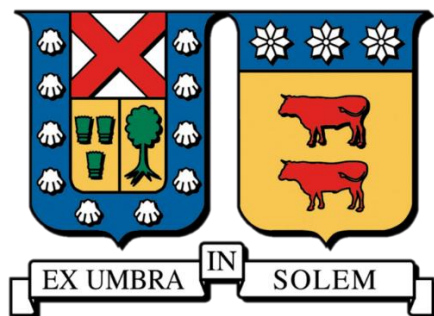


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



LIMITACIONES DE LA PRODUCCIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA A GRAN ESCALA POR CAUSA DE LA CAPACIDAD DE PREPARACIÓN

DANIELA FERNANDA CONTRERAS GONZÁLEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA CIVIL EN MINAS

Profesor guía:
VICTOR ENCINA

Santiago, Chile

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Limitaciones de la producción en minería subterránea a gran escala por causa de la capacidad de preparación

Nombre del candidato(a): Daniela Contreras González

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Joaquín; **Departamento:** Departamento de ingeniería de minas, metalurgia y materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

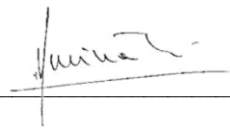
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

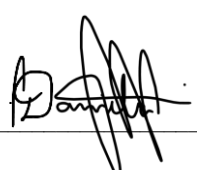
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero partir agradeciéndole a mis padres: Sara y Elías, quienes siempre han creído en mí y me han apoyado incondicionalmente en todo lo que he realizado, sobre todo con el amor y cariño que me han brindado siempre, sin ellos no habría podido llegar hasta aquí, y a mi hermano Matías, quien ha sido mi inspiración a seguir y me ha alentado siempre a ser mejor.

A mi compañero de vida Diego, quién ha sido un pilar fundamental en mi vida y con el que hemos vivido juntos este proceso. Agradezco su apoyo y compañía en momentos difíciles, por levantarme cuando sentía que no podía más y por alentarme a salir adelante.

A mis mascotas, las que ya no están y las que siguen aquí, que me acompañaron durante todo este proceso, desvelándose conmigo en noches de estudio y me brindaron su compañía durante el desarrollo de esta memoria.

A mis angelitos que me cuidan siempre, mis abuelos: Mami, Cuca y Tata, quienes me acompañan desde donde están y sin duda estarían orgullosos de mí.

A mis profesores, en especial a Víctor Encina, quien me guio en todo este proceso y me brindó sus conocimientos para lograr el objetivo de este trabajo.

Y a los amigos que me dejó la universidad, quienes fueron un gran apoyo durante toda esta etapa universitaria y se convirtieron en familia después de tantas experiencias vividas juntos.

Resumen

En minería subterránea, la capacidad de preparación de mina determina directamente la capacidad de producción, ya que es esta etapa la que habilita físicamente las zonas del yacimiento desde donde se podrá extraer mineral. Aunque el sistema de manejo de materiales tenga la capacidad de movilizar mayores volúmenes, dicha capacidad queda subutilizada si no existe suficiente mineral habilitado para ser extraído. En consecuencia, la producción no está limitada por la capacidad de extracción, sino por la zona efectivamente habilitada para ese fin, lo que convierte a la preparación minera en el verdadero cuello de botella del proceso productivo en minería subterránea.

En métodos de hundimiento masivo como *block* o *panel caving*, además de la preparación, la tasa de socavación constituye otra limitante de la capacidad de producción del método en el mediano plazo. Esta tasa define la velocidad con que se puede inducir el colapso del macizo rocoso y habilitar nuevas zonas de extracción, condicionando así la capacidad productiva sostenida de la mina.

Este estudio aborda ambas limitaciones. En cuanto a la preparación minera, se analizan dos enfoques constructivos: excavaciones mediante perforación y tronadura, y excavación mecánica con equipos tipo *drift borer*, los cuales tienen importantes efectos en la duración de la construcción de obras de hormigón. Para la socavación, se utilizan tasas empíricas obtenidas a partir de estudios de benchmarking, representativas del estado del arte observado en faenas reales.

El estudio se desarrolla sobre una operación teórica, basada en un diseño típico de explotación con equipos LHD y una malla triangular equilátera con puntos de extracción espaciados a 15 metros. A partir de este modelo, se determinó la capacidad máxima de producción limitada por la tasa de socavación, y posteriormente se evaluó si la preparación minera, con ambos enfoques constructivos, eran capaces de habilitar en un año, la superficie necesaria para sostener dicho tonelaje anual.

Los resultados obtenidos demuestran que la principal limitante de la capacidad productiva en el método de *block* o *panel caving* es la tasa de socavación. Ambos enfoques constructivos —perforación y tronadura, y excavación mecanizada— permiten preparar la superficie necesaria para alcanzar el área máxima de socavación anual. Sin embargo, en el caso del método convencional, la ejecución de las obras de hormigón en los puntos de extracción implica un desafío significativo de gestión operativa, al requerir una alta dotación de personal y una compleja logística durante un período superior a cuatro meses.

Se concluye entonces, que el límite de capacidad de producción de minas *block* o *panel caving* es del orden de 45 ktpd y para alcanzarlo, lo más recomendable sería efectuar la preparación con un enfoque constructivo de excavación mecánica con *drift borer*.

Abstract

In underground mining, the mine development capacity directly determines the production capacity, as this stage physically enables the areas of the orebody from which mineral extraction can occur. Even if the material handling system has the capability to move larger volumes, such capacity remains underutilized if there is insufficient ore available for extraction. Consequently, production is not limited by the extraction capacity itself, but rather by the effectively developed zones, making mine development the true bottleneck of the production process in underground mining.

In mass mining methods such as block or panel caving, in addition to mine development, the undercutting rate represents another constraint on the method's production capacity in the medium term. This rate defines the speed at which the rock mass can be induced to collapse and new extraction areas can be made available, thus conditioning the sustained productive capacity of the mine.

This study addresses both limitations. Regarding mine development, two construction approaches are analyzed: conventional excavation by drilling and blasting, and mechanical excavation using drift borer-type equipment, both of which have significant effects on the duration of concrete works. For the undercutting stage, empirical rates obtained from benchmarking studies were used, representing the state-of-the-art observed in real mining operations.

The study is based on a theoretical operation, designed following a typical caving layout using LHD equipment and an equilateral triangular drawpoint pattern with 15 m spacing. From this model, the maximum production capacity limited by the undercutting rate was determined, and subsequently, it was evaluated whether the mine development, under both construction approaches, could enable within one year the required area to sustain such annual tonnage.

The results show that the main limiting factor of production capacity in block or panel caving is the undercutting rate. Both construction approaches —drilling and blasting, and mechanical excavation— allow for preparing the necessary area to achieve the maximum annual undercutting surface. However, in the case of the conventional method, the execution of concrete works at the drawpoints represents a significant operational management challenge, as it requires a high labor demand and complex logistics over a period exceeding four months.

It is therefore concluded that the upper production capacity limit for block or panel caving mines is around 45 ktpd, and to achieve it, the most advisable approach is to conduct the mine development using a mechanical excavation method with a drift borer system.

Glosario

MSGE: Minería subterránea a gran escala

P&T: Perforación y tronadura

S: Sur

E: Este

N: Norte

NH: Nivel de hundimiento

NP: Nivel de producción

LHD: Load haul dump

TBM: Tunnel boring machine

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
2	Objetivos y alcances	2
2.1	Objetivo general	2
2.2	Objetivos específicos.....	2
2.3	Alcances y limitaciones	2
3	Estado del arte	3
3.1	Métodos de hundimiento en MSGE	3
3.1.1	Block caving	3
3.2	Preparación Minera.....	5
3.2.1	Desarrollo horizontal	6
3.2.2	Desarrollo vertical	6
3.2.3	Obras civiles	6
3.3	Métodos de excavación	7
3.3.1	Perforación y tronadura	7
3.3.2	Construcción mecanizada.....	7
3.4	Capacidad productiva y altura de bloque	9
3.4.1	Altura de bloque	9
3.4.2	Capacidad productiva	10
3.5	Malla de extracción	11
4	Metodología.....	14
4.1	Recopilación de antecedentes.....	14
4.2	Determinar la capacidad y área limitante máxima	14
4.3	Realizar la malla de extracción.....	14
4.4	Cubicación de la obra	15
4.5	Duración de obras de preparación	15
4.6	Definición de la carta Gantt.....	15
4.7	Análisis de los resultados	15
5	Antecedentes.....	16
5.1	Diseño minero con P&T	16
5.1.1	Nivel de hundimiento	16
5.1.2	Nivel de producción.....	17
5.1.3	Tiempo de preparación	18

5.2	Diseño minero con sistema <i>drift boring</i> horizontal.....	22
5.2.1	Nivel de hundimiento	22
5.2.2	Nivel de producción.....	23
5.2.3	Tiempo de preparación	26
6	Desarrollo	29
6.1	Capacidad y área limitante	29
6.2	Caso diseño P&T	30
6.2.1	Diseño malla de extracción.....	30
6.2.2	Cubicación	33
6.2.3	Duración de obras de preparación	34
6.2.4	Carta Gantt.....	35
6.3	Caso diseño Drift Borer.....	37
6.3.1	Diseño malla de extracción.....	37
6.3.2	Cubicación	40
6.3.3	Duración de obras de preparación	42
6.3.4	Carta Gantt.....	43
7	Análisis de resultados	45
7.1	Análisis general	45
7.2	Análisis nivel de hundimiento	47
7.3	Análisis nivel de producción	49
8	Conclusión y Recomendaciones.....	51
8.1	Conclusión.....	51
8.2	Recomendaciones	52
9	Referencias	53

Índice de figuras

Figura 1: Diseño de block caving convencional (Branon et al., 2011).....	4
--	---

Figura 2: Diseño drift boring horizontal (Rostami, 2011).	8
Figura 3: Evolución de altura de bloque (Flores et al., 2004).	9
Figura 4: (a) Configuración cuadrada, (b) Configuración mixta, (c) Configuración triangular (Cavieres et al., 2006).	11
Figura 5: (a) Malla Cuadrada, (b) Malla Henderson, (c) Malla Teniente (Cavieres et al., 2006).	12
Figura 6: Algoritmo de Voronoi (Nelis, 2021).	13
Figura 7: Esquema de trabajo.	14
Figura 8: Diseño del nivel de hundimiento con perforación y tronadura.	17
Figura 9: Diseño nivel de producción sistema convencional.	18
Figura 10: Carta Gantt de la preparación minera con sistema convencional.	21
Figura 11: Diseño de nivel de hundimiento para el sistema mecanizado.	22
Figura 12: Diseño nivel de producción para el sistema mecanizado.	24
Figura 13: Disposición de dovela en la calle de producción (Núñez, 2022).	25
Figura 14: Dimensiones de dovelas (Núñez, 2022).	25
Figura 15: Carta Gantt de la preparación minera para sistema mecanizado.	28
Figura 16: (a) Disposición general de puntos de extracción, (b) Algoritmo de Voronoi en diseño convencional.	30
Figura 17: Diseño de malla con los puntos para socavar del sistema convencional.	32
Figura 18: Carta Gantt de la preparación minera anual para el sistema convencional.	36
Figura 19: (a) Disposición general de puntos de extracción para el diseño mecanizado (b) Algoritmo de Voronoi del diseño mecanizado.	37
Figura 20: Diseño de malla con los puntos para socavar del sistema mecanizado.	39
Figura 21: Carta Gantt preparación minera del sistema mecanizado.	44
Figura 22: Obras del nivel de hundimiento en el caso convencional.	48
Figura 23: Obras del nivel de hundimiento en el caso mecanizado.	48

Índice de tablas

Tabla 1: Etapas de la preparación minera.	5
Tabla 2: Dimensiones de galerías del nivel de producción.	17
Tabla 3: Cubicación de obras sistema convencional.	19
Tabla 4: Duración de cada obra con sistema convencional.	20
Tabla 5: Duración total con sistema convencional.	21
Tabla 6: Dimensiones galerías del nivel de producción.	23
Tabla 7: Cubicación de obras con sistema mecanizado.	26
Tabla 8: Duración de cada obra con sistema mecanizado.	27
Tabla 9: Duración total para sistema mecanizado.	28
Tabla 10: Área total preparada en el sistema convencional.	31
Tabla 11: Puntos de extracción que se deben preparar.	31
Tabla 12: Índice de cada unidad de obra por punto de extracción (sistema convencional).	33
Tabla 13: Total de cada obra para la preparación minera.	34
Tabla 14: Duración de cada obra del sistema convencional.	35
Tabla 15: Duración total para el sistema convencional.	36
Tabla 16: Área preparación en el diseño con drift borer original.	38
Tabla 17: Puntos de extracción del nuevo diseño con drift borer.	38
Tabla 18: Índice de unidad de obra por punto de extracción en el sistema mecanizado.	40
Tabla 19: Cubicación de cada obra para el sistema mecanizado.	41
Tabla 20: Duración de cada obra en el sistema mecanizado.	42
Tabla 21: Duración total de la preparación con drift borer.	44
Tabla 22: Comparación de duración de ambos casos.	45
Tabla 23: Comparación de cuadrillas de ambos casos.	46
Tabla 24: Comparación de duración de obras del NH de ambos casos.	47
Tabla 25: Comparación de cubicación de obras del NH de ambos casos.	47
Tabla 26: Comparación de duración de obras en NP de ambos casos.	49
Tabla 27: Comparación de cubicación de obras para el NP de ambos casos.	50

1 Introducción

La minería busca migrar de superficie a subterránea, con métodos de hundimiento masivos como *block caving* y sus variantes *panel caving* y macrobloques. Esta minería ofrece ventajas como un menor impacto ambiental, mayor seguridad, mejor calidad del mineral y menor costo de mantenimiento. Sin embargo, en sus desventajas se encuentran un mayor costo de inversión inicial, dificultades en el acceso, riesgos de seguridad y una menor producción, siendo esta última la que genera un mayor problema en este tipo de minería debido a que esta capacidad de producción limitada podría afectar en la rentabilidad a largo plazo del proyecto (Ingenium, 2023).

La minería subterránea a gran escala debe tener una preparación minera planificada y eficiente ya que es la etapa previa al desarrollo de la producción, por lo que de esta depende el éxito de la explotación del yacimiento.

En la actualidad, los estudios están enfocados en la optimización del hundimiento y la recuperación del mineral, sin embargo, no abordan los factores operacionales que existen en la preparación de los métodos de hundimiento. Además, tampoco hay suficiente cuantificación comparativa entre lo que se planifica producir y lo que realmente se puede preparar anualmente, considerando rendimientos reales y eficiencia operativa.

En este contexto, es relevante abordar directamente esta brecha, permitiendo evaluar cómo las restricciones en la etapa de preparación limitan la productividad futura en minería subterránea masiva. A través de un estudio y cuantificación de la superficie efectiva por malla de extracción, se estimará la capacidad real de preparación anual y su impacto en la capacidad de producción alcanzable.

Este trabajo de memoria propone estimar el área de preparación anual de un método de hundimiento masivo, como el *block caving*, y de esta manera evaluar cuanto podría ser la capacidad de producción esperada en la minería subterránea, considerando como caso base un proyecto realizado con sistemas de excavación convencional y mecanizados, como P&T y el equipo *drift borer*, respectivamente.

2 Objetivos y alcances

2.1 Objetivo general

- Determinar el factor principal que limita la capacidad productiva potencial del método de hundimiento por socavación en minería subterránea a gran escala.

2.2 Objetivos específicos

- Definir los factores que influyen en la capacidad de producción del método.
- Evaluar el impacto de preparación convencional con P&T versus el uso de *Drift Borer*.
- Analizar el impacto de la variación en la tasa anual de socavación.
- Determinar la capacidad de producción correspondiente al factor limitante.

2.3 Alcances y limitaciones

Esta memoria se basa en una planificación de preparación minera ya realizada, en la cual se evaluó la duración de esta, realizando las excavaciones con un sistema convencional (P&T) y un sistema mecanizado (*drift borer*). En esta preparación se diseñaron mallas de extracción para el nivel de producción y nivel de hundimiento, para los cuales se realizaron todos los cálculos requeridos para que estos diseños cumplan con el factor de seguridad y sean considerados estables.

Por otro lado, el enfoque de este análisis está orientado exclusivamente a la preparación minera en la etapa de infraestructura de explotación, con el fin de calcular el área máxima de preparación que se puede alcanzar en un año y con esta, la capacidad productiva máxima a extraer en minería subterránea a gran escala, de manera que se obtengan las limitantes de esta producción y la influencia que tiene la preparación en esta.

Es por esto por lo que, en el desarrollo de esta memoria, se considerarán condiciones óptimas de terreno y se excluirán las influencias geológicas, geomecánicas, económicas y la etapa de infraestructura de pre-producción incluida en el estudio base.

3 Estado del arte

3.1 Métodos de hundimiento en MSGE

En minería subterránea a gran escala, se utilizan los métodos de hundimiento como *sublevel*, *panel* y *block caving* debido a que son altamente mecanizados y a la gran cantidad de mineral que pueden extraer. Se basan en el colapso inducido del macizo rocoso, en el cual, al realizar un corte inferior en el cuerpo mineral, este se hunde de manera natural y luego el mineral se extrae a través de los puntos de extracción. El más utilizado es *block caving*, ya que, debido a la manera en la que se realiza, suele ser de bajo costo, por lo que es una alternativa eficiente para la explotación de mineral masiva (Branon et al., 2011).

3.1.1 Block caving

Es un método de hundimiento a gran escala que se aplica a yacimientos que tengan una geometría masiva de gran potencia. El hundimiento se va realizando de manera columnar hacia la superficie, sin embargo, la diferencia que tiene este método con *sublevel caving* es que el mineral y la roca están involucrados en el hundimiento (Hartman y Mutmanský, 2002).

La explotación del mineral se realiza a través de puntos de extracción preconstruidos, los cuales se posicionan en la base del yacimiento a explotar, de manera que mediante estos puntos se remueve la capa horizontal, eliminando de esta forma el soporte vertical de la columna de mineral superior y así comienza a hundirse mediante la gravedad. Cuando el mineral hundido se extrae, el mineral superior continúa fracturándose debido a los esfuerzos que recibe el bloque mineral no soportado, por lo que genera que el mineral se siga hundiendo por la gravedad (Branon et al., 2011).

El diseño minero del método de hundimiento *block caving* se compone por una infraestructura de distintos niveles, como se puede observar en la Figura 1, los cuales deben cumplir una función específica para el desarrollo exitoso de este. Los niveles principales son los siguientes (Branon et al., 2011):

- Nivel de hundimiento: en este nivel se realiza la socavación basal del macizo rocoso. Se compone por galerías de hundimiento ubicadas paralelamente entre sí. Su diseño dependerá de la variante de hundimiento escogida, las cuales pueden ser hundimiento convencional, hundimiento previo o hundimiento avanzado.
- Nivel de producción: está constituido por las calles de producción y las galerías de zanja que conectan estas calles. En este nivel se realiza la extracción, por lo que se encuentran las bateas que conectan con el nivel de hundimiento. Puede tener distintas configuraciones como ‘espina de pescado’ o ‘El Teniente’.

- Nivel de transporte: el diseño de este nivel será definido según el tipo de transporte elegido, este puede ser ferrocarril, camiones, correas transportadoras o una combinación de estos.
- Nivel de ventilación: es el nivel encargado de proporcionar la ventilación de entrada y salida hacia los otros niveles y el acceso entre estos. Se conforma por galerías y chimeneas.

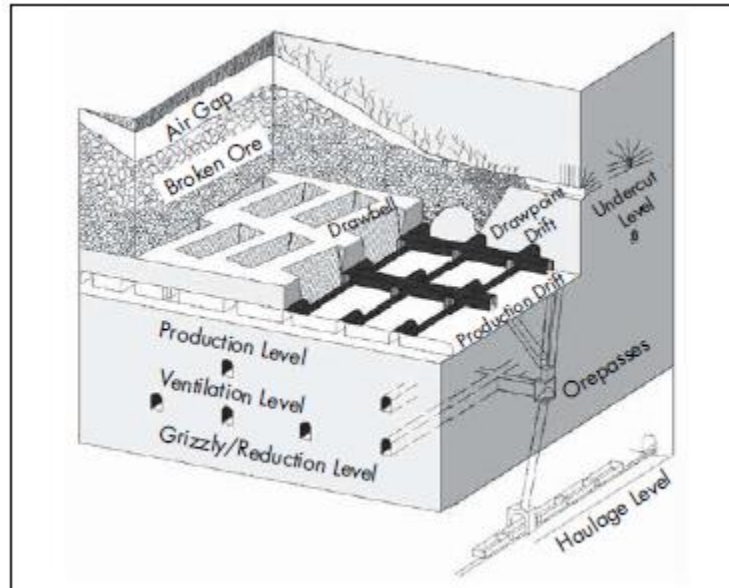


Figura 1: Diseño de block caving convencional (Branon et al., 2011).

Este diseño se desarrolla en la etapa de preparación minera, la cual para el método *block caving*, se debe realizar en todo el bloque antes de que comience la extracción, a diferencia del método *panel caving*, en el que, la preparación se realiza de manera continua por delante de la extracción (Nelis, 2021).

3.2 Preparación Minera

La preparación minera corresponde al conjunto de obras que se necesitan para la incorporación del área en la cual se realizará la continuidad de la explotación, como la extracción del bloque en el caso del método *block caving*. Estas actividades son el desarrollo de túneles y construcción de infraestructura de los distintos niveles. Se debe realizar de manera continua y secuencial, ya que, un retraso, detención o interferencias en esta etapa, generarán impactos en las metas productivas (Díaz y Morales, 2008). Esta preparación puede dividirse en dos etapas, las cuales se describen en la Tabla 1: (González, 2018):

Tabla 1: Etapas de la preparación minera.

INFRAESTRUCTURA DE PRE-PRODUCCIÓN	INFRAESTRUCTURA DE EXPLOTACIÓN
Etapas en la cual se habilita la infraestructura para la producción, como los accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación.	Etapas donde se incorporan las otras actividades de preparación minera en los niveles.

Por otro lado, según Camhi (2012), la preparación puede clasificarse en tres grandes grupos de trabajo, los cuales son:

- Excavaciones mineras: desarrollos horizontales, verticales y las obras que forman parte de estos (fortificación de galerías, saneamiento de galerías y estabilización de sectores).
- Obras civiles: obras donde la materialización principal es el hormigón armado, como las carpetas de rodado y los muros de confinamiento, los cuales sirven como fortificación definitiva en una zona de producción.
- Montaje de infraestructura: obras realizadas al finalizar un proyecto, como el montaje y la habilitación de buzones de carguío y *plate feeders* o la infraestructura utilizada para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

Las obras realizadas en la preparación minera son las siguientes (Díaz y Morales, 2008):

- Desarrollo de galerías de todos los niveles.
- Construcción de los piques de traspaso desde el nivel de producción hasta el nivel de transporte.
- Construcción de obras civiles como puntos de extracción, puntos de descarga, chutes de carguío de mineral, alimentadores de placa, vías férreas, otros.

- Construcción de infraestructura de servicios como talleres de mantenimientos, infraestructura eléctrica y oficinas.
- Montaje y puesta en marcha de los sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos como la implementación de sistemas de control automático para LHD semiautomáticos, controles remotos para chancadores de roca, chutes, alimentadores de placa y ventilación auxiliar.
- Perforación y tronadura de la socavación y la apertura de bateas de extracción con el fin de incorporar el área a la producción.

3.2.1 Desarrollo horizontal

El desarrollo horizontal es una etapa clave en la preparación minera, debido a que es un proceso que abarca todas las excavaciones necesarias para iniciar un proyecto minero. Además, es la responsable de que se pueda continuar con el desarrollo de las demás obras, por lo que el cumplimiento de estas determinará que el proyecto cumpla con el plazo requerido.

Esta etapa incluye actividades como la excavación de cruzados y conexiones en el nivel de hundimiento, calles y zanjas en el nivel de producción, galerías de ventilación en el subnivel de ventilación, cruzados en el nivel de transporte, cabeceras y accesos principales (Contreras, 2016).

3.2.2 Desarrollo vertical

En la etapa de desarrollo vertical se incluyen todas las obras como chimeneas y piques ubicadas entre galerías las cuales servirán de conexión entre estas. Las perforaciones se pueden realizar de diversas formas, un ejemplo es el caso de la mina El Teniente, el cual utiliza dos métodos, uno es mediante el sistema *Raise Borer* y otro mediante el sistema *Blind Hole*.

3.2.3 Obras civiles

Las obras civiles, como explica Camhi (2012), corresponden a la construcción de puntos de extracción, carpetas de rodado y muros de confinamiento, los cuales su materialización principal es el hormigón armado.

Junto con el desarrollo horizontal, son las obras más relevantes de la preparación minera, debido a que abarcan el mayor presupuesto de esta etapa (Camhi, 2012), por lo que es necesaria la correcta ejecución de estas y el cumplimiento con el tiempo requerido de construcción.

3.3 Métodos de excavación

Los métodos de excavación del desarrollo de las obras horizontales y verticales pueden ejecutarse mediante perforación y tronadura o de manera mecanizada (Núñez, 2022).

3.3.1 Perforación y tronadura

La perforación y tronadura puede utilizarse en las excavaciones de obras como el desarrollo de las calles y galerías, la apertura de bateas, la socavación basal, piques de traspaso y chimeneas. La ejecución de este proceso cumple con un ciclo de operaciones unitarias que incluyen desde la excavación hasta la fortificación de estos. Generalmente se realiza en obras cuyo el tipo de roca es roca dura (Núñez, 2022).

3.3.2 Construcción mecanizada

La construcción mecanizada es la excavación mediante equipos mecánicos excavadores los cuales se pueden utilizar para las obras de desarrollo horizontal, vertical o inclinadas. Si bien este sistema permite optimizar el tiempo en la construcción de estas obras, la mayor parte de las excavaciones se siguen realizando mediante perforación y tronadura, debido a la poca flexibilidad de estos equipos, ya que, para utilizar este método, se necesita que la roca presente las mismas condiciones en todo el proceso y que el tipo de roca no sea muy dura porque podría generar que el avance sea más lento y que aumenten los costos.

Un ejemplo de los equipos para la construcción mecanizada son las maquinas tuneladoras (TBM), las cuales pueden ser utilizadas para excavaciones horizontales que tengan una gran longitud y radios de curvaturas pequeños (Gacitúa, 2012).

Por otro lado, se encuentra el sistema *drift boring*, el cual tiene varios beneficios en comparación con el método convencional como la perforación y tronadura, debido a que otorga una mayor seguridad, aumento en la tasa de producción, mayor grado de automatización, menor requerimiento de mano de obra, menor daño en paredes, mayor control del proceso, uniformidad del tamaño del desarrollo, eliminación de vibraciones que resultan de la tronadura y una mejor ventilación (Rostami, 2011). Además, tiene un mayor avance en el desarrollo de las obras, no genera daños en la roca circundante, requiere una menor fortificación o puede no necesitarla y gracias a la sección circular perfecta de excavación que realiza se tiene una mayor estabilidad del desarrollo (Tuck, 2011).

Este método cuenta con distintas técnicas según el desarrollo que se requiera hacer. Para el desarrollo de obras verticales o inclinadas, como piques de traspaso o chimeneas se puede utilizar el *drift boring* convencional, *down* o *blind hole boring*. Por otro lado, para el desarrollo de obras horizontales se utiliza el *drift boring* horizontal (Núñez, 2022).

- **Drift boring horizontal**

El desarrollo de la galería horizontal que realiza este equipo consta con una perforación horizontal entre dos accesos, como se muestra en la Figura 2, donde una broca de perforación atraviesa la roca para luego ser reemplazada por un escariador modular armable, el cual será el responsable de realizar la excavación en reversa hacia el equipo. El equipo LHD será el encargado de extraer la marina mientras se va escariando la roca. Una vez finalizado este proceso, se procede a desarmar el escariador y a retirar los equipos (Núñez, 2022).

Este método puede ser utilizado en roca competente cuando los equipos tuneleros son muy grandes o la perforación y tronadura está restringida o prohibida. Los diámetros de galería que puede realizar están en el rango de 0.6 – 4.5 m.

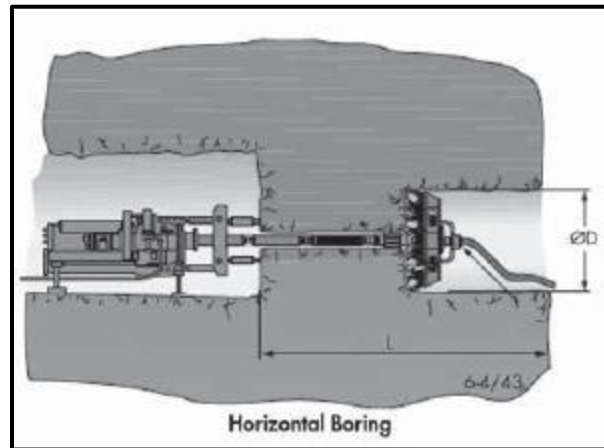


Figura 2: Diseño drift boring horizontal (Rostami, 2011).

3.4 Capacidad productiva y altura de bloque

3.4.1 Altura de bloque

En el método de hundimiento *block caving*, el alto de la columna a extraer se determinará según la geometría del cuerpo mineralizado y que se pueda obtener un beneficio económico de esta. Según Ovalle y Pesce (2004), las columnas deben ser de menor altura (hasta 400 m), para que así se pueda acelerar la puesta en marcha del proyecto (con el fin de disminuir los tiempos de retornos), se concentre la explotación en un sector de alta ley (de esta manera mejoraría el flujo de caja) y se adapte a la infraestructura existente.

La altura de los bloques de los métodos de hundimiento de *block* y *panel caving* ha ido aumentando con los años, ya que antes del año 1970 la altura típica era de 100 m, luego aumentó a 160 m al año 1990 y finalmente desde 1990 la altura es de 240 m. (Flores et al., 2004). En la Figura 3 se puede observar la evolución que ha tenido la altura de los bloques en los métodos de hundimientos ya mencionados.

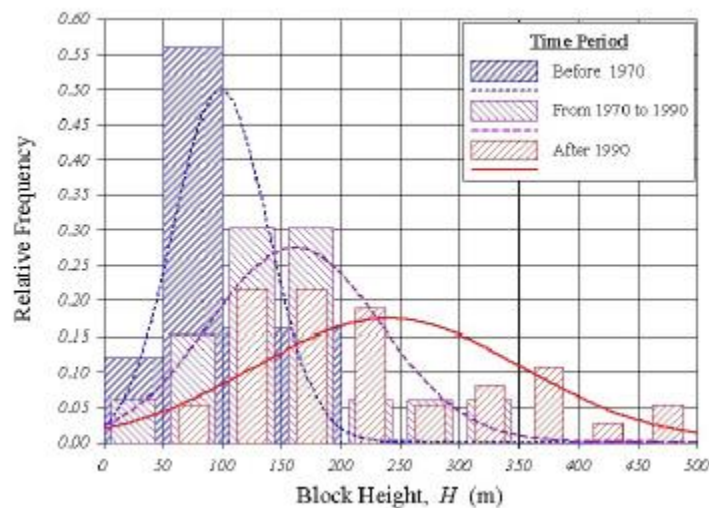


Figura 3: Evolución de altura de bloque (Flores et al., 2004).

3.4.2 Capacidad productiva

La elección de la altura de bloque es relevante debido a que se relaciona directamente con la capacidad productiva, ya que según Ovalle y Perce (2004), la capacidad productiva de una mina estaría limitada por la tasa de socavación y la altura de columna. Esto puede observarse en la Ecuación 1 propuesta por Ovalle (2012):

$$MPC = H \cdot V_p \cdot \gamma \cdot Ro$$

Ecuación 1: Máxima capacidad productiva para el método block caving.

Donde:

MPC (t/a): Máxima capacidad productiva

H (m): Altura de cuerpo mineralizado

V_p (m²/a): Tasa de preparación

γ (t/m³): Densidad del material *in situ*

Ro (fracción de 1): Recuperación operacional

Esta fórmula de capacidad productiva máxima sirve para los métodos de hundimiento como *sublevel*, *panel* y *block*. Para los últimos métodos mencionados, se utiliza la altura del cuerpo mineralizado, a diferencia del *sublevel caving*, que se calcula con el ancho o la longitud de este.

La tasa de preparación, para el caso del hundimiento con *block caving*, corresponde a la preparación de la base del cuerpo mineralizado, es decir, los puntos de extracción socavados por mes o por año. Actualmente, en un estudio confidencial de benchmarking realizado por JRI, se indica que la media de bateas extraídas al mes son 2 y el máximo son 4.

La densidad utilizada es la densidad *in situ* del material, el cual va a depender de la mineralización, ya que varían desde 2,4 t/m³ (minas metálicas) a 4,5 t/m³ (minas de hierro).

La recuperación operacional para los métodos de hundimiento *block* y *panel caving* pueden tener casi un 100% de recuperación, aunque en muchos casos no es así ya que depende de factores como las condiciones del terreno, la calidad del diseño y la calidad de la operación minera (la calidad de la socavación).

3.5 Malla de extracción

La malla de extracción es la distribución geométrica que van a tener los puntos de extracción para extraer el mineral desde el nivel de hundimiento al nivel de producción (Chacón, 1980). La construcción de esta es realizada en la preparación minera, junto con el desarrollo del nivel de hundimiento.

Está compuesta por las calles de producción y las galerías de zanjías. Los parámetros que la definen son las distancias entre las calles perpendicular a las calles, el ángulo entre calle y zanja, la distancia entre zanjías paralelas a las calles y la distribución de elipsoides de extracción.

La disposición de elipsoides puede representarse a través de configuraciones que se pueden observar en la Figura 4 y estas a su vez, se pueden distribuir en tres formas:

- Elipsoides separados
- Elipsoides tangentes
- Elipsoides traslapados

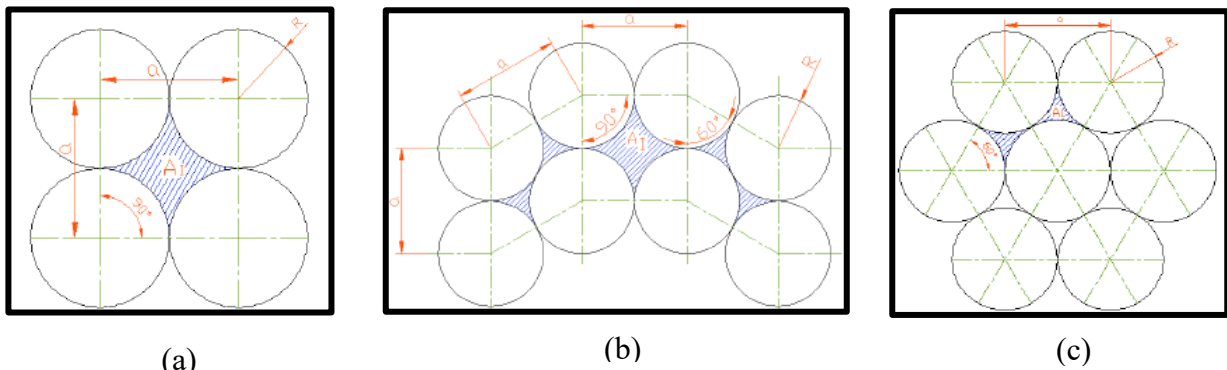
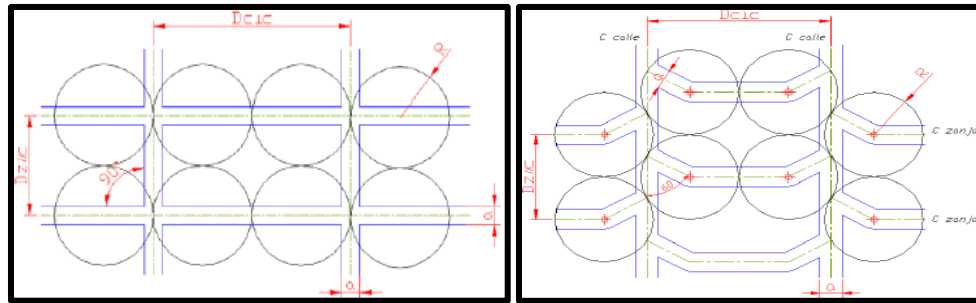


Figura 4: (a) Configuración cuadrada, (b) Configuración mixta, (c) Configuración triangular (Cavieres et al., 2006).

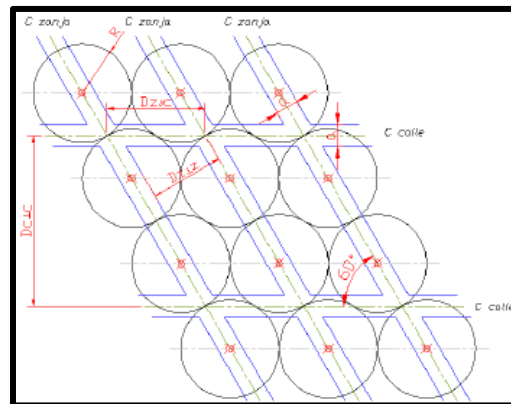
Para determinar el diseño de la malla de extracción se debe definir la operación del método a realizar, analizar y comparar las ventajas y desventajas de las distintas configuraciones existentes y estudiar los tipos de mallas que se pueden aplicar a los métodos *block* y *panel caving*. Según Cavieres et al. (2006), estos tipos de mallas se observan en la Figura 5 y pueden ser:

- Malla cuadrada
- Malla tipo Henderson
- Malla tipo Teniente



(a)

(b)



(c)

Figura 5: (a) Malla Cuadrada, (b) Malla Henderson, (c) Malla Teniente (Cavieres et al., 2006).

En Chile, el diseño más utilizado en minería subterránea a gran escala es la malla tipo Teniente (Cavieres et al., 2006). Además, según Esterhuizen y Laubscher (1992), es el diseño más resistente en comparación con los otros.

El diseño de malla de extracción debe cumplir con tres condiciones (Chacón, 1980):

- Ser lo suficientemente estrecha para que los volúmenes en movimiento se intercepten en la altura adecuada para así evitar pérdidas de mineral y una dilución prematura.
- Ser lo suficientemente amplia para maximizar el área de sustentación del nivel, minimizar el costo de desarrollo y permitir una operación eficiente de los equipos cargadores.
- Puntos de extracción equidistantes, esto significa que la distancia entre estos debe ser igual desde cualquier dirección considerada.

Bajo la condición de este último punto, se utiliza el método de Voronoi, con el cual se puede determinar lo que se extraerá por cada punto de extracción mediante un algoritmo que define el área de influencia de un punto en basándose en sus vecinos más cercanos (Nelis, 2021).

Para las mallas tipo Teniente, el resultado de este algoritmo para cada punto es una base hexagonal, generando un diseño tipo panal de abeja. En la Figura 6 se puede observar este procedimiento.

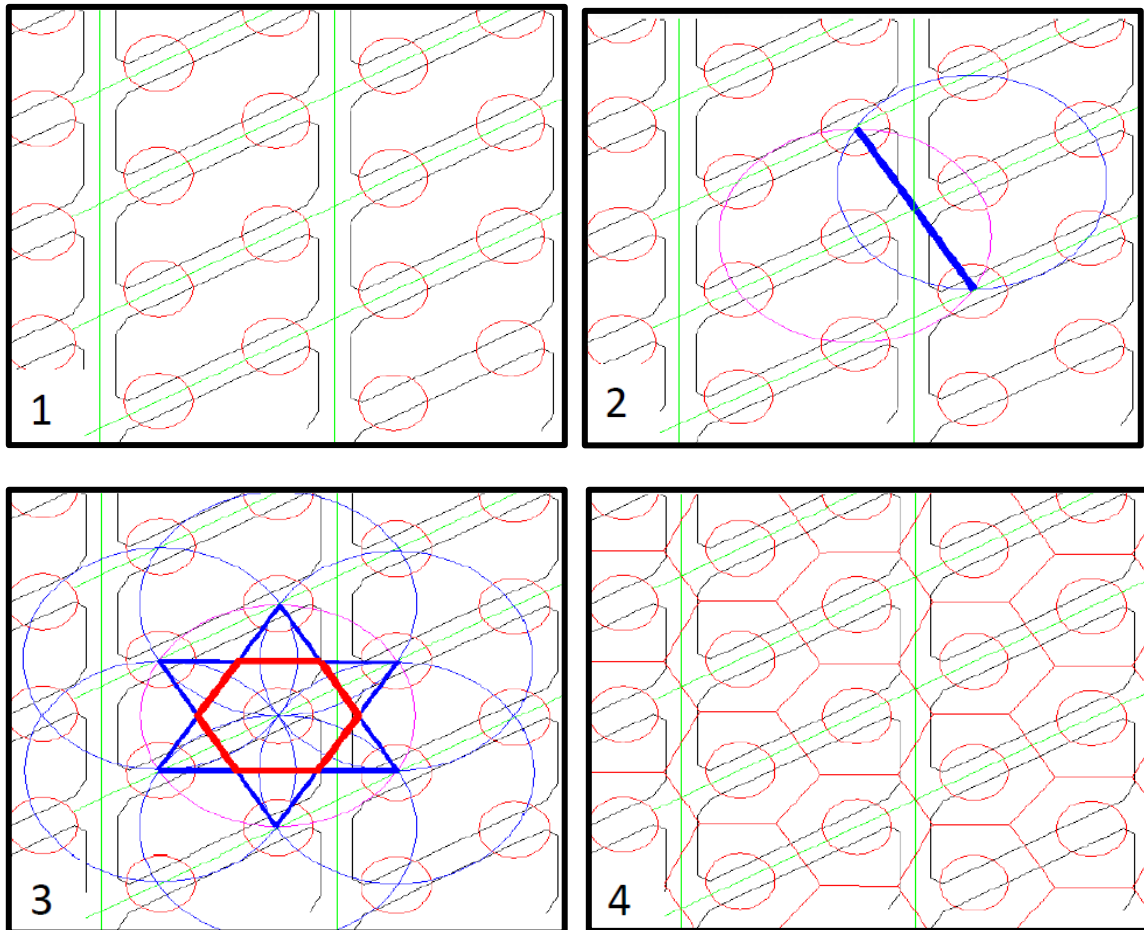


Figura 6: Algoritmo de Voronoi (Nelis, 2021).

El procedimiento consta con que, al ser puntos equidistantes, se forma un hexágono alrededor de un punto, el cual se obtiene a través de dos triángulos equiláteros dispuestos al revés de forma que rodeen a este punto. Este hexágono se dispone en todos los puntos de la malla formando el panal de abeja, como se explicó anteriormente.

4 Metodología

La metodología de trabajo a seguir para el desarrollo de esta memoria se observa en la Figura 7 y se definirá cada etapa a continuación:

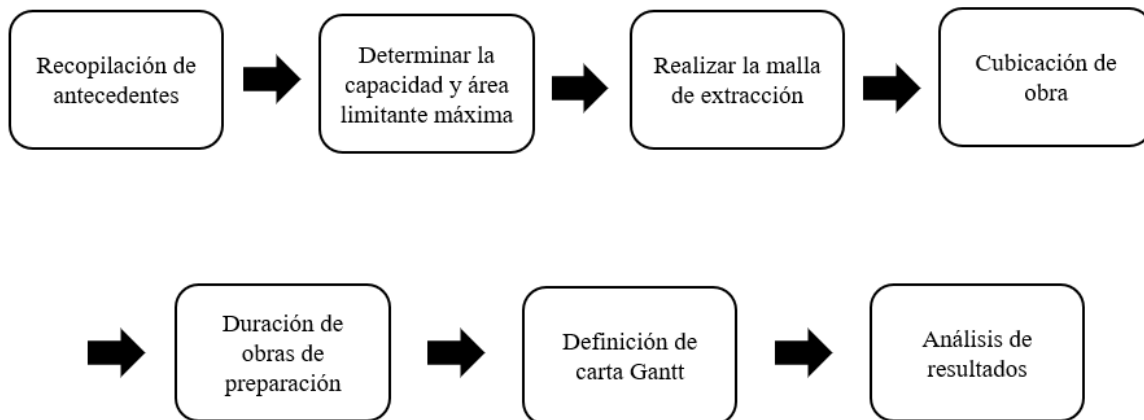


Figura 7: Esquema de trabajo.

4.1 Recopilación de antecedentes

Se seleccionó un estudio que cuenta con dos diseños de malla del nivel de producción con el método *block caving*, uno realizado con perforación y tronadura y otro realizado con el sistema de *drift boring*, los cuales tienen su estudio previo de estabilidad, cubicación y tiempo de duración de cada obra.

4.2 Determinar la capacidad y área limitante máxima

Con el diseño de malla escogido y los datos recopilados del benchmarking, se realizará el cálculo de la tasa de socavación, el cual servirá para obtener la capacidad de producción y área de preparación máxima que se puede realizar con el método *block caving*.

4.3 Realizar la malla de extracción

Con el algoritmo de voronoi, se definirá el área de lo que se puede extraer por cada punto de extracción del diseño de malla con el sistema convencional y con *drift boring*. El área obtenida total se comparará con el resultado de área limitante, de manera que se pueda determinar la nueva planificación de preparación que se tendrá para cada sistema para alcanzar la capacidad máxima. El diseño de malla de extracción se realizará con AutoCAD.

4.4 Cubicación de la obra

Definida la nueva malla de extracción para ambos casos, se realizará la cubicación de cada obra mediante una relación entre la cubicación y puntos de extracción del estudio del caso base, de manera que se pueda definir la nueva longitud que tendrán los nuevos diseños.

4.5 Duración de obras de preparación

Luego de realizar la cubicación, se calculará la duración en días de cada obra, para ambos diseños, mediante la Ecuación 2:

$$Tiempo\ por\ obra\ [día] = Entero \left(\frac{Total\ actividad\ [u]}{Rendimiento\ \left[\frac{u}{d-N^{\circ}\ cuadrillas} \right] \cdot N^{\circ}\ cuadrillas} \right) + 1$$

Ecuación 2: Duración por obras en días (Núñez, 2022).

Donde:

Total actividad: longitud, área o volumen efectiva de cada actividad minera.

Rendimiento: rendimiento de cada cuadrilla por día.

N° cuadrillas: cantidad de cuadrillas por actividad.

4.6 Definición de la carta Gantt

Para realizar la carta Gantt, se definió la secuencia de trabajo a realizar por cada obra luego de tener los días de trabajo que necesitan para su preparación, por lo que una vez determinada la secuencia, fue posible definir la carta Gantt.

4.7 Análisis de los resultados

Finalmente, se realizará una comparación con los resultados obtenidos para cada diseño y un análisis de estos, con el fin de determinar si la planificación de preparación tiene influencia en la capacidad de producción.

5 Antecedentes

Este estudio es ejecutado en base a la preparación minera de un modelo de *block caving*, en el cual se realizará la comparación de la planificación de este a través de distintas metodologías de excavación para las galerías horizontales. Un modelo es desarrollado con P&T y el otro modelo con el sistema *drift boring* horizontal.

Cabe destacar que este modelo ya cuenta con el análisis de estabilidad en el nivel de producción y de hundimiento, de ambos diseños, y con el diagrama de perforación a utilizar, por lo que en este estudio no se presentarán ya que no están incluidos en el alcance de esta memoria.

Además, como se mencionó en los alcances, este estudio está limitado a la etapa de infraestructura de explotación, por lo que sólo se consideraron los datos que estuvieran relacionados con esto.

5.1 Diseño minero con P&T

5.1.1 Nivel de hundimiento

Este nivel considera 9 galerías ubicadas sobre las calles de producción con una orientación SE y un espaciamiento de 30 m, como se observa en la Figura 8. La dimensión de esta galería es de 3.7 x 3.7 m.

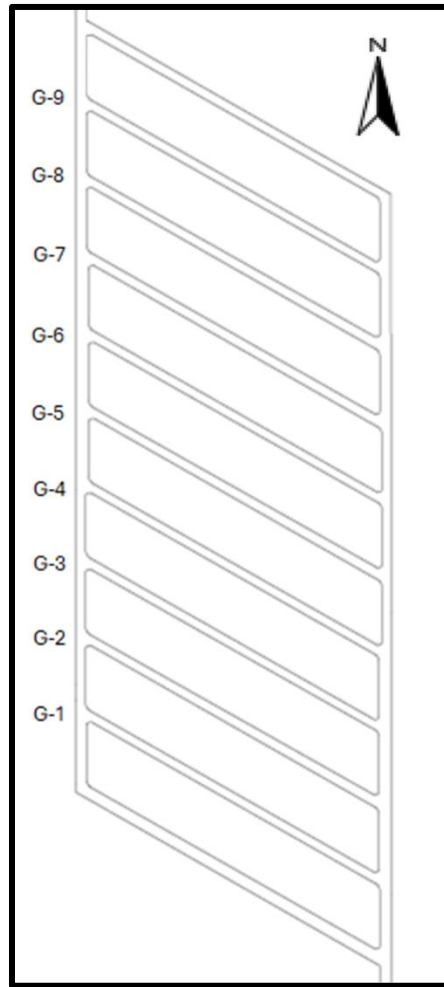


Figura 8: Diseño del nivel de hundimiento con perforación y tronadura.

5.1.2 Nivel de producción

El nivel de producción cuenta con una malla de extracción tipo teniente 15 x 15, la cual se observa en la Figura 9 y cuenta con 9 calles de producción que se encuentran a 30 m y 6 galerías de zanja en perpendicular a las calles de producción, las cuales tienen un espaciamiento de 15 m. En la Tabla 2 se especifican las dimensiones de estas galerías.

Tabla 2: Dimensiones de galerías del nivel de producción.

Galerías	Dimensiones
Calles de producción	4.1 x 4.1
Galerías de zanja	4.1 x 4.1

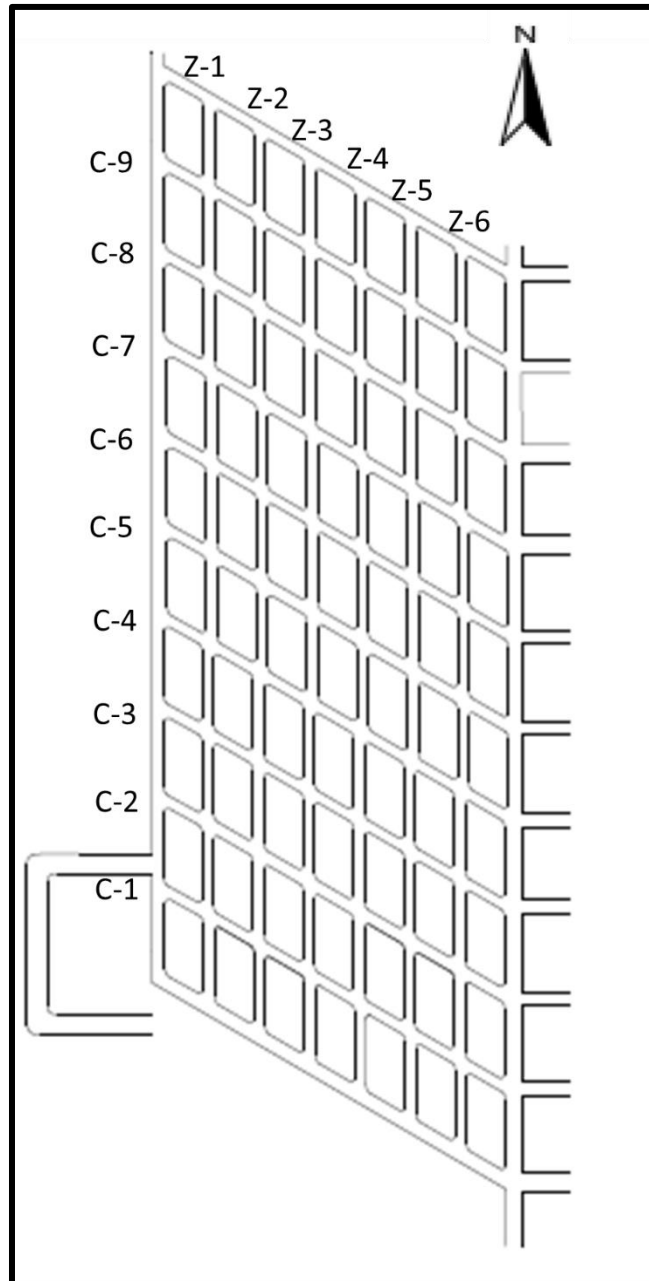


Figura 9: Diseño nivel de producción sistema convencional.

5.1.3 Tiempo de preparación

La duración en días de cada obra fue calculada con la formula mencionada en la metodología, sin embargo, como se explicó anteriormente, no se consideró para el tiempo total el desarrollo de cabeceras debido a que es parte de la etapa de infraestructura de preproducción, por lo que se modificó la tabla, la carta Gantt y el tiempo final del modelo utilizado. En la Tabla 3, se puede observar la cubicación de las obras a realizar.

Tabla 3: Cubicación de obras sistema convencional.

Descripción	Cantidad	Unidad
Nivel de hundimiento		
Desarrollo GH 3.7 x 3.7 m	769	m
Chimeneas 2.0 x 2.0 m	91	m
Perforación radial	91 879	ml
Nivel de producción		
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 m	1 000	m
Desarrollo galería zanja	1 800	m
Chimeneas piloto 1.5 x 1.5 m	516	m
Pavimento H-35 con fibra en calles	1 944	m ³
Suministro y construcción de punto de carguío	120	u
Perforación zanjas	15 912	ml

A continuación, en la Tabla 4 se indica el tiempo de preparación de cada obra en días:

Tabla 4: Duración de cada obra con sistema convencional.

Descripción	Rendimiento Unidad/d-R	#R	Duración días
Nivel de hundimiento			
Desarrollo GH 3.7 x 3.7 con malla, split set y líneas de agua, comunicaciones y energía	7	2	55
Chimeneas 2.0 x 2.0	20	1	5
Perforación radial	120	2	383
Nivel de producción			
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 S con malla, perno 2.4 m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	36
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 N con malla, perno 2.4 m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	36
Desarrollo de galería de zanja S con malla y perno 2.4 m	7	2	65
Desarrollo de galería de zanja N con malla y perno 2.4 m	7	2	65
Chimeneas Piloto 1.5 x 1.5 m	20	1	26
Pavimento H-35 con fibra en Calles	20	2	49
Suministro y construcción de punto de carguío	0.08	4	376
Perforación zanjas	120	2	67

La secuencia constructiva para determinar el tiempo total de la preparación minera es:

- 1) Excavar las galerías de hundimiento mediante perforación y tronadura.
- 2) La perforación radial de socavación se realizará cuando se complete la mitad de la excavación de las galerías de hundimiento.
- 3) Las chimeneas piloto se realizarán al finalizar las galerías de hundimiento.
- 4) Las calles de producción del área sur se comenzaron a desarrollar 19 días después de comenzar el desarrollo de las galerías de hundimiento.

- 5) Una vez finalizadas estas, se realiza el desarrollo de las calles de producción del área norte y se comienza con el desarrollo de las galerías de zanja del área sur.
- 6) Al finalizar las calles de producción del área norte se realiza el desarrollo de las galerías de zanja del área norte.
- 7) La perforación de chimeneas piloto se realizará después del desarrollo de calles de producción y galerías de zanja.
- 8) Al finalizar el desarrollo de las galerías de zanja sur, se realizará la instalación del pavimento en calles y la construcción de puntos de extracción simultáneamente.
- 9) La perforación de zanjas se realizará una vez finalizado el proceso de perforación radial.

Con la secuencia de trabajo ya definida, se realizó la carta Gantt, la cual se observa en la Figura 10 y diferencia las obras realizadas con P&T (color rosado) de las de pavimento (color gris):

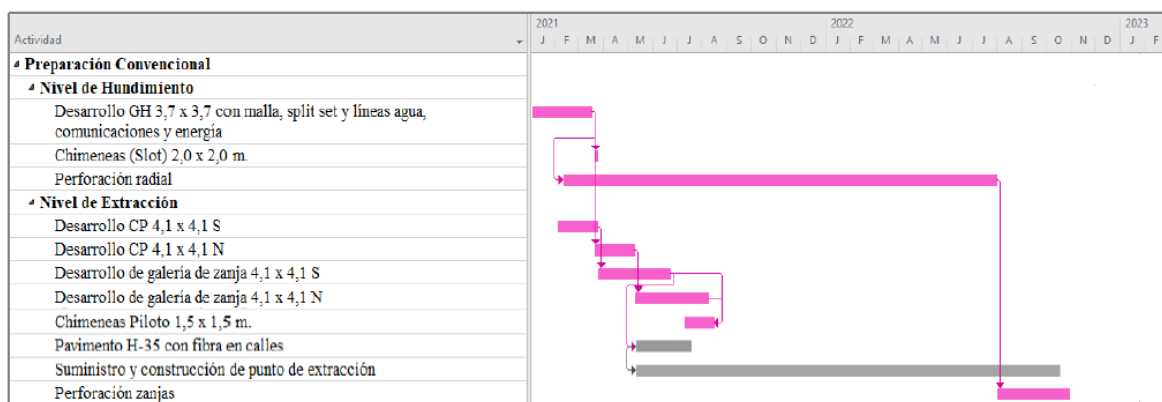


Figura 10: Carta Gantt de la preparación minera con sistema convencional.

En la Tabla 5 se resume la duración que tendrá cada nivel y el total de la preparación minera con el sistema de perforación y tronadura.

Tabla 5: Duración total con sistema convencional.

Tiempo nivel de hundimiento (día)	411
Tiempo nivel de producción (día)	455
Tiempo total (día)	455

5.2 Diseño minero con sistema *drift boring* horizontal

5.2.1 Nivel de hundimiento

El nivel de hundimiento está conformado por 20 galerías con la orientación SE y espaciamiento de 15 m, como se observa en la Figura 11. Para este caso, las galerías de hundimiento son realizadas con el sistema *drift boring* y se encuentran entre las calles de producción y galerías de zanja. El diámetro de las galerías es de 3,7 m.

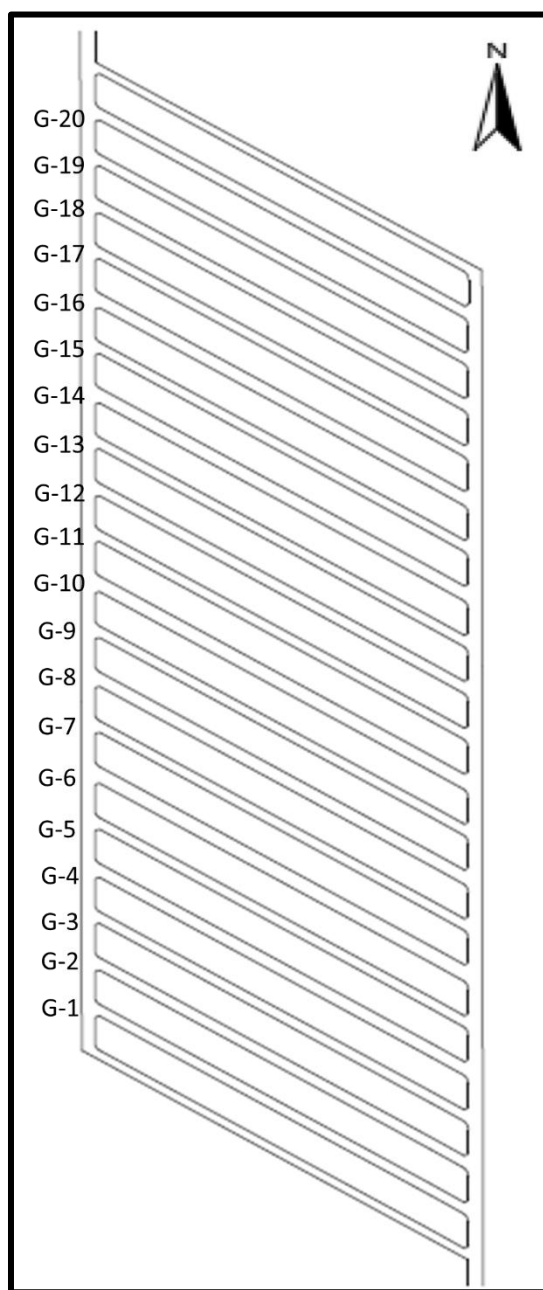


Figura 11: Diseño de nivel de hundimiento para el sistema mecanizado.

5.2.2 Nivel de producción

El nivel de producción cuenta 9 calles de producción, 10 galerías de zanja ubicadas paralelamente a las calles de producción (ambas con orientación SE) y 6 estocadas ubicadas a 60° de las calles de producción y galerías de zanja, con orientación NS. Debido a que se utilizará el sistema *drift boring* para las galerías y desarrollos horizontales, se realizarán excavaciones en el ingreso Este de las calles de producción para posicionar el equipo *drift borer*.

En la Figura 12, la zona encerrada indica las galerías de zanja, estocadas y calles de producción, las cuales están realizadas con el equipo *drift borer*, mientras que las otras obras como cabeceras, accesos y excavaciones se llevan a cabo mediante perforación y tronadura.

En la Tabla 6, se puede observar que las galerías de zanja tienen un diámetro menor al de las calles de producción y estocadas, esto se justifica por la función que tiene, ya que servirá como un desarrollo temporal para el ingreso de equipos con menores dimensiones que retirarán la marina cuando el equipo *drift borer* realice la galería y para la apertura de la zanja longitudinal.

Tabla 6: Dimensiones galerías del nivel de producción.

Galerías	Dimensiones	Unidad
Calles de producción	4,1	m
Galerías de zanja	3,7	m
Estocadas	4,1	m

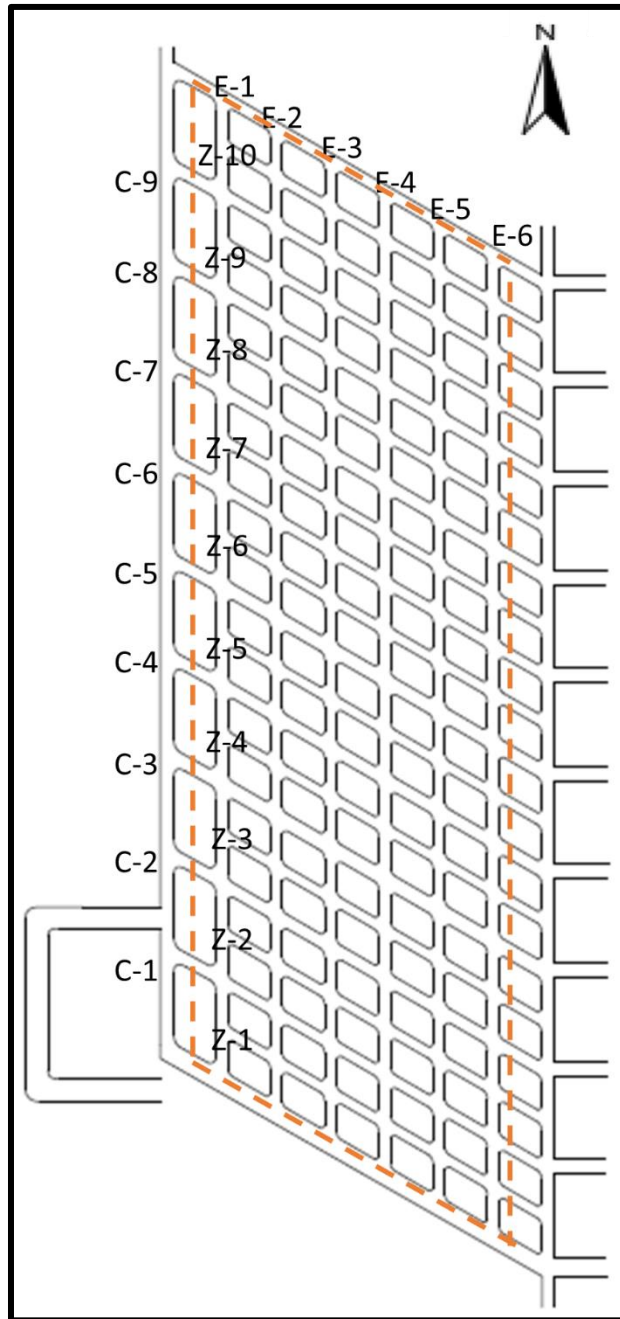


Figura 12: Diseño nivel de producción para el sistema mecanizado.

Debido a que en este diseño se utiliza el equipo mecanizado *drift borer* para el desarrollo de las galerías horizontales, se debe considerar la instalación de estructuras de hormigón (dovelas) en la planificación de la preparación. Las dovelas cumplen la función de permitir el tránsito de los equipos mineros por las galerías que tengan sección circular (obtenidas por el equipo *drift borer*), como las calles de producción y estocadas, en la Figura 13 se observa su aplicación.

Estas estructuras de hormigón son prefabricadas, su altura es de 0,65 m, su ancho es de 3 m y su espesor es de 0,5 m. En la Figura 14, se puede observar que presentan una canaleta semicircular en la parte inferior que sirve como vía de escurrimiento de agua.

La instalación de las dovelas se lleva a cabo mediante cargadores que las transportarán para posicionarlas y anclarlas en las calles de producción y estocadas.

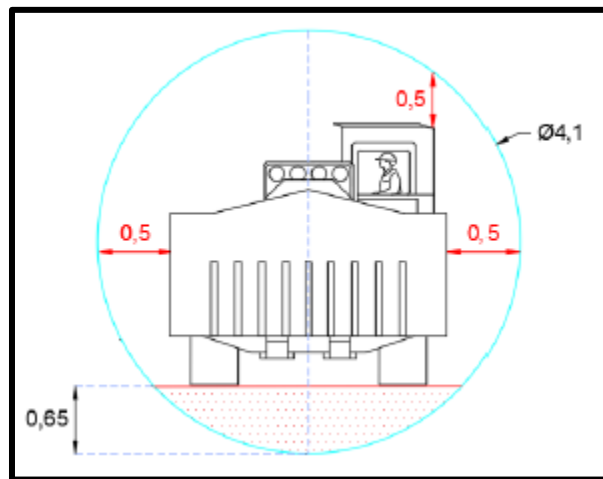


Figura 13: Disposición de dovela en la calle de producción (Núñez, 2022).

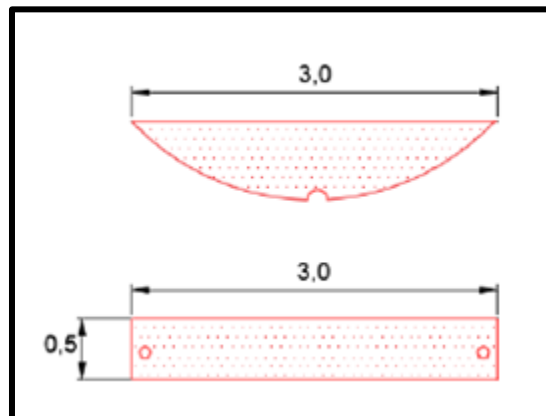


Figura 14: Dimensiones de dovelas (Núñez, 2022).

5.2.3 Tiempo de preparación

En este caso, también se calculó la duración en días de cada obra y como se explicó anteriormente, se modificaron los resultados del modelo utilizado debido a que no se consideraron las obras de desarrollo de cabeceras.

La cubicación para el diseño con sistema *drift boring* se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7: Cubicación de obras con sistema mecanizado.

Descripción	Cantidad	Unidad
Nivel de hundimiento		
Desarrollo GH d = 3.7 m	1 500	m
Chimeneas 2.0 x 2.0 m	202	m
Perforación radial	55 397	ml
Nivel de producción		
Desarrollo CP d = 4.1 m	822	m
Desarrollo de estocadas d = 4.1 m	1 332	m
Desarrollo de galerías zanja d = 3.7 m	750	m
Chimeneas piloto 1.5 x 1.5 m	184	m
Dovela (2 x metro)	1 848	m ³
Suministro y construcción de punto de carguío (dovela de techo)	81	m ³
Perforación zanja longitudinal	24 752	ml
Perforación destace batea	4 320	ml

En la Tabla 8 se presentan los tiempos de duración de cada obra:

Tabla 8: Duración de cada obra con sistema mecanizado.

Descripción	Rendimiento Unidad /d-R	#R	Duración días
Nivel de hundimiento			
Desarrollo GH d = 3.7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	15	1	101
Chimeneas 2.0 x 2.0 m	20	1	11
Perforación radial	120	2	231
Nivel de producción			
Desarrollo CP d = 4.1 m	15	1	55
Desarrollo de estocadas d = 4.1 m	15	2	45
Desarrollo de galerías de zanja d = 3.7 m	15	1	51
Chimeneas piloto 1.5 x 1.5 m	20	1	10
Dovelas	30	1	62
Suministro y construcción de punto de carguío (dovela de techo)	15	1	9
Perforación zanja longitudinal	120	2	104
Perforación destace batea	120	2	19

La secuencia constructiva para determinar el tiempo total de la preparación minera con equipo *drift borer* es:

- 1) Excavación de las galerías de hundimiento con el equipo *drift borer*.
- 2) La perforación radial se realizará con perforación y tronadura cuando se complete el desarrollo de la mitad de las galerías de hundimiento.
- 3) La perforación de chimeneas piloto se realizará al final el desarrollo de las galerías de hundimiento.
- 4) Con el equipo *drift borer* utilizado para las galerías de hundimiento se realizará la excavación de las galerías de zanja e ingresará un nuevo equipo *drift borer* el cual desarrollará las calles de producción.

- 5) Una vez que finalice la excavación de las calles de producción y galerías de zanja, se realizará el desarrollo de las estocadas utilizando los dos equipos *drift borer*.
- 6) Cuando finalice el desarrollo de las galerías de zanja, se procederá a realizar la perforación de la zanja longitudinal.
- 7) Se instalarán las dovelas en las calles de producción y en las estocadas.
- 8) Luego se instalarán las dovelas en el techo de los puntos de carguío.
- 9) A continuación, se realizará la perforación de las chimeneas piloto.
- 10) La perforación de destace de bateas se realizará una vez terminada la perforación de la galería de zanja.

Luego de definir la secuencia de trabajo, se realiza la carta Gantt, la cual se puede visualizar en la Figura 15 y que diferencia las obras realizadas con *drift borer* (celeste) con las de P&T (rosado) y pavimento (gris).

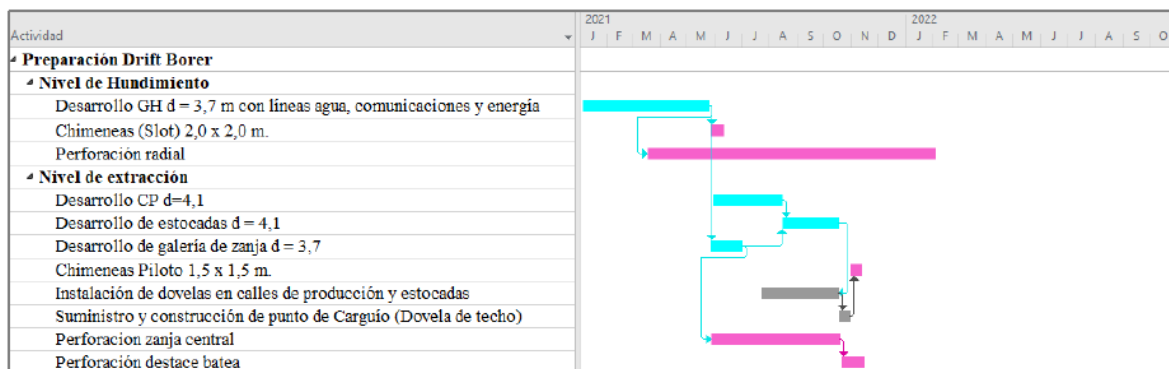


Figura 15: Carta Gantt de la preparación minera para sistema mecanizado.

La duración de desarrollo de cada nivel y de la preparación minera total se resume en la Tabla 9.

Tabla 9: Duración total para sistema mecanizado.

Tiempo nivel de hundimiento (día)	282
Tiempo nivel de producción (día)	145
Tiempo total (día)	282

6 Desarrollo

A partir de los valores de capacidad y área limitante, se determinará un plan de preparación minera con el fin de comparar las obras realizadas en cada caso y verificar si se puede realizar en el periodo de un año. De esta manera, se comprobará si optimizar las obras en la preparación minera influye en la capacidad de producción máxima.

6.1 Capacidad y área limitante

El valor de la capacidad limitante máxima de producción se obtuvo con la fórmula ya mencionada, para la cual se hicieron las siguientes consideraciones:

- La tasa de socavación se calculó con el máximo de bateas que se extraen al mes y se utilizó el área de diseño de preparación de block caving seleccionado, la cual es de 450 m².
- La altura de bloque es de 240 m, la que se usa actualmente según indica el benchmarking.
- La densidad in situ es de 2,6 ton/m³.
- La recuperación operacional será del 100% debido a que, en este análisis, se considera que las condiciones de terreno, calidad del diseño y del socavado son óptimas, por lo que su factor será 1.

Finalmente, se obtiene lo siguiente:

$$Tasa\ de\ socavación = 72\ m^2/día$$

$$Capacidad\ limitante\ máxima = 44\ 928\ tpd$$

Además, con la tasa de socavación obtenida, se realizó el cálculo del área limitante máxima, mediante la Ecuación 3, con el fin de obtener la cantidad de área que se debe preparar para alcanzar la producción máxima:

$$Área\ Limitante\ Máxima = tasa\ de\ socavación \cdot día \cdot mes$$

Ecuación 3: Área de preparación máxima.

$$Área\ limitante\ máxima = 21\ 600\ m^2/año$$

6.2 Caso diseño P&T

6.2.1 Diseño malla de extracción

Para obtener los parámetros, se aplicó el algoritmo de Voronoi, el cual se observa en la Figura 16. En la Tabla 10 se observan los parámetros obtenidos del diseño original, por lo que se observa que el área de este diseño es inferior al área máxima obtenida, por lo que se necesitará aumentar los puntos de extracción con la finalidad de que se logre la capacidad de producción máxima.

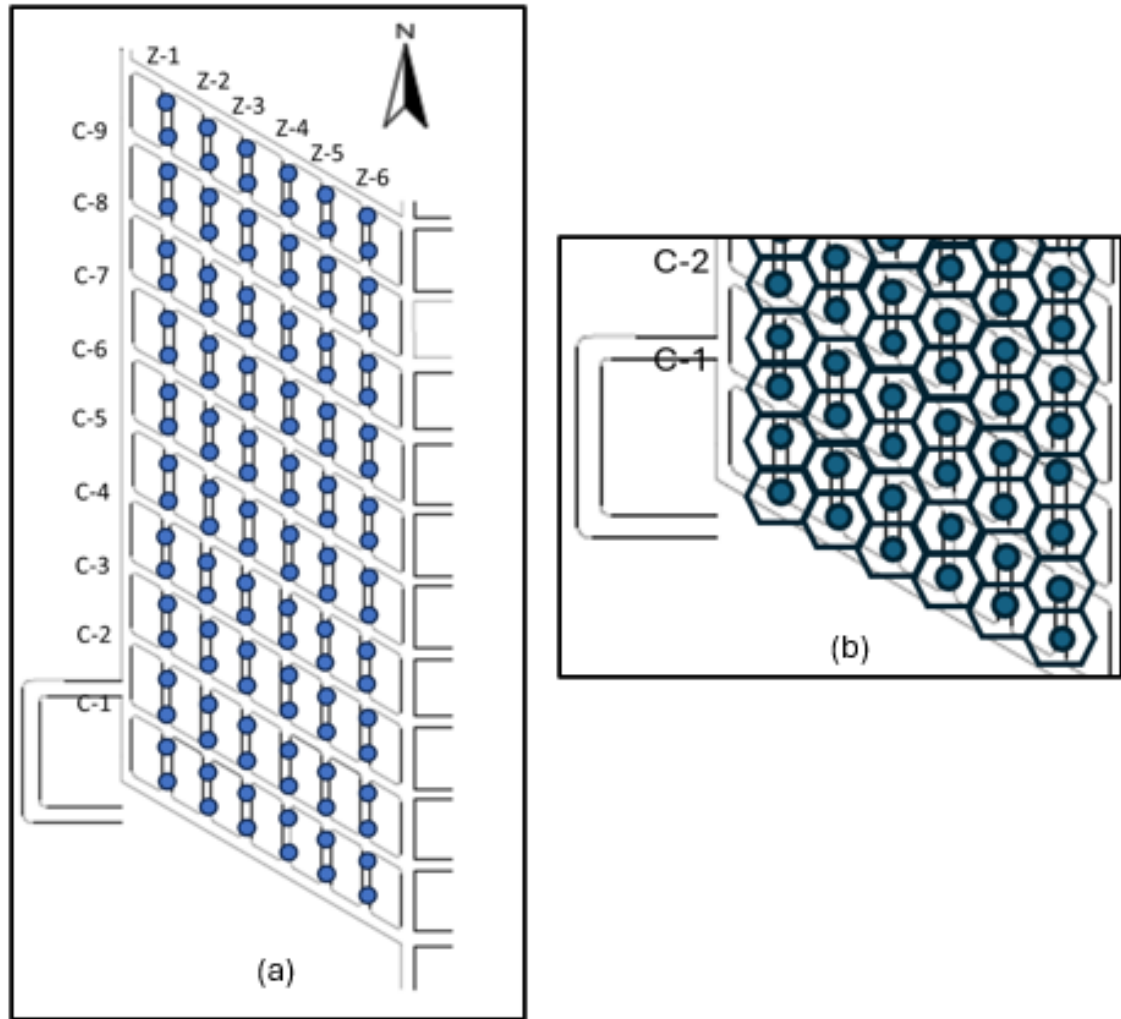


Figura 16: (a) Disposición general de puntos de extracción, (b) Algoritmo de Voronoi en diseño convencional.

Tabla 10: Área total preparada en el sistema convencional.

Puntos de extracción	120	unidad
Área punto de extracción	146	m ²
Área total	17 537	m ²

Realizando una relación entre el área máxima y el área de cada punto de extracción, se obtuvo que, para alcanzar la capacidad de producción máxima, se necesitarán 148 puntos de extracción, como se puede observar en la Tabla 11:

Tabla 11: Puntos de extracción que se deben preparar.

Puntos de extracción	148	unidad
Área punto de extracción	146	m ²
Área total	21 629	m ²

Debido a que se necesitan más puntos de extracción para lograr el área máxima, se debe modificar el diseño de malla original, de manera que se pueda obtener el diseño del nivel de producción que alcance la capacidad productiva requerida. Este nuevo diseño con los puntos de extracción obtenidos se observa en la Figura 17.

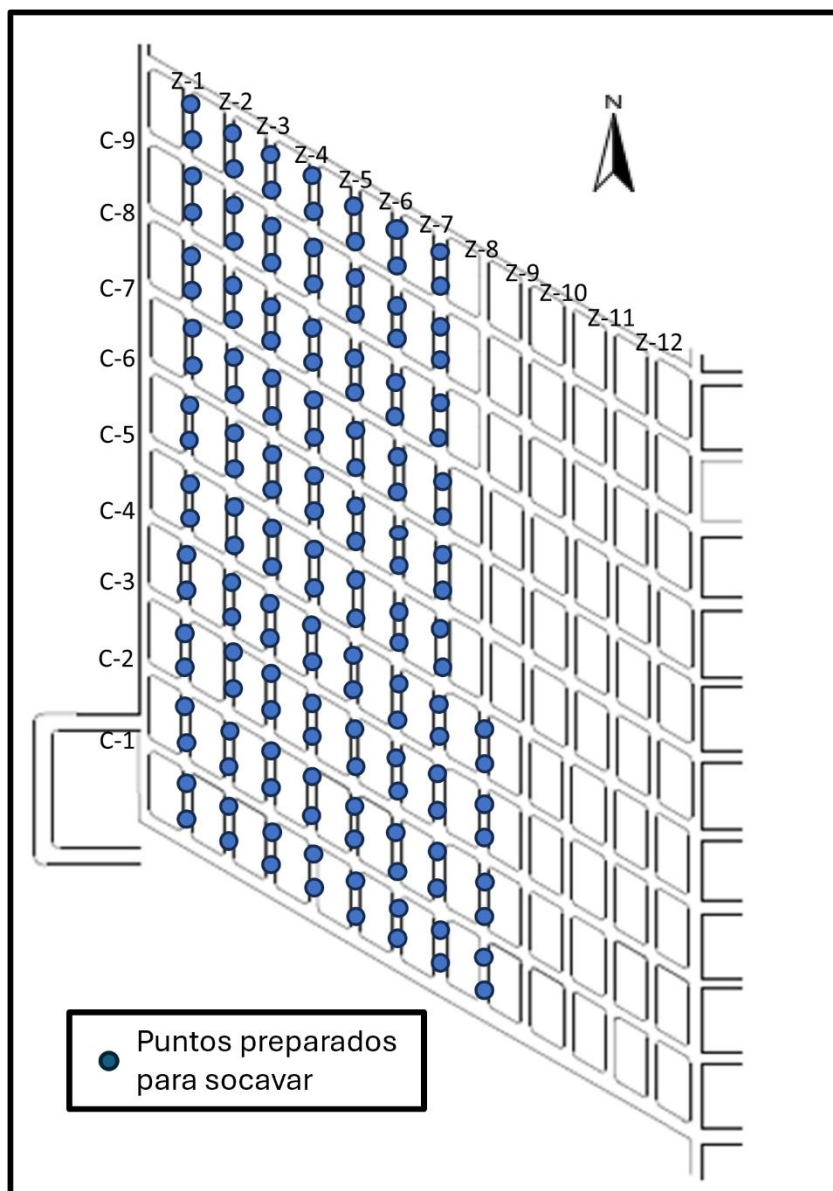


Figura 17: Diseño de malla con los puntos para socavar del sistema convencional.

En este nuevo diseño de malla, se mantuvo las calles de producción y aumentaron las galerías de zanja, sin embargo, no se realizaron modificaciones mayores ya que el resto de las construcciones no están consideradas en la planificación de este estudio.

Si bien se puede observar que el diseño de malla aumentó al doble, se considera que los puntos de extracción restantes (92) serán socavados en el año siguiente, por lo que en la planificación de la preparación sólo se considerarán 148 puntos.

6.2.2 Cubicación

Para la nueva cubicación, se hizo una relación entre la longitud de la obra original con los puntos de extracción que contiene, de manera que se obtuvo un índice el cual indica cuánto se necesita de cada actividad por punto de extracción, este se puede observar en la Tabla 12 que se muestra a continuación:

Tabla 12: Índice de cada unidad de obra por punto de extracción (sistema convencional).

OBRAS	Índice (un/PE)
NIVEL HUNDIMIENTO	
Desarrollo GH 3.7 x 3.7 m	6,4
Chimeneas (Slot) 2.0 x 2.0 m	0,8
Perforación Radial	765,7
NIVEL PRODUCCIÓN	
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 m	8,3
Desarrollo GZ	15
Chimeneas Piloto 1.5 x 1.5 m	4,3
Pavimento H-35 con fibra en calles	16,2
Suministro y construcción de punto de carguío	1
Perforación Zanjas	132,6

Con este índice calculado y los puntos de extracción que se necesitan en el diseño, se obtuvo la longitud, unidad y volumen que se necesita cada obra, los cuales se observan en la Tabla 13:

Tabla 13: Total de cada obra para la preparación minera.

OBRAS	Total obra	Unidad
NIVEL HUNDIMIENTO		
Desarrollo GH 3.7 x 3.7 m	948	m
Chimeneas (Slot) 2.0 x 2.0 m	112	m
Perforación Radial	113 317	ml
NIVEL PRODUCCIÓN		
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 m	1 233	m
Desarrollo GZ	2 220	m
Chimeneas Piloto 1.5 x 1.5 m	636	m
Pavimento H-35 con fibra en calles	2 398	m ³
Suministro y construcción de punto de carguío	148	un
Perforación Zanjás	19 625	ml

6.2.3 Duración de obras de preparación

Considerando el mismo rendimiento utilizado en el estudio base, se calculó la duración en días de cada obra, modificando la cantidad de cuadrillas con el fin de conseguir que las actividades se logren realizar en el periodo de un año, esto se puede observar en la Tabla 14.

Tabla 14: Duración de cada obra del sistema convencional.

OBRAS	Rendimiento (un/d-R)	#R (cuadrillas)	Duración (días)
NIVEL HUNDIMIENTO			
Desarrollo GH 3.7 x 3.7 m	7	1	136
Chimeneas (Slot) 2.0 x 2.0 m	20	1	6
Perforación Radial	120	4	237
NIVEL PRODUCCIÓN			
Desarrollo CP 4.1 x 4.1 m	7	2	89
Desarrollo GZ	7	2	159
Chimeneas Piloto 1.5 x 1.5 m	20	1	32
Pavimento H-35 con fibra en calles	20	2	60
Suministro y construcción de punto de carguío	0,08	14	133
Perforación Zanjas	120	4	41

6.2.4 Carta Gantt

Para la planificación de cada obra, se realizó la siguiente secuencia de actividades:

- 1) El desarrollo de galerías de hundimiento, calles de producción y galerías zanja se realizarán al mismo tiempo.
- 2) La perforación radial se comenzará a realizar una vez que se termine de excavar la primera galería de hundimiento, por lo que se desarrollarán en paralelo.
- 3) Cuando termine la excavación de las galerías de hundimiento, se desarrollarán las chimeneas.
- 4) En el nivel de producción, cuando finalicen las galerías zanja, se realizará el desarrollo de las chimeneas piloto, el pavimento en las calles de producción y el suministro y construcción de punto de carguío en simultáneo.

- 5) La perforación de zanjas se realizará una vez terminada la actividad de perforación radial.

A continuación, con la secuencia de trabajo y duración de cada obra calculada, en la Figura 18, se muestra la carta Gantt planificada para la etapa de preparación, en la cual el color rosado representa las obras realizadas con P&T y las grises son con pavimento.

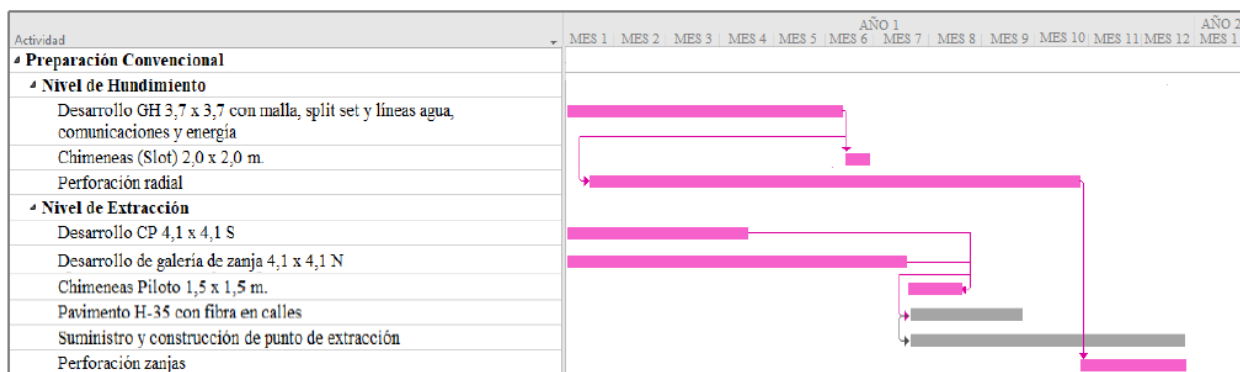


Figura 18: Carta Gantt de la preparación minera anual para el sistema convencional.

Finalmente, los tiempos obtenidos se pueden visualizar en la Tabla 15:

Tabla 15: Duración total para el sistema convencional.

Tiempo nivel de hundimiento (día)	250
Tiempo nivel de producción (día)	292
Tiempo total (día)	292

6.3 Caso diseño Drift Borer

6.3.1 Diseño malla de extracción

Como se observa en la Figura 19, para el análisis del caso con el diseño del equipo *drift borer*, se realizó el mismo procedimiento que para el caso realizado con perforación y tronadura. En la

Tabla 16, se observa que los parámetros del diseño base, son los mismos que en ese caso, por lo que también se deberá modificar el diseño de este caso.

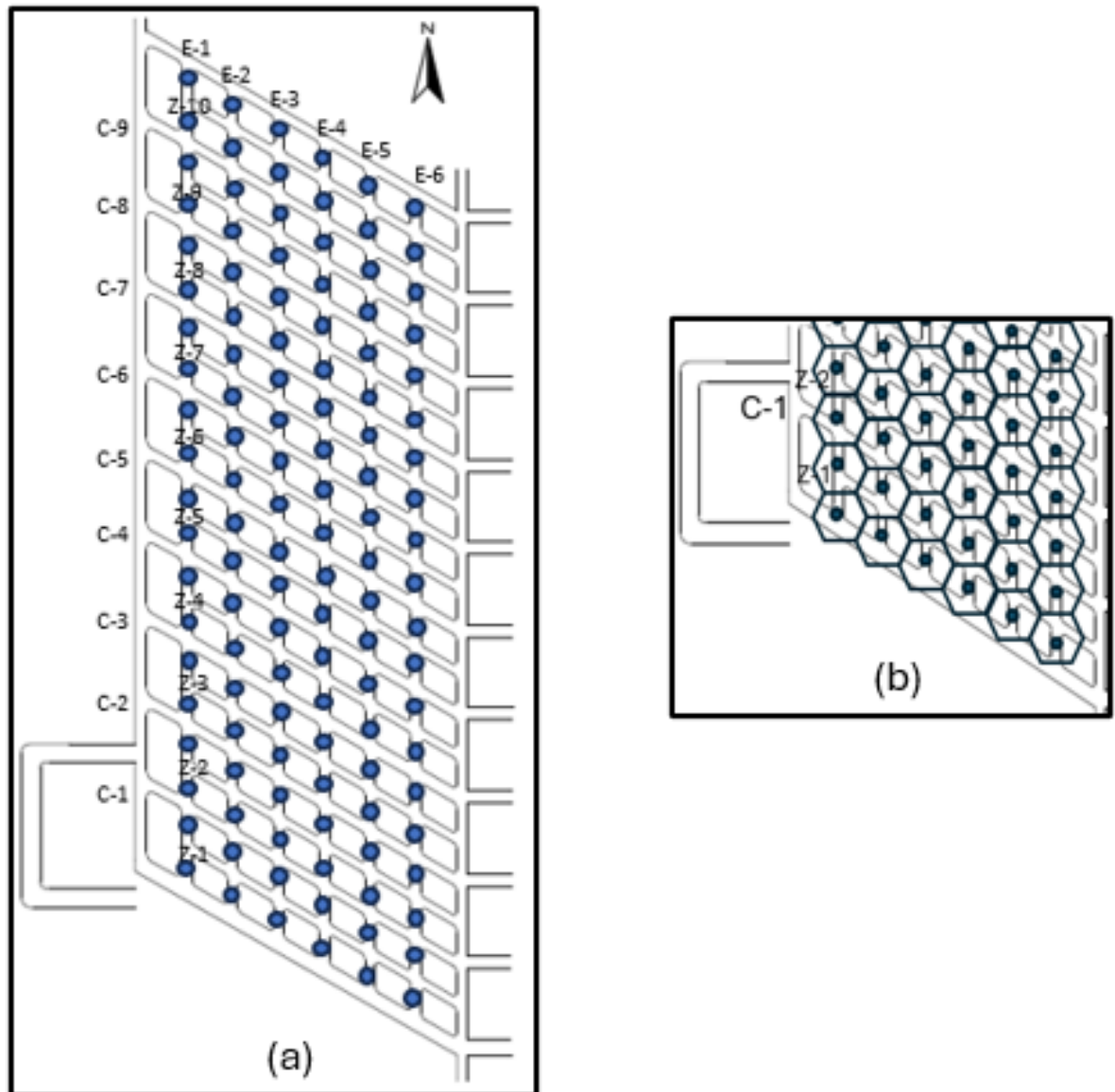


Figura 19: (a) Disposición general de puntos de extracción para el diseño mecanizado (b) Algoritmo de Voronoi del diseño mecanizado.

Tabla 16: Área preparación en el diseño con drift borer original.

Puntos de extracción	120	unidad
Área punto de extracción	146	m ²
Área total	17 537	m ²

Al igual que en caso anterior, se realizó una relación entre el área máxima y el área de cada punto de extracción, para así obtener la cantidad de puntos de extracción que se necesitan para alcanzar la capacidad de producción máxima, estos se observan en la siguiente Tabla 17:

Tabla 17: Puntos de extracción del nuevo diseño con drift borer.

Puntos de extracción	148	unidad
Área punto de extracción	146	m ²
Área total	21 629	m ²

Como se puede observar, es la misma cantidad de puntos que se necesitan para el caso anterior, por lo que el nuevo diseño del nivel de producción se muestra a continuación en la Figura 20:

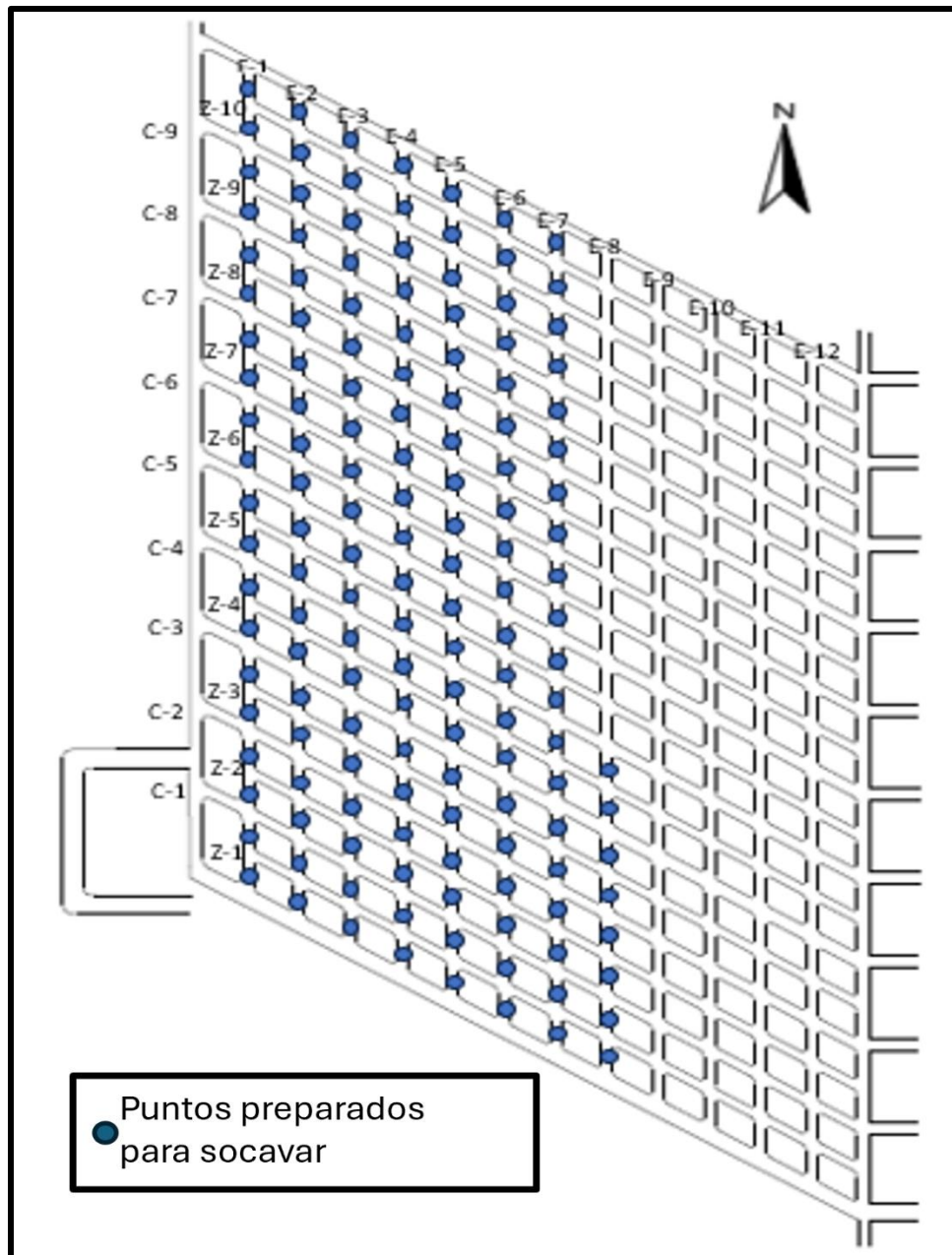


Figura 20: Diseño de malla con los puntos para socavar del sistema mecanizado.

Para este caso se mantuvo la cantidad de calles de producción y galería zanja, lo que aumentó fueron las estocadas, sin embargo, el resto de las obras no se modificaron ya que no están en los alcances de este estudio.

El diseño de malla fue aumentado al doble, por lo que los puntos de extracción restantes 92, se consideran en la planificación de socavación del año siguiente.

6.3.2 Cubicación

Para el cálculo de la cubicación de este diseño, se realizó una relación entre la longitud original de las obras y los puntos de extracción que contiene, por lo que se obtuvo el índice observado en la Tabla 18:

Tabla 18: Índice de unidad de obra por punto de extracción en el sistema mecanizado.

OBRAS	Índice [un/PE]
NIVEL HUNDIMIENTO	
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	12,5
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	1,7
Perforación radial	461,6
NIVEL PRODUCCIÓN	
Desarrollo CP d = 4,1 m	6,9
Desarrollo de estocadas d = 4,1	11,1
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	6,3
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	1,5
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas	15,4
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	1,0
Perforación zanja longitudinal	206,3
Perforación destace batea	36,0

Con estos índices, se logró determinar la nueva cubicación para este diseño con los puntos de extracción incorporados, la cual se muestra a continuación en la Tabla 19:

Tabla 19: Cubicación de cada obra para el sistema mecanizado.

OBRAS	Total obra	Unidad
NIVEL HUNDIMIENTO		
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	1 850	m
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	249	m
Perforación radial	68 323	ml
NIVEL PRODUCCIÓN		
Desarrollo CP d = 4,1 m	1 014	m
Desarrollo de estocadas d = 4,1	1 643	m
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	925	m
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	227	m
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas	2 279	un
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	148	un
Perforación zanja longitudinal	30 527	ml
Perforación destace batea	5 328	ml

6.3.3 Duración de obras de preparación

En el cálculo de duración de cada obra por día, se consideró el mismo rendimiento que se utilizó en el estudio del caso base, en cambio, la cantidad de cuadrillas fue modificada con la finalidad de que las obras se realicen en el plazo de un año. En la Tabla 20 se puede observar la duración que tendrá cada actividad.

Tabla 20: Duración de cada obra en el sistema mecanizado.

OBRAS	Rendimiento (un/d-R)	#R (cuadrillas)	Duración (días)
NIVEL HUNDIMIENTO			
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	15	1	124
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	20	1	13
Perforación radial	120	2	285
NIVEL PRODUCCIÓN			
Desarrollo CP d = 4,1 m	15	1	68
Desarrollo de estocadas d = 4,1	15	1	110
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	15	1	62
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	20	1	12
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas	30	1	76
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	15	1	10
Perforación zanja longitudinal	120	1	255
Perforación destace batea	120	1	45

6.3.4 Carta Gantt

La planificación de la preparación se indica en la siguiente secuencia de trabajo:

- 1) Las galerías de hundimiento, calles de producción y galería zanja serán desarrolladas con el equipo *drift borer* y se realizarán de manera simultánea.
- 2) La perforación de zanja longitudinal se realizará en simultáneo con las actividades mencionadas anteriormente y se desarrollará con P&T.
- 3) La perforación radial del nivel de hundimiento será realizada con P&T y comenzará una vez finalizada la primera galería de hundimiento.
- 4) Finalizadas las galerías de hundimiento, se realizarán las chimeneas, con perforación y tronadura.
- 5) Al terminar las calles de producción, se desarrollarán las estocadas con el equipo *drift borer*.
- 6) Una vez desarrolladas las estocadas, se instalarán las dovelas, y luego, las dovelas de techo.
- 7) El destace de batea se realizará a continuación de la perforación de zanja longitudinal.
- 8) Las chimeneas piloto serán desarrolladas una vez terminada la instalación de dovelas.

A continuación, en la Figura 21 , se puede observar la carta Gantt para el diseño del nivel de extracción del caso diseñado con el equipo *drift borer*, en el cual el color celeste representa las obras realizadas con *drift borer*, el color rosado con P&T y las grises las que están prefabricadas.

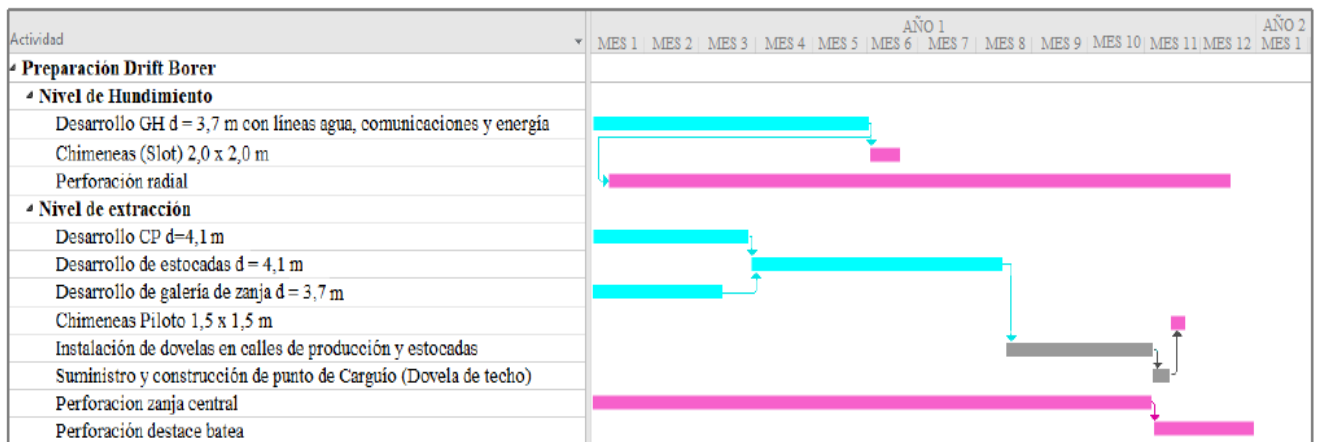


Figura 21: Carta Gantt preparación minera del sistema mecanizado.

En la Tabla 21, se detalla el tiempo que demora cada nivel.

Tabla 21: Duración total de la preparación con drift borer.

Tiempo nivel de hundimiento (día)	291
Tiempo nivel de producción (día)	300
Tiempo total (día)	300

7 Análisis de resultados

7.1 Análisis general

A continuación, se realizará un análisis y comparación entre los resultados obtenidos para los dos casos estudiados.

Tabla 22: Comparación de duración de ambos casos.

Tiempo	P&T	Drift borer
Tiempo nivel de hundimiento (día)	250	291
Tiempo nivel de producción (día)	292	300
Tiempo total (día)	292	300

Al comparar los tiempos de duración para la misma cantidad de área con los distintos métodos de excavación de galerías, se puede observar que con el caso convencional (P&T), de la misma forma que si se realiza con un equipo mecanizado, *drift borer* en este caso, es posible alcanzar a preparar el área máxima de extracción dentro de un año, ya que como se puede observar en la Tabla 22, demoraron 292 y 300 días, respectivamente.

En el caso convencional, se alcanza una duración menor al caso con *drift borer*, tanto para el nivel de hundimiento como para el de producción, sin embargo, más adelante se podrá observar que hay diferencias en la cubicación y en la cantidad de cuadrillas a utilizar entre ambos, por lo que estos resultados de duración no demuestran el caso optimo a utilizar.

Es por esto por lo que se compararán los otros parámetros mencionados anteriormente (cubicación de obras y cantidad de cuadrillas), con el fin de definir lo que limita e influye en la preparación de área y la capacidad productiva de un macizo rocoso.

Por otro lado, también se realizó la comparación entre cuadrillas utilizadas por obra para cada caso, la cual se observa en la Tabla 23.

Tabla 23: Comparación de cuadrillas de ambos casos.

Obras	Caso P&T	Caso drift borer
Nivel de hundimiento		
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	1	1
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	1	1
Perforación radial	4	2
Nivel de producción		
Desarrollo CP d = 4,1 m	2	1
Desarrollo de estocadas d = 4,1	-	1
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	2	1
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	1	1
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas (pavimento en el caso de P&T)	2	1
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	14	1
Perforación zanja longitudinal	4	1
Perforación destace batea	-	1

Respecto a la cantidad de cuadrillas, se puede observar que el sistema mecanizado *drift boring* requiere de menos cantidad y una mayor capacidad de automatización, tanto para el nivel de hundimiento como para el nivel de producción, a diferencia del método convencional, el cual demandó una mayor cantidad de personal y coordinación para conseguir el ritmo de avance planificado.

Por otro lado, si bien hay actividades como el desarrollo de galerías, chimeneas en el nivel de hundimiento y chimeneas piloto, que requieren de la misma cantidad de cuadrillas, esto se justifica por la longitud de excavación a realizar, ya que como se podrá observar más adelante, para el caso con *drift borer* se necesitará de una mayor cantidad de metros para su desarrollo.

En las actividades de punto de carguío se observa que, para el caso convencional, se necesita una gran cantidad de cuadrillas en comparación con el sistema *drift borer*, esto se debe al hormigón utilizado, ya que, con P&T, son realizados con hormigón y para el caso mecanizado, se tienen dovelas prefabricadas las cuales demandan menos tiempo. Además, se observa la diferencia de cuadrillas en la perforación de zanja, en la cual requiere más cuadrillas dado que para el caso convencional, esta actividad comienza después de finalizar la perforación radial y en el caso mecanizado, no depende de esta actividad.

7.2 Análisis nivel de hundimiento

Tabla 24: Comparación de duración de obras del NH de ambos casos.

DURACIÓN DE OBRAS NH (día)		
Obras	Caso P&T	Caso drift borer
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	136	124
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	6	13
Perforación radial	237	285

Se puede observar que en la Tabla 24, la duración del desarrollo de las galerías para la excavación realizada con *drift borer* es menor al sistema convencional, en cambio en las chimeneas y perforación radial, esto es al revés, debido a que en ambos casos esta es desarrollada con P&T, sin embargo, en la Tabla 25 se evidencia la diferencia de metros de excavación que tienen entre sí.

Tabla 25: Comparación de cubicación de obras del NH de ambos casos.

CUBICACIÓN DE OBRAS NH (m)		
Obras	Caso P&T	Caso drift borer
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	948	1 850
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m	112	249
Perforación radial	113 317	68 323

Al comparar la cubicación de obras con los diferentes sistemas de excavación, se evidencia que para el caso con *drift borer*, se duplica el desarrollo de obra a realizar manteniendo una duración similar al caso convencional. Esto demuestra que el equipo mecanizado tiene un

mayor rendimiento volumétrico por unidad de tiempo, convirtiéndolo en un sistema eficiente para el desarrollo de galerías.

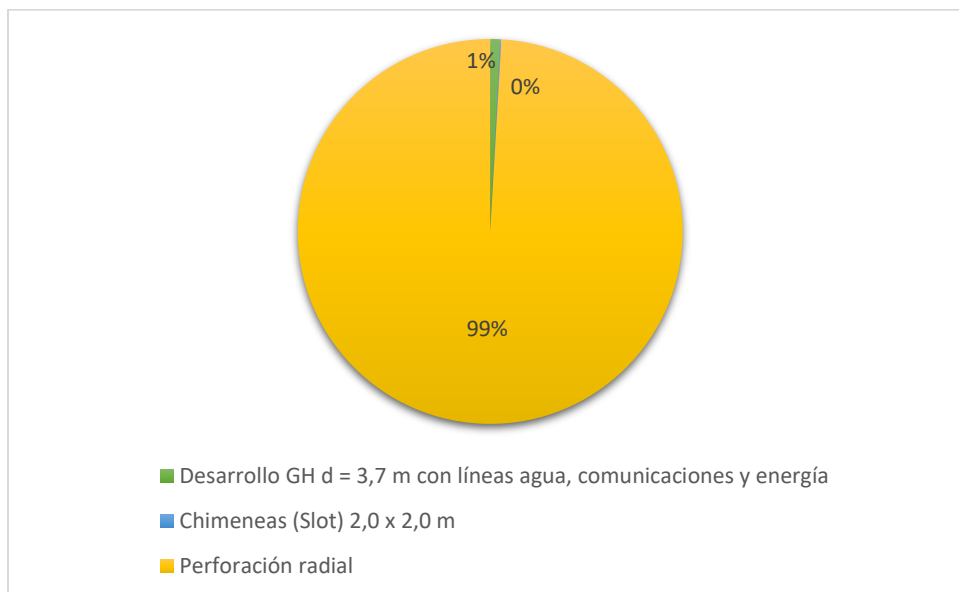


Figura 22: Obras del nivel de hundimiento en el caso convencional.

En la Figura 22, se demuestra que el 99% de las obras en el nivel de hundimiento en el caso realizado con P&T pertenece a la perforación radial y 1% pertenece al desarrollo de galerías, lo cual indica que una optimización en la excavación de la galería no influiría mayormente en la duración total del nivel de hundimiento.

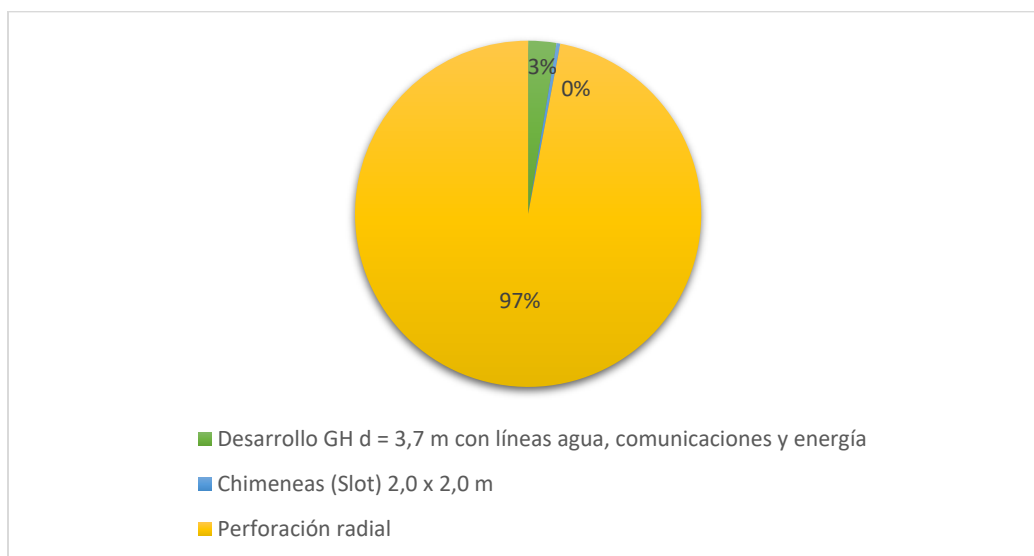


Figura 23: Obras del nivel de hundimiento en el caso mecanizado.

Por otro lado, en la Figura 23, para el caso realizado con el equipo *drift borer*, al igual que con el método anterior, la actividad más demandante a realizar en el nivel de hundimiento es la perforación radial, en este caso con un 97% y un 3% para el desarrollo de las galerías, por

lo que, en este nivel, aunque se optimice el desarrollo de galerías con distintos métodos mecanizados, lo que determinará el ritmo de avance dependerá del rendimiento de P&T.

7.3 Análisis nivel de producción

Tabla 26: Comparación de duración de obras en NP de ambos casos.

DURACIÓN DE OBRAS NP (DÍA)		
Obras	Caso P&T	Caso drift borer
Desarrollo CP d = 4,1 m	89	68
Desarrollo de estocadas d = 4,1	-	110
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	159	62
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	32	12
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas (pavimento en el caso de P&T)	60	76
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	133	10
Perforación zanja longitudinal	41	255
Perforación destace batea	-	45

Como se muestra en la Tabla 26, en el nivel de producción, al igual que en el nivel de hundimiento, se puede observar que la excavación de galerías con sistema *drift boring* reduce el tiempo de desarrollo respecto al sistema convencional. Sin embargo, para el desarrollo de zanja, se observa una gran diferencia entre ambos casos, lo cual se justifica en la cantidad de cuadrillas utilizadas (4 para P&T y 1 para *drift borer*), lo que significa que, para mantener el ritmo de avance, en el caso de P&T se necesitó aumentar el personal y/o equipo.

Tabla 27: Comparación de cubicación de obras para el NP de ambos casos.

CUBICACIÓN DE OBRAS NP		
Obras	Caso P&T	Caso drift borer
Desarrollo CP d = 4,1 m	1 233	1 014
Desarrollo de estocadas d = 4,1	-	1 643
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	2 220	925
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	636	227
Instalación dovelas en calle de producción y estocadas (pavimento en el caso de P&T)	2 398	2 279
Suministro y construcción de punto de carguío (Dovela de techo)	148	148
Perforación zanja	19 625	30 527
Perforación destace batea	-	5 328

Por otro lado, al comparar la cubicación de obra en la Tabla 27, se observa que el equipo *drift borer* entrega una excavación más precisa con respecto al caso convencional, ya que necesita de menos metros lineales a desarrollar. Además, se requiere de menos conexiones verticales en el caso mecanizado debido a que las chimeneas piloto disminuyen con respecto al sistema con perforación y tronadura.

Si bien se puede observar que con el sistema mecanizado se puede lograr un mayor desarrollo de obras horizontales en menos tiempo y con menos cantidad de cuadrantes, no influye potencialmente en la capacidad productiva a conseguir.

8 Conclusión y Recomendaciones

8.1 Conclusión

En el presente estudio, se determinó el factor principal que limita la capacidad productiva potencial del método de hundimiento *block caving* en MSGE. Esto se logró mediante un análisis comparativo entre un caso de preparación convencional con P&T y un caso de preparación con *drift borer*, en el cual se desarrollaron modelos de cubicación, estimación de tasas de socavación y proyecciones del tonelaje diario que se pueden alcanzar de forma anual, para así comprender la relación que existe entre la capacidad de preparación y de producción.

Se identificó que los factores que influyen en la capacidad de producción que se puede alcanzar con el método *block caving* depende principalmente de la altura del bloque y de la tasa de socavación, ya que, además, esta última mencionada, define el área limitante de extracción. Sin embargo, al incrementar el área de preparación, no afecta significativamente a la producción diaria, por lo que la variante principal limitante de la capacidad productiva es la altura del bloque, debido a que, impone un límite físico al hundimiento ya que define la magnitud de la zona de fragmentación activa y la tasa de extracción estable. Por otro lado, el valor de la tasa anual de socavación está condicionado por la estabilidad del hundimiento y la interacción entre la geometría del bloque y las propiedades geotécnicas del macizo rocoso. Por lo que un aumento de este permitiría alcanzar antes de tiempo la condición de producción, pero no aumentaría la capacidad de producción.

La implementación de sistemas mecanizados en las excavaciones de obras como el equipo *drift borer*, representa un avance tecnológico significativo el cual contribuye a mejorar aspectos relevantes en minería profunda y con una gran extensión, como la continuidad operativa, el control y la seguridad de los trabajadores. Esto se debe a que reduce la exposición de los trabajadores, minimiza la variabilidad del proceso constructivo debido a la precisión en la excavación y reducción de tiempo en el desarrollo de galerías debido al uso de maquinaria de avance continuo y la sustitución de fortificación por dovelas prefabricadas. Sin embargo, el tonelaje se mantuvo con el caso convencional de P&T, ya que, aumentando la cantidad de cuadrillas de trabajo, se puede alcanzar la construcción del área de preparación minera en el mismo tiempo que con el sistema mecanizado. Por lo que, el uso de este sistema no implica un aumento en la capacidad productiva, sino que otorga mayor flexibilidad en el cumplimiento con la metodología de trabajo a realizar.

Con el factor limitante, se determinó que la capacidad de producción máxima que se puede alcanzar para un bloque de 240 m de altura, una densidad in situ de 2.6 t/m^3 y una tasa de socavación de $72 \text{ m}^2/\text{día}$, independiente del sistema de excavación utilizado, es de 44 928 tpd, con una superficie máxima de $21\,600 \text{ m}^2$.

Finalmente, con los resultados obtenidos se puede determinar que las limitaciones de producción en MSGE no dependen sólo de restricciones operacionales o de recursos, sino que a las condiciones geométricas y geotécnicas del macizo rocoso. Si bien el sistema mecanizado puede tener ventajas sobre el sistema convencional, no demuestra que genere un incremento en la producción máxima alcanzable, por lo tanto, se obtiene que la preparación

minera condiciona los tiempos de inicio de la producción, pero no el tonelaje máximo extraíble. Es por esto por lo que la limitación de capacidad productiva se debe exclusivamente a la cantidad de bateas extraídas por año y a la altura de columna.

8.2 Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos y análisis realizados, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Uno de los principales problemas de aumentar la producción en MSGE consiste en las condiciones geomecánicas y geotécnicas, por lo que, se recomienda realizar estudios sobre cómo se puede aumentar la altura de bloque sin producir efectos negativos en la explotación del yacimiento, como el exceso de dilución o la desestabilidad del bloque.
- Debido a que el otro factor que influye en la capacidad de producción es la tasa de socavación, se sugiere estudiar cómo se puede aumentar esta, sin la generación de estallidos de rocas.
- Se recomienda el uso de *drift borer* con la finalidad de disminuir la necesidad de más cuadrillas, mejorar las condiciones de trabajo y acortar los plazos de trabajo, ya que con esto se tiene una holgura en el desarrollo de la preparación minera, lo cual genera un beneficio en esta.
- Para lograr una mayor producción en minería subterránea a gran escala, se sugiere mantener más de una operación funcionando en simultáneo e independientes entre sí, ya que con una sola no se puede mantener el mismo ritmo de producción que la obtenida en minería a rajo abierto.

9 Referencias

Branon C., et al. (2011). Underground extraction: Block caving. En P. Darling (Eds.), SME Mining Engineering Handbook (pp. 1437-1451).

Camhi, J. (2012). Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de Block Caving caso estudio mina El Teniente CODELCO Chile. Universidad de Chile.

Cavieres P. et al. (2006). Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para método panel caving en roca primaria, mina el teniente. Universidad de Santiago de Chile.

Chacón J. (1980). Block caving y LHD reflexiones sobre mallas de extracción.

Contreras, C. (2016). Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving. Universidad de Chile.

Díaz, G., & Morales, E. (2008). Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day - El Teniente. Massmin.

Esterhuizen y Laubscher. (1992). A comparative evaluation of production level layouts. Massmin.

Flores G. et al. (2004). Current Practices and Trends in Cave Mining. Massmin.

Gacitúa, J. (2012). Análisis cualitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles. Universidad de Chile.

González, T. (2018). Modelamiento del plan anual de preparación minera de la división El Teniente utilizando el modelo de optimización UDESS. Universidad de Chile.

Hartman H. y Mutmanský J. (2002). Underground mining, caving method: block caving. En H. Hartman & J. Mutmanský (Eds.), *Introductory Mining Engineering* (pp. 420-432).

Ingenium. (2023). Minería subterránea: Definición y ventajas. <https://ingenium.edu.pe/blog/mineria/mineria-subterranea-definicion-y-ventajas/>

Nelis G. (2021). Clase 12: Footprint y altura óptima. Universidad de Concepción.

Nelis G. (2021). Clase 14: Preparación minera en block y panel caving. Universidad de Concepción.

Núñez, C. (2022). Diseños de niveles de explotación por hundimiento para construcción mecanizada y mínima utilización de hormigón. Universidad Técnica Federico Santa María.

Ovalle, A. y Pesce, J. (2004). Production Capacity of a Mass Caving. *Massmin*.

Ovalle, A. (2012). Mass Caving Maximum Production Capacity. *Massmin*.

Rostami, J. (2011). Mechanical Rock Breaking. En P. Darling (Eds.), *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 417-434).

Tuck, M. (2011). Underground Horizontal and Inclined Development Methods. En P. Darling (Eds.), *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 1179-1202).