. Al igual que la planificación en minería superficial, la subterránea es un proceso iterativo que requiere mirar muchas opciones y determinar cuáles, en el largo plazo, proveerán resultados óptimos (Bullock, 2011).



Figura 2.21: Esquema del Proceso de Planificación Minera. Fuente: (Cordero, 2010)

En general, si se considera en el análisis una explotación subterránea de Panel Caving, el proceso de planificación no difiere del aplicado en otros métodos de explotación, en el entendido que se sustenta sobre información base, definiciones técnicas y económicas, indicadores económicos y de riesgo para evaluar las definiciones de planificación (ver Figura 2.21). Luego, los resultados económicos derivados de la planificación minera interactúan con las definiciones técnicas y económicas generando un proceso de retroalimentación (Cordero, 2010).

Considerando lo anterior, el proceso general de planificación en minas explotadas por Block o Panel Caving es como lo muestra la Figura 2.22:

Modelo	Envolvente Económica	Diseño Minero	Agendamiento de la Producción	Agendamiento de la Preparación
<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de Bloques • Modelo de Dilución 	<ul style="list-style-type: none"> • Valoración Económica • Selección del Footprint • Definición Envolverte Económica • Suavizamiento de Columnas 	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de Malla de Extracción • Interacción de Columnas 	<ul style="list-style-type: none"> • Secuencia de Apertura de Bateas • Preparación integrada como costo y bateas/periodo • Extracción de Mineral 	<ul style="list-style-type: none"> • Flota de Equipos • Agendamiento • Desarrollo Niveles Productivos • Obras Civiles • Montaje

Figura 2.22: Proceso de Planificación de Block y Panel Caving. Fuente: *Elaboración Propia*

Se desprende de la Figura 2.22 que el principal objetivo de la planificación minera es conseguir la extracción de mineral a partir de un modelo de bloques, considerando un inventario de bloques, topografía, restricciones geotécnicas, económicas y técnicas. Los resultados son el beneficio por bloque, alturas de columnas, plan de producción, secuenciamiento, áreas de producción, etc.

Horizonte de Planificación

Debido a la cantidad de información que requiere una planificación exitosa, en general se hacen simplificaciones que no llegan a un plan de producción óptimo. Por lo tanto, la planificación implica un proceso iterativo que se debe hacer bajo distintos parámetros, dependiendo del horizonte de tiempo al que se quiera apuntar. Este último punto es importante ya que el horizonte de tiempo se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero. Por esto, se distinguen 3 tipos de horizontes según el tiempo comprometido:

1. *Planificación de Largo Plazo* (mayor a 5 años): Se dimensiona el sector o yacimiento de estudio, donde se establecen los límites espaciales del mismo. Respecto a la vida de la mina, se realizan aproximaciones respecto a la duración de la explotación del proyecto minero. Se cuantifican las reservas extraíbles, a partir de los recursos disponibles en el sector de la futura explotación.
2. *Planificación de Mediano Plazo* (3 a 5 años): Se depuran los parámetros determinados en la planificación de largo plazo y se incorporan nuevos antecedentes. Se evalúa el presupuesto necesario para la operación y puesta en marcha de la mina, generalmente se evalúa en periodos anuales.
3. *Planificación de Corto Plazo* (1 año): Se depuran los parámetros determinados en la planificación de mediano plazo y se incorporan nuevos antecedentes. Se definen los equipos y logística para cumplir con la meta definida en el presupuesto de operaciones de la mina. Los planes generados son de carácter mensual y hasta diario.

La Figura 2.23 representa el aporte en valor que tienen los distintos horizontes de planificación, donde el valor cuantifica el aporte de cada horizonte al proyecto final. Este valor generalmente se evalúa en términos monetarios, aunque también se pueden considerar otros aspectos.

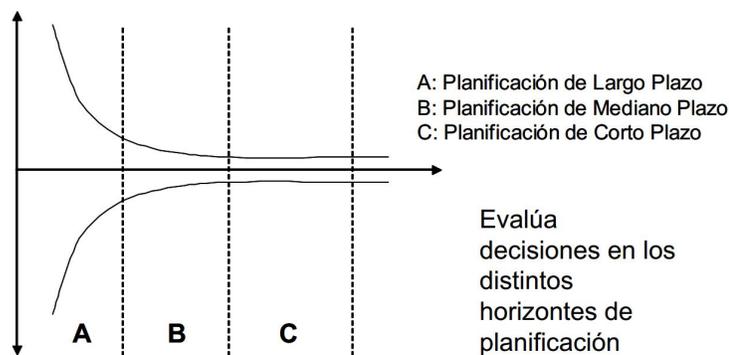


Figura 2.23: Esquema de Valor Respecto al Horizonte de Planificación. *Fuente: (Cordero, 2010)*

2.6. Investigación de Operaciones en Minería

La utilización de esta disciplina en la resolución de problemas mineros se remonta al año 1960, desde aquella época se han utilizado problemas de simulación y optimización principalmente orientados a resolver problemas de rajo abierto o superficiales como también aquellos subterráneos. Las decisiones que se busca cuantificar o sustentar son principalmente en qué momento, de qué modo extraer el mineral y qué hacer con él, para que el resultado se aproxime al óptimo económico (Newman, Rubio y col., 2010).

El desarrollo de esta disciplina en minería de rajo o superficial, se ha orientado a resolver principalmente los siguientes problemas:

- Pit Final o Pit último: Enfocado a determinar el mineral económicamente extraíble respetando restricciones geotécnicas y diseño.
- Secuenciamiento o Agendamiento de Bloques: Enfocado a determinar cuándo debiese ser extraído un bloque, considerando restricciones de producción y procesamiento principalmente.
- Asignación de equipos: Enfocado a determinar los recursos necesarios para cumplir el agendamiento establecido.

2.6.1. Investigación de Operaciones en Minería Subterránea

Decisiones Estratégicas

Las decisiones tomadas a nivel estratégico en minería subterránea, es decir, elección del método apropiado de extracción y el diseño del mismo, son evaluadas principalmente por características geomecánicas y la mineralización del depósito. Sin embargo existen distintos trabajos que abordan variables asociadas a estas características:

- Barbaro y Ramani (1986) mediante un la resolución de un modelo de programación entero mixto, buscan determinar el agendamiento de la producción y el tipo de plantas de procesamiento con múltiples ubicaciones en forma de satisfacer la demanda de mercado.
- Qinglin y col. (1996) presenta una aproximación para cuantificar la elección de un método de explotación, el autor define una metodología seleccionando distintos métodos probables para un depósito, luego considera parámetros técnicos y económicos para cada uno de ellos, para finalmente resolver identificando la incertidumbre y complejidad de la geología como un "Grey System" o Sistema incompleto y utilizando redes neuronales para determinar los índices para determinar aquellos índices técnicos y económicos.
- Rubio (2002) desarrolla una metodología de agendamiento que permite vincular objetivos estratégicos, como la maximización del valor neto descontado y la maximización de la vida útil de la mina con el agendamiento de la producción, obteniendo así la integración de estimación de reservas con las tasas de desarrollo como resultado del agendamiento de la producción.

- Rahal y col. (2003) describe un modelo de programación lineal entera mixta con múltiples objetivos, minimizando la desviación del perfil de puntos de extracción manteniendo la producción esperada.
- Yun y col. (2003) introduce el uso de algoritmos evolucionarios para optimizar la producción de una mina a partir del análisis de un depósito, en el cual mediante un algoritmo genético se fija el óptimo a producir, determinando así el periodo a ser minado para cada bloque, luego mediante programación evolucionaria se fija la tasa a ser minada para cada bloque, llegando a una solución parcial para cada periodo.
- Newman y Kuchta (2007) mediante un modelo de programación entera mixta para agendar una producción multi-periodo. El modelo respeta parámetros de una secuencia operativa factible minimizando la desviación de los tonelajes planificados. Implementan una heurística de agregación de periodos para luego resolver el modelo original con información proveniente del modelo agregado.
- Epstein y col. (2012) presentan una metodología para abordar problemas de largo plazo basados en la formulación de flujos capacitados para una red multiproducto (commodities) considerando la producción de minas subterráneas como superficiales utilizando plantas de procesamiento común. Por la magnitud del problema se aborda una solución lineal relajada para el problema mayor y aproximando este a una solución cercana a entera con un procedimiento modificado.
- Davis y Newman (2008) introduce el cuestionamiento a la forma actual de evaluar un proyecto mediante la cuantificación del valor descontado neto como función objetivo versus la valorización de múltiples alternativas mediante el modelo de Opciones Reales.
- Pourrahimian (2013) se hace cargo del agendamiento a largo plazo de una mina de Block Caving mediante un modelo de programación lineal mixto, maximizando el valor considerando restricciones técnicas y operacionales. Las formulaciones del modelo son definidas en tres niveles; clúster de puntos de extracción, punto de extracción y punto de extracción en bancos por cota.
- Vargas y col. (2014) propone un metodología que permita considerar la incertidumbre geológica mediante simulaciones de la ley del depósito en el cálculo de la envolvente económica para minas de Block/Panel Caving. Se consideran la elección de un piso óptimo, cálculo de reservas mediante utilizando el algoritmo de pit final inverso y un análisis de riesgo con respecto al valor de la envolvente definida.

Decisiones Tácticas

Las decisiones tácticas involucran las evaluaciones y especificaciones de los procesos que se deben llevar a cabo a lo largo de la vida de la mina. En esto se considera la interacción de sistemas de extracción, preparación, transporte, construcción y procesamiento dentro de los más importantes y a su vez cómo interactúan con la naturaleza geológica y geotécnica de la operación. En esta sección se describen trabajos en las cuales se ven involucradas este tipo de decisiones tanto en el planteamiento como la solución del problema.

- Kazakidis (2001) demuestra como los problemas del comportamiento del macizo rocoso afectan en forma significativa la operación, determinando así una metodología para cuantificar y evaluar la interacción entre la planificación y la geomecánica. La

probabilidad en los eventos permite hacer un análisis de confiabilidad, el cual determina los valores iniciales para el plan de producción. La flexibilidad necesaria en el diseño y planificación con respecto a estos eventos, fue determinada mediante análisis de flujos descontados, opciones reales, simulación de la producción y simulaciones de Monte-Carlo. Finalmente desarrolla una metodología que permite evaluar el proyecto considerando las flexibilidades necesarias y los riesgos presentes en el proceso de planificación y diseño.

- Alarcón (2014) introduce la metodología de Opciones Reales en la consideración de la disponibilidad de los puntos de extracción en métodos Block/Panel representándolo a través del castigo de la velocidad máxima de extracción por punto considerando coberturas para contrarrestar dicho efecto, como el aumento de inversión en preparación minera. De este modo se determina el impacto en el valor esperado del proyecto.
- W. Rocher (2011) busca integrar dos bloques del proceso de planificación generando un modelo optimización y agendamiento de actividades, el cual hiciera posible considerar en forma simultánea el desarrollo de la preparación minera y la producción, de manera tal que se genere un agendamiento factible y robusto.
- Martinez y Newman (2011) mediante un modelo de programación entera mixta se busca conciliar los planes de largo plazo con aproximaciones mensuales a un plan de corto plazo minimizando la desviación de estos respetando restricciones operacionales.

2.7. Estudios Similares

A continuación se entrega una revisión de los principales estudios en la planificación minera de Panel Caving.

- O. Araneda y Gaete (2004). Este estudio propone un modelo matemático para determinar la cantidad óptima de incorporación de área y tasa de extracción en un sistema de explotación de Panel Caving. EL modelo está basado en ecuaciones de balance de masa e incluye material quebrado, siendo uno de los primeros modelos en su tipo.
- Araneda y Sougarret (2008). Este trabajo muestra las lecciones aprendidas en materia de hundimiento en El Teniente entre los años 1997 al 2007. Manejar frente de hundimiento menores a 250 metros de ancho, mejorar el tipo de secuencia minera, incluir preacondicionamiento en el macizo rocoso y un cambio de cultura son algunas de las lecciones aprendidas que muestra este trabajo.
- G. Díaz y E. Morales (2008). Este trabajo presenta los problemas de constructibilidad que sostuvo El Teniente, desde el 2000 hasta el 2004. Considerando retrasos y no cumplimientos de los planes de preparación de manera sistemática se determinó las causas que produjeron que solo se lograra un 70 % de cumplimiento de constructibilidad, durante 2002. El trabajo muestra los planes de acción se enfocaron proponer e implementar un Sistema Integrado de Planificación, Presupuesto y Administración. Además, se incluyeron planes para empresas contratistas y aumentar los niveles de seguridad. Los resultados muestran que los costos unitarios de preparación disminuyeron en un 15 % y el cumplimiento del plan de preparación alcanzó un 95 %.
- N. Morales y col. (2012). Este estudio propone un modelo de optimización para integrar

la constructibilidad de un proyecto a la optimización de un programa de producción. Basado en un modelo matemática entero-mixto, se entrega el modelamiento de la función objetivo y restricciones.

- Winston y col. (2012) Esta investigación tiene por objetivo presentar un modelo de programación matemática para el tratamiento del secuenciamiento y agendamiento de una mina subterránea, teniendo en cuenta la producción, los recursos disponibles y la constructibilidad de manera integrada, siendo una herramienta de análisis rápido para el planificador minero. La función objetivo del modelo aquí presentado es la maximización del valor presente neto de un conjunto de actividades, sujeto a varias restricciones. La implementación final resulta en una herramienta llamada UDESS. Los resultados muestran que el programa de producción cambia cuando se considera la constructibilidad de un diseño minero, más aún, tiene influencia en el resultado y si bien no se asegura obtener un valor de negocio mayor, sí un mayor grado de robustez por considerar más información y evaluarla en poco tiempo de manera conjunta.
- Smoljanovic y col. (2012). Esta tesis incluye la aplicación de un modelo para optimizar el VAN como función objetivo, en una mina de Panel Caving y sus distintos sistema de manejo de materiales, de tal forma de estudiar la secuencia de apertura de los puntos de extracción y las variaciones del VAN asociadas. La idea es considerar la secuencia de apertura de puntos de extracción como un output del problema y seleccionar la mejor secuencia dados distintos sistema de manejo de materiales. Los resultados indican que la selección del sistema minero es importante, ya que los resultados de la función objetivo son muy distintos (así como la ley media) para cada sistema considerado. Los resultados pueden variar hasta un 18 % entre un sistema y otro.
- M. Orellana y J. Díaz (2014). Este trabajo muestra la experiencia y lección aprendidas del hundimiento en los bloques 1 y 2 de la mina Esmeralda de Codelco División El Teniente. A partir de la estrategia operacional, se entrega información y un análisis sobre el proceso de conexión del hundimiento, estallidos de rocas y eventos mayores, cave back y sismicidad, mostrando que existe evidencia y relación entre la sismicidad producida y la conexión del caving. En este caso, se apreció que el hundimiento del macizo rocoso genera sismicidad en la zona productiva producto del proceso de conexión a niveles superiores.
- Jamett y Alegría (2014). Este trabajo muestra las distintas estrategia de crecimiento que se adoptaron en la Mina Esmeralda de Codelco División El Teniente para llevar a cabo la explotación de los bloques 1 y 2.
- Alarcón (2014) Este estudio modela la velocidad de extracción máxima para cada punto de un sector en operación, y se consideraran diferentes escenarios variando la cantidad de puntos de extracción disponibles a partir de un caso base. Dado lo anterior, también estudia la relación entre el aumento en inversión tanto en mayor preparación minera, como en mayor inversión de equipos de preparación, para así poder aumentar el número de puntos de extracción que se puedan abrir por unidad de tiempo, y el impacto en el valor esperado del proyecto. El estudio permitió encontrar el tamaño óptimo de la cobertura (apertura de puntos de extracción), la cuantificación en el impacto en el VAN y su variabilidad.
- Arriagada y col. (2015). Este trabajo propone una metodología que determina una secuencia optimizada mediante la utilización de un modelo de optimización de secuenciamiento que maximiza el valor presente neto (VPN) y el software de flujo gravitacional

Rebop, el que obtiene una mezcla más precisa. Posteriormente, ambos resultados son comparados con un procedimiento manual de planificación llamado "marginalista" el que considera mineral todo lo que se encuentra sobre la ley de corte sobre una secuencia determinada con anterioridad. Los resultados muestran que la metodología presenta un rango de mejora respecto a la planificación "marginalista" de entre un 7 % a un 20 %. En el caso de un block caving, donde la dirección de la extracción es principalmente vertical, esta metodología permite obtener una secuencia que maximiza el VPN.

- Lobiano (2016). Este estudio propone una metodología para incorporar la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de magnitud determinada en base a variables geotécnicas, minerías y operacionales. La metodología se compone de dos modelos; El primero busca estimar el peligro sísmico en base a características geotécnicas y operacionales y el segundo es un modelo de optimización. Integrando ambos modelos se genera un plan de producción e incorporación de área que permita establecer la mínima probabilidad de peligro sísmico inherente. En todos y cada uno de estos casos analizados, se logró disminuir la probabilidad de peligro sísmico por zona, incluso en algunos de ellos cumpliendo el Peligro Sísmico Límite definido por la compañía.
- J. Contreras (2016). Este estudio propone una metodología para estimar la tasa de incorporación de área en un Panel Caving. Considerando la sismicidad, velocidad de extracción y consideraciones geométrica del cave back, se establece una incorporación de área óptima en el régimen.
- J. Oyanader y Zuñiga (2016). Este trabajo propone una metodología de análisis de constructibilidad con el objetivo de representar los desafíos de la preparación minera en un Panel Caving. Se incluye los rendimientos promedios, de la preparación y desarrollo minero, restricciones operacionales y de interacción entre niveles, construcciones y zonas de altos esfuerzos.

2.7.1. Contribución de la Tesis

Los estudios expuestos previamente buscan resolver problemáticas asociadas a disminuir el peligro sísmico variando macrosecuencias (Lobiano, 2016), medir la confiabilidad de planes de producción variando las tasas de incorporación de área anuales y velocidades de extracción, y su impacto en el VAN (Alarcón, 2014), proponer modelos de optimización buscando resolver agendamientos de producción y preparación minera a nivel global para distintos métodos de explotación subterráneos (W. Rocher, 2011), o variar la estrategia de sistemas de manejo de materiales y su impacto en la apertura de puntos de extracción (Smoljanovic y col., 2012).

Al igual que los casos anteriores, la tesis "Optimización de Planes Mineros en Minas Explotadas en Panel Caving Incluyendo Actividades de Preparación Minera" tiene como objetivo desarrollar una metodología basada en programación matemática, pero con la diferencia que ésta última se enfoca en incluir las actividades de preparación minera de los niveles de extracción y hundimiento de una mina Panel Caving con hundimiento Convencional a un plan de producción (programa de extracción), resolviendo ambos procesos en un único problema de agendamiento.

Tal como se mostró en la sección anterior, no se identificaron investigaciones que permitieran involucrar ambas etapas en un único problema de agendamiento, siendo el

estudio de W. Rocher (2011) lo más similar. En él, se propone un modelo de optimización con el cual es desarrollada esta tesis y otras investigaciones sobre agendamiento de producción, pero su desarrollo está enfocado en proponer las bases del modelo de optimización de UDESS.

Capítulo 3

Herramienta de Agendamiento y Planificación UDESS

UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduling) es una herramienta de planificación y agendamiento basada en programación matemática que permite resolver agendamientos en minería subterránea, minería de transición y cielo abierto.

Inicialmente, se presentó un modelo de optimización para agendamientos en preparación minera por W. Rocher (2011) y N. Morales y col. (2012). Este modelo consistía en resolver un problema de planificación y agendamiento de actividades en minería subterránea. Posteriormente, el modelo fue usado como base para el desarrollo del software Underground Developer and Extraction Sequencer and Scheduling, pero por la versatilidad en su uso, fue renombrado a Universal Delphos Sequencer and Scheduling.

Esta herramienta fue desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile y es usado con fines académicos y de investigación.

3.1. Funcionamiento de UDESS

UDESS funciona bajo el concepto de actividades o tareas, las cuales se relacionan mediante precedencias, de tal forma que el inicio de ciertas tareas está limitado por la consecución de otras. Sumado a lo anterior, las actividades están sometidas a cumplir ciertas restricciones tales como cumplir límites (máximo o mínimo) de capacidad en el consumo de recursos de una o un conjunto de actividades, o forzar el inicio o fin de actividades en determinados periodos.

A continuación, se explica el funcionamiento de la herramienta y se describen las variables y restricciones más importantes del modelo de programación matemática UDESS.

3.1.1. Actividades

La estructura del software se articula en la definición genérica de actividades, las cuales deben ser descritas por recursos y/o atribuciones dado el problema que se busque resolver, esto permite abordar cualquier problema que pueda ser descrito bajo esa definición. Para que una tarea se considerada como una actividad en UDESS, al menos ésta debe contar con un nombre, un valor económico (beneficio o costo) y una tasa de avance (max rate). Además, puede contar cinco accesorias y todas aquellas que el usuario defina.

- Indispensables
 1. ID: Nombre de la actividad
 2. ING: Ingreso o costo percibido por la actividad
 3. Max Rate: Tasa máxima realizable por mes².
- Accesorias
 1. Pre Cost: Costo incurrido al comenzar una actividad
 2. Costo de poner fin a la actividad
 3. Lenght: Duración de la actividad (recursos por ejemplo)
 4. Min Rate: Tasa mínima realizable por actividad
 5. Sub-actividad: si forma parte de un actividad mayor
 6. Atributos numéricos que describan la naturaleza del problema

3.1.2. Restricciones

Las actividades interactúan en el modelo de optimización mediante la definición de restricciones acordes al problema. En ese sentido, las restricciones pueden ser clasificadas en:

- Restricciones de Precedencias: Representa el vínculo lógico entre la realización de una actividad predecesora y otra sucesora. Estás definen el orden en que las actividades deben ser realizadas durante el agendamiento (restricciones físicas), es decir, estas dan sentido generalmente al problema, describiéndolo física y operacionalmente.
- Otras restricciones incorporadas en el software:
 1. Operational Resource Constraint o Restricciones de Recursos Operacionales: Limita el consumo de un determinado recurso para un determinado periodo de tiempo, para todas las actividades que lo requieran.
 2. Starting Resource Capacity o Restricción de Recurso de Inicio: Limita el consumo de un recurso dado al iniciar las actividades.
 3. Progress Limit Constraint o Restricción Limite de Desarrollo: Obliga el cumplimiento de un progreso mínimo y máximo de una actividad en un intervalo de tiempo.
 4. Range Resource Constraint o Restricción de Rango de Recursos: Limita el consumo de las actividades para un recurso dado. Esta limita el total del recurso en el rango de tiempo dado y no una tasa por cada periodo.

²Udess está construido considerando que el Max Rate sea en meses.

5. Activity Incompability Constraint o Restricción de Incompatibilidad de Actividad: Limita el desarrollo simultáneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado.
6. Starting Period Constraint o Restricción de Inicio en Periodo: Limita el intervalo de tiempo en el que un grupo de actividades debe comenzar.

Estas últimas permiten describir el problema en base a los recursos asignados a cada una de las actividades. La descripción realizada fundamenta la versatilidad de la herramienta desarrollada y su potencialidad en la resolución de problemas de diversas disciplinas y por supuesto de la industria minera.

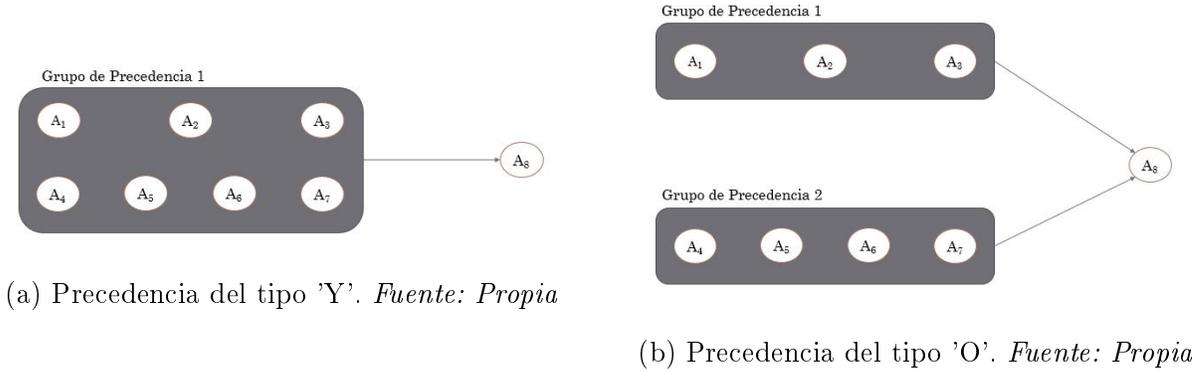


Figura 3.1: Tipos de Precedencias

3.1.3. Función Objetivo

A partir de la precedencias entre actividades y restricciones, el software agenda las tareas de forma de producir el máximo beneficio. La función objetivo es la siguiente:

$$NPV = \sum_{i=0}^T \beta^{\gamma t} \sum_{i \in A} (v_i \cdot p_{i,t} - v_i^+ \Delta s_{i,t} - v_i^- \Delta e_{i,t}) \quad (3.1)$$

donde $\beta = \frac{1}{(1+\alpha)^{1/12}}$ es el factor de actualización mensual, α la tasa de descuento anual, y $\gamma t = \sum_{s \leq t} k_s$ corresponde al tiempo acumulado hasta el periodo t . Por otro lado, v_i corresponde al ingreso o costo de cada actividad y $p_{i,t}$ el progreso que alcanza. A su vez, los términos $\Delta s_{i,t}$ y $\Delta e_{i,i}$ vienen dados por:

$$\Delta s_{i,t} = \begin{cases} s_{i,1} & , t = 1 \\ s_{i,t} - s_{i,t-1} & , t > 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\Delta e_{i,t} = \begin{cases} e_{i,t} - e_{i,t-1} & , t < T \\ e_{i,T} & , t = T \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1.4. Resultados

El problema de programación lineal es resuelto por un motor de optimización llamado Gurobi, el cual resuelve el problema de agendamiento solucionando un problema de programación entera mixto.

Gurobi fue diseñado para aprovechar los procesadores multi-core y se encuentra disponible de manera gratuita para fines académicos³.

Los resultados de UDESS corresponde a una carta Gantt en donde se especifica cuánto progresar en cada una de las actividades definidas sobre el horizonte de planificación. Esta salida es luego exportable a Excel para su análisis e implementación.

³www.gurobi.com

Capítulo 4

Metodología

En el presente capítulo se entrega la metodología propuesta para realizar un agendamiento conjunto entre Planificación y Preparación Minera. Luego, se entregan las simplificaciones que se realizaron, la forma de cómo fueron modeladas ambas etapas, las restricciones para el caso de estudio y los supuestos que se realizaron.

4.1. Metodología

1. Se escoge un modelo de bloques y se modelan las actividades de producción. En este paso se incluye el modelamiento de la velocidad de extracción por bloques a través del *Max_Rate*, toneladas por bloques, las beneficios por bloques, entre otros. También se define los bloques que pertenecen al área crítica para comenzar el hundimiento.
2. Se define un foot print a partir del modelo de bloques anterior, y se modelan las actividades de preparación de acuerdo a lo anterior. En este paso se incluyen la máxima velocidad de ejecución de cada una de las actividades de preparación modelada como *Max_Rate*, los costos y rendimientos de cada actividad.
3. Se definen las precedencias de las actividades de producción tales como la extracción vertical de las columnas y el ángulo de extracción.
4. Se definen las precedencia de las actividades de preparación. Esta secuencia puede representar a un Panel Caving con hundimiento convencional, avanzado o previo.
5. Se define la capacidad de producción en régimen como restricción de producción.
6. Se define las restricciones de recursos globales de las actividades de preparación
7. Se crea la instancia de agendamiento. Si el modelo es infactible, se revisan los datos y se vuelven a crear la instancia hasta que sea factible.
8. Se resuelve la instancia de agendamiento con la herramienta computacional UDESS.
9. Una vez que los resultados son obtenidos, se preparan y analizan.

4.2. Principales Supuestos

Algunos supuestos son asumidos para llevar a cabo los casos de estudios. Los supuestos son:

- **Altura de columnas de extracción:** La altura máxima de extracción disponible para la extracción será de 250 metros, como límite máximo. Esta altura no tiene relación con la altura económicamente extraíble, pues el agendamiento entregará dicha altura.
- **Dilución:** La dilución del modelo de bloques será computado antes de ingresarlo a la metodología. Dicho proceso se realiza utilizando una altura de interacción de 90 mts según la dilución vertical de Laubscher.
- **Piso de hundimiento económico y foot print:** La selección del piso de hundimiento y la definición del área del foot print (2D) son consideradas como información conocida.

4.3. Modelamiento en UDESS

En esta sección se presenta el modelamiento utilizada en esta tesis con el fin de obtener los resultados mostrados en el Capítulo 5.

Es necesario indicar que en esta sección sólo se considerará el agendamiento en conjunto de las etapas de Producción y Preparación solamente, es decir, la selección del piso económico, las alturas económicas extraíbles, el footprint y las Capacidades son parámetros de entrada al modelo (informaciones conocidas).

4.3.1. Generalidades del Modelamiento en Panel Caving

Para comenzar con el modelamiento, un diseño conceptual es presentado de acuerdo a la Figura 4.1.

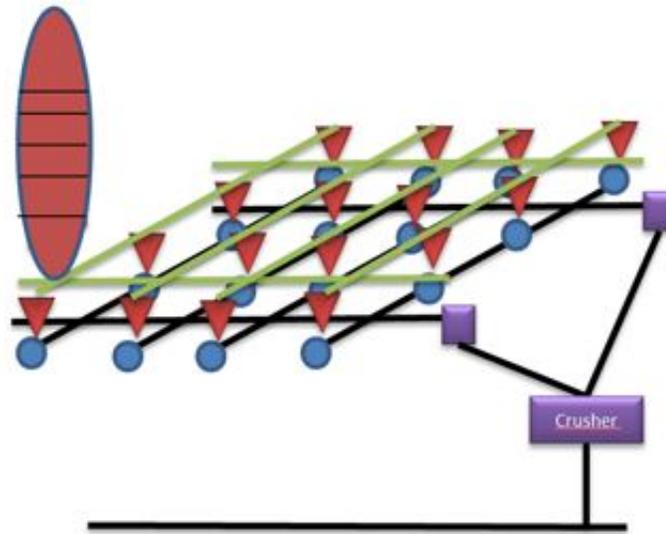


Figura 4.1: Diseño Conceptual del Modelamiento en Panel Caving. *Fuente:*
<https://goo.gl/cp3aER>

A continuación se presentan los supuestos más relevantes para el modelamiento en UDESS.

- Se realiza la planificación de la producción a partir de columnas de material que corresponden al mineral a extraer.
- Se considera que las columnas, numeradas $i = 1, 2, \dots, N$ son discretizadas en $p = 1, 2, \dots, P$, no necesariamente discretizadas en el mismo tamaño.
- Por otro lado, el valor económico de cada columna será como la suma de cada bloque p , es decir, $b_i = \sum_{p=1}^P b_{i,p}$, el tonelaje será $w_i = \sum_{p=1}^P w_{i,p}$.
- La velocidad de extracción de cada columna dependerá del estado en el que se encuentre. La velocidad se modela según el vector $u_i = u(p_1, p_2, \dots, p_P)$ (ver Figura 4.2).
- El valor neto económico de cada columna b_i considerará los ingresos por procesar y vender el mineral, menos los costos de extracción, pero no considerará los costos de desarrollos ni preparación.
- Asociada a cada columna de extracción, se considerará una actividad de preparación y desarrollo $D_i = 1, \dots, N$ con un beneficio b_i negativo correspondiente al costo de preparación correspondiente.
- Las actividades de preparación y desarrollo son actividades secuenciales y pueden tener subtareas de mismo modo secuenciales.
- Efectos como la dilución se consideran ya incluidos al computar el valor económico y tonelaje de la columna; y se asume para efectos de calcular el plan, que no dependen de la extracción, aunque sí se consideran aspectos geométricos como mantener un ángulo de extracción.
- Habrán $t = 1, 2, \dots, T$ años para planificar. Se considera un número máximo de columnas H_t a habilitar por año, sujetas a las consideraciones geomecánicas.
- Hay una capacidad W_t de toneladas a ser extraídas en cada período $t = 1, 2, \dots, T$.

- Nos interesa maximizar el VAN de la secuencia.

Las secciones 4.3.3 y 4.3.4 presentan los aspectos más importantes considerados en la metodología.

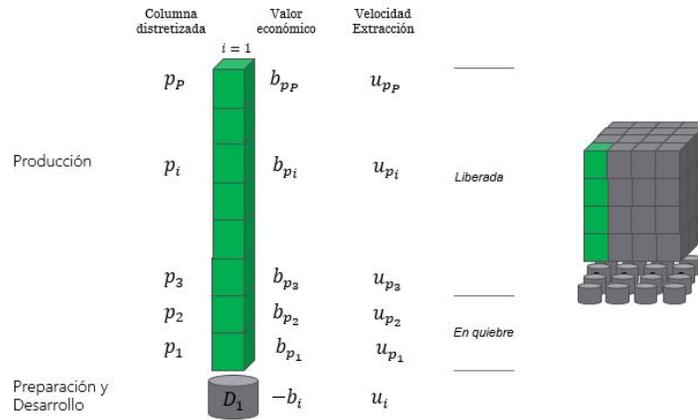


Figura 4.2: Modelamiento de una columna en UDESS. *Fuente: Elaboración Propia*

4.3.2. Metodología del Modelamiento

La Figura 4.3 muestra un esquema de los parámetros de entrada para crear una instancia para abordar el problema de agendamiento entre producción y preparación minera. Luego, dicho esquema es revisado con detalle en las secciones 4.3.3 y 4.3.4.

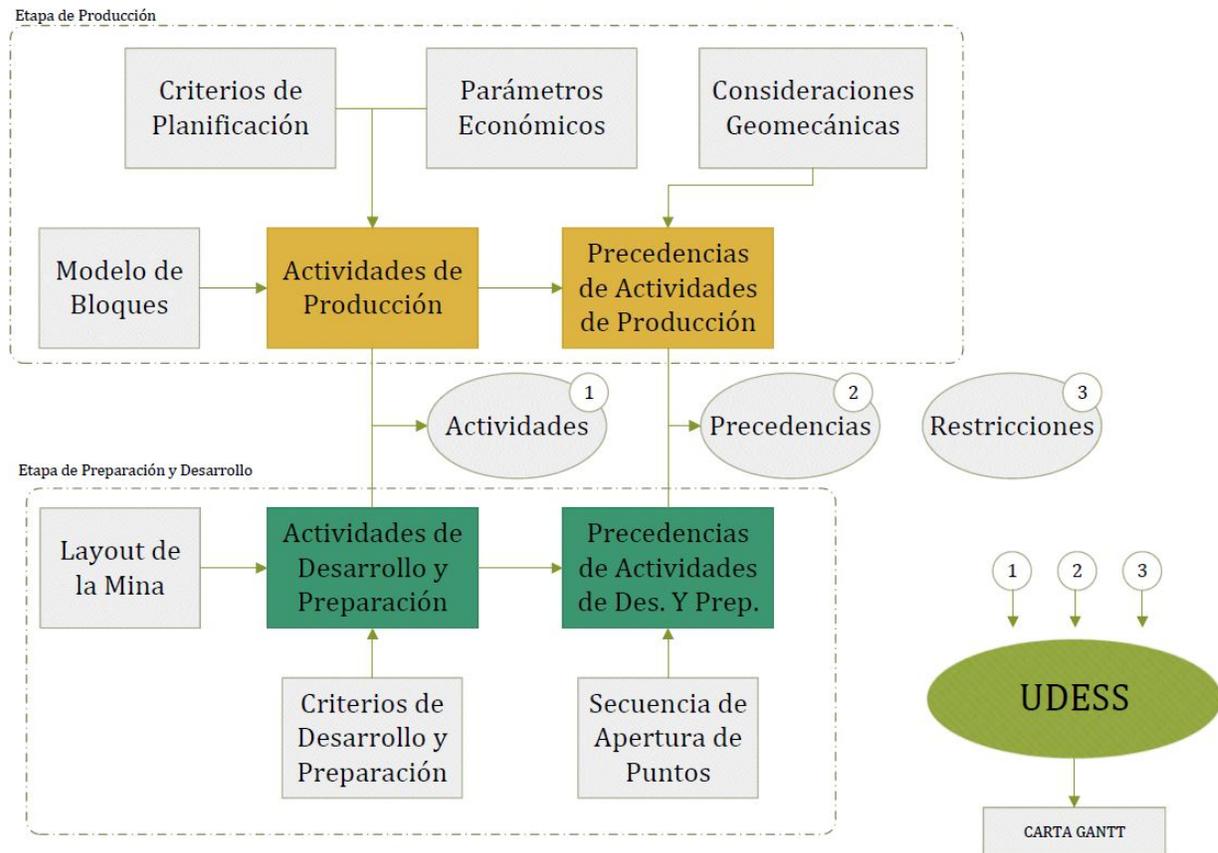


Figura 4.3: Metodología de Trabajo en UDESS. Fuente: *Elaboración Propia*

4.3.3. Modelamiento de la Etapa de Producción

El modelamiento de la etapa de producción corresponde a la extracción de material desde la socavación de mineral hasta el cierre de los puntos de extracción por agotamiento de reservas extraíbles.

Los parámetros de entradas para modelar corresponde al Modelo de bloques, Criterios de Planificación, Parámetros Económicos. Por otro lado, las Consideraciones Geométricas y Geomecánicas son consideradas y modeladas como precedencias.

A continuación se explicará cada una de ellas en función de las Actividades y Precedencias en UDESS.

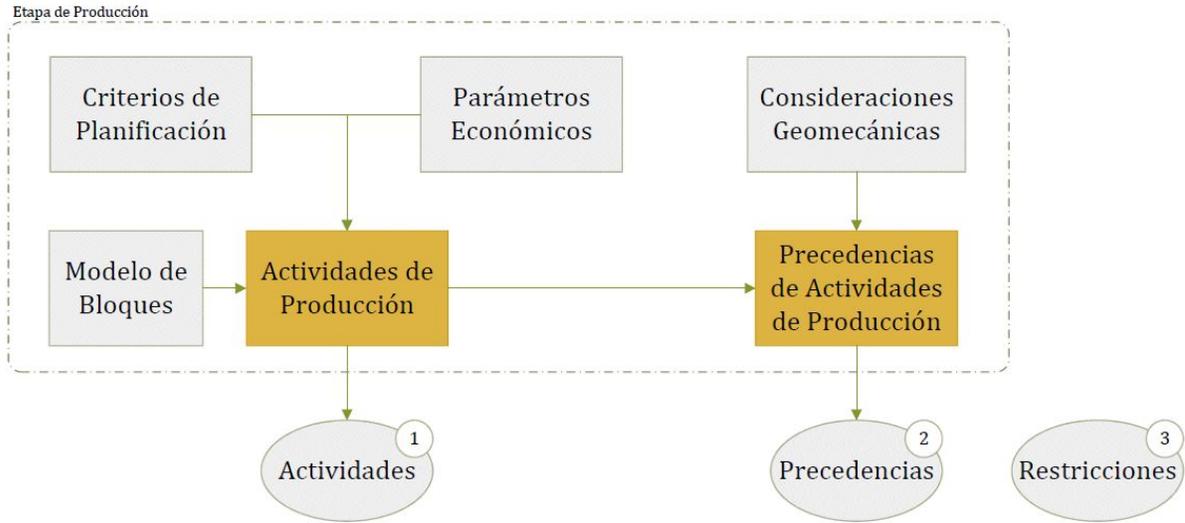


Figura 4.4: Metodología de Trabajo en Actividades de Producción en UDESS. *Fuente: Elaboración Propia*

Modelo de Bloques

Cada bloque del Modelo de Bloques será considerado como una actividad en UDESS y todos los atributos del bloque serán heredados en dicha actividad. En otras palabras, las Actividades de Producción corresponden a los bloques del inventario de bloques con todas sus cualidades y características geometalúrgicas, de este modo, coordenadas, leyes, categorización, densidad, tonelaje, etc., serán atributos de cada Actividad de Producción.

Criterios Económicos

Según los Parámetros Económicos, cada bloque posee un beneficio dado por el precio del metal de interés y los costos de extraer, procesar y comercializar cada bloque. La valorización de cada bloque es como lo indica la ecuación (4.1).

$$U_{bloque} = P \cdot L \cdot R \cdot T - (C_{mina} + C_{planta} + C_{RyV} \cdot L \cdot R) \cdot T \quad (4.1)$$

Donde:

A partir del beneficio de cada bloque, la actividad hereda el valor económico.

U_{bloque}	=	Beneficio económico obtenido al extraer, procesar y comercializar el bloque.
T	=	Tonelaje del bloque.
L	=	Contenido del elemento de interés del bloque (ley).
R	=	Recuperación metalúrgica del elemento de interés.
P	=	Precio de venta del elemento de interés.
C_{mina}	=	Costo de extracción del bloque (Arranque, carguío y transporte).
C_{planta}	=	Costo de procesamiento del bloque.
C_{RyV}	=	Costo de refinación y venta del elemento de interés.

Criterios de Planificación

Respecto a los criterios de planificación, básicamente esto se refiere al horizonte de planificación, capacidad de producción en régimen, perfil de velocidad de extracción, punto de inicio del hundimiento, secuenciamiento y estrategia de incorporación de área.

En particular, el perfil de velocidad de extracción es modelada por el Max_Rate o máxima velocidad de ejecución según la altura de columna. Esta situación es modelada según la Ecuación (4.2).

$$Max_Rate\left[\frac{veces}{periodo}\right] = vel_{ext}\left[\frac{ton}{m^2 \cdot dia}\right] \cdot \frac{Area[m^2] \cdot Periodo[periodo]}{Ton_{bloque}[ton]} \quad (4.2)$$

A modo de ejemplo, la tabla 4.1 corresponde al archivo de actividades⁴ de producción que es entregado a UDESS.

Tabla 4.1: Ejemplo de un Archivo de Actividades de Producción preparado para UDESS

Fuente: Elaboración Propia

ID Actividad	X	Y	Z	Tonelaje [ton]	Ley [%]	Max_Rate [veces/periodo]	Beneficio [USD]
$Bloque_i$	x_i	y_i	z_i	T_i	L_i	MR_i	B_i
1	1,470	1,335	1,280	29,052	1.12	1.00	1,495,651
2	1,570	1,545	1,388	28,764	2.04	2.81	1,876,609
3	1,630	1,440	1,244	28,620	0.45	0.33	105,531
...

Consideraciones Geométricas y Geomecánicas: Restricciones de Precedencias

Las restricciones de Precedencias en las Actividades de Producción corresponde a las consideraciones lógicas y geométricas que permiten modelar el hundimiento del macizo rocoso

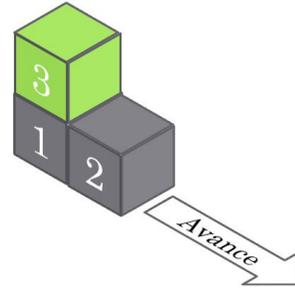
⁴La interpretación de la velocidad de extracción es como sigue: si el Max_Rate es 1,00 significa que se puede realizar como máximo 1 vez la actividad 1 en el periodo en cuestión. Si el Max_Rate es 2,81, significa que se puede realizar la actividad 2,81 veces en un periodo, y finalmente, si el Max_Rate es 0,33, significa que la actividad se puede un tercio de la actividad en un periodo.

4.5a, mantener el ángulo de extracción y la entrada de dilución y controlar el riesgo sísmico 4.5b.

Las precedencias en esta etapa son realizadas a partir de los bloques del modelo de bloques y la Figura 4.5 representa cada una de ellas.



(a) Precedencia lógica de extracción de una columna en métodos mineros por hundimientos. *Fuente: Elaboración Propia*



(b) Precedencia para modelar el control del riesgo sísmico en quiebre. *Fuente: Elaboración Propia*

Figura 4.5: Precedencia de las Actividades de Producción

4.3.4. Modelamiento de la Etapa de Preparación

Las Actividades de Preparación y Desarrollo son definidas a partir de las tareas que se deben cumplir para construir los niveles productivos.

Estas tareas son secuenciales y a partir de los criterios de preparación y desarrollo, cada actividad contará con atributos como el largo de la galería o cantidad de fortificación, un costo por ejecutarlas y un rendimiento. Este último termino, será modelado como la velocidad máxima de ejecución o Max Rate.

Las actividades de Preparación y Desarrollo Minero son divididas en 2. Por un lado, el modelamiento de las actividades de desarrollos corresponde a la construcción de túneles y galerías que se requieren para construir los niveles productivos (ver Figura 4.6). En ese sentido, las principales actividades son desde la marcación de tiros en la frente hasta la fortificación de perno, malla y shotcrete (Fortificación No Definitiva). Básicamente corresponde al ciclo minero en minería subterránea. Los desarrollos incluidos en el modelamiento contempla los desarrollos horizontales y verticales (ore pass) de los niveles de producción y hundimiento.

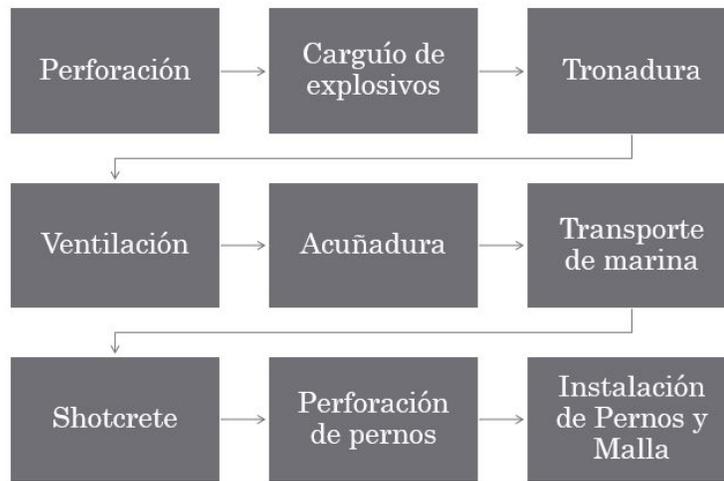


Figura 4.6: Ciclo Minero para el Desarrollo Horizontal. *Fuente: Elaboración Propia*

Por otro lado, las actividades de preparación o fortificación corresponde a las actividades de reforzamiento de los desarrollos horizontales y verticales que son requeridas para mantener las instalaciones a salvo y la instalación y montaje de obras civiles. Éstas incluyen las actividades de fortificación de intersección entre calles, construcción de los puntos de extracción, carpeta de rodado y pilares y muros.

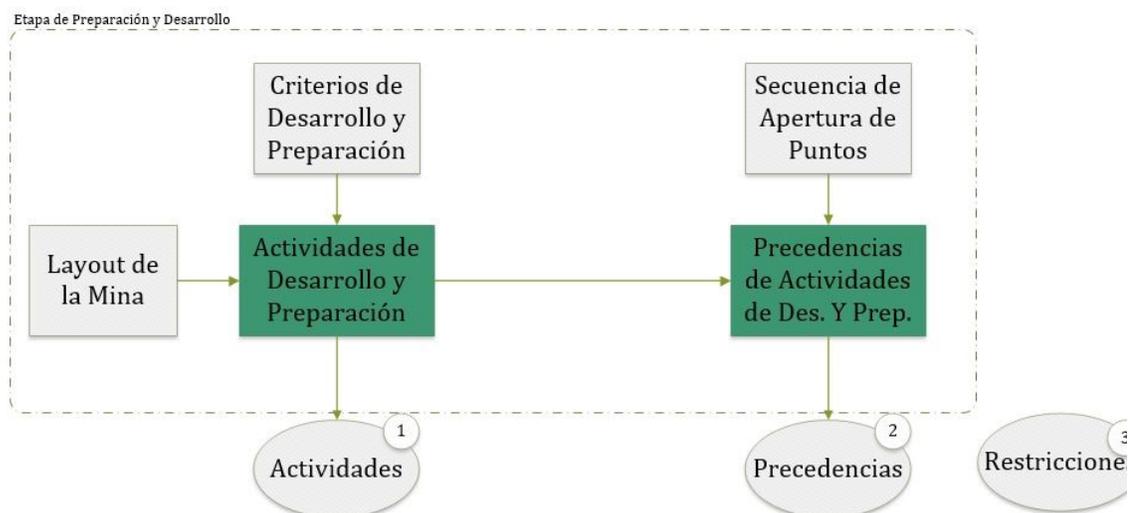


Figura 4.7: Metodología de Trabajo en Actividades de Preparación y Desarrollo en UDESS. *Fuente: Elaboración Propia*

De acuerdo a la Figura 4.7, los parámetros de entradas para modelar la etapa de Preparación y Desarrollo básicamente corresponde al Layout de la Mina y Criterios de Desarrollo y Preparación. Las precedencias para modelar la estrategia de incorporación de bateas es de acuerdo a la Secuencia de Apertura de Puntos de Extracción.

A continuación se explicará cada una de ellas en función de las Actividades y Precedencias en UDESS.

Layout de la Mina

El layout de la mina es el parámetro más importante para modelar las actividades de Preparación y Desarrollo ya que contiene todas las dimensiones de los niveles productivos que soportarán la producción.

Para modelar dichas labores en UDESS, es necesario considerar la discretización de los desarrollos horizontales y verticales en tramos menores para facilitar la resolución del problema según el tiempo de planificación. Si el objetivo es un agendamiento en periodos mensuales, es necesario considerar una discretización de la galería en tramos convenientes, por ejemplo, 10 metros, de tal manera de visualizar los resultados en la realidad. Por otro lado, no sería conveniente realizar un agendamiento mensual considerando actividades de largo de 100 metros.

Los siguientes items son los más importantes para el modelamiento de las actividades de Preparación y Desarrollo que debería estar definidos en el layout de la mina.

- Niveles Productivos
- Tipo de Malla de Extracción (El Teniente o Henderson)
- Número de Intersecciones entre calles de producción y zanjas
- Secciones de los desarrollos horizontales y verticales
- Requerimientos de Fortificación

De lo anterior, el layout debe contar, al menos, con los largos y secciones de las galerías de los niveles, y en el nivel de producción, con la cantidad de puntos de extracción, fortificación de pilares, puntos de extracción, intersección de calles y metros de las carpetas de rodado. Además, se debe contar con los metros de desarrollo vertical. La Tabla 4.2 muestra las principales actividades del nivel de producción (nivel más intensivos en desarrollos) y la Tabla 4.3, las del nivel de hundimiento.

Tabla 4.2: Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Producción incluidas en el Modelamiento

Actividades del Nivel de Producción	unidad
Desarrollos Horizontales	metros
Desarrollos Verticales (0.7 m)	metros
Fortificación Intersección Calle / Zanja	unidades
Fortificación de Pilares	unidades
Construcción Muros de Confinamiento	metros
Construcción Carpeta de Rodado	metros
Puntos de Extracción	unidades
Excavación y Fortificación de Puntos de Vaciados	unidades
Construcción Brocal de Punto de Vaciado	unidades
Desquinche de Pique (1.5 a 3.4 m)	unidades
Fortificación de Pique (3.4 m)	unidades
Blindaje de Pique (3.4 m)	unidades
Construcción Base de Martillo	unidades

Tabla 4.3: Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Hundimiento incluidas en el Modelamiento

Actividades del Nivel de Hundimiento	unidad
Desarrollos Horizontales	metros
Desarrollos Verticales	metros

Para realizar el acceso a los niveles de producción, también pueden ser modeladas las actividades que permiten desarrollar las rampas de acceso.

Criterios de Preparación y Desarrollo

Los criterios de Preparación y Desarrollo tienen que ver con los rendimientos que se ejecutan en cada una de las actividades. Además, se debe considerar un costo por ejecutar dichas actividades. La siguiente tabla muestra la información necesaria para este ítem.

Tabla 4.4: Rendimientos de Preparación y Desarrollo

Nivel	Actividad	Valor	Rendimiento	Costo	Costo unitario
NP	Frontones de Accesos NP	A_i	m/mes	$-C_A$	US\$/m
NP	Calle de Producción	CP_i	m/mes	$-C_{CP}$	US\$/m
NP	Calle Zanja	CZ_i	m/día	$-C_{CZ}$	US\$/m
NP	Punto Vaciado	PV_i	día/un	$-C_{PV}$	US\$/un
NP	Fortificación Intersección	FI_i	unidades/mes	$-C_{FI}$	US\$/un
NP	Fortificación Pilares con Muros de Confinamiento	FM_i	unidades/mes	$-C_{FM}$	US\$/un
NP	Construcción de Puntos de Extracción	PE_i	unidades/mes	$-C_{PE}$	US\$/un
NP	Carpeta de Rodado	CR_i	mts/mes	$-C_{CR}$	US\$/m
NP	Construcción Batea	B_i	mts bar./mes	$-C_B$	US\$/un
UCL	Frontones de Accesos UCL	A_i	m/mes	$-C_A$	US\$/m
UCL	Galería de Hundimiento	GH_i	m/mes	$-C_{GH}$	US\$/m

Secuencia de Apertura de Puntos

La secuencia de apertura de puntos se refiere a cómo es secuenciada la incorporación de columnas para agregar área productiva a la producción. Esta secuencia tiene que ver con cuántas bateas son incorporadas por periodo siguiendo un orden lógico, pero no tiene ver con que el inicio de una columna esta precedida por el fin de otra.

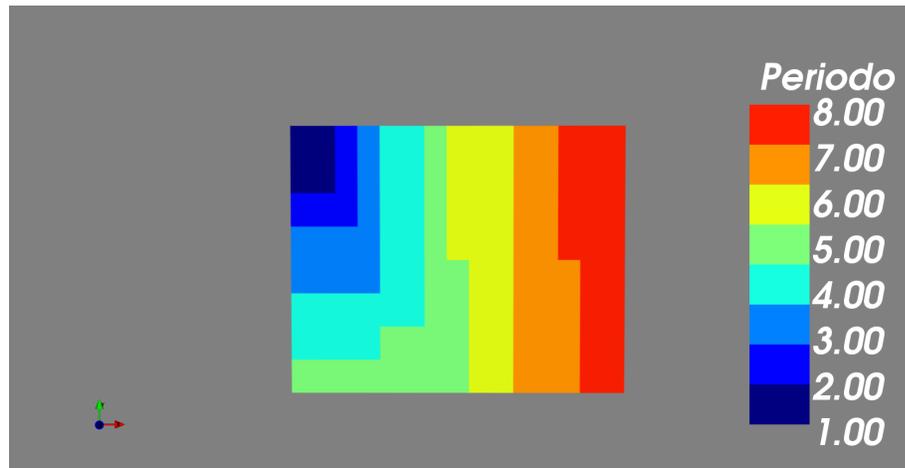


Figura 4.8: Ejemplo de Incorporación de Área como Secuencia de Apertura de Puntos.

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 5

Caso Estudio 1: Análisis y Resultados

Este capítulo muestra la implementación de la metodología propuesta considerando todos los pasos descritos en el Capítulo 4 para la etapa de producción. Para alcanzar este propósito se plantean 4 ejercicios los cuales consisten en aplicar la metodología propuesta solamente a las actividades de producción, es decir, simular la forma en como se realiza la planificación de la producción en la industria. Además, se evalúa una estrategia para disminuir los tiempos de cómputo sin perder de vista las condiciones operacionales. Para esto, se realizan 4 ejercicios llamados:

- Ejercicio 1: "Optimización de Actividades de Producción"
- Ejercicio 2: "Discretización de Columnas"
- Ejercicio 3: "Discretización de Columnas y Punto de Inicio de Hundimiento"
- Ejercicio 4: "Discretización de Columnas y Velocidades de Extracción"

Se considera que todos los casos son basados en información proveniente de algunos proyectos contemporáneos y minas en explotación, y no representa alguna mina en particular. Además, todos los caso de estudio presentan supuestos asumidos para desarrollar los experimentos y simulaciones.

Supuestos Generales

Los supuestos más importantes se presentan a continuación.

- El método de explotación modelado es un Panel Caving con hundimiento convencional.

5.1. Parámetros de Entrada

Los parámetros de entrada más importante del Caso Estudio 1 se muestran a continuación de acuerdo a la metodología propuesta en el Capítulo 4.

5.1.1. Modelo de Bloques

Un modelo de bloques del almacén del Laboratorio de Planificación Minera Delphos fue utilizado. Las características son las siguientes:

Tabla 5.1: Características Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 1

Parámetro	Mínima	Máxima	Unidades
Coordenada X	2930	3170	-
Coordenada Y	3190	3330	-
Coordenada Z	1868	2102	-
Tamaño Modelo	1457		unidades
Tamaño Bloque X	20		m
Tamaño Bloque Y	20		m
Tamaño Bloque Z	18		m
Metales presentes	Cu		-
Ley Media Cu (%)	0.81		%
Tonelaje	12.24		Millones de Ton

La visualización del modelo de bloques en una vista isométrica es mostrada en la Figura 5.1.

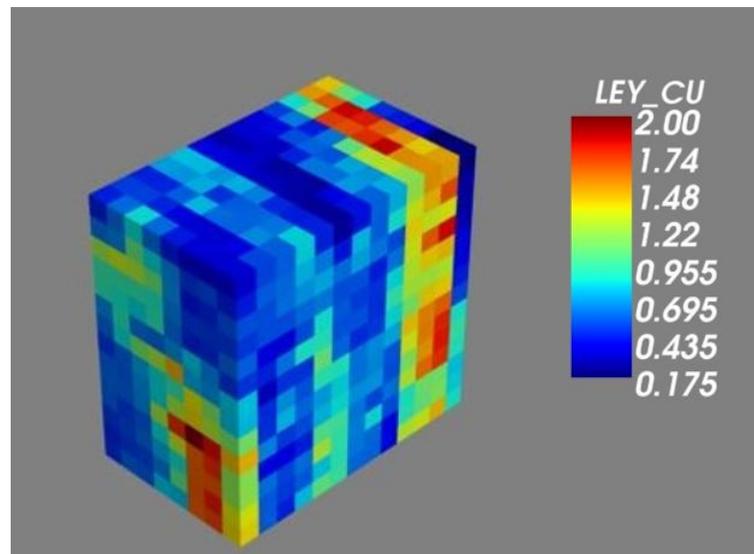


Figura 5.1: Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 1. *Fuente: Elaboración Propia. Software: DOPPLER*

5.1.2. Criterios Económicos

Los criterios económicos utilizados para valorar el modelo de bloques son mostrado en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros Económicos del Caso de Estudio 1

Parámetro	Valor	Unidad
Precio de Cu	2.2	US/lb
Costo Mina	4.0	US/ton
Costo Planta	8.0	US/ton
Costo de Refinación	0.3	US/lb
Recuperación	85.0	tanto por ciento

5.1.3. Criterios de Planificación

El horizonte de tiempo de planificación es 13 años y una producción en régimen de 7,000 toneladas por día es estimada según la formulación de Ovalle (2012) (ver Ecuación 5.1), esto es:

$$MPC[tpa] = (W \text{ or } H)[m] \cdot V_p \left[\frac{m^2}{\text{año}} \right] \cdot \gamma \left[\frac{\text{ton}}{m^3} \right] \cdot R_0[\%] \quad (5.1)$$

donde:

- MPC = Máxima Capacidad de Producción por Año.
- V_p = Velocidad de Preparación.
- H = Altura del Cuerpo Mineralizado en el caso de un Block o Panel Caving.
- W = Ancho del Cuerpo Mineralizado en el caso de un Sublevel Caving.
- γ = Densidad promedio del yacimiento.
- D = Disponibilidad del Método Minero.

El criterio de planificación también incluye la velocidad de extracción de la columna y la Tabla 5.3 muestra las velocidades usadas para el Caso Estudio 1.

Tabla 5.3: Perfil de Velocidad de Extracción según la Altura de Columna

Velocidad según Altura			Estado de la Columna
Velocidad	Altura Columna		-
$\text{ton}/m^2 - \text{dia}$	$\text{min}[m]$	$\text{max}[m]$	-
0.17	0	18	Área Crítica
0.25	0	18	Área No Crítica
0.35	18	36	En Quiebre
0.45	36	54	En Quiebre
0.55	54	72	En Quiebre
0.70	72	250	Liberada

De la Tabla 5.3, es necesario indicar que el estado "Área Crítica" corresponden a todos los bloques que pertenecen al área inicial necesaria para producir la propagación del caving. Se

considera un radio hidráulico de 25 [m], de forma cuadrada, supuesto asumido para atender las condiciones de hundibilidad. Por otro lado, la "Área No Crítica" corresponde a todos los bloques de 1° nivel que no pertenecen al "Área Crítica".

Respecto al Punto de Inicio del Caving, la Figura 5.2 muestra el footprint del piso de hundimiento. El inicio del hundimiento ha sido elegido desde la coordenada E2930, N3330.

	2930	2950	2970	2990	3010	3030	3050	3070	3090	3110	3130	3150	3170
3330	2.4	10.5	9.6	7.7	2.9	2.5	2.5	3.2	4.4	2.6	1.9	1.6	4.3
3310	3.9	9.9	8.6	6.2	3.1	3.0	2.6	4.0	3.7	1.9	1.9	1.3	6.0
3290	4.4	8.8	8.3	5.3	3.1	2.9	2.3	4.2	3.8	1.7	1.5	2.8	6.3
3270	4.9	7.8	7.9	4.8	2.7	2.0	2.2	5.0	4.1	1.9	1.4	4.9	5.0
3250	5.1	7.7	8.2	3.7	2.6	1.8	2.4	5.3	3.6	2.0	2.3	5.5	4.5
3230	6.5	7.6	7.8	2.2	2.3	1.4	2.2	5.1	3.2	2.7	1.8	4.7	3.8
3210	8.2	9.6	7.9	1.9	2.0	1.5	1.7	4.3	2.8	3.0	1.5	3.5	3.4
3190	8.3	9.2	7.5	2.6	1.5	0.9	1.0	3.8	2.4	2.3	1.6	2.6	2.8

Figura 5.2: Beneficio por Columna del Footprint (en millones de dólares). *Fuente: Elaboración Propia.*

Respecto a la tasa de incorporación de área, se consideró un crecimiento tal como lo indica la Figura 5.3.

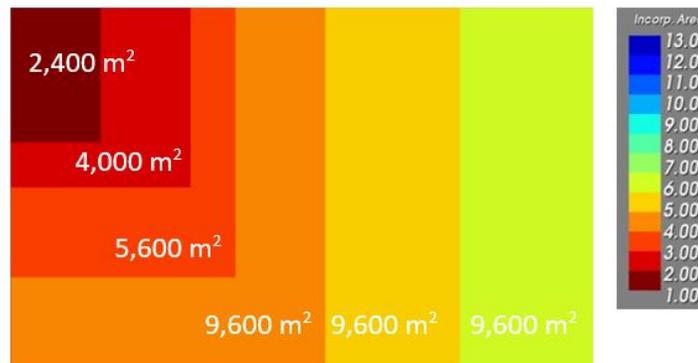


Figura 5.3: Incorporación de Área por Año para el Caso Estudio 1. *Fuente: Elaboración Propia. Software: DOPPLER*

5.1.4. Consideraciones Geométricas y Geomecánicas

Las consideraciones geométricas y geomecánicas son indiferentes para los casos estudios porque son condiciones del método de explotación, por lo que para este caso y los otros no varía. Esto quiere decir que las consideraciones geométricas y geomecánicas son como lo indica la Sección 4.3.3.

5.2. Ejercicio 1: Optimización de Actividades de Producción

Este ejercicio busca determinar el orden de extracción óptimo de los bloques de las columnas de mineral y evaluar los resultados del agendamiento de producción según el valor presente neto, dada una estrategia de apertura de puntos.

5.2.1. Resultados del Caso de Estudio 1

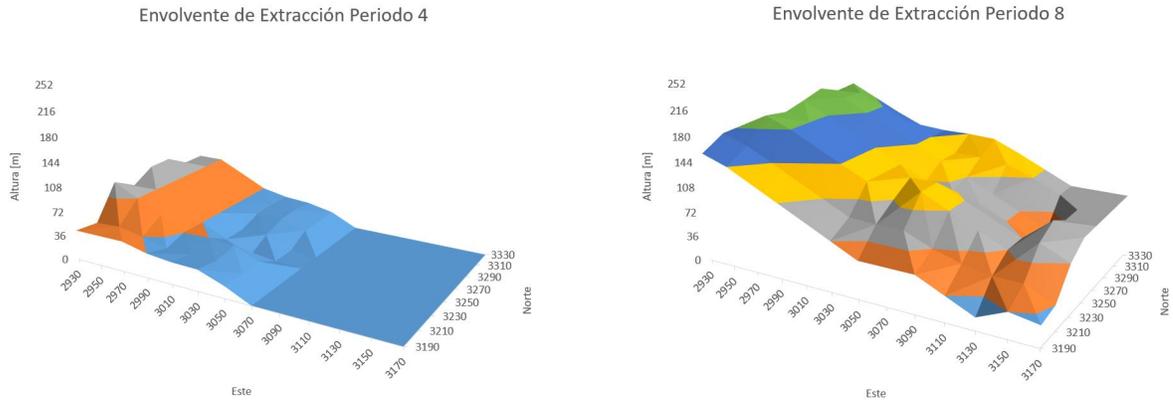
Como consecuencia de la maximización de valor presente neto, se aprecia un comportamiento decreciente de las leyes en donde los bloques de mayores beneficios son agendados en los primeros años, consecuencia de incluir el valor del dinero en el tiempo en los planes de producción.



Figura 5.4: Plan de Producción para el Caso Estudio 1. *Fuente: Elaboración Propia.*

La Figura 5.5 muestra la envolvente de extracción de los periodos 4 y 8, donde se observa que el ángulo de extracción se mantiene entre 35° a 45° durante todo el agendamiento.

El valor objetivo que consiguió este agendamiento es de 204,25 millones de dólares. El tiempo de resolución del problema alcanzó a 424,90 segundos y el Gap fue de 2,90 %.



(a) Secuencia de Extracción Periodo 4 en Ramp Up. *Fuente: Elaboración Propia.*

(b) Secuencia de Extracción Periodo 8. *Fuente: Elaboración Propia.*

Figura 5.5: Secuenciamiento del Plan de Producción Caso Estudio 1.

5.2.2. Análisis de Resultados Caso Estudio 1

La conclusión más importante de este ejercicio es que es posible realizar un plan de producción con la herramienta matemática UDESS considerando un modelo de bloques, y antecedentes técnicos y económicos. A continuación se entregan algunos comentarios sobre el ejercicio 1:

- Existe la posibilidad de secuenciar el primer nivel de modelo de bloque acuerdo a la estrategia de apertura de puntos de extracción con precedencias horizontales. En algunos casos, esta situación podría no ser conveniente debido a la velocidad de extracción de cada bloque (actividad) y el tamaño de éste; si cada actividad posee una máxima tasa de ejecución "Max_Rate" menor o igual al periodo en cuestión (en particular, menor a 1), entonces el agendamiento no podrá extraer más que ese bloque en ese periodo, postergando (por precedencias) al resto de los bloques al siguiente periodo, lo que se traduce en que no se alcanza la producción deseada. Por esta razón se escogió no considerar precedencias horizontales en el primer nivel. Para incorporar la secuencia de apertura de puntos, se optó por forzar el progreso de cada bloque por periodo con la restricción "Progress Limit Constraint".
- Respecto al ángulo de extracción, es posible mantener el ángulo de extracción en 45° bajo las consideraciones geométricas y geomecánicas. Inicialmente se consideró mantener el ángulo de extracción hasta la altura de liberación (30% de la altura extraíble), pero los resultados fueron insatisfactorios debido a que la extracción era irregular pasada esta altura de extracción. Por lo tanto, se optó por considerar las precedencias del ángulo de extracción en todo el modelo de bloques.
- A medida que el número de actividades aumenta, el problema de agendamiento requiere de mayor tiempo para encontrar una solución lo que motivó a encontrar una estrategia para disminuir los tiempo de cómputo.

5.3. Ejercicio 2: Discretización de Columnas

A medida que el problema a abordar considera más bloques, el tiempo de resolución también aumentó, por lo que se recurrió a buscar estrategias para disminuir los tiempos de resolución. De este modo, se construyó una estrategia que tiene que ver con la "discretización" de las columnas.

La idea conceptual es mostrada en la Figura 5.6 y tiene que ver con que algunos bloques pertenecientes a una columna de roca fueron agrupados para reducir los niveles. Este agrupamiento respeta el balance de masa y la ley promedio ponderada de los bloques agrupados.

En ningún caso, las columnas fueron rebloqueadas con bloques de columnas vecinas (en dirección X o Y), sino que siempre dentro de una única columna. Además, el agrupamiento fue replicado a todas las columnas por igual.

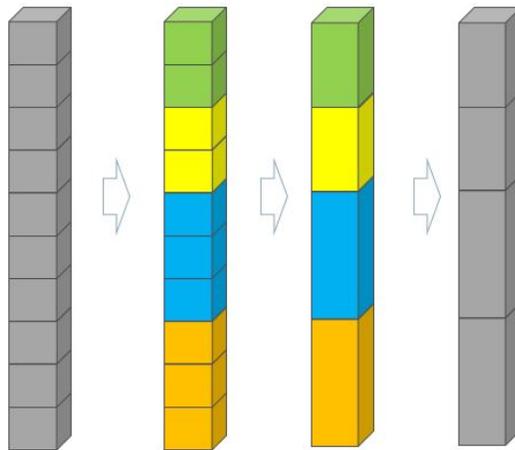


Figura 5.6: Idea Conceptual para la Discretización. *Fuente: Elaboración Propia.*

La Tabla 5.4 muestra los 6 casos analizados. La nomenclatura y descripción de cada "discretización" es como sigue:

1. $G14_{-13} + 1 \cdot 1$: Caso inicial.
2. $G8_{-5} + 3 \cdot 3$: El modelo de bloques final contó con 8 niveles. Se mantuvieron intactos los primeros 5 niveles y el resto de la columna se agrupó en 3, cada uno con 3 bloques.
3. $G6_{-4} + 2 \cdot 5$: El modelo de bloques final contó con 6 niveles. Se mantuvieron intactos los primeros 4 niveles y el resto de la columna se agrupó en 2, cada uno con 5 bloques.
4. $G6_{-2} + 4 \cdot 3$: El modelo de bloques final contó con 6 niveles. Se mantuvieron intactos los primeros 2 niveles y el resto de la columna se agrupó en 4, cada uno con 3 bloques.
5. $G5_{-4} + 1 \cdot 10$: El modelo de bloques final contó con 5 niveles. Se mantuvieron intactos los primeros 4 niveles y el resto de la columna se agrupó en 1, con 10 niveles restantes.
6. $G5_{-2} + 3 \cdot 4$: El modelo de bloques final contó con 5 niveles. Se mantuvieron intactos los primeros 2 niveles y el resto de la columna se agrupó en 3, cada uno con 4 bloques.

Tabla 5.4: Resumen Casos Seleccionados de Agrupamiento de Niveles

Caso	Niveles	In situ	Grupos	Bloques x grupo	ID
Base	14	14	0	0	$G_{14_13} + 1 \cdot 1$
1	8	5	3	3	$G_{8_5} + 3 \cdot 3$
2	6	4	2	5	$G_{6_4} + 2 \cdot 5$
3	6	2	4	3	$G_{6_2} + 4 \cdot 3$
4	5	4	1	10	$G_{5_4} + 1 \cdot 10$
5	5	2	3	4	$G_{5_2} + 3 \cdot 4$

El Ejercicio 2 consiste en realizar un plan de producción para todas las discretizaciones, considerando la misma capacidad de producción, estrategia de apertura de puntos y velocidad de extracción. Los resultados son mostrados en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

5.3.1. Resultados Ejercicio 2

La Figura 5.7 muestra el plan de producción de todos los casos discretizados analizados. Todos los casos analizados cumplieron con las restricciones y consideraciones impuestas en el modelo de optimización. De hecho, del punto de vista de la producción los agendamientos no tuvieron diferencias y el comportamiento de las leyes fue decreciente y similar para todos los casos, con diferencias en el periodo de Ramp Up.

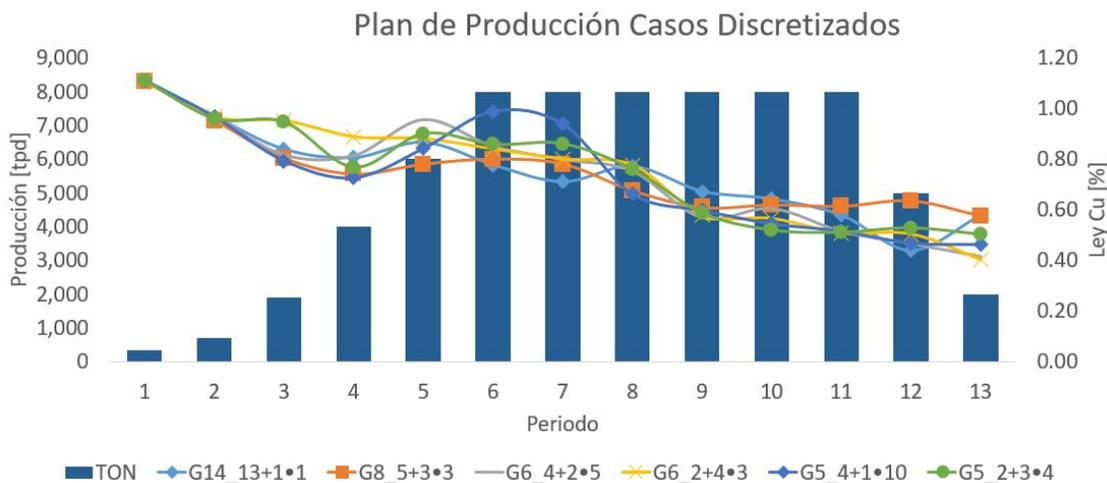
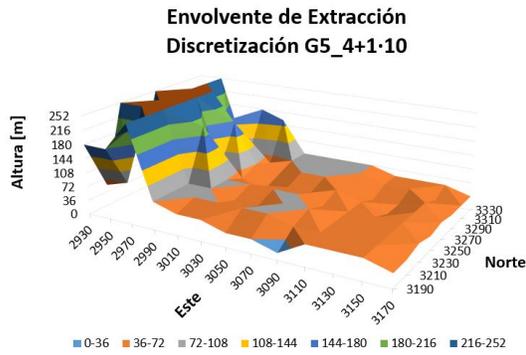


Figura 5.7: Plan de Producción para los modelos discretizados. Fuente: *Elaboración Propia*.

La discretización de columnas logró disminuir los tiempos de cómputo y mantener el ángulo de extracción de las simulaciones. Sin embargo, la Figura 5.8 muestra las envolventes de extracción o alturas de columna extraída para las discretizaciones $G_{5_4} + 1 \cdot 10$ y $G_{6_4} + 2 \cdot 5$, ambos en el periodo 7. Se aprecia que el ángulo de extracción en estas dos discretizaciones no se cumple debido a la diferencia de tamaño de los bloques superiores respecto a los inferiores (18 m versus 180 m, y 18 m y 90 m, respectivamente).



(a) Propagación del Caving $G5_4 + 1 \cdot 10$ (Periodo 7). Fuente: *Elaboración Propia*.



(b) Propagación del Caving $G_4 + 2 \cdot 5$ (Periodo 7). Fuente: *Elaboración Propia*.

Figura 5.8: Propagación del Hundimiento - Caso Estudio 2.

A pesar que está situación es geométrica, también afecta el Valor Presente Neto de estos 2 casos respecto a los otros. Esto, porque el modelo de optimización opta por extraer los bloques de los niveles superior con mayor beneficio, limitados unicamente por la velocidad de extracción, dejando a los bloques inferiores de menor beneficio postergados para periodos posteriores.

Para el caso particular de las discretizaciones $G5_4 + 1 \cdot 10$ y $G_4 + 2 \cdot 5$ se presenta una irregularidad en las leyes del plan de producción (ver Figura 5.7) entre los periodos 4 y 7 (Ramp Up y Régimen) que afecta el VPN. Esto se explica porque el modelo de optimización opta por extraer los bloques de los niveles superior con mayor beneficio, limitados unicamente por la velocidad de extracción, dejando a los bloques inferiores de menor beneficio postergados para periodos posteriores, alterando el Valor Presente Neto de ambos casos.

Estas dos discretizaciones son consideradas críticas debido al impacto que tienen sobre el ángulo de extracción.

La Figura 5.9 muestra los resultados del agendamiento para las 6 discretizaciones analizadas. Se observa que el tiempo de resolución de cada problema disminuye conforme más se agrupan los niveles. Por otro lado, las desviaciones (Gap) alcanzadas (el valor del gap es el que está dentro de las columnas como porcentaje) son menores al 5% para todos los casos.

Finalmente, el valor objetivo (el otro valor dentro de la columna) alcanzado por los agendamientos no presenta desviaciones estándares mayores al $\pm 3,2\%$.

5.3.2. Análisis de Resultados Ejercicio 2.

Respecto a los resultados de este ejercicio, algunos comentarios son mostrados a continuación:

- Las discretizaciones consiguen disminuir el tiempo de resolución de un problema de agendamiento sin perder de vista la optimalidad.



Figura 5.9: Valor Objetivo, Gap y Tiempo de Resolución Casos Discretizados. *Fuente: Elaboración Propia.*

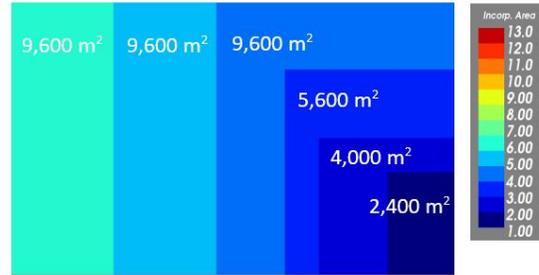
- No obstante lo anterior, se aprecia que el agrupamiento de varios bloques puede tener un impacto negativo en el Ángulo de Extracción, es decir, en algunos casos no permite controlar el ángulo de extracción. Esta situación se puede ver claramente en la Figura 5.8. De todas las simulaciones realizadas, sólo 2 obtuvieron resultados insatisfactorios.
- Los casos críticos de discretizaciones ocurren cuando los existen un agrupamiento de varios bloques, sobre todo en la parte superior de un modelo de bloque, lo cual se ve reflejado en los casos $G5_4 + 1 \cdot 10$ y $G6_4 + 2 \cdot 5$.
- Respecto del plan de producción de las 2 discretizaciones críticas, existe un aumento de la ley entre el periodo 4 y 7 (entre Ramp Up y Régimen). Esta situación se debe a que los últimos niveles contiene 10 y 5 bloques agrupados, respectivamente, y como el modelo de optimización maximiza el beneficio, el agendamiento opta por extraer los bloques superiores con alto contenido de ley. Del punto de vista económica, es interesante este resultado, pero deja de lado la realidad de método de explotación (ángulo de extracción).

5.4. Ejercicio 3: Discretización de Columnas y Punto de Inicio de Hundimiento

Para evaluar el impacto que tiene la elección del punto de inicio de hundimiento en la metodología, se realizó un experimento donde 2 puntos fueron escogidos como inicios. La Figura 5.10 muestra las dos secuencias de extracción junto a la estrategia de incorporación de área.



(a) Estrategia de Incorporación de Área Secuencia 1. Fuente: *Elaboración Propia*.



(b) Estrategia de Incorporación de Área Secuencia 2. Fuente: *Elaboración Propia*.

Figura 5.10: Estrategia de Incorporación de Área y Secuenciamiento. Caso Estudio 2. Software: DOPPLER

5.4.1. Resultados Ejercicio 3

Los resultados son mostrados en la Figura 5.11, donde se aprecia que la secuencia 1 consigue un 5,5% más de valor, en promedio, en todas las discretizaciones.

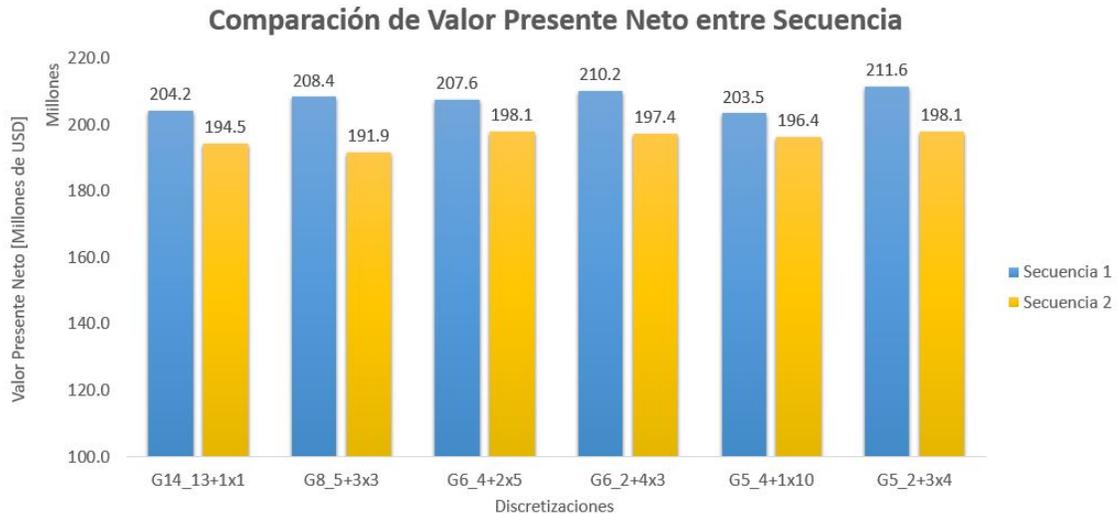


Figura 5.11: VPN entre Secuencia 1 y Secuencia 2, según Discretizaciones. Fuente: *Elaboración Propia*.

5.4.2. Análisis de Resultados Ejercicio 3.

De los resultados obtenidos en este ejercicio, se indica que:

- La elección del punto de inicio del hundimiento afecta al Valor Presente Neto del agendamiento de producción. Esta situación se debe exclusivamente a la distribución de las leyes en el yacimiento.

- En todos los casos, la secuencia 1 consiguió mejores resultados en términos del Valor Presente Neto debido a la temprana captura de bloques de mejores leyes al inicio del proyecto.

5.5. Ejercicio 4: Discretización de Columnas y Velocidades de Extracción

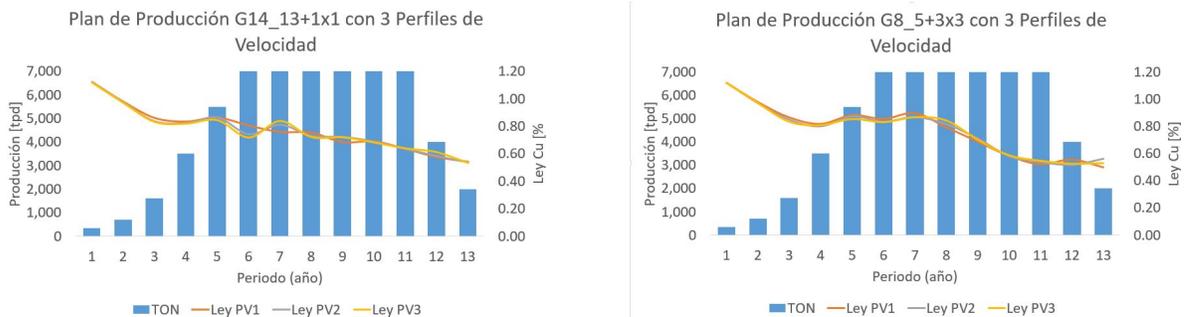
El ejercicio 4 consiste en realizar planes de producción variando el perfil de velocidad de manera de medir el impacto que esto tiene en el Valor Presente Neto. De la Tabla 5.5 se aprecia las distintas velocidades de extracción utilizadas en una misma secuencia de extracción, según las 6 discretizaciones.

Tabla 5.5: Perfiles de Velocidad Caso Estudio 2. Experimento 3

Nivel	Perfil de Velocidad [$ton/m^2 - dia$]		
	Perfil 1 (PV1)	Perfil 2 (PV2)	Perfil 3 (PV3)
1er (área crítica)	0,17	0,17	0,17
1er (área no crítica)	0,25	0,20	0,19
2do	0,35	0,30	0,28
3er	0,45	0,40	0,38
4to	0,55	0,50	0,48
5to	0,70	0,68	0,65

5.5.1. Resultados Ejercicio 4

Los resultados son presentados en la Figura 5.12 y 5.13, donde se aprecia la comparación entre los distintos perfiles de velocidad. De los planes de producción de la Figura 5.12 se aprecia que el comportamiento de las leyes es decreciente y similar. El perfil de mayor velocidad, PV1, consigue mejores resultados al extraer más rápido los bloques de mayores leyes.



(a) Plan de Producción con 3 Perfiles de Velocidades de Extracción. $G14_{13} + 1 \cdot 1$.

(b) Plan de Producción con 3 Perfiles de Velocidades de Extracción. $G8_{5} + 3 \cdot 3$.

Figura 5.12: Plan de Producción con 3 Perfiles de Velocidades de Extracción. Casos $G8_{5} + 3 \cdot 3$ y $G14_{13} + 1 \cdot 1$. Fuente: *Elaboración Propia*.

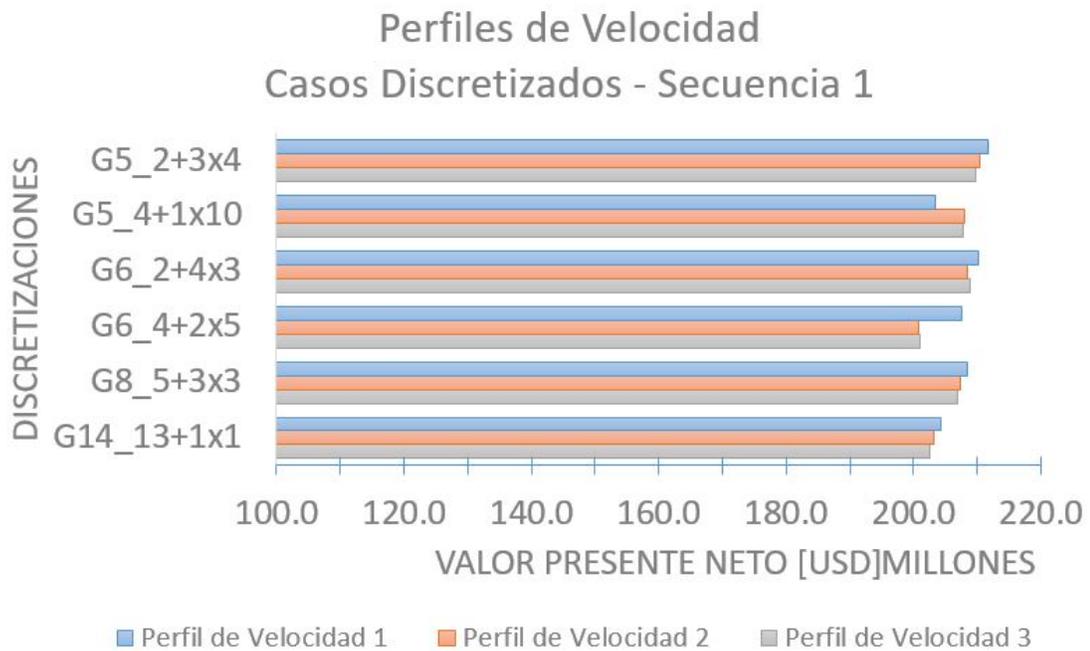


Figura 5.13: Perfiles de Velocidades. Secuencia 1. *Fuente: Elaboración Propia.*

5.5.2. Análisis de Resultados Ejercicio 4.

De los resultados obtenidos, se desprende que:

- El perfil de velocidad afecta el Valor Presente Neto de tal forma que a mayor perfil de velocidad, mayor Valor Presente Neto.
- De la Figura 5.13, el perfil de mayor velocidad, PV1, consigue mejores resultados en todos los casos, exceptos a los casos $G5_4 + 1 \cdot 10$ y $G6_4 + 2 \cdot 5$ donde nuevamente la agrupación de bloques afecta el resultado.

Capítulo 6

Caso Estudio 2: Análisis y Resultados

Este capítulo muestra la implementación de la metodología propuesta considerando todos los pasos descritos en el Capítulo 4 para las etapas de producción y preparación minera. Para alcanzar este propósito se plantean 3 ejercicios en Caso de Estudio 2 que consiste en aplicar la metodología propuesta completamente y compararla con la manera Tradicional de realizar la Planificación de la Producción.

- Ejercicio 5: "Planificación Tradicional"
- Ejercicio 6: "Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional"
- Ejercicio 7: "Metodología Propuesta"

Se considera que todos los casos son basados en información proveniente de algunos proyectos contemporáneos y minas en explotación, y no representa alguna mina en particular. Además, todos los caso de estudio presentan supuestos asumidos para desarrollar los experimentos y simulaciones.

Supuestos Generales

Los supuestos más importantes se presentan a continuación.

- El método de explotación modelado es un Panel Caving con hundimiento convencional.
- Se asume que existen rampas que conectan a los dos niveles y, también, cruzados que conectan a todo el nivel, por lo que está actividades no son modeladas.
- Los niveles que serán modeladas son los niveles de producción y hundimiento.
- Para el Caso Estudio 2, las actividades de preparación modeladas son la fortificación de intersección entre calles, fortificación del piso (carpetas de rodado), fortificación de los puntos de extracción y la fortificación de los pilares por medio de los muros de confinamiento.

6.1. Ejercicio 5: Planificación Tradicional

Este ejercicio corresponde a simular la planificación de la producción, teniendo en vista que la Preparación es considerada como un parámetro de entrada tal como m^2 por periodo. Este ejercicio no incluye restricciones de Preparación ni tampoco velocidades de ejecución de las actividades de preparación. Los costos de las actividades de preparación son considerados dentro de la resolución del problema.

6.2. Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional

Este ejercicio corresponde a integrar la preparación minera al ejercicio 5. La pregunta que se busca responder es: ¿Es posible igualar o mejorar la producción del ejercicio 5 incluyendo las restricciones de Preparación? Para esto, en primera instancia se busca mejorar la producción y, si no se consigue, se busca saber cuánta producción es posible conseguir. Se entiende como restricciones de Preparación a la cantidad de actividades de Desarrollo y Fortificación que se pueden realizar por año. Se incluyen las velocidades de ejecución de las actividades de preparación (*Max_rate* de ActPrep).

6.3. Ejercicio 7: Metodología Propuesta

La Metodología Propuesta incluye todas las actividades de producción y preparación, más la restricción de capacidad de producción y preparación en un único problema de agendamiento.

La Tabla 6.1 muestra un resumen de lo anterior.

Tabla 6.1: Resumen de las Restricciones de los ejercicios 5, 6, y 7.

Caso Estudio 2	Ejercicio 5: Metodología Tradicional	Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a Metodología Tradicional	Ejercicio 7: Metodología Propuesta
Restricción de Capacidad [max. producción/año]	✓	✓ ^(*)	✓
Restricción de Preparación [unid/año]	✗	✓	✓
Incorporación de área (Ejerc. 5) o Bateas(Ejerc. 6)	✓	✓	- ^(**)
Velocidad de Ejecución Actividades de Producción (Max_rate ActProd)	✓	✓	✓
Velocidad de Ejecución Actividades de Preparación (Max_rate ActPrep)	✗	✓	✓

^(*) Las restricciones de capacidad de producción por periodo son referida al ejercicio 5.

^(**) La incorporación bateas es un resultado de la Metodología Propuesta.

6.4. Estrategia Operacional de Apertura de Bateas

Para los ejercicios 5 y 6, se evalúan 3 escenarios de estrategias de aperturas de bateas; Pesimista, Normal y Optimista (ver Tabla 6.2). Estos escenarios tienen que ver con la cantidad de bateas que se incorporarán por año. Para este caso estudio, se asumió que el área de influencia de una batea es igual al área socavada (1 batea = 600 m^2).

Finalmente, los resultados son comparadas con la metodología propuesta que no requiere de una estrategia de apertura de bateas, tal como lo muestra la Tabla 6.1.

Tabla 6.2: Escenarios que definen la estrategia operacional de apertura de bateas por periodo para los casos Pesimista, Normal y Optimista.

	Periodo de Incorporación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-16	Total
Escenario	Pesimista	0	0	2	4	5	10	15	21	21	21	21	120
	Normal	0	0	4	8	12	16	21	21	21	17	0	120
	Optimista	0	2	6	12	16	21	21	21	21	0	0	120

6.5. Metodología de Trabajo para los Ejercicios 5, 6 y 7

Se estableció la siguiente manera de realizar los experimentos de los ejercicios 5 y 6. Un resumen es presentado en la Figura 6.1.

6.5.1. Metodología del Ejercicio 5

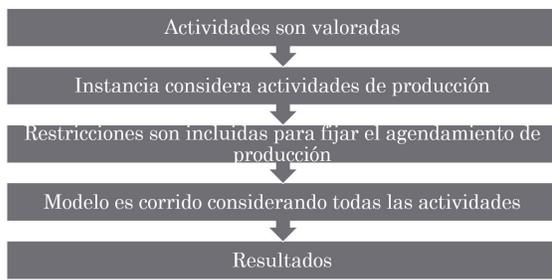
La Figura 6.1a muestra la metodología para crear la instancia de agendamiento de los experimentos del ejercicio 5. En primer lugar las actividades son valorizadas económicamente. Luego, la instancia de agendamiento se crea considerando que la actividad i de producción posee $recurso_i \neq 0$, $beneficio_i \neq 0$ y $max_rate_i \neq 0$, y la actividad j de preparación, $recurso_j = 0$, $beneficio_j \neq 0$, $max_rate_j = \infty$ (ver Tabla 6.3). Esto, para simular que la preparación estará cuando sea requerida. Luego, las restricciones son incluidas en la instancia. A saber, las restricciones son:

- La incorporación de área dada por la estrategia operacional definida en la Sección 6.4, y
- Restricciones de capacidad (máxima producción por periodo)

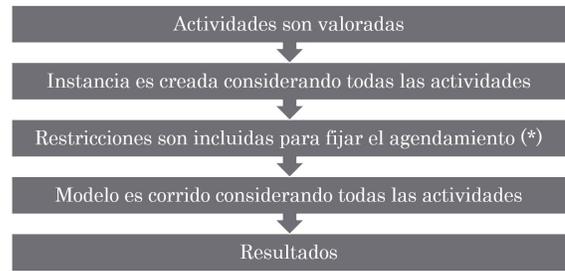
Finalmente, el modelo es corrido considerando todas las actividades y los beneficios son descontados.

6.5.2. Metodología del Ejercicio 6

La Figura 6.1b muestra la metodología para crear la instancia de agendamiento de los experimentos del ejercicio 6. En primer lugar las actividades son valorizadas económicamente. A diferencia del ejercicio 5, la instancia de agendamiento considera a la actividad i y j de producción y preparación, respectivamente, con $recurso_i \neq 0$, $beneficio_i \neq 0$ y $max_rate_i \neq 0$, y $recurso_j \neq 0$, $beneficio_j \neq 0$ y $max_rate_j \neq 0$ (ver Tabla 6.3). Las restricciones de "incorporación de área" según la estrategia operacional de apertura de zanjas (ver sección 6.4) y la restricciones de capacidad de producción son referidas al ejercicio 5. Además, es agregada a la instancia de agendamiento las restricciones de preparación. Finalmente, el modelo es corrido considerando todas las actividades y los beneficios son descontados.



(a) Metodología de los experimentos del ejercicio 5: Planificación Tradicional.



(b) Metodología de los experimentos del ejercicio 6: Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional

Figura 6.1: Metodología para realizar los ejercicios 5 y 6. Fuente: *Elaboración Propia*.

(*) Restricciones de Producción del ejercicio 5.

Tabla 6.3: Desglose de las Actividades y Atributos imputados para los Ejercicios 5 y 6.

	Ejercicio 5: Planificación Tradicional		Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a Planificación Tradicional	
	Actividades De Producción	Actividades De Preparación	Actividades De Producción	Actividades De Preparación
Max Rate	$\neq 0$	∞	$\neq 0$	$\neq 0$
Beneficio	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Recursos	$\neq 0$	$= 0$	$\neq 0$	$\neq 0$

6.5.3. Metodología del Ejercicio 7

La Figura 6.2 muestra la metodología para crear la instancia de agendamiento del ejercicio 7. En primer lugar las actividades son valorizadas económicamente. La instancia de agendamiento considera a la actividad i y j de producción y preparación, respectivamente, con $recurso_i \neq 0$, $beneficio_i \neq 0$ y $max_rate_i \neq 0$, y $recurso_j \neq 0$, $beneficio_j \neq 0$ y $max_rate_j \neq 0$. Las restricciones de capacidad y preparación son cargadas a la instancia. Finalmente, el modelo es corrido considerando todas las actividades y los beneficios son descontados.



Figura 6.2: Metodología para realizar los ejercicios 7. *Fuente: Elaboración Propia.*

Finalmente, la Tabla 6.4 muestra todos los experimentos del Caso Estudio 2, y su correspondiente nomenclatura.

Tabla 6.4: Nomenclatura de todos los Experimentos del Caso Estudio 2.

Nomenclatura Experimentos	Ejercicio 5: Metodología Tradicional	Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a Metodología Tradicional	Ejercicio 7: Metodología Propuesta
Pesimista	5.1	6.1 ^(*) y 6.1 ^(**)	7
Normal	5.2	6.2 ^(*) y 6.2 ^(**)	
Optimista	5.3	6.3 ^(*) y 6.3 ^(**)	

(*) Restricción de Capacidad de Producción \geq al Ejercicio 5.

(**) Restricción de Capacidad de Producción \leq al Ejercicio 5.

6.6. Parámetros de Entrada para Planificación de Producción

6.6.1. Modelo de Bloques

Un modelo de bloques del almacén del Laboratorio de Planificación Minera Delphos es utilizado. Las características son las siguientes:

Tabla 6.5: Características Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 2

Parámetro	Mínima	Máxima	Unidades
Coordenada X	1470	1750	-
Coordenada Y	1335	1560	-
Coordenada Z	1220	1460	-
Tamaño Modelo	5,040		unidades
Tamaño Bloque X	20		m
Tamaño Bloque Y	15		m
Tamaño Bloque Z	12		m
Metales presentes	Cu		-
Ley Media Cu (%)	0.556		%
Tonelaje	18.36		Millones de Ton

La visualización del modelo de bloques en una vista isométrica es mostrada en la Figura 6.3.

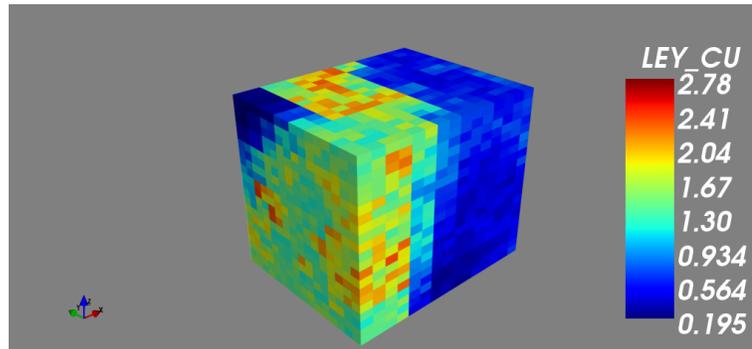


Figura 6.3: Modelo de Bloque usado para el Caso Estudio 2. *Software: DOPPLER*

Como consecuencia del caso estudio 5.3, este ejercicio adopta una discretización que permita disminuir los tiempo de resolución. El modelo de bloques es discretizado de acuerdo a lo siguiente:

- $G7_0 + 7 \cdot 3$: El modelo de bloques final contó con 7 niveles (de 21). No se consideraron niveles del modelo original y los bloques se agruparon de a 7, cada uno con 3 bloques.

6.6.2. Criterios Económicos

Para el caso de la etapa de Producción, los criterios económicos usados corresponden a los mismos usados en la sección 5.1.2.

6.6.3. Criterios de Planificación

El horizonte de tiempo de planificación es 16 años y una producción en régimen de 12,000 toneladas por día es estimada según la formulación de Ovalle (2012) (ver Ecuación 5.1). La velocidad de extracción de la columna se muestran en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Perfil de Velocidad de Extracción según la Altura de Columna

Velocidad según Altura			Estado de la Columna
Velocidad	Altura Columna		-
$ton/m^2 - dia$	$min[m]$	$max[m]$	-
0.20	0	36	área Crítica
0.25	0	36	área No Critica
0.35	36	72	En Quiebre
0.45	72	108	En Quiebre
0.55	108	144	En Quiebre
0.70	144	252	Liberada

Se considera un radio hidráulico de 28 [m], de forma cuadrada, supuesto asumido para atender las condiciones de hundibilidad.

Respecto al Punto de Inicio del Caving, la Figura 6.4 muestra el footprint del piso de hundimiento. El inicio del hundimiento ha sido elegido desde la coordenada E1470, N1560, avanzando desde noroeste a sureste.

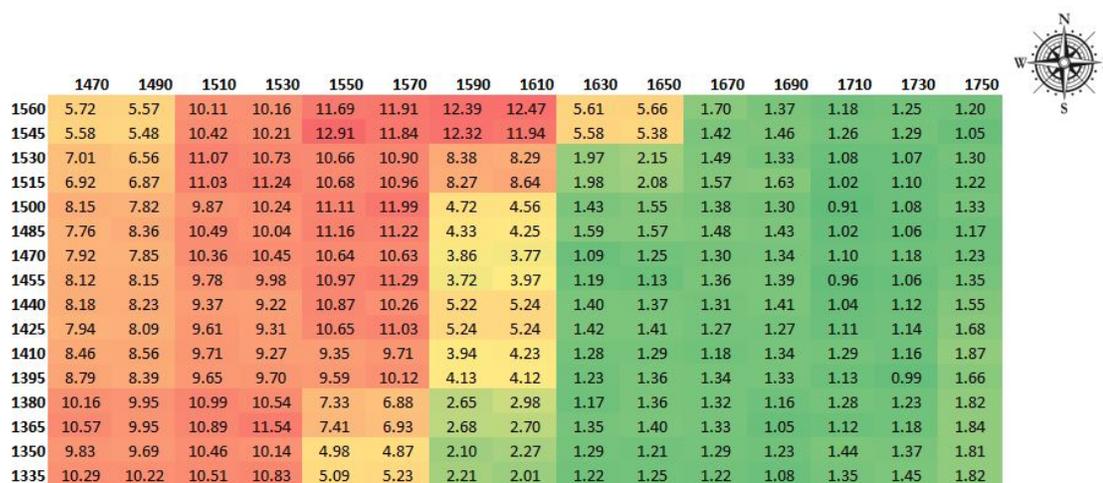


Figura 6.4: Beneficio por Columna del Footprint (millones de dólares). Fuente: Elaboración Propia.

6.6.4. Consideraciones Geométricas y Geomecánicas

Las consideraciones geométricas y geomecánicas son indiferentes para los casos estudios porque son condiciones del método de explotación, por lo que para este caso y los otros no

varía (ver Figura 4.5).

6.7. Parámetros de Entrada - Planificación de Preparación Minera

6.7.1. Malla de Extracción, Layout de la Mina y Diseño Minero

La malla escogida para el Nivel de Producción es del tipo El Teniente con dimensiones 15 m x 20 m (ver Figura 6.5).

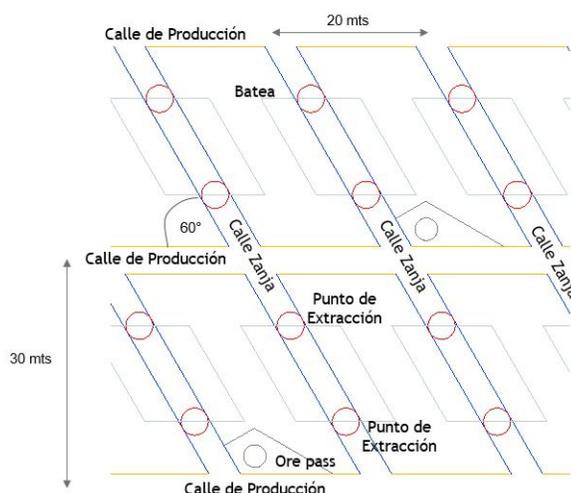


Figura 6.5: Malla de Extracción Nivel de Producción. *Fuente: Elaboración Propia*

El área del footprint es de 240 m x 300 m. Respecto al diseño minero, la elaboración del nivel de producción (NP) y nivel de hundimiento (UCL) permiten dimensionar las excavaciones subterráneas de ambos niveles y las actividades de reforzamiento en el NP lo cual se aprecia en las Tablas 6.7 y 6.8.

Tabla 6.7: Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Producción incluidas en el Modelamiento

Actividades del Nivel de Producción	Cantidad
Desarrollos Horizontales	3,960 m
Desarrollos Verticales	810 m
Fortificación Intersección Calle / Zanja	154 unidades
Construcción Muros de Confinamiento	2,440 m
Construcción Carpeta de Rodado	3,260 m
Puntos de Extracción	240 unidades
Excavación y Fortificación de Puntos de Vaciados	27 unidades

Tabla 6.8: Actividades de Preparación y Desarrollo en el Nivel de Hundimiento incluidas en el Modelamiento

Actividades del Nivel de Hundimiento	unidad
Desarrollos Horizontales	4,687 m

6.7.2. Criterios de Desarrollo y Preparación

Los rendimientos y costos de las Actividades de Desarrollo y Preparación son mostrados en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Criterios de Rendimientos en Preparación y Desarrollo

Nivel	Actividad	Rendimiento		Costo unitario	
NP	Calle de Producción	120.00	m/mes	-3,750	US\$/m
NP	Calle Zanja	120.00	m/día	-3,750	US\$/m
NP	Punto Vaciado	300.00	día/un	-500,000	US\$/un
NP	Fortificación Intersección	9.00	unidades/mes	-30,000	US\$/un
NP	Fortificación Pilares con Muros de Confinamiento	3.00	unidades/mes	-30,000	US\$/un
NP	Construcción de Puntos de Extracción	5.50	unidades/mes	-100,000	US\$/un
NP	Carpeta de Rodado	120.00	mts/mes	-3,500	US\$/m
NP	Construcción Batea	2,000	mts bar./mes	-101,250	US\$/un
UCL	Galería de Hundimiento	100.00	m/mes	-2,900	US\$/m

6.7.3. Secuencia de Apertura de Puntos

La estrategia de apertura de bateas de extracción es definida de acuerdo a la Figura 6.6, en la cual se aprecia la secuencia (números).

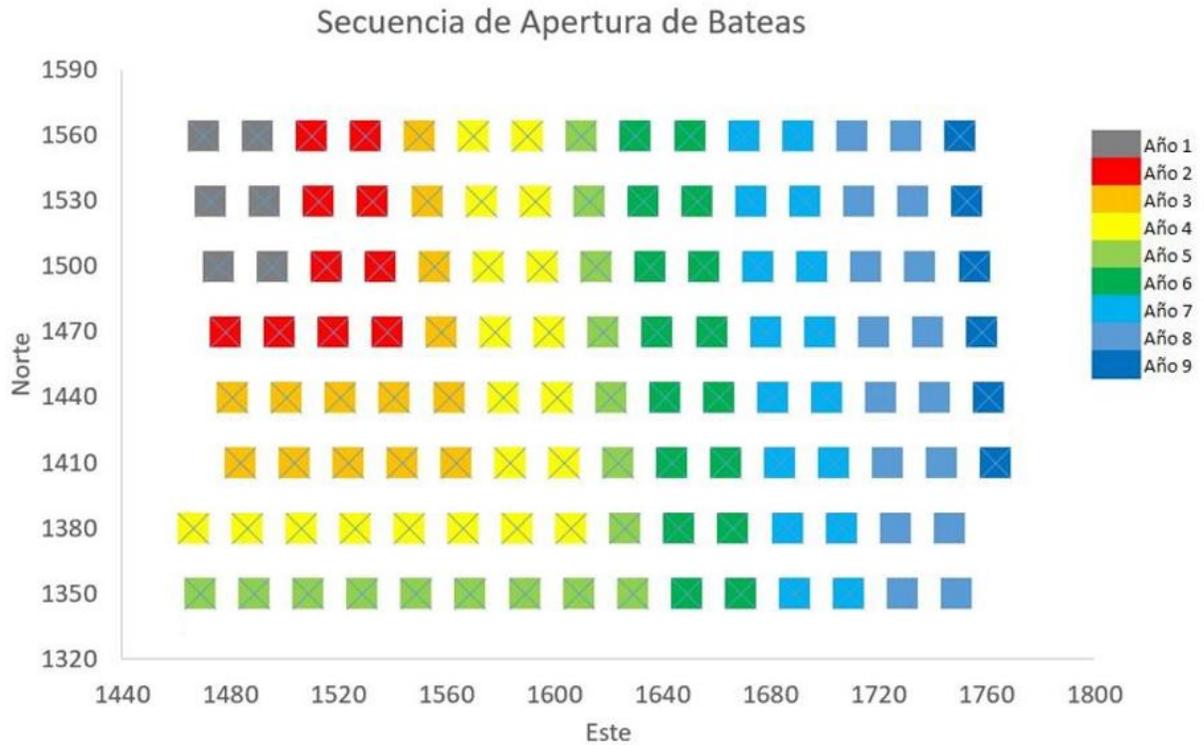


Figura 6.6: Estrategia de Apertura de Bateas y Secuenciamiento. *Fuente: Elaboración Propia*

6.8. Resultados Ejercicio 5: Planificación Tradicional

La Figura 6.7 muestra los planes de producción para el escenario Pesimista, Normal y Optimista realizados según la Planificación Tradicional. Se aprecia que la temprana apertura de bateas permite adelantar el comienzo del Ramp Up y mejorar la producción. Respecto del Ramp Down, se aprecia que la producción cae conforme la estrategia (Optimista, Normal y luego Pesimista). Respecto de las leyes, los comportamientos son similares y decrecientes.

La Figura 6.8 muestra una comparación del ángulo de extracción de las 3 estrategias para los periodos 8 y 12. En ambas figuras (6.8a periodo 8 y 6.8b periodo 12) se aprecia que los agendamientos de los bloques son distintos entre sí, pero todos mantienen un ángulo de extracción entre un rango de 35° y 45° .

Planificación Tradicional Estrategia Pesimista (5.1), Normal (5.2) y Optimista (5.3)

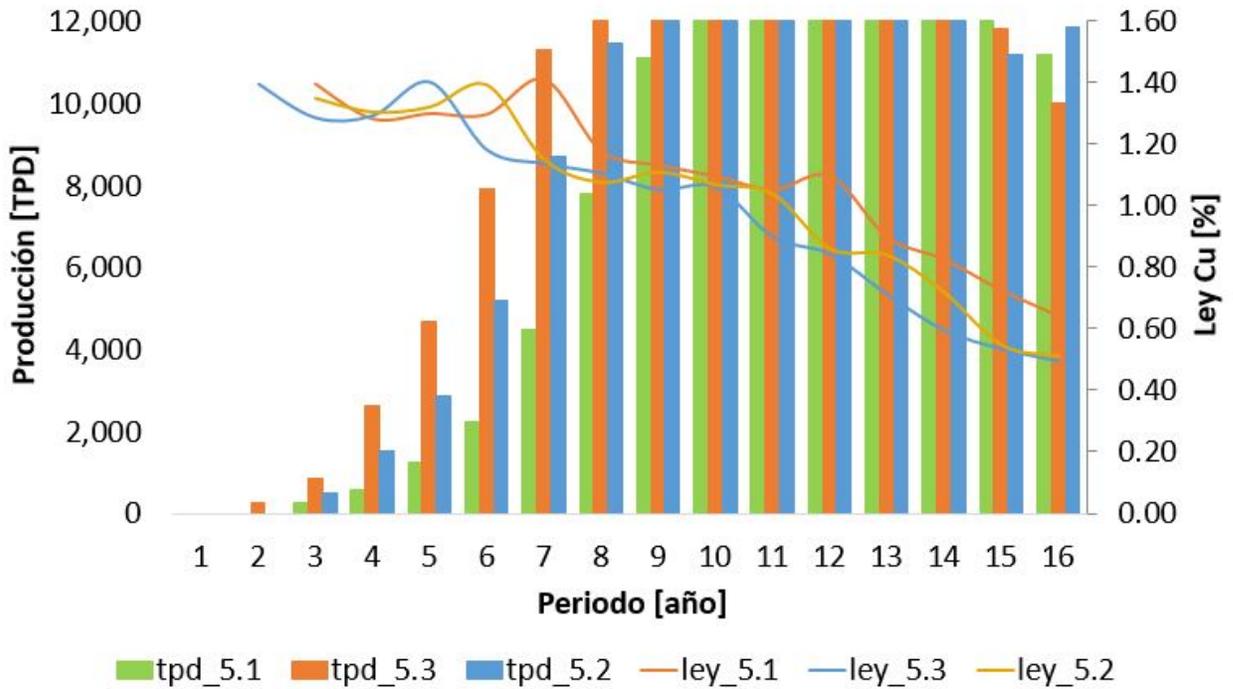


Figura 6.7: Comparación de Planes de Producción Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional (Ejercicio 5)

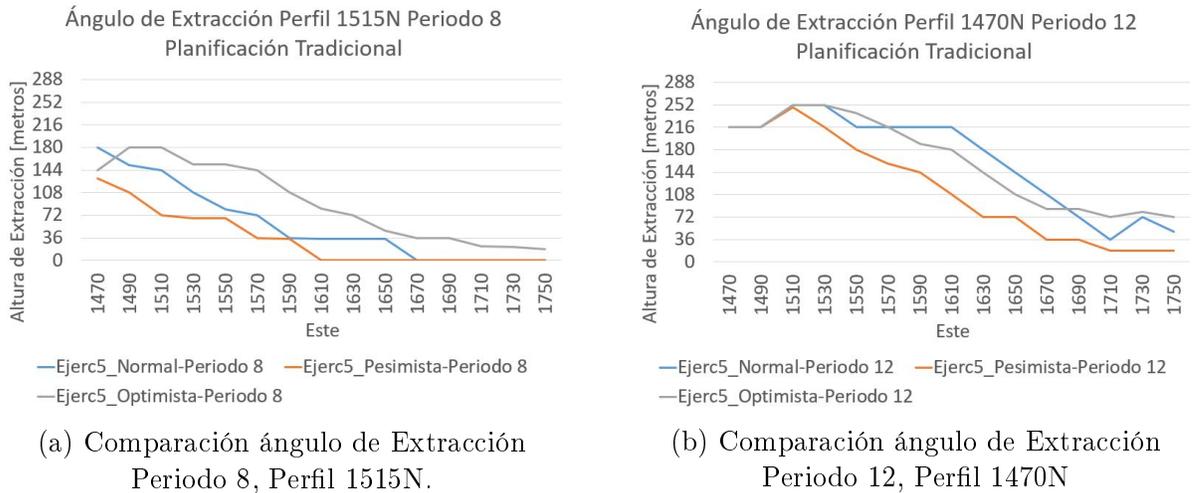


Figura 6.8: Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 para las 3 Estrategias según Planificación Tradicional

La Tabla 6.10 muestra el Valor Presente Neto (VPN) conseguido por las tres estrategias. Como es evidente, la estrategia optimista logra mejores resultados globales respecto al Valor

Presente Neto (VPN) debido a la temprana apertura de bateas. En las 3 estrategias se prepara todo el sector ($72,000 m^2$), por lo tanto la diferencia de valor en las actividades de preparación tienen que ver con el momento en el cual se ejecutan y no con la cantidad (ver Figura 6.9), es decir, a medida que la preparación minera se adelanta aumenta el costo de la misma. Esto también tiene un efecto positivo en la captura de valor de las actividades de producción puesto que aumenta el valor de las actividades de producción.

Tabla 6.10: Valor Presente Neto de los Planes de Producción Metodología Tradicional

Valor Presente	Valor Presente Actividades de Producción	Valor Presente Actividades de Preparación	Valor Presente Neto (VPN)
Experimento	Millones de dolares	Millones de dolares	Millones de dolares
Pesimista	489,31	-64,08	425,23
Normal	531,35	-68,73	462,62
Optimista	547,89	-70,33	477,57

Por otro lado, la Figura 6.9 muestra los costos de preparación para las 3 estrategias. En todos los casos, se aprecia que la preparación no comienza en el primer año puesto que no existen restricciones de preparación que limiten la construcción, por lo que la herramienta matemática intenta retrasar lo más posible las actividades de preparación para maximizar el VPN. Además, los costos son irregular y erráticos en cada periodo por la misma situación, es decir, agenda a medida que requiere las actividades de preparación porque no tiene restricciones de recursos de las mismas.

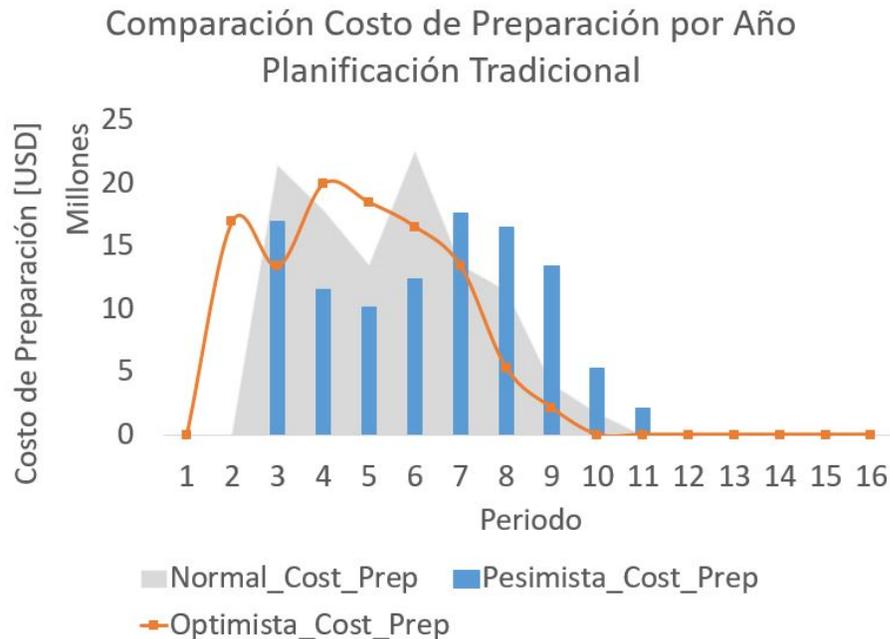


Figura 6.9: Comparación de Costos de Preparación por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional

6.9. Resultados Ejercicio 6: Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional

Los resultados de esta sección son mostrados en 2 partes:

- Resultados del ejercicio 6 (según el agendamiento de producción y preparación, más un análisis de los ingresos, costos y valor de los agendamientos).
- Comparación de los resultados ejercicio 5 y 6; con el ejercicio 5.

6.9.1. Agendamiento de Producción

Una comparación entre todos los planes conseguidos por la Incorporación de Preparación a la Planificación Tradicional es mostrada en la Figura 6.10.

Se observa que se mantiene el mismo comportamiento que en la Metodología Tradicional (ver Figura 6.7), es decir, se consigue mayor producción en el periodo de Ramp Up con la Estrategia Optimista. Respecto a las leyes, no existe diferencias significativas entre las estrategias y su comportamiento es similar y decreciente. Esas diferencias son justificadas debido a las diferencias de agendamientos de los bloques.

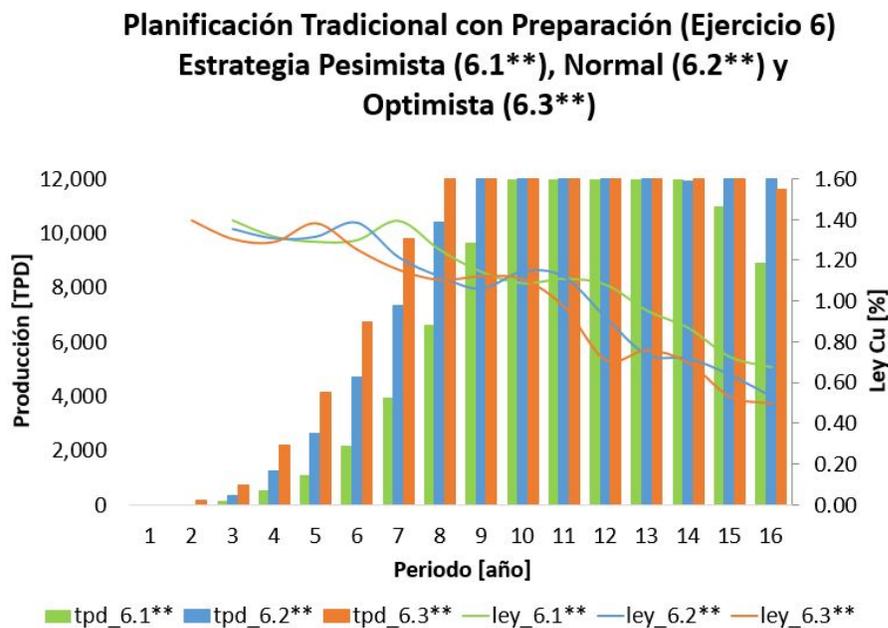


Figura 6.10: Comparación de Planes de Producción Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Incorporación de Preparación a Planificación Tradicional (Ejercicio 6)

Respecto al ángulo de extracción la Figura 6.11 muestra una comparación entre las 3 estrategias (Pesimista, Normal y Optimista). En ambas figuras (6.11a y 6.11b) se aprecia que los agendamientos de los bloques son distintos. Las estrategia Optimista continua presentando

envolventes de extracción mayores debido a que hay una temprana apertura de bateas para la extracción de las columnas, situación que se mantuvo también en el ejercicio 5. En todos los experimentos el ángulo de extracción se mantuvo en un rango de entre 35° y 45° lo cual se aprecia en la figura 6.11.

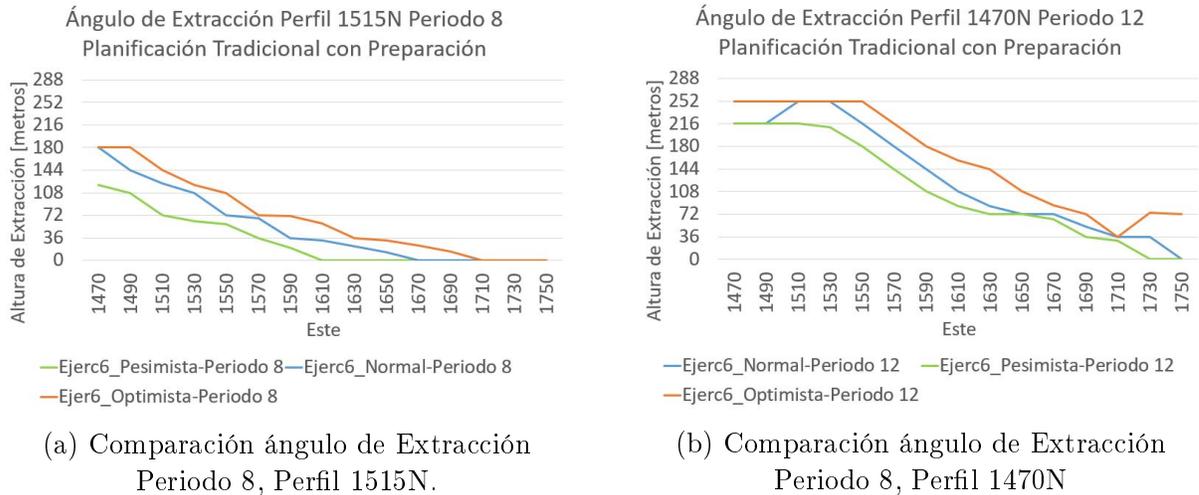


Figura 6.11: Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 para las 3 Estrategias según Planificación Tradicional con Preparación

6.9.2. Agendamiento de Preparación

A diferencia del ejercicio 5, en este ejercicio sí existe un agendamiento de las actividades de Preparación Minera y la Figura 6.12 muestra el agendamiento del desarrollo horizontal de los niveles de hundimiento (NP) y preparación (UCL).

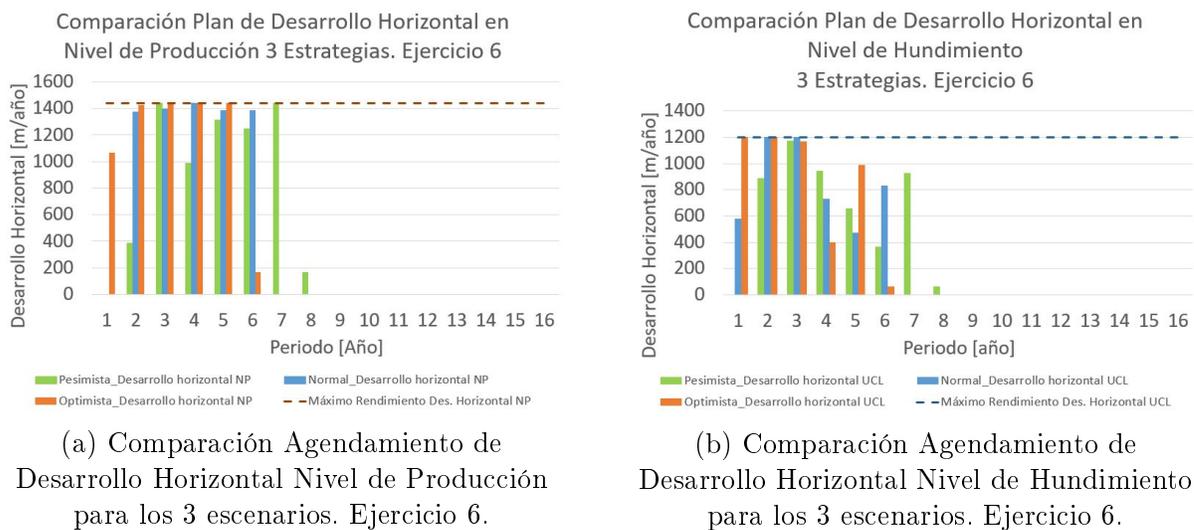


Figura 6.12: Comparación Agendamiento de Desarrollo Horizontal Nivel de Producción y Hundimiento para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

En el caso del Nivel de Producción (ver Figura 6.12a), el resultado del agendamiento de estas actividades es regular, teniendo un inicio, un régimen y una caída al final. Esta situación se debe al modelamiento de las actividades; son definidas con recursos de 20 metros lineales y con restricciones del tipo "Y", lo que condujo a resultados más depurado producto de la mayor resolución con la que se modeló.

La situación opuesta se presenta en el nivel de hundimiento (ver Figura 6.12b). El resultado del agendamiento para estas actividades es irregular debido a que cada actividad se consideró de 160 metros y con precedencias tipo "Y", esto trajo que para comenzar el inicio de otras actividades era necesario terminar con una o varias actividades de 160 mts. en el UCL, lo que conducía a realizar exceso de desarrollo en el nivel de hundimiento.

Esta situación afectó la regularidad del agendamiento en este nivel productivo, sin embargo, a medida que aumenta la resolución del problema (mayor número de actividades), se presentan otros inconvenientes como el tiempo de resolución del problema, por lo que se optó por esta mantener esta situación así.

De acuerdo al modelo planteado, la Figura 6.12 muestra que los desarrollos horizontales limitaron el problema puesto que se utilizaron todos los recursos en los primeros años. Otras variables que limitaron al modelo fueron la construcción de los sistemas de traspaso, los cuales se muestran en la Figura 6.13.

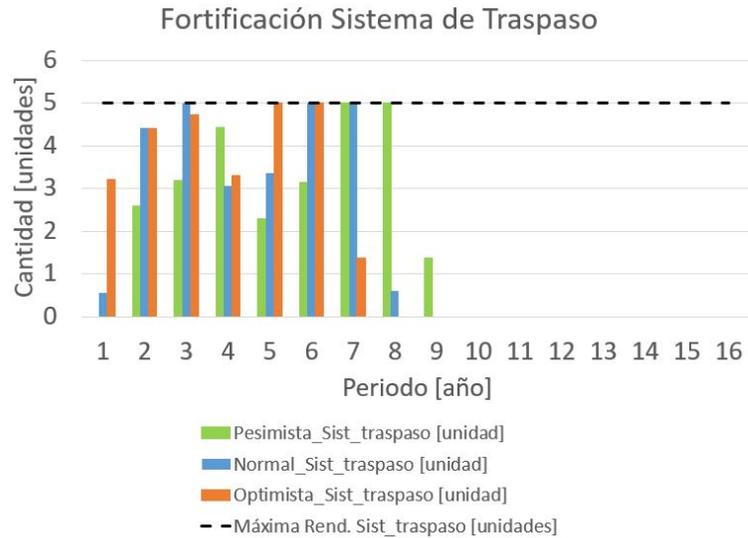
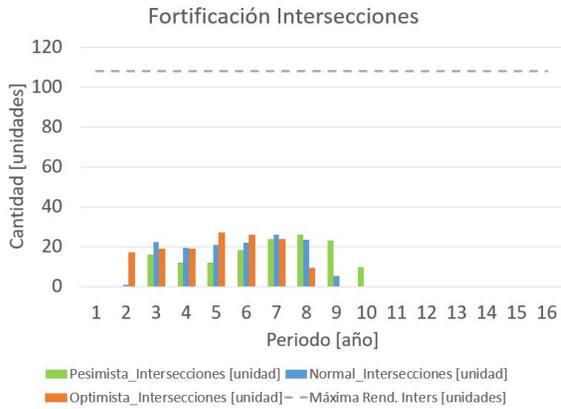
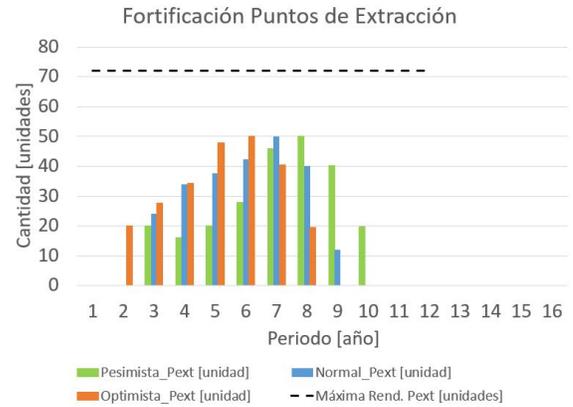


Figura 6.13: Comparación Agendamiento de Sistema de Traspaso para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

Respecto a las otras actividades de Preparación, se aprecia que no son limitantes y se pueden ver en las Figuras 6.14a, 6.14b y 6.15a y 6.15b.

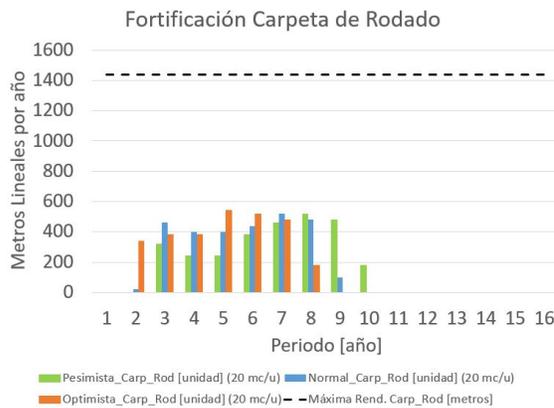


(a) Comparación Agendamiento de Fortificación de Intersección entre Calle y Galería Zanja para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

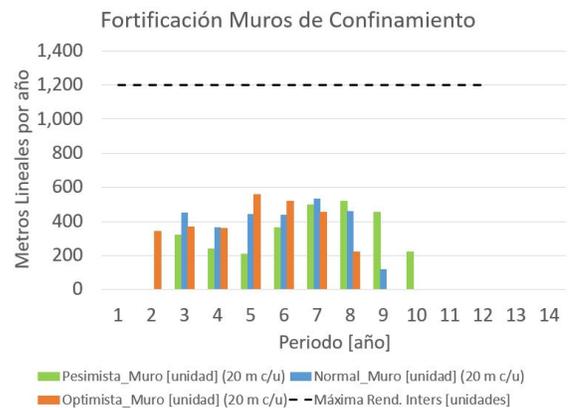


(b) Comparación Agendamiento de Puntos de Extracción para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

Figura 6.14: Comparación Agendamiento de Fortificación de Intersección de Calle y Galería Zanja y Fortificación de Puntos de Extracción para los 3 escenarios. Ejercicio 6.



(a) Comparación Agendamiento de Construcción Carpeta de Rodad para los 3 escenarios. Ejercicio 6.



(b) Comparación Agendamiento de Construcción Muros de Confinamientos para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

Figura 6.15: Comparación Agendamiento de Construcción de Carpeta de Rodado y Muros de Confinamiento para los 3 escenarios. Ejercicio 6.

6.9.3. Ingresos, Costos y Valor Presente Neto del Agendamiento

La Figura 6.16 muestra los Ingresos por Producción para las 3 estrategias (Pesimista, Normal y Optimista) de acuerdo a la Planificación Tradicional con Preparación.

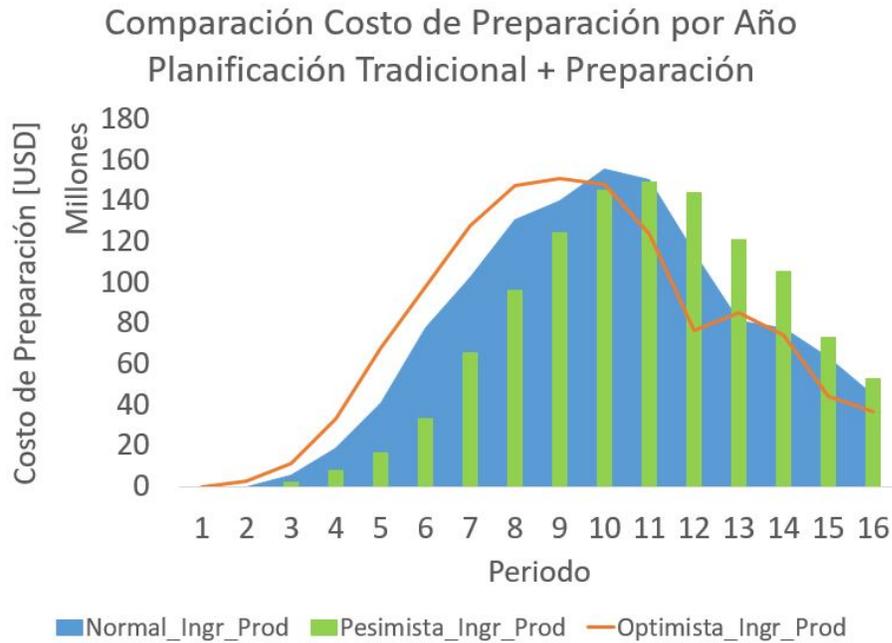


Figura 6.16: Comparación de Ingreso de Producción por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación.

De la Figura 6.16, se aprecia que existe una caída de ingreso en el periodo 12 para el caso Optimista (línea de color roja). Esto se debe a la zona de bajo de mineral que se encuentra agendando en ese periodo lo que se traduce en una baja de Cu Fino. En los otros casos, esta situación es compensada o mitigada por sectores de alta ley aún no explotados.

Por otro lado, la Figura 6.17 muestra los costos de preparación para las 3 estrategias (Pesimista, Normal y Optimista) de acuerdo a la Planificación Tradicional con Preparación. A diferencia del ejercicio 5 (ver 6.9), en todos los casos se aprecia que la preparación comienza en el primer año puesto que ahora sí existen restricciones de preparación que limiten la construcción de las actividades de preparación, lo que se ve refleja en los costos. éstos, tiene un comportamiento sin muchas irregularidades y las pequeñas desviaciones (años 5, 6 y 7, para estrategias Optimista, Normal y Pesimista, respectivamente), se justifican debido a los desequilibrios del agendamientos del desarrollo horizontal, principalmente en el nivel de hundimiento. Para mayor información, ver Figura 6.12b.

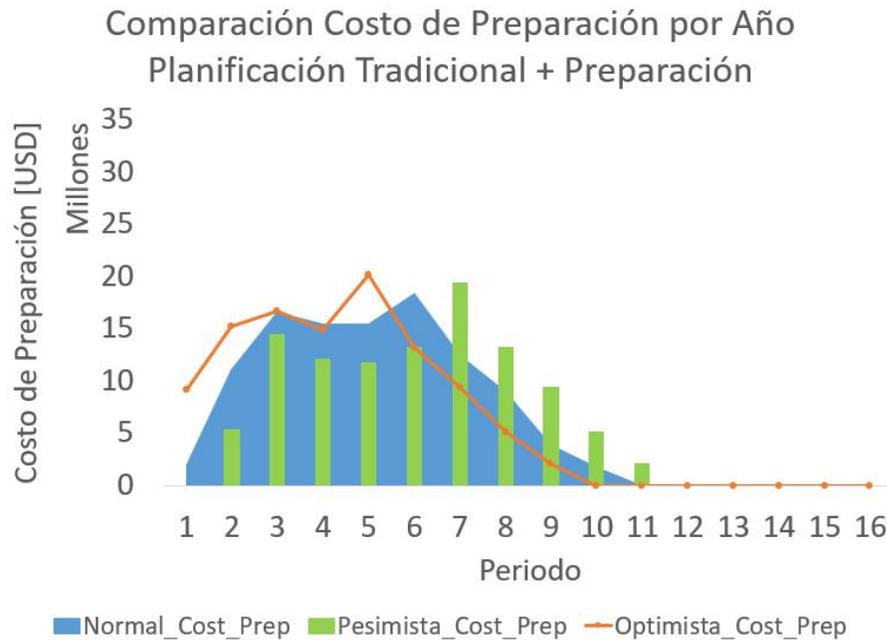


Figura 6.17: Comparación de Costos de Preparación por Año en Estrategia Optimista, Normal y Pesimista según la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación (ejercicio 6).

Finalmente, la Tabla 6.11 muestra el Valor Presente de las actividades de producción y preparación, y el VPN para el agendamiento de todas las estrategias.

Tabla 6.11: Valor Presente Neto de los Planes de Producción. Planificación Tradicional con Preparación

	Valor Presente Actividades de Producción	Valor Presente Actividades de Preparación	Valor Presente Neto (VPN)
Experimento	Millones de dolares	Millones de dolares	Millones de dolares
Pesimista	477,43	-66,92	410,51
Normal	517,21	-71,78	445,43
Optimista	532,03	-72,93	459,10

6.9.4. Comparación Ejercicio 5 y 6

Estos experimentos (del ejercicio 6) buscan responder a la pregunta si es posible cumplir con la producción (del ejercicio 5) incorporándoles la Preparación Minera al agendamiento.

De acuerdo a la tabla 6.4, todos los experimentos que intentaron igual o superar el plan de producción del ejercicio 5, a saber, los experimentos 6.1*, 6.2* y 6.3*, arrojaron que en ningún caso es posible superar la producción en el Ramp Up. En régimen y Ramp Down es posible conseguir resultados iguales o mayores. De lo anterior, se concluye que no es posible superar la producción cuando se incorpora la Preparación Minera. Esto significa que los planes de producción son infactibles en la vida real y no es posible cumplir con esa promesa.

Para resolver esta situación, se buscó determinar cuál es el plan de producción que se puede alcanzar con tales restricciones, por lo que se crearon los experimentos 6.1**, 6.2** y 6.3**. Las Figuras 6.18, 6.19 y 6.20 muestran la comparación entre planes de producción conseguido por la Planificación Tradicional y con Incorporación de Preparación para los casos Pesimista, Normal y Optimista, respectivamente.

En todas las Figuras (6.18, 6.19 y 6.20) se aprecia que en el periodo de Ramp Up la situación presenta mayores diferencias, evidenciando lo expuesto previamente, es decir, las restricciones de preparación limitan la producción en el periodo de Ramp Up impidiendo cumplir con la producción.

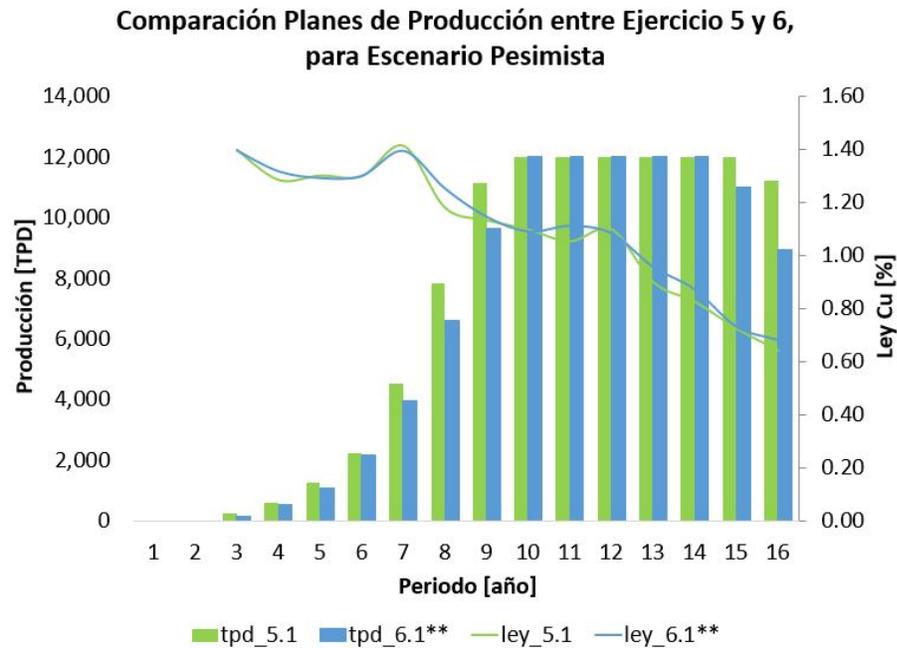


Figura 6.18: Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, experimento.

En la Figura 6.18 se muestra la comparación de la estrategia Pesimista, donde se aprecia que la producción del ejercicio 5 es mayor en el periodo de Ramp Up y Ramp Down que el ejercicio 6, pero esta situación no es posible conseguirla debido a la ausencia de las restricciones de preparación. Cuando las restricciones de preparación son consideradas, el plan de producción consigue resultados menores en términos de producción. Respecto de las leyes, están manteniendo un comportamiento similar y no representan diferencias significativas.

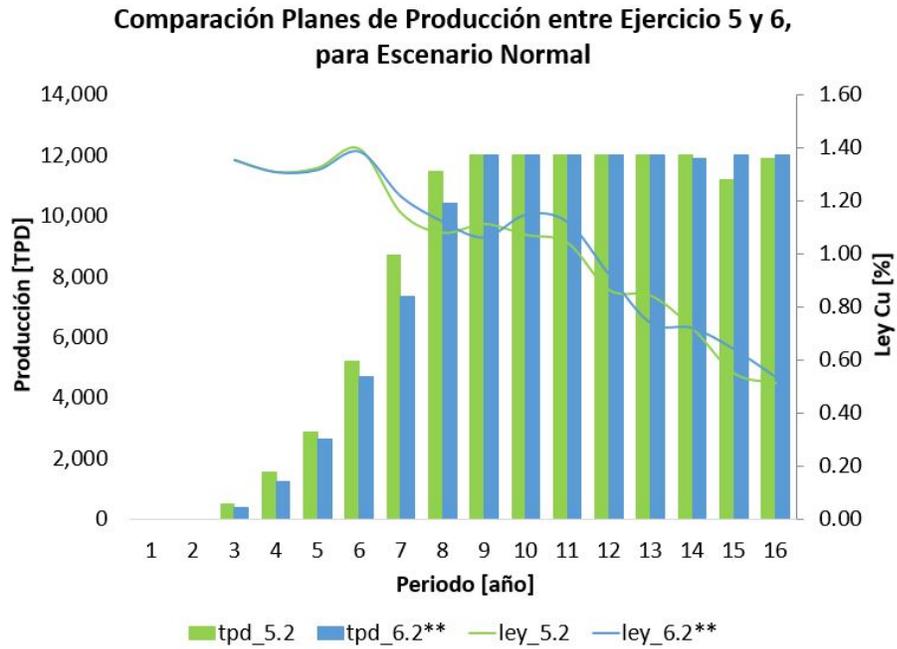


Figura 6.19: Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, experimento.

La Figura 6.20 muestra la comparación de la estrategia Optimista, y también se aprecia que el ejercicio 6 no se consigue alcanzar la producción en el periodo de Ramp Up, pero se mitiga en el Ramp Down. Esta última situación se ve con mayor intensidad en esta estrategia y en la pesimista (ver figura 6.20 y 6.18).

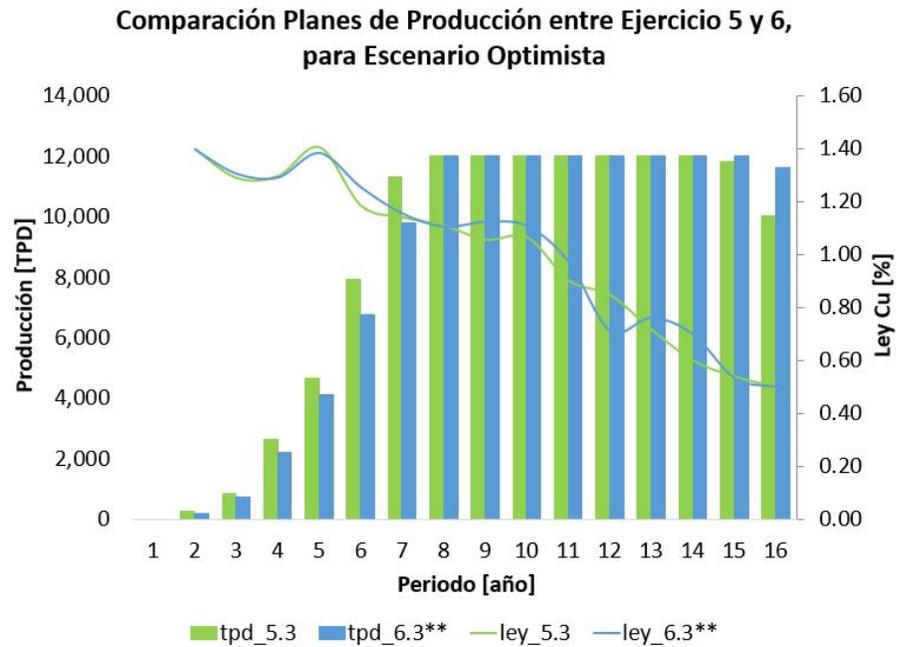


Figura 6.20: Comparación entre Plan de Producción ejercicio 5 y 6, Estrategia Optimista.

Por otro lado, la comparación del VPN entre la Metodología Tradicional y con Preparación

es mostrada en la Figura 6.21, donde se aprecia que en todos los casos, la Incorporación de Preparación disminuye el valor prometido respecto a la Metodología Tradicional.

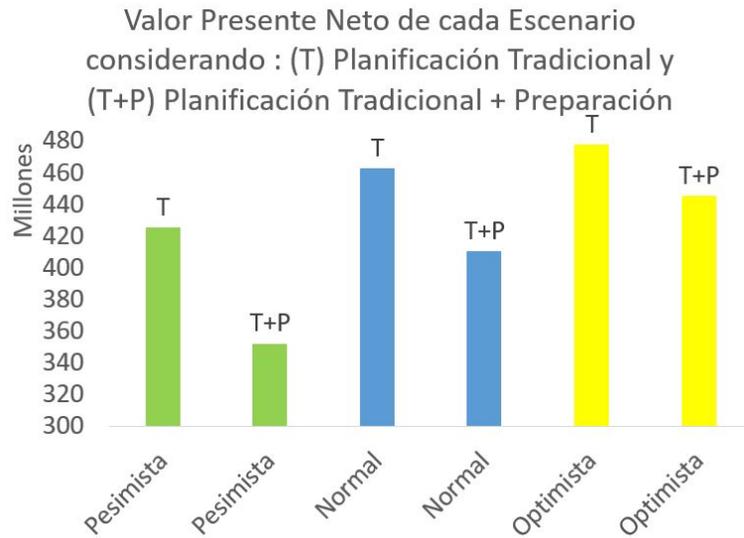


Figura 6.21: Comparación Valor Presente Neto de los ejercicios 5 y 6 para todos los Escenarios/Estrategia.

6.10. Resultados Ejercicio 7: Metodología Propuesta

Los resultados de esta sección son mostrados en 2 partes:

- Resultados de la metodología propuesta (según el agendamiento de producción y preparación, más ingresos y costos por año, y el valor de agendamiento)
- Comparación de los resultados anteriores con los ejercicios 5 y 6.

6.10.1. Agendamiento de Producción

La Figura 6.22 muestra el plan de producción conseguido por la metodología propuesta. El plan presenta un comportamiento regular ascendente en el Ramp Up de 6 años, un Régimen constante de 8 años y Ramp Down de 1 año. Respecto a las leyes, presenta un comportamiento similares a los ejercicios anteriores y regularmente decreciente.

Metodología Propuesta. Ejercicio 7

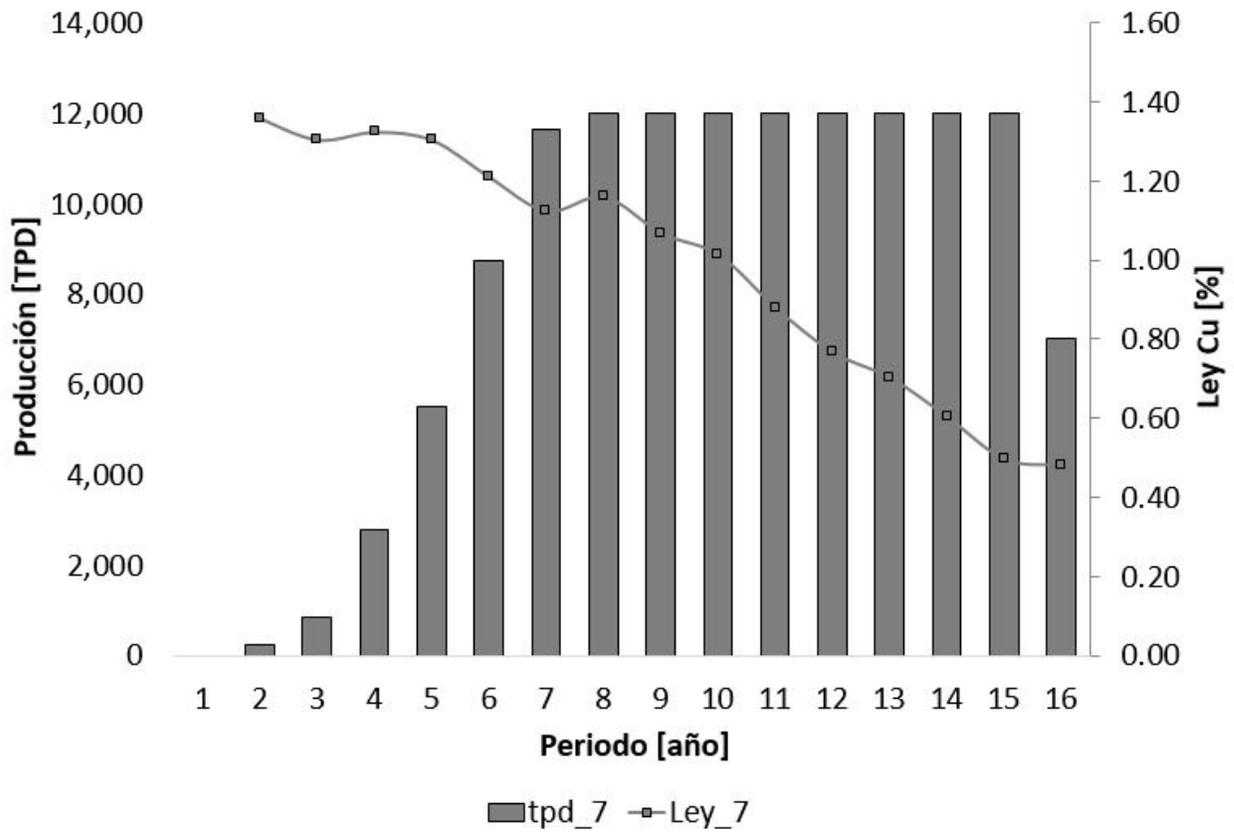


Figura 6.22: Plan de Producción Metodología Propuesta.

Las Figuras 6.23 muestran la altura de mineral extraída en los periodos 3 y 6 del agendamiento.

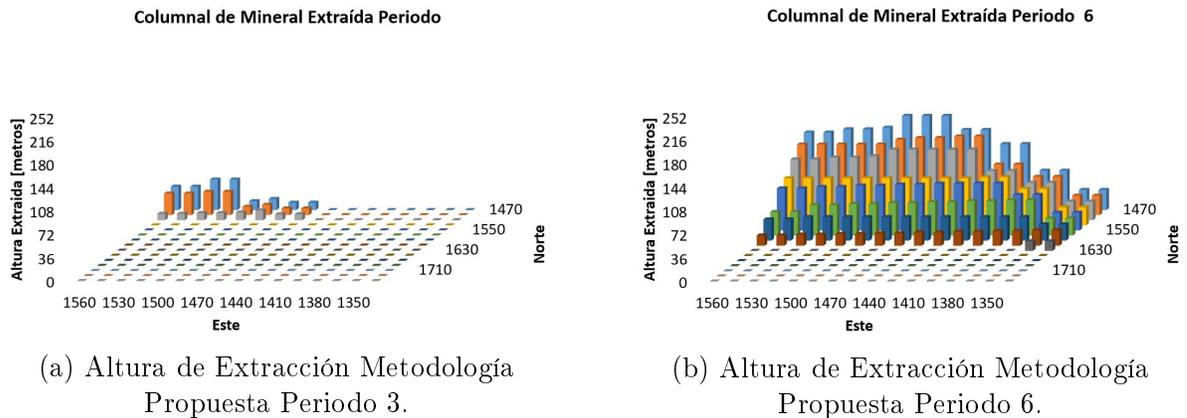
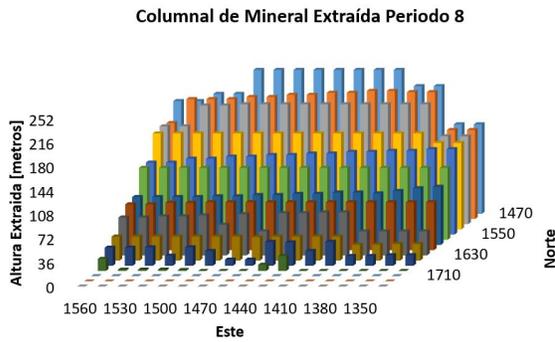
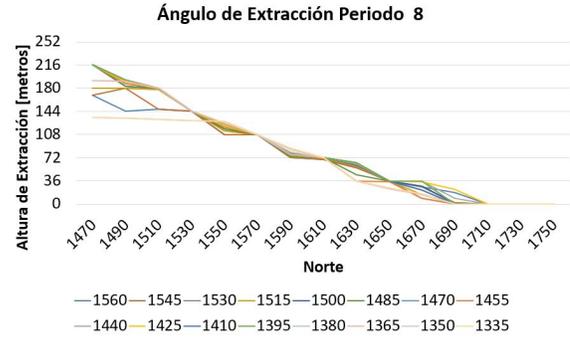


Figura 6.23: Envoltente de Extracción Metodología Propuesta Periodo 3 y 6

La 6.24 y 6.25 muestra la altura de extracción (imagen izquierda) de cada columna en el periodo 8 y 12, respectivamente, y el ángulo de extracción según cada perfil (imagen derecha).

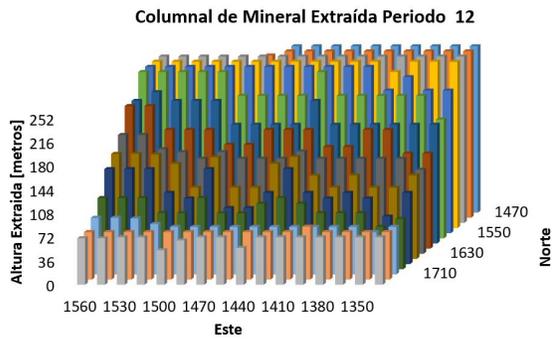


(a) Altura de Extracción Metodología Propuesta Periodo 8. Las líneas representan todos los perfiles existentes en el periodo 8.

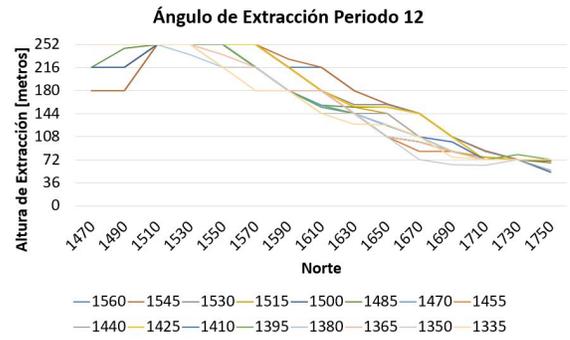


(b) ángulo de Extracción Metodología Propuesta Periodo 8. Las líneas representan todos los perfiles existentes en el periodo 12.

Figura 6.24: Envolverte de Extracción y ángulo de Extracción Metodología Propuesta Periodo 8.



(a) Altura de Extracción Metodología Propuesta Periodo 12.



(b) ángulo de Extracción Metodología Propuesta Periodo 12.

Figura 6.25: Envolverte de Extracción y ángulo de Extracción Metodología Propuesta Periodo 12.

6.10.2. Agendamiento de Preparación

Respecto a los desarrollos mineros, la Figura 6.26 muestra el agendamiento de los niveles de producción y hundimiento, donde se observa que la construcción de túneles de ambos niveles presenta un comportamiento regular y sin desviaciones que se terminan de construir en el periodo 6.

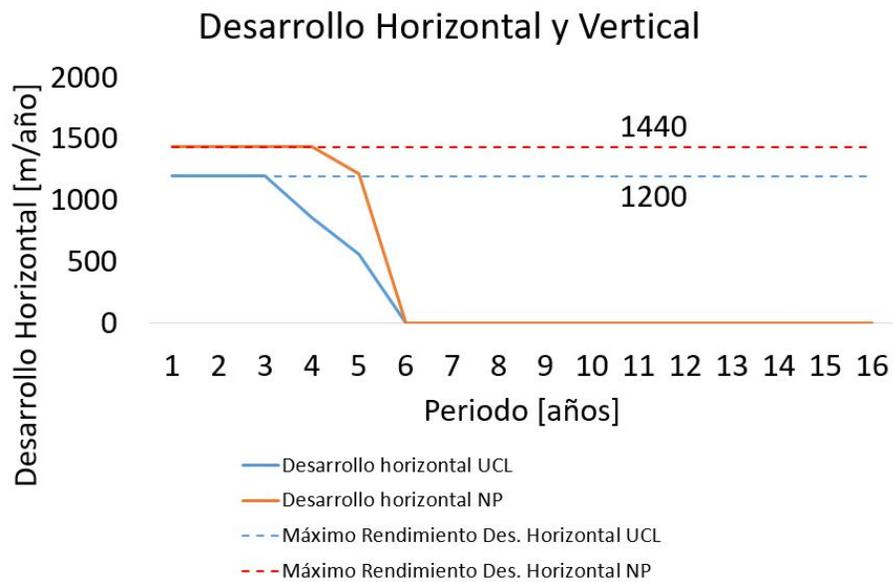


Figura 6.26: Plan de Desarrollo Horizontal en Nivel de Hundimiento y Producción Metodología Propuesta

Uno de los aspectos más importantes de la metodología se aprecia en la Figura 6.27a donde se observa la cantidad de bateas que el agendamiento determinó óptimo para resolver el problema de agendamiento. A diferencia de las estrategias Pesimista, Normal y Optimista de los ejercicios anteriores, aquí la cantidad de bateas que se incorporan es una salida del problema de agendamiento.

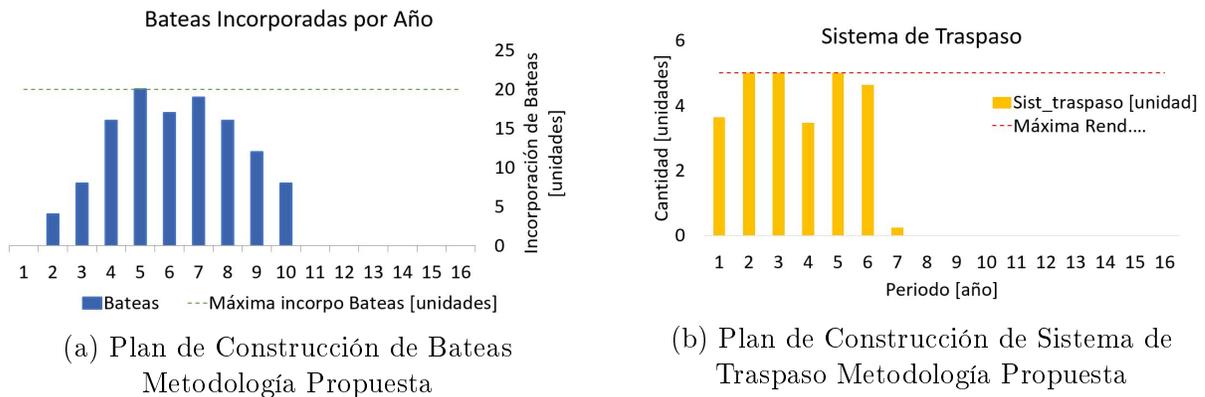
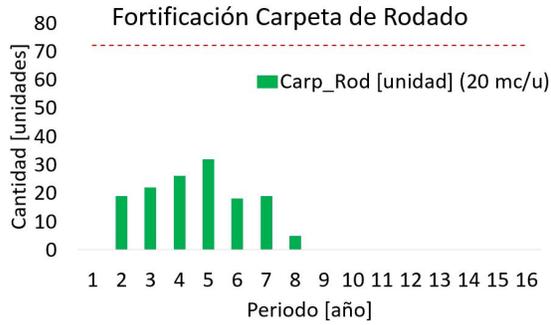


Figura 6.27: Plan de Construcción de Bateas y Sistema de Traspaso Metodología Propuesta

La Figura 6.27b muestra el agendamiento del sistema de traspaso y las Figuras 6.28 y 6.29 muestran los agendamientos de las actividades de preparación.

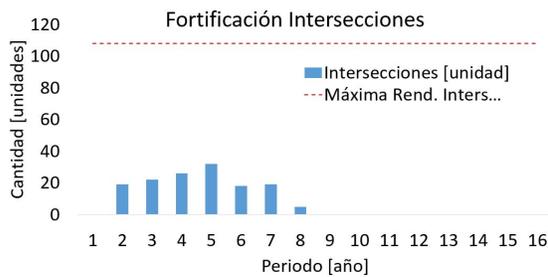


(a) Plan de Construcción de Carpeta de Rodado (1 unidad = 20 mts) Metodología Propuesta

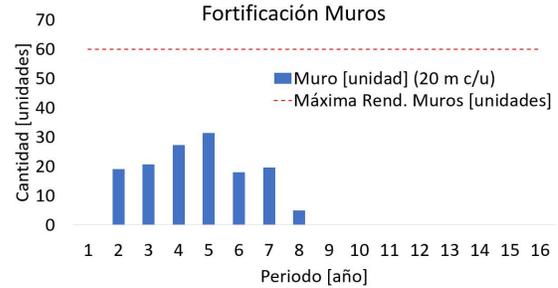


(b) Plan de Fortificación de Puntos de Extracción Metodología Propuesta

Figura 6.28: Plan de Construcción de Carpeta de Rodado y Puntos de Extracción Metodología Propuesta



(a) Plan de Construcción de Fortificación de Intersección Calle y Galería Zanja Metodología Propuesta



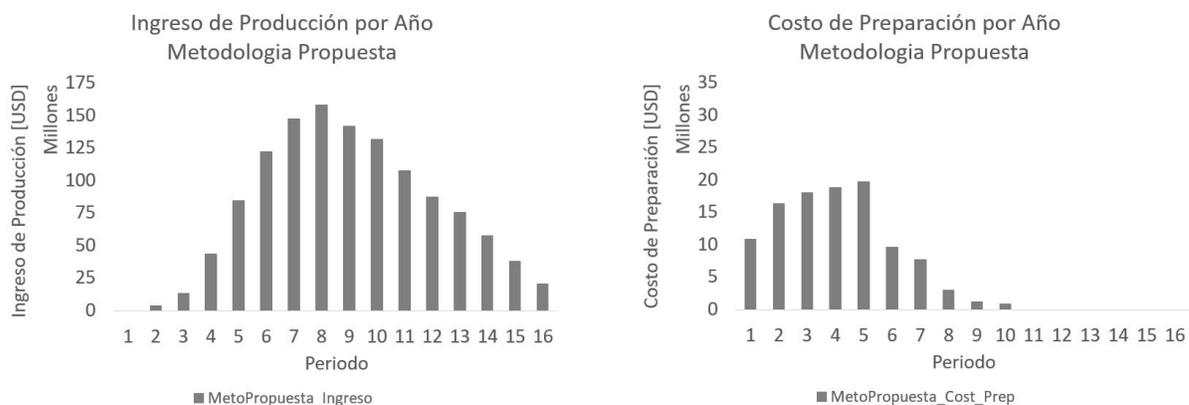
(b) Plan de Construcción de Fortificación de Muros de Confinamiento (1 unidad = 20 mts) Metodología Propuesta

Figura 6.29: Plan de Construcción de Fortificación de Intersección de Calles y Galerías Zanjas y Muros de Confinamiento Metodología Propuestas

6.10.3. Ingresos, Costos y VPN del Agendamiento

La Figura 6.30 muestra el perfil de ingresos y costos del agendamiento con la metodología. La Figura 6.30a muestra los ingresos por año que se obtuvo en la metodología propuesta cuyos valores está directamente relacionado con el Fino de Cu que se captura.

La Figura 6.30b muestra los costos incurridos por año para construir los niveles productivos. El comportamiento de los costos de preparación es creciente hasta el año 5 y luego cae hasta el año 10 de forma paulatina. En el año 10 se termina de realizar todos los niveles de producción. La inversión en costos de preparación cae de forma abrupta entre el año 5 y 6 lo cual se explica ya que se termina de construir los desarrollos horizontales en ese año (ver Figura 6.26), y desde el año 6 en adelante sólo existen tareas de fortificación.



(a) Ingreso de Producción por Año según la Metodología Propuesta

(b) Costo de Preparación por Año según la Metodología Propuesta

Figura 6.30: Ingresos y Costos de Preparación por Año según la Metodología Propuesta

La Tabla 6.12 muestra el Valor Presente de las actividades de Producción y Preparación, más el Valor Presente Neto del agendamiento, cuyo valor alcanza los 467,24 millones de dólares.

Tabla 6.12: Valor Presente Neto de los Planes de Producción con Metodología Propuesta

Metodología Propuesta	Valor Presente Actividades de Producción	Valor Presente Actividades de Preparación	Valor Presente Neto (VPN)
	Millones de dolares	Millones de dolares	Millones de dolares
Metod. Propuesta	540,86	-73,62	467,24

Finalmente, la Tabla 6.13 muestra un resumen del agendamiento de producción según la metodología propuesta.

Tabla 6.13: Agendamiento de Producción según la Metodología Propuesta

PRODUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
áREAS																
área Preparada (incorporada) [m ²]	0	2,400	4,800	9,600	12,000	10,200	11,400	9,600	7,200	4,800	0	0	0	0	0	0
área Socavada (hundida) [m ²]	0	2,400	4,800	9,600	12,000	10,200	11,400	4,500	7,500	9,300	300	0	0	0	0	0
Area Preparada Acumulada [m ²]	0	2,400	7,200	16,800	28,800	39,000	50,400	60,000	67,200	72,000	72,000	72,000	72,000	72,000	72,000	72,000
área Socavada Acumulada [m ²]	0	2,400	7,200	16,800	28,800	39,000	50,400	54,900	62,400	71,700	72,000	72,000	72,000	72,000	72,000	72,000
área Agotada [m ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	1,200	1,200	11,100	6,900	6,000	10,200	10,800	24,600
Area Agotada Acumulada [m ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	1,200	2,400	13,500	20,400	26,400	36,600	47,400	72,000
área Activa Acumulada [m ²]	0	2,400	7,200	16,800	28,800	39,000	50,400	60,000	67,200	70,800	69,600	58,500	51,600	45,600	35,400	24,600
VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN																
Velocidad de Extracción [ton/m ² - dia]		0.20	0.23	0.26	0.30	0.36	0.42	0.53	0.55	0.53	0.54	0.58	0.64	0.72	0.75	0.75
PUNTOS DE EXTRACCIÓN																
Puntos de Extracción Activos [unidad]	0	4	24	56	96	130	168	200	224	236	232	195	172	152	118	82
Calles Activas [unidad]	0	3	5	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

6.10.4. Comparación Metodología Propuesta con ejercicios 5 y 6

Las Figuras 6.31, 6.32 y 6.33 comparan el plan de producción conseguido por la metodología propuesta y las estrategias pesimista, normal y optimista de los ejercicios 5 y 6.

En el Ramp Up, se observa que el plan de producción conseguido por la metodología propuesta consigue mayor producción, incluso por sobre la estrategia optimista. Esta situación es interesante del punto de vista productivo debido a que con las estrategia usadas no era posible determinar cuál era la producción óptima.

Respecto a la producción en Régimen, se observa que es constante al igual que los otros casos y no presenta desviaciones significativas.

Respecto a las leyes , se observa el comportamiento la ley de la metodología propuesta es decreciente, parejo y sin irregulares durante todo el agendamiento, situación distinta a los resultados de las otras estrategias, donde existen sobresaltos.

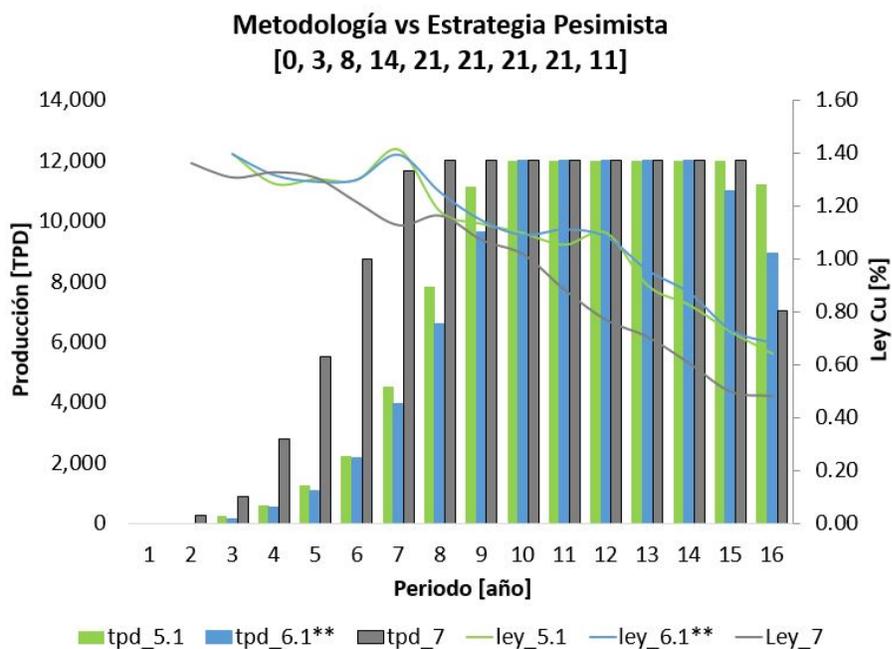


Figura 6.31: Comparación entre Plan de Producción de Metodología Propuesta y Estrategia Pesimista del Ejercicio 5 y 6

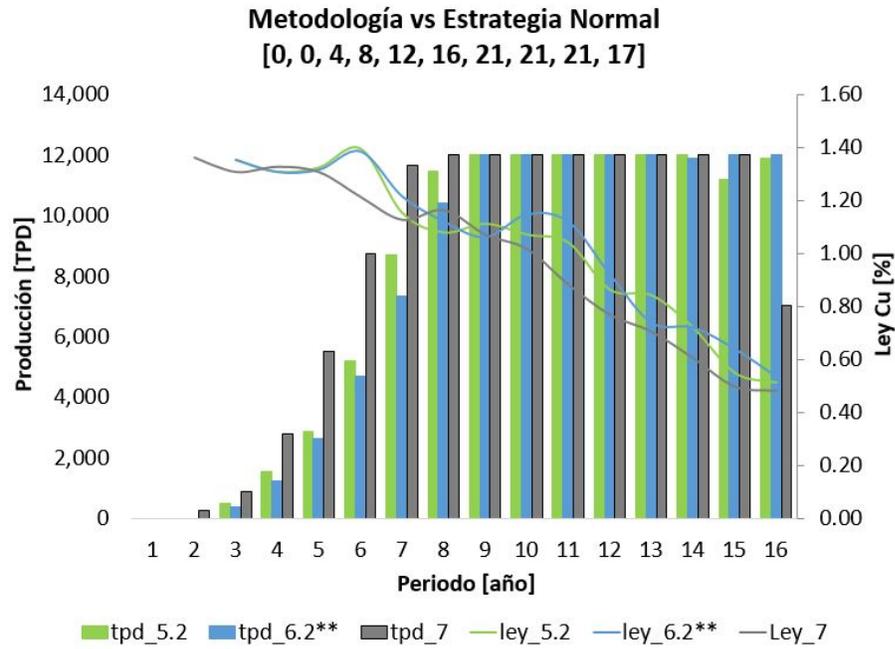


Figura 6.32: Comparación entre Plan de Producción de Metodología Propuesta y Estrategia Normal del Ejercicio 5 y 6

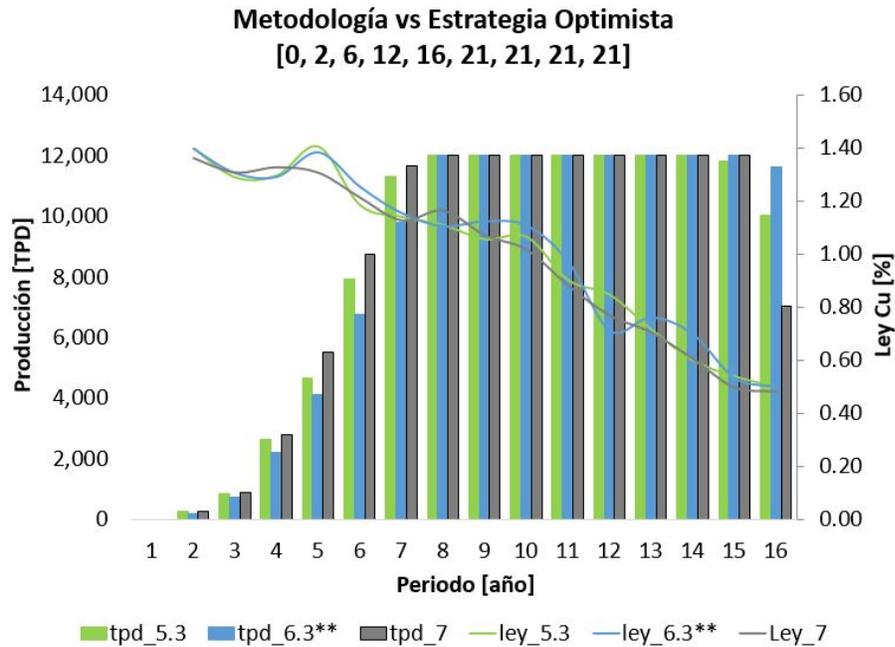
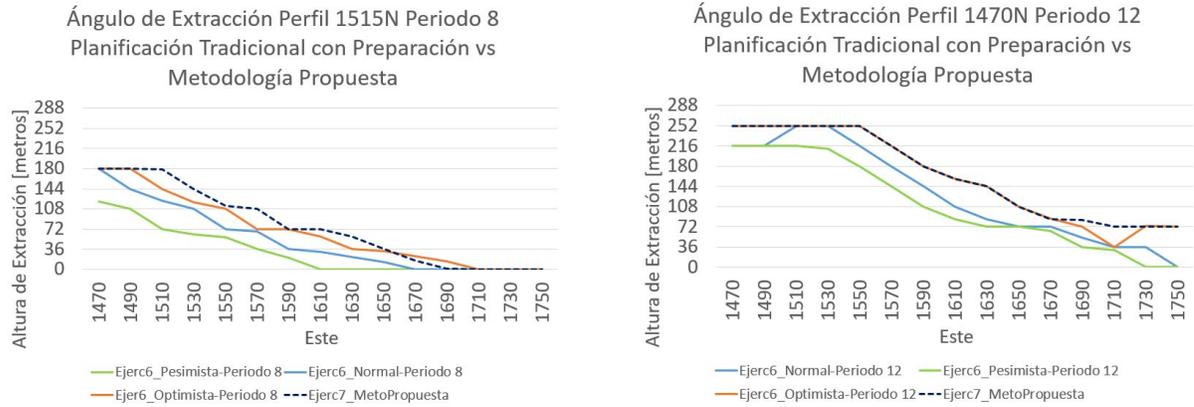


Figura 6.33: Comparación entre Plan de Producción de Metodología Propuesta y Estrategia Optimista del Ejercicio 5 y 6

La Figura 6.34 muestra una comparación del ángulo de extracción entre la metodología propuesta y el ejercicio 6. En ella se observa que el ángulo también se mantiene entre 35° y 45° y la envolvente de extracción de la metodología propuesta se ubicada, al menos, igual o por sobre las otras estrategias.

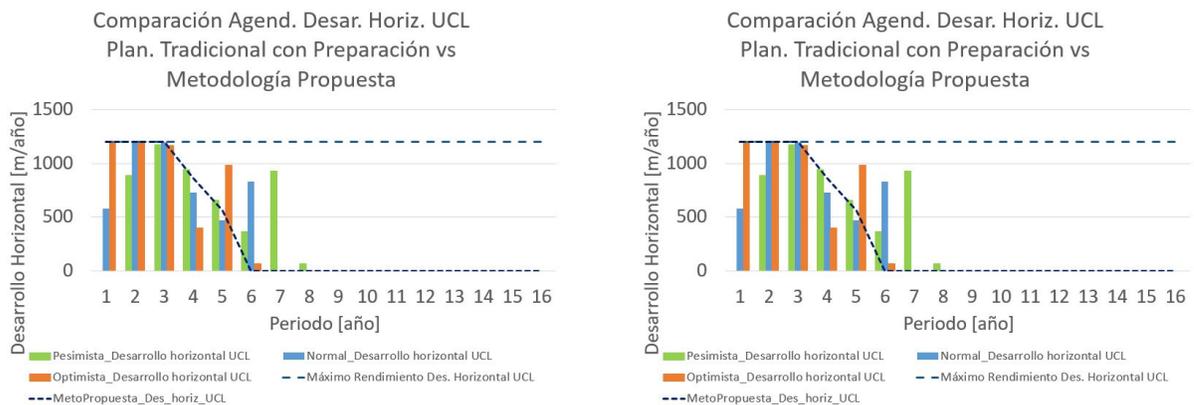


(a) Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 Perfil N1515 entre Planificación Tradicional con Preparación y Metodología Propuesta

(b) Comparación ángulo de Extracción Periodo 12 Perfil N1470 entre Planificación Tradicional con Preparación y Metodología Propuesta

Figura 6.34: Comparación ángulo de Extracción Periodo 8 y 12 entre Planificación Tradicional con Preparación y Metodología Propuesta

Las Figuras 6.35 muestra una comparación de los resultados del agendamiento de los desarrollos mineros entre la metodología propuesta y el ejercicio 6. Se aprecia que la metodología propuesta logra adelantar los desarrollos ocupando completamente la capacidad de construcción en los primeros años. Esta situación no es capturada en los otros agendamientos debido a que la estrategia operacional de apertura de bateas es impuesta, dejando capacidad ociosa.



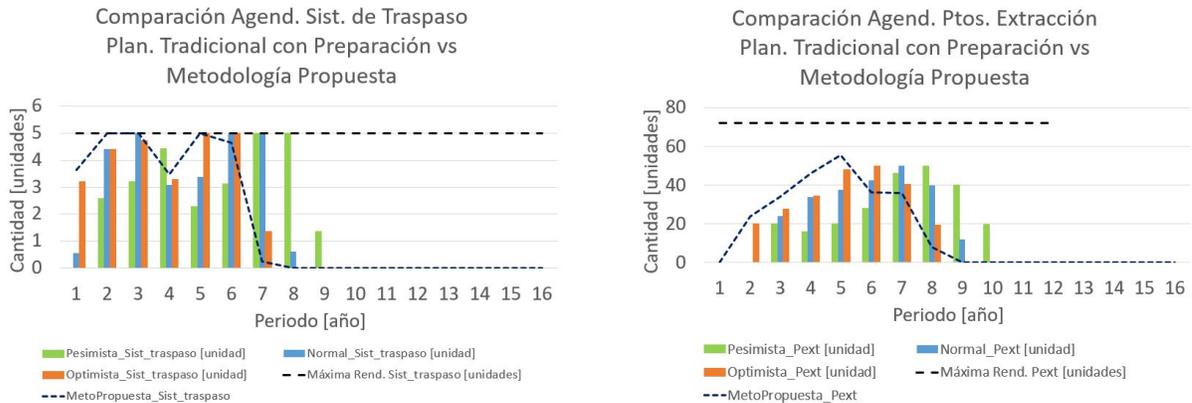
(a) Comparación Agendamientos de Desarrollo Horizontal Nivel de Hundimiento (UCL) entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

(b) Comparación Agendamientos de Desarrollo Horizontal Nivel de Producción (NP) entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

Figura 6.35: Comparación Agendamientos de Desarrollo Horizontal Nivel de Producción (NP) y Hundimiento (UCL) entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

La Figuras 6.36 muestra la comparación de la construcción de los sistemas de traspaso del nivel de producción (6.36a) y la construcción de los puntos de extracción (6.36b) entre

la metodología propuesta y el ejercicio 6. Igual que el caso anterior, se aprecia un adelantamiento de las ambas actividades hacia los primeros años. Sin embargo, la construcción de Puntos de Extracción se atenúa el fenómeno debido a que esta actividad no es limitante en el agendamiento.

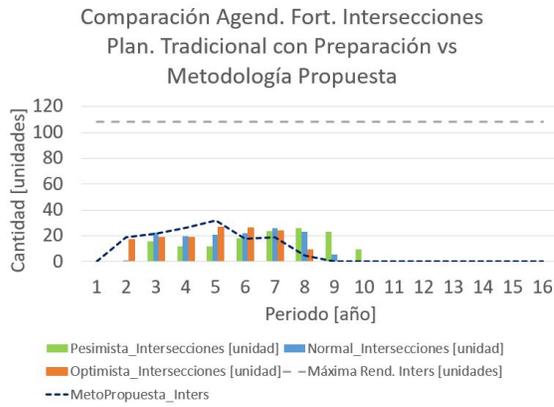


(a) Comparación Agendamiento de Construcción de Sistema de Traspaso entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

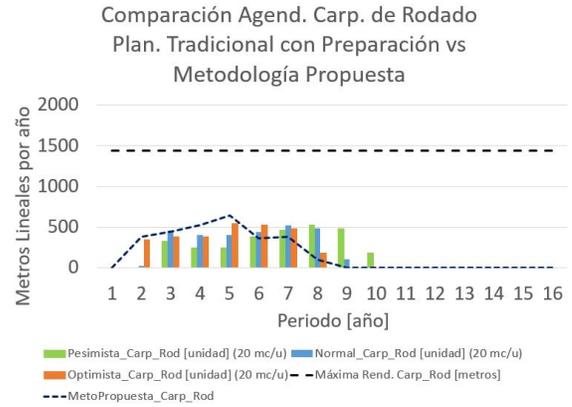
(b) Comparación Agendamiento de Fortificación de Puntos de Extracción entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

Figura 6.36: Comparación Agendamientos de Sistemas de Traspaso y Fortificación de Puntos de Extracción entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

Las Figuras 6.37 muestra la comparación de la construcción de la fortificación de las intersecciones de Calles de Producción y Galerías Zanjas (6.37a), y de la construcción de la Carpeta de Rodado (6.37b) entre la metodología propuesta y el ejercicio 6. La situación anterior ("adelantamiento" de las actividades a los primeros años) no se presenta tan clara como los casos anteriores, debido a que estas actividades (Fortificación de Intersección y Construcción de Carpeta de Rodado) no son actividades limitantes en el agendamiento.



(a) Comparación Agendamiento de Fortificación de Intersecciones entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta



(b) Comparación Agendamiento de Carpeta de Rodado entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

Figura 6.37: Comparación Agendamientos de Sistemas de Traspaso y Fortificación de Puntos de Extracción entre Planificación Tradicional con Preparación versus Metodología Propuesta

Respecto a los costos por año obtenidos por el agendamiento de la metodología propuesta y los del ejercicio 6, son presentados en la Figura 6.38. Como consecuencia de adelantar actividades de preparación a los primeros años, los costos de preparación son mayores en la metodología propuesta que en las estrategias Pesimistas, Normal y Optimista del ejercicio 6.

Comparación Costo de Preparación por Año Planificación Tradicional con Preparación y Metodología Propuesta

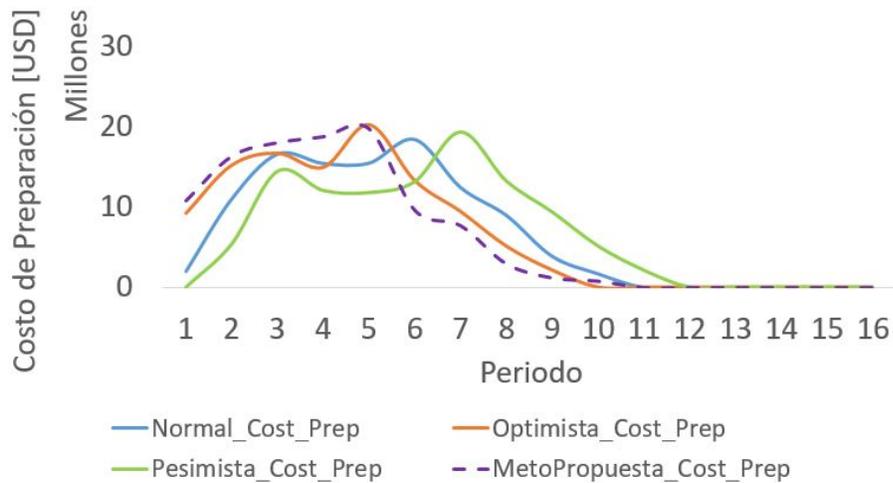


Figura 6.38: Comparación Costos de Preparación entre Metodologia Propuesta y Estrategia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6.

Respecto a los ingresos por año obtenidos por el agendamiento de la metodología propuesta y los del ejercicio 6, éstos son presentados en la Figura 6.39. Se aprecia que el agendamiento de la metodología propuesta captura mayor valor en los primeros años producto del óptimo adelantamiento de las actividades de preparación. Además, el peak de ingreso se consigue más temprano que en las estrategias operacionales del ejercicio 6, situación que impacta el valor presente neto de forma positiva.

Por otro lado, el comportamiento de los ingresos de la metodología propuesta es regular durante todo el periodo de agendamiento, y una vez alcanzado el peak, el descenso es parejo y sin sobresaltados.

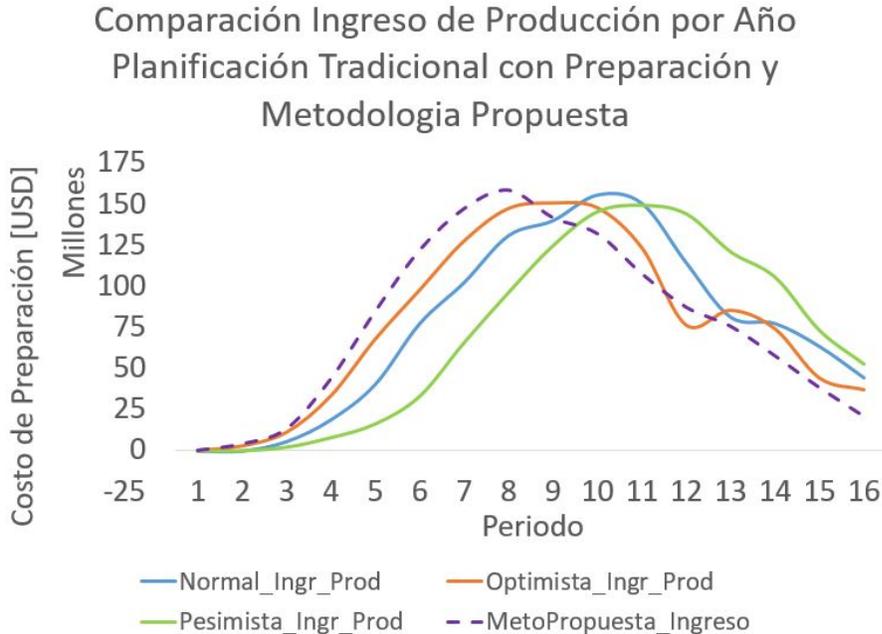


Figura 6.39: Comparación Ingresos de Producción entre Metodología Propuesta y Estrategia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6

Una comparación del valor presente neto entre la metodología propuesta y las estrategias Pesimista, Normal y Optimista del ejercicio 6 es mostrada en la Figura 6.40, donde se aprecia que el valor captura por la metodología es mayor en todos los casos.

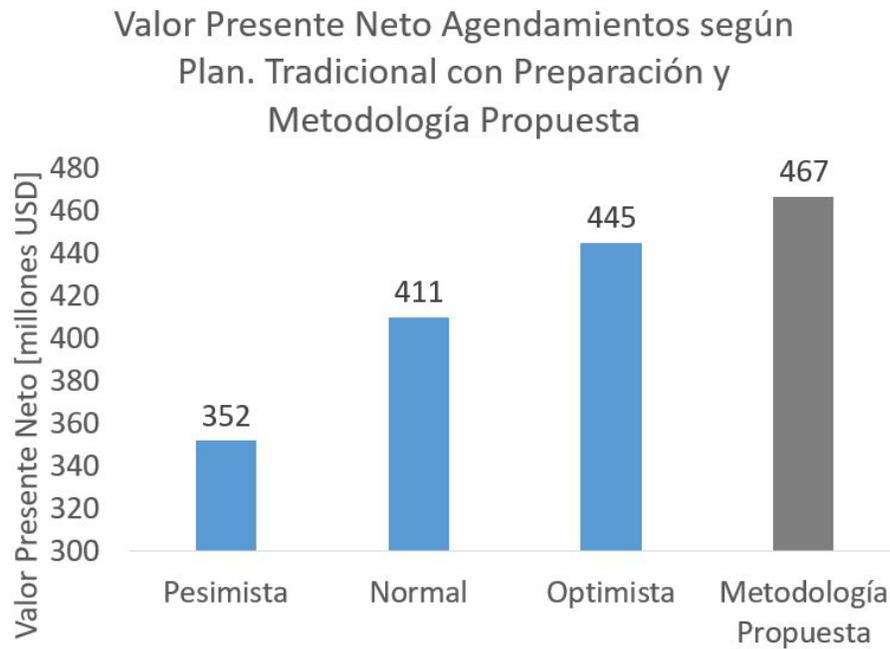


Figura 6.40: Comparación Valor Presente Neto Planes de Producción entre Metodología Propuesta y Estrategia Pesimista, Normal Optimista del Ejercicio 6

Finalmente, la Tabla 6.14 muestra un desglose detallado de cada uno de los valores capturados por el ejercicio 6 y 7. De ella, se desprende que la metodología propuesta consigue superar a las estrategias Pesimista, Normal y Optimista del ejercicio 6 en un 33 %, 14 % y 5 %, en valor, respectivamente.

Tabla 6.14: Tabla Comparativa de los valores capturados entre la Metodología Propuesta y la Planificación Tradicional con Incorporación de Preparación

Comparación VPN entre ejercicio 6 y 7	Planificación Tradicional con Preparación (ejercicio 6)			Metodología Propuesta (ejercicio 7)
	Pesimista	Normal	Optimista	
Valor Presente Act. de Producción [millones USD]	413	477	517	541
Valor Presente Act. de Preparación [millones USD]	-61	-67	-72	-74
Valor Presente Neto Agendamientos [millones USD]	352	411	445	467
Diferencia porcentual (respecto a Metodología Propuesta)	33 %	14 %	5 %	

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1. Caso Estudio 1

- Es posible realizar un plan de producción a nivel de bloques con la herramienta matemática UDESS considerando un modelo de bloques, y antecedentes técnicos tales como la extracción de la columna, el ángulo de extracción, punto de inicio del hundimiento, secuencia de apertura de puntos de extracción y velocidades de extracción de las columnas de rocas.
- Se propuso una estrategia de discretizaciones de las columnas de bloques para mejorar los tiempos de resolución, lo cual permitió disminuir los tiempos de cómputo sin perder de vista las características generales del sistema minero.
- No obstante lo anterior, el agrupamiento de varios bloques puede tener un impacto negativo en el control del ángulo de extracción.
- Debido a que la envolvente final de extracción es determinada por la UDESS, no fue posible incluir una restricción que permitiera controlar el cierre de área por periodo.

7.2. Caso Estudio 2

- Se modelaron las actividades de preparación y producción. En las primeras se consideró el nivel de hundimiento y producción y las actividades incluidas fueron el desarrollo horizontal en ambos niveles, y la fortificación de intersección, fortificación de puntos de extracción, fortificación de pilares y fortificación de piso, más el sistema de traspaso, en el nivel de producción. En las actividades de producción, un modelo de bloques fue considerado como parte de modelamiento.
- Se crearon 3 ejercicios. El primero busca simular la planificación tradicional usada en la industria, luego, el segundo tiene como propósito incluir las restricciones de preparación a la planificación tradicional y, finalmente, un ejercicio con la metodología propuesta (3er ejercicio). Además, se crearon 3 estrategias operacionales de apertura de puntos de extracción: Pesimista, Normal y Optimista.

- Todos los ejercicios realizados desarrollaron el foot-print completo, y por lo tanto, se realizaron todas las actividades de preparación, pero no se extrajeron todos los bloques. La herramienta matemática determinó cuál es la envolvente de producción óptima.
- En todas las estrategias, los resultados evidenciaron que al incluir las restricciones de preparación a la metodología tradicional de planificación, no es posible superar la producción en el periodo de Ramp Up, confirmando la hipótesis que los planes de producción generados mediante la metodología de planificación tradicional no son factible en la vida real cuando la preparación minera es incluida.
- Respecto a la estrategia operacional de apertura de bateas, la determinación de cada uno de ellas tiene que ver con cuantos puntos de extracción se habilitan por año. Cada Ingeniero Planificador puede decidir una estrategia distinta pero no es posible determinar la cantidad óptima de manera manual. Esto tiene consecuencias debido a que podría existir una estrategia óptima que es imposible de determinar.
- La metodología propuesta permite incluir las actividades de producción (modelo de bloques) y las actividades de preparación en un único problema de optimización, lo que permite obtener un agendamiento integral y simultáneo, logrando mejorar el Valor Presente Neto de un proyecto.
- Esta metodología logra mejores resultados en términos del Valor Presente Neto respecto de todos los experimentos realizados, tanto con la Planificación Tradicional o con Incorporación de Preparación como según las estrategias operacionales de aperturas de puntos de extracción. En este sentido la metodología determina la cantidad óptima de puntos de extracción sin necesidad de definirla, sino que el modelo de optimización la determina considerando las restricciones de preparación y producción simultáneamente.
- El agendamiento de la metodología propuesta captura mayor valor en los primeros años producto del óptimo adelantamiento de las actividades de preparación. Esto se explica porque el peak de ingreso se consigue más temprano que en las otras estrategias operacionales, situación que impacta el valor presente neto de forma positiva. El comportamiento de los ingresos es regular durante todo el periodo de agendamiento, y una vez alcanzado el peak, el descenso es parejo y sin sobresaltos.
- Como consecuencia de adelantar actividades de preparación a los primeros años, los costos de preparación son mayores en la metodología propuesta que en las otras estrategias operacionales, lo cual se justifica porque por cada 1 dolar adicional incluido en la preparación, se consigue 10 dolares adicionales de ingreso.
- A partir de los resultados conseguidos, las actividades de desarrollo horizontal de ambos niveles productivos y los sistemas traspaso (Ore Pass) son actividades limitantes en el modelo de optimización. Otras actividades como la fortificación de puntos de extracción o la construcción de la carpeta de rodado no lo fueron.
- La metodología propuesta agenda los desarrollos ocupando completamente la capacidad de construcción en los primeros años. Esta situación no es capturada en los otros agendamientos debido a que la estrategia operacional de apertura de bateas es impuesta, dejando capacidad ociosa.
- El ángulo de extracción se mantiene entre 35° y 45° para todos los ejercicios y experimentos realizados. En el caso de la metodología propuesta, la envolvente de extracción de la metodología propuesta (medida en el mismo perfil y mismo año) se ubicó, al menos, igual o por sobre las otras estrategias. Esta situación refleja que la integración

de ambas etapas (preparación y producción) pueden mejorar el valor capturado debido a la temprana apertura de puntos.

- El modelamiento del Nivel de Producción permitió que las actividades fueron agendadas de forma regular, teniendo un inicio, un régimen y una caída al final. Esta situación se debe a que son definidas con recursos de 20 metros lineales y con restricciones del tipo "Y", lo que condujo a resultados más depurado producto de la mayor resolución con la que se modeló. Por el contrario, el modelamiento del Nivel de Hundimiento fue con actividades de preparación cuyos recursos son de 160 metros y 64 mts (último tramo), lo que no permitió un agendamiento de estas actividades de forma es irregular, lo que condujo a realizar exceso de desarrollo en el nivel de hundimiento.
- Esta situación afectó la regularidad del agendamiento en este nivel productivo, sin embargo, a medida que aumenta la resolución del problema (mayor número de actividades), se presentan otros inconvenientes como el tiempo de resolución del problema, por lo que se optó por esta mantener esta situación así.
- Finalmente, se concluye que la metodología propuesta en este estudio logra incluir las actividades de preparación minera a una estrategia de extracción, entregando un plan de producción óptimo del punto de vista de valor presente neto, dado restricciones operacionales y técnicas.

7.3. Trabajo futuro

A partir de este trabajo, se podrían realizar las siguientes extensiones:

- Evaluar la posibilidad de incluir otro tipos de secuencia de construcción tal como un Panel Caving con hundimiento previo o avanzado, e incluir precedencias del Tipo "O".
- Evaluar la posibilidad de simular el resultado de agendamiento de la metodología propuesta, de tal manera de operativizar los resultados.
- Incluir una restricciones que permita controlar el cierre de área.
- Incluir una mayor resolución en el modelamiento de las actividades de preparación del nivel de hundimiento para mejorar la calidad de los resultados del agendamiento.
- Incluir y modelar los niveles de transporte y ventilación al problema de tal manera de evaluar estos niveles en la construcción de los niveles productivos.

Bibliografía

- Alarcón, Maximiliano (2014). «Valorización del Aumento de Confiabilidad en Planes de Producción de Sistemas Mineros Subterráneos». Memoria. Universidad de Chile.
- Araneda, O. y S. Gaete (2004). «Continuous modelling for caving exploitation». En: *Fourth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ed. por Araneda, O. y Gaete, S.
- Araneda, O y A Sougarret (2008). «Lessons Learned in Cave Mining at El Teniente Mine Over the Period 1997-2007». En: *Fiveth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, págs. 43-52.
- Arriagada, F. y col. (2015). «Secuenciamiento optimizado considerando regla de mezcla». En:
AtlasCopco (1968). *Guía de la Minería Subterránea. Métodos y Aplicaciones*.
- Barbaro, RW y RV Ramani (1986). «Generalized multiperiod MIP model for production scheduling and processing facilities selection and location». En: *Mining Engineering* 38.2, págs. 107-114.
- Bullock, Richard L. (2011). «Introduction to Underground Mine Planning». En: *Mining Engineering Handbook*.
- Butcher, R.J. (2000). «Block Cave Undercutting - Aims, Strategies, Methods and Management». En: *Third International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ed. por Butcher, R.J.
- Camhi, J.F. (2012). «Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de BLock Caving. Caso Estudio Mina El Teniente Codelco Chile». Tesis. Universidad de Chile.
- Cavieres, Patricio (1999). *Evolución de los Métodos de Explotación en la Mina El Teniente*. type. institution.
- Charles A. Brannon, Gordon K. Carlson y Timonthy P. Casten (2011). «Block Caving». En: *Mining Engineering Handbook*. Ed. por Darling, Peter.
- Contreras, Eduardo (2007). «Métodos de Explotación». Cátedra Métodos de Explotación. Escuela de Ingeniería en Minas. Facultad de Ingeniería. USACH.
- Cordero, Mauticio (2010). «Planificación Minera Estratégica de un Panel Caving». Tesis. Universidad de Santiago de Chile.
- Davis, Graham A y Alexandra M Newman (2008). «Modern strategic mine planning». En: *Proceedings of the Australian Mining Technology Conference, AusIMM, Carlton, Australia*, pág. 129.
- Díaz, G. y E. Morales (2008). «Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day - El Teniente mine - Codelco Chile». En: *Fiveth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ed. por Díaz, G. y Morales, E.

- E.T. Brown, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (2002). *Block Caving Geomechanics*.
- Epstein, Rafael y col. (2012). «Optimizing long-term production plans in underground and open-pit copper mines». En: *Operations Research* 60.1, págs. 4-17.
- Hamrin, Hans (2001). «Underground mining methods and applications». En: *Underground mining method*.
- Introductory Mining Engineering* (1987). publisher.
- J. Contreras J. Cornejo, C. Caviedes (2016). «Metodología para estimación de la tasa de incorporación de área en panel caving, Codelco – División El Teniente». En: *Umining 2016*. Ed. por J. Contreras J. Cornejo, C. Caviedes.
- J. Oyanader, P. Rojas y N. Zuñiga (2016). «Metodología de Análisis de Constructibilidad, Proyecto Recursos Sur Codelco, División El Teniente». En: *Umining 2016*. Ed. por J. Oyanader, P. Rojas y Zuñiga, N.
- Jamett, N. y R.Q. Alegría (2014). «New growth strategy in Esmeralda Mine». En: *Caving 2014*. Ed. por Jamett, N. y Alegría, R.Q.
- Kazakidis, Vassilios (2001). «Operating risk: Planning for flexible mining systems». Tesis doct. University of British Columbia.
- Laubscher, D.H. (1994). «Cave Mining - the state of the art». En: *The journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Lobiano, Carlos (2016). «Inclusión de Interferencias Operacionales de Origen Geotécnico en Planificación Minera de Panel Caving». Tesis de Magister. Universidad de Chile.
- M. Orellana, C. Cifuentes y J. Díaz (2014). «Caving experiences in Esmeralda Sector, El Teniente Mine». En: *Caving 2014*. Ed. por M. Orellana, C. Cifuentes y Díaz, J.
- Martinez, Michael A y Alexandra M Newman (2011). «A solution approach for optimizing long and short term production scheduling at LKAB Kiruna mine». En: *European Journal of Operational Research*, págs. 184-197.
- Morales, N. y col. (2012). «Integrating constructability of a project into the optimization of production planning and scheduling». En: *Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ed. por editor.
- Newman, Alexandra M y Mark Kuchta (2007). «Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine». En: *European Journal of Operational Research* 176.2, págs. 1205-1218.
- Newman, Alexandra M, Enrique Rubio y col. (2010). «A review of operations research in mine planning». En: *Interfaces* 40.3, págs. 222-245.
- Ortiz, Julián (2008). «Apuntes de Curso de explotación de minas».
- Ovalle, Alfonso W. (2012). «Mass Caving Maximum Production Capacity». En: *Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ed. por editor.
- Pourrahimian, Yashar (2013). *Mathematical programming for sequence optimization in block cave mining*. University of Alberta (Canada).
- Qinglin, C y col. (1996). «Optimization of underground mining methods using grey theory and neural networks». En: *5th Internat. Sympos. Mine Planning Equipment Selection MPES, Sao Paulo, Brazil*, págs. 393-398.
- Rahal, D y col. (2003). «The use of mixed integer linear programming for long-term scheduling in block caving mines». En: *Proceedings of the 31st International APCOM Symposium, Cape Town, South Africa*, págs. 123-131.
- Rojas, Molina y Cavieres (2001). «Preundercut Caving in El Teniente Mine». En: *Underground Mining Methods*.

- Rubio, Enrique (2002). «Long term planning of block caving operations using mathematical programming tools». Tesis doct. University of British Columbia.
- Smoljanovic, M. y col. (2012). «Optimum sequencing of underground ore reserves for different mining systems». En:
- Statistics, World Metal, ed. (2016). *World Metal Statistics May 2017 and Yearbook 2016*.
- Vargas, E. y col. (2014). «Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica». En:
- W. Rocher E. Rubio, N. Morales (2011). «Eight-Dimensional PLanning-Construction of an Integrated Model for Mine PLanning Involving Constructability». En: *APCOM 35th*. Ed. por W. Rocher E. Rubio, N. Morales.
- Winston, R. y col. (2012). «Secuenciamiento óptimo de preparacion minera subterranea». En:
- Yun, QX y col. (2003). «Evolutionary algorithms for the optimization of production planning in underground mines». En: *Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy*, págs. 311-314.