



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

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE TBM EN NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA BLOCK CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

GABRIEL GONZALO HERRERA PINO

PROFESOR GUÍA:

LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

NELSON VÍCTOR MORALES VARELA

HANS GÖPFERT HIELBIG

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Gabriel Gonzalo Herrera Pino
FECHA: Junio de 2021
PROFESOR GUÍA: Luis Felipe Orellana Espinoza

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE TBM EN NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA BLOCK CAVING

El presente estudio analiza la aplicabilidad de la excavación mecanizada tipo Tunnel Boring Machine (TBM) en la minería subterránea masiva Block Caving. Específicamente, busca determinar las capacidades y limitaciones de la TBM en la construcción de túneles, adaptando el diseño de los niveles de producción a las características de funcionamiento de las TBM, y estimar tiempos y costos de construcción de dichos diseños.

La primera etapa de este estudio consiste en la determinación de los parámetros de funcionamiento de las TBM a través de una revisión bibliográfica, la siguiente fase corresponde a la definición y construcción del caso base correspondiente al diseño minero del proyecto Chuquicamata Subterránea explotada por Block Caving, seguido por el planteamiento de 2 casos propuestos en los que se logre adaptar el diseño y la secuencia de la construcción de las calles del nivel de producción a los requerimientos de las TBM, en la tercera etapa se busca estimar los tiempos y costos de la preparación de los macrobloques mediante la realización de una simulación de Montecarlo, luego, en una cuarta etapa se calcula el impacto económico que los diseños tienen sobre el plan de producción basado en los resultados de la simulación, para ello, se toma como referencia el plan de producción de la extracción de cobre del primer nivel del proyecto Chuquicamata Subterránea.

Al examinar los diseños propuestos de los niveles de producción y para radios de giro mínimo de la TBM de 40 metros se puede evidenciar que la cantidad de desarrollos por macrobloque aumenta en comparación al caso base levemente en un 6 %. De los resultados obtenidos en las simulaciones para la preparación de los 4 primeros macrobloques de la mina, se puede observar que con respecto al caso base para el Diseño 1 y Diseño 2 se tiene un aumento de los tiempos de preparación de los macrobloques de 4 meses y 2 meses respectivamente, y un aumento de los costos de preparación de 55 MUSD y 54 MUSD respectivamente. El retraso del inicio de la producción producto de los mayores tiempos de preparación se traduce en una disminución en la cantidad de beneficios totales de 142 MUSD y 124 MUSD para el Diseño 1 y Diseño 2 respectivamente.

El uso de TBM no descarta las operaciones de la perforación y tronadura, pues solo el 33 % de los desarrollos del nivel de producción pueden ser construidos con TBM debido a la limitante de sus radios de giro actuales. Se requiere de un radio de giro mínimo de 15 metros para la construcción de las zanjas de los puntos de extracción. La TBM provee tiempos de construcción de los túneles notoriamente menores a la perforación y tronadura, sin embargo, esta ventaja no puede ser aprovechada en su totalidad debido a que los niveles deben ser construidos utilizando ambos métodos y existen restricciones de las frentes disponibles para la PyT cuando la TBM está excavando en el mismo macrobloque. Estas interferencias generan retrasos en la construcción de los túneles y por lo tanto en el cronograma global de la preparación de los macrobloques.

**ABSTRACT OF THE MEMORY TO OPT TO
THE DEGREE OF:** Civil Mining Engineer
BY: Gabriel Gonzalo Herrera Pino
DATE: June 2021
SUPERVISOR: Luis Felipe Orellana Espinoza

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF TBM AT THE BLOCK CAVING MINING PRODUCTION LEVEL

The present study analyzes the applicability of the mechanized excavation Tunnel Boring Machine (TBM) in the Block Caving massive underground mining. Specifically, seeks to determine the capacities and limitations of the TBM in tunnel construction, adapting the design of the production levels to the operating characteristics of the TBM's, and estimate construction times and costs of those designs.

The first stage of this study consists of determining the operating parameters of the TBM through a bibliographic review, the next phase corresponds to the definition and construction of the base case corresponding to the mining design of the production level of the Chuquicamata underground project exploited by Block Caving, followed by the design of 2 proposed cases in which the design and sequence construction of the tunnels of the production level can be adapted to the requirements of the TBM, in the third stage it is sought to estimate the preparation times and costs of the macroblocks by performing a Monte Carlo simulation, then, in a fourth stage, the economic impact that the designs have on the copper production plan is calculated based on the results of the simulation, for this, the production plan of the first lift of the Chuquicamata underground project is taken as a reference.

When examining the proposed designs for the production levels and for minimum turning radius for the TBM of 40 meters, it can be seen that the amount of developments per macroblock increases compared to the base case slightly in a 6 %. From the results obtained in the simulations of the first four macroblocks of the mine, it can be observed that compared with the base case for the Design 1 and Design 2 there is an increase in the preparation time of the macroblocks of 4 months and 2 months respectively, and an increase in the preparation costs of 112 MUSD and 111 MUSD respectively. The delayed start of production as a result of the longer preparation times translates into an decrease in the amount of total profits of 142 MUSD and 124 MUSD for the Design 1 and the Design 2 respectively.

The use of TBM does not rule out drilling and blasting operations, since only 33% of the development of the production level can be built with TBM due to the limitation of its current turning radius. A minimum turning radius of 15 meters is required for the construction of the remaining developments. The TBM provides construction times for the tunnels significantly shorter than drilling and blasting, however, this advantage cannot be fully exploited because the levels must be built using both methods and there are restrictions on the fronts available for P&T when the TBM is digging in the same macroblock. These interferences generate delays in the construction of the tunnels and therefore in the overall schedule for the preparation of the macroblocks.

DEDICATORIA

*A mi hermano
Q.E.P.D.*

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Contexto de la memoria	1
1.2	Motivación de la memoria.....	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo General	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	Alcances	4
1.5	Estructura de la memoria.....	5
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Tipos de Tunnel Boring Machine.....	6
2.1.1	Tipos de Tunnel Boring Machine en Roca Dura.....	7
2.2	Operatividad de la Tunnel Boring Machine	10
2.2.1	Sistema Back-Up.....	10
2.2.2	Manejo de Marinas.....	11
2.2.3	Sitio de Montaje	13
2.2.4	Retroceso desde el Túnel.....	14
2.2.5	Relleno con dovelas	14
2.2.6	Características Técnicas Tunnel Boring Machine.....	16
2.3	Terrenos Desafiantes para Tunnel Boring Machine.....	18
2.4	Estimación de Costos de una Tunnel Boring Machine	20
2.4.1	Costos de Adquisición.....	20
2.4.2	Costos de Montaje.....	21
2.4.3	Costos de Excavación y Sistema Back-up	22
2.4.4	Costos de Cortadores.....	23
2.4.5	Costos de Mano de Obra	24
2.4.6	Costo Mantenimiento y Reparación.....	24
2.4.7	Costos de Servicio.....	25
2.4.8	Costos de Energía.....	26
2.5	Proyectos con Tunnel Boring Machine.....	27
2.5.1	San Manuel, EE. UU.....	27
2.5.2	Stillwater, EE. UU.....	28
2.5.3	El Teniente, Chile.....	29
2.5.4	Los Bronces, Chile	30

2.5.5	Túnel de Base de San Gotardo	32
2.5.6	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo	33
2.5.7	Resumen de Proyectos	34
2.6	Método de Explotación Block Caving	35
2.6.1	Descripción de la Explotación por Block Caving	35
2.6.2	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea	37
3	METODOLOGÍA	42
3.1	Descripción de la Metodología	42
3.2	Parámetros Principales	43
3.2.1	Parámetros Perforación y Tronadura.....	43
3.2.2	Parámetros Tunnel Boring Machine.....	46
3.2.3	Simulación de Montecarlo	48
3.2.4	Lógica de la Simulación.....	50
3.2.5	Estimación Económica.....	51
3.3	Desarrollo de la Metodología.....	53
3.3.1	Diseños Nivel de Producción y Hundimiento Caso Base	53
3.3.2	Diseños Nivel de Producción Tunnel Boring Machine.....	54
3.3.3	Secuencia de Construcción Caso Base.....	56
3.3.4	Secuencia de Construcción Tunnel Boring Machine	57
4	Resultados	60
4.1	Simulación de Montecarlo	60
4.2	Programa de Preparación Caso Base.....	62
4.3	Programas de Preparación Simulación.....	63
4.4	Plan de Desarrollos Horizontales Caso Base	66
4.5	Plan de Desarrollos Horizontales Simulados	67
4.6	Estimación Económica.....	67
4.7	Evaluación Número de Frentes	69
5	DISCUSIÓN	70
5.1	Diseños Nivel de Producción	70
5.2	Tiempos de Preparación.....	71
5.3	Secuencia de Construcción.....	71
5.4	Costos de Construcción.....	72
5.5	Características Geomecánicas.....	74
5.6	Logística de Construcción.....	75
6	Conclusiones	77
6.1	Trabajo Futuro.....	78

7	BIBLIOGRAFÍA.....	79
8	ANEXO A.....	82
8.1	Resumen Extendido.....	82
9	Anexo B.....	86
9.1	Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov.....	86
9.1.1	Tasa de Avance TBM.....	86
9.2	Programas de Preparación.....	87
9.3	Código de Programación.....	90
9.3.1	Variables.....	90
9.3.2	Código Diseño 1.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Comparación entre el método de perforación y tronadura con la excavación mecanizada TBM (Gratias et al, 2014).....	2
Tabla 2.1:	Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (elaboración propia).....	34
Tabla 3.1:	Tiempo requerido para cada actividad de un ciclo de PyT para distintas secciones del túnel (Práctica Profesional III, 2020).....	44
Tabla 3.2:	Flota de equipos utilizados por nivel para las labores de desarrollo con perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).....	45
Tabla 3.3:	Costos por actividad de la perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).....	45
Tabla 3.4:	Costo de los equipos utilizados en perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020)....	46
Tabla 3.5:	Parámetros de TBM utilizados para el diseño de los niveles de producción (elaboración propia).....	46
Tabla 3.6:	Parámetros económicos utilizados para la evaluación económica (elaboración propia).....	52
Tabla 3.7:	Metros a construir por macrobloques para cada diseño del nivel de producción (elaboración propia).....	55
Tabla 4.1:	Tiempos y costos de preparación obtenidos de la simulación para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	61
Tabla 4.2:	Resumen de los costos totales actualizados para para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	62
Tabla 4.3:	Costos unitarios de la excavación con TBM y avances promedio y máximo obtenidos de las simulaciones del Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).....	67
Tabla 4.4:	Beneficios actualizados totales para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	68
Tabla 4.5:	Tiempos y costos de preparación al tener 2 frentes operativas para la PyT en el nivel de producción para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	69
Tabla 5.1:	Estimación del VAN para la preparación de todos los macrobloques del primer nivel de Chuquicamata Subterránea para el caso base, Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).....	73
Tabla 9.1:	Estadística de los datos de tasa de avance TBM.....	86
Tabla 9.2:	Parámetros test de Kolmogorov-Smirnov para la tasa de avance TBM.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de una TBM (Herrenknecht AG,2021).	1
Figura 1.2: Vista isométrica de un esquema típico de los niveles de una mina Block Caving (Paredes et al, 2018).	3
Figura 2.1: Clasificación de la TBM según tipo de terreno a excavar (Zheng et al, 2016).	6
Figura 2.2: Esquema detallado de las partes de una TBM Gripper (Robbins Company, 2021).	7
Figura 2.3: Esquema detallado de las partes de una TBM Escudo Simple (Robbins Company, 2021).	8
Figura 2.4: Esquema detallado de las partes de una TBM Doble Escudo (Robbins Company, 2021).	9
Figura 2.5: Sistema back-up de una TBM de escudo simple (Herrenknecht AG,2021).	11
Figura 2.6: Esquema del traspaso del material excavado en el túnel desde la correa transportadora del sistema back-up al camión de transporte (Komatsu, 2019).	12
Figura 2.7: Esquema del relleno del piso de túneles excavados con TBM (Bruland, 2000)	12
Figura 2.8: Caverna de montaje de la TBM en El Teniente (Ofiara et al, 2016).	13
Figura 2.9: Esquema del cabezal de corte de una TBM ensamblada en dos partes (Robbins, 2020).	14
Figura 2.10: Modelo 3D de una dovela de suelo de hormigón (Geoconsult, 2020).	15
Figura 2.11: Esquema de una planta de producción de dovelas en superficie (Herrenknecht, 2019).	15
Figura 2.12: Flat car utilizado para el transporte de dovelas (Lewis Group, 2019).	16
Figura 2.13: Ingreso de agua en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).	18
Figura 2.14: Roca altamente fracturada encontrada en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).	19
Figura 2.15: Daños generados en el túnel de excavación producto de eventos de estallido de roca en el Túnel Base San Gotardo (Rehbock-Sander & Jesel, 2018).	19
Figura 2.16: Costos de excavación de la TBM (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000).	22
Figura 2.17: Costos sistema back-up (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000).	22
Figura 2.18: Costo de los cortadores (dc = diámetro de los cortadores) (Bruland, 2000).	23
Figura 2.19: Costos mano de obra (Bruland, 2000).	24
Figura 2.20: Ruta del túnel en la mina San Manuel (Cigla et al, 2001).	27
Figura 2.21: Layout Proyecto Mina Stillwater (Cigla et al, 2001).	28
Figura 2.22: Mina Los Bronces (Barioffi et al, 2011).	30
Figura 2.23: Portal de la TBM y camino de acceso (Barioffi et al, 2011).	30
Figura 2.24: TBM Doble Escudo utilizada en Los Bronces (Barioffi et al, 2011).	31
Figura 2.25: Longitud de los tramos de túneles construidos en el proyecto Base de San Gotardo (Herrenknecht, 2010).	32
Figura 2.26: Sitio de montaje de la TBM Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).	33
Figura 2.27: TBM Gripper utilizada en el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).	34
Figura 2.28: Esquema de los niveles de una mina Block Caving convencional (Flores & Catalan, 2019).	36
Figura 2.29: Esquema de la secuencia de construcción de Macrobloques (Vergara, 2014).	36
Figura 2.30: Configuración de la mina Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	37
Figura 2.31: Esquema del proceso de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	38
Figura 2.32: Diseño de los niveles de un Macrobloque en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	39
Figura 2.33: Diseño del nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	39
Figura 2.34: Secuencia de preparación de macrobloques en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	40
Figura 2.35: Dirección de la explotación de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	41

Figura 2.36: Secuencia óptima de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	41
Figura 3.1: Metodología de la memoria (elaboración propia).	43
Figura 3.2: Sección de los túneles del nivel de producción y hundimiento (elaboración propia).	44
Figura 3.3: Sección del túnel construido por TBM (elaboración propia).	47
Figura 3.4: Esquema con las dimensiones de la caverna de montaje y la rampa de inicio de la TBM (elaboración propia).	47
Figura 3.5: Sección de la caverna de montaje de la TBM y los túneles de inicio de la excavación (elaboración propia).	48
Figura 3.6: Histograma de la estimación de la tasa de avance diaria de la TBM para un UCS de la roca promedio de 131.6 MPa (Rodríguez, 2020).	49
Figura 3.7: Diagrama de la lógica de la simulación de Montecarlo (elaboración propia).	50
Figura 3.8: Plan de producción de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	51
Figura 3.9: Plan de producción del primer nivel de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	51
Figura 3.10: Diseño nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	53
Figura 3.11: Diseño nivel de hundimiento de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	53
Figura 3.12: Diseños propuestos de los desarrollos de los niveles de producción de 4 macrobloques construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).	54
Figura 3.13: Diseños de los desarrollos del nivel de producción de 1 macrobloque construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).	55
Figura 3.14: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción del caso base (elaboración propia).	56
Figura 3.15: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de hundimiento del caso base (elaboración propia).	57
Figura 3.16: Desarrollos iniciales antes del inicio de la excavación de la TBM (elaboración propia).	58
Figura 3.17: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción con TBM de los 4 macrobloques iniciales (elaboración propia).	58
Figura 3.18: Secuencia de construcción de las calles del nivel de producción con TBM de 2 macrobloques (elaboración propia).	59
Figura 4.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del caso base (elaboración propia).	63
Figura 4.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del caso base (elaboración propia).	63
Figura 4.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 1 (elaboración propia).	64
Figura 4.4: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 1 (elaboración propia).	64
Figura 4.5: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 2 (elaboración propia).	65
Figura 4.6: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 2 (elaboración propia).	65
Figura 5.1: Correlación entre el UCS y la tasa de penetración de la TBM (Jain et al, 2016).	74
Figura 5.2: Índice de la vida de los cortadores por tipo de roca (Bruland, 2000).	75
Figura 9.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del caso base (elaboración propia).	87
Figura 9.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 1 (elaboración propia).	88
Figura 9.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 2 (elaboración propia).	89

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Costo de adquisición de la TBM (Bruland, 2000).....	20
Ecuación 2.2: Costo de adquisición del sistema back-up (Bruland, 2000).	20
Ecuación 2.3: Costos montaje de la TBM y sistema back-up (Bruland, 2000).	21
Ecuación 2.4: Costos de los cortadores promedio (Bruland, 2000).	23
Ecuación 2.5: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM (Bruland, 2000).....	24
Ecuación 2.6: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up (Bruland, 2000).	25
Ecuación 2.7: Factor de corrección del costo de mantenimiento (Bruland, 2000).....	25
Ecuación 2.8: Costos de servicios de la TBM (Bruland, 2000).	25
Ecuación 2.9: Costos de servicios del sistema back-up (Bruland, 2000).....	25
Ecuación 2.10: Costos del consumo de energía (Bruland, 2000).....	26
Ecuación 2.11: Factor de corrección del costo de energía (Bruland, 2000).....	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Histograma de los tiempos de preparación de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).....	60
Gráfico 4.2: Histograma de los costos de preparación actualizados de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).	61
Gráfico 4.3: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del caso base para 4 macrobloques (elaboración propia).....	66
Gráfico 4.4: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del Diseño 1 y Diseño 2 para 4 macrobloques (elaboración propia).....	67
Gráfico 4.5: Beneficios anuales actualizados para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).	68
Gráfico 5.1: Porcentaje de los costos totales por actividad para cada caso (elaboración propia).	73

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto de la memoria

La perforación y tronadura es el método de construcción de túneles más antiguo en la industria de la excavación y se utiliza con mucha frecuencia. Sin embargo, una nueva disciplina llamada excavación mecanizada nació a principios de la década de 1950, acelerando la competencia entre los métodos de excavación mecánicos con los de perforación y tronadura. La excavación mecanizada se puede definir como la excavación por medio de máquinas que transfieren la energía mediante la fuerza de empuje desde las herramientas de corte (cortadores, brocas) a la roca o suelo (Bilgin et al, 2013). Esta memoria se enfoca específicamente en los equipos de excavación mecanizada tipo Tunnel Boring Machine o TBM (Figura 1.1).

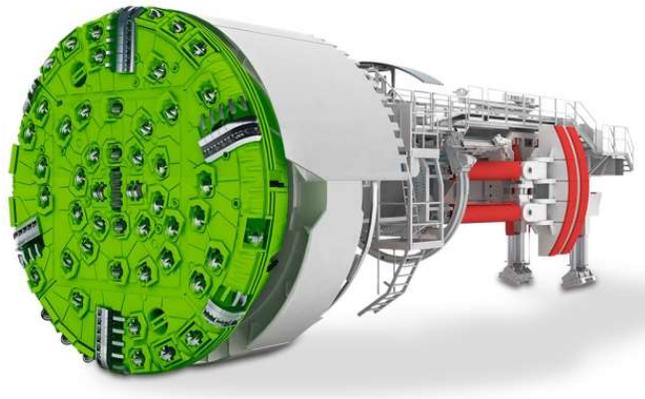


Figura 1.1: Esquema de una TBM (Herrenknecht AG, 2021).

Uno de los avances más importantes en excavación de roca dura fue el desarrollo del cortador de disco, patentado por el ingeniero de minas, James Robbins, de Estados Unidos en 1952. Esta invención provocó un rápido aumento en el número de proyectos de túneles en todo el mundo debido a su capacidad en el corte de roca dura. Esto también provocó muchos desarrollos nuevos, especialmente en tecnologías de tuneladoras para roca dura (Bilgin et al, 2013).

Las mejoras en las máquinas de excavación de suelos comenzaron durante la década de 1970, especialmente en Japón y Alemania. En estos dos países se desarrollaron muchos tipos de máquinas para terrenos blandos que funcionan mediante el principio de presión en la frente de excavación. Algunos países europeos siguieron la tendencia de investigación en excavación de suelos a partir de la década de 1990. Actualmente, las investigaciones científicas se centran básicamente en el acondicionamiento de suelos y lodos mediante aditivos químicos para mejorar el rendimiento de la excavación (Bilgin et al, 2013).

Las investigaciones para llegar a las materias primas subterráneas lo más rápido posible llevaron a la utilización de tuneladoras en la industria minera. La primera aplicación de TBM en minería fue en la mina subterránea de hierro Steep Rock en los Estados Unidos, de la cual los principales accesos fueron excavados por una TBM de la marca Robbins en 1957. A esto le siguieron muchas otras aplicaciones exitosas de TBM en la minería, como en muchas minas de carbón en Inglaterra, la mina San Manuel Cooper en Arizona y la mina Stillwater en Montana (Bilgin et al, 2013).

Desde entonces, la industria de la excavación mecanizada ha logrado notables progresos con mejores diseños de los cortadores y las cabezas de corte, mayor monitoreo de las operaciones y nuevos avances en el tratamiento del terreno y soporte de la roca (Zheng et al, 2016). En la actualidad, la excavación mecánica tiene una participación importante en los proyectos de excavación civiles como alternativa a la perforación y tronadura convencional (Cigla et al, 2001). La Tabla 1.1 resume algunas de las ventajas y desventajas de la TBM frente a la perforación y tronadura.

Tabla 1.1: Comparación entre el método de perforación y tronadura con la excavación mecanizada TBM (Gratias et al, 2014).

Factor	Perforación y Tronadura	TBM
Tiempo de preparación del lugar de inicio	Requiere menos tiempo para iniciar	Requiere de 3 a 12 meses
Tasas de avance	Tasa de excavación más lenta (típicamente de 3 a 9 metros por día con un promedio de 180 m/mes para una frente)	Tasas de excavación significativamente mayores, desde 15 metros a 50 metros por día, 450 m/mes)
Forma del túnel	Normalmente tiene forma de herradura, pero puede tener otras formas	Uniformemente redonda
Longitud y profundidad del túnel	Difícil en entornos de baja sobrecarga	No comparable a la perforación y tronadura para túneles cortos (menos de 2 km)
	Sustancialmente más lento en túneles de acceso más largos (más de 2 km)	Radio de giro mínimo de 30 m
		Más rápido para túneles largos y rectos
Orientación del cuerpo mineral	Se puede usar para cualquier orientación del cuerpo mineralizado	Ideal para usar en cuerpos minerales profundos y/o largos
Remoción, eliminación o reutilización de la marina	Se puede reutilizar, pero el tamaño y la consistencia de la marina son muy variables	Puede reutilizarse; marina de tamaño uniforme.
	La remoción debido al tamaño variable de las rocas puede ser difícil	La roca uniforme también facilita la extracción mediante un transportador continuo
Vibración del suelo	Alta	Baja
Área poblada o despoblada	Típicamente despoblada o en áreas pobladas con restricciones	Pobladas o despobladas
Acceso a mano de obra calificada	Requiere habilidades y certificación únicas	Principalmente mecánicos

1.2 Motivación de la memoria

Las TBM tienen el potencial de utilizarse para desarrollar grandes yacimientos mineros. Como puede ser el caso de la minería Block Caving, la cual requiere de la construcción de desarrollos alrededor de la zona mineralizada para temas de exploración, logística, accesos, ventilación y producción (Figura 1.2); por ejemplo, el nivel de producción necesita que numerosas calles paralelas sean excavadas para la extracción de mineral. Estos niveles pueden ser tan largos como el largo del yacimiento (del orden de los cientos de metros dependiendo de la geometría y la masividad del yacimiento).

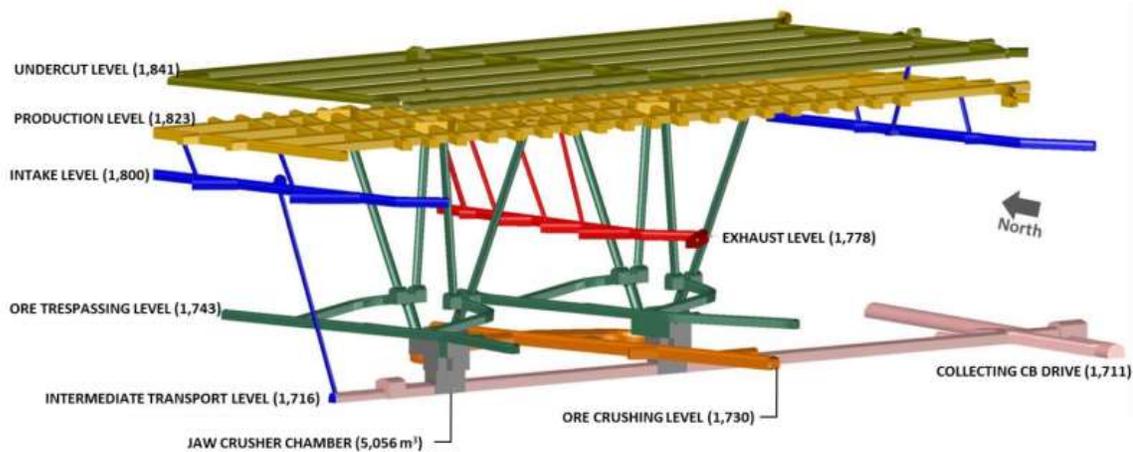


Figura 1.2: Vista isométrica de un esquema típico de los niveles de una mina Block Caving (Paredes et al, 2018).

Los túneles de los niveles de transporte y de hundimiento que se encuentran por debajo y sobre el nivel de producción respectivamente también pueden ser construidos por TBM, así como los niveles de ventilación en los cuales los túneles circulares construidos por una TBM ofrecen ventajas de capital y costos operativos, ya que reducen las pérdidas por fricción en la ventilación y permiten que una mayor proporción de la sección excavada sea utilizada para servicios como agua, energía y aire comprimido.

A partir de estos puntos es que este trabajo busca aportar a la discusión acerca de los desafíos y oportunidades de la excavación mecanizada en la minería subterránea debido a que no hay antecedentes de la construcción de niveles de producción con TBM en la actualidad. Este aporte se busca lograr a través del estudio y análisis de las características de los equipos de excavación mecanizada tipo TBM, evidenciando las desventajas que posee este método de excavación y las áreas que aún deben ser mejoradas para volver factible su implementación en futuros proyectos de la minería subterránea masiva.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la aplicabilidad de la excavación mecanizada tipo Tunnel Boring Machine en los niveles de producción de la minería subterránea masiva Block Caving.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las capacidades y limitaciones de la TBM en la construcción de túneles.
- Adaptar el diseño de los niveles de producción a las características de funcionamiento de las TBM.
- Estimar tiempos y costos de construcción de los diseños propuestos.
- Conocer el impacto económico del uso de TBM en la construcción de los niveles de producción.

1.4 Alcances

- El estudio se limita a la evaluación de los diseños de los niveles de producción construidos con TBM, no considera otros tipos de desarrollos como rampas de conexión entre niveles, o el diseño de otros niveles como los de hundimiento, de transporte o de ventilación.
- Para los escenarios a simular se consideran condiciones ideales de la geología y la geomecánica de la roca para el funcionamiento de la TBM, es decir, terrenos que no presenten elementos que dificulten considerablemente el avance de la tuneladora, como la presencia de fallas.
- Se contabilizan los costos operativos e inversiones necesarias para la construcción de los desarrollos horizontales de los macrobloques, no se consideran los costos de desarrollos verticales o de las labores de preacondicionamiento.

1.5 Estructura de la memoria

El presente estudio, se basa en siete capítulos ordenados de manera lógica para cumplir con los objetivos propuestos.

- Capítulo 1: El capítulo introduce el contexto de la memoria y la motivación de este trabajo, para luego presentar los objetivos principales y específicos a cumplir, y finalmente los alcances del estudio.
- Capítulo 2: Se presenta la revisión bibliográfica realizada. Se explica el funcionamiento de las distintas tuneladoras y sus características técnicas, se muestran algunos proyectos que han utilizado esta tecnología previamente y la lógica de explotación de la minería Block Caving.
- Capítulo 3: Se describe la metodología. Se detalla cada uno de los pasos a seguir y las consideraciones adoptadas para cumplir con los objetivos de la memoria.
- Capítulo 4: Se presentan los resultados del estudio. Los resultados incluyen los diseños propuestos del nivel de producción utilizando TBM, las simulaciones de Montecarlo de los casos seleccionados y una evaluación económica de cada caso.
- Capítulo 5: Se discuten los resultados del estudio. En este capítulo se examinan los resultados del capítulo anterior, se analizan las diferentes implicancias de estos y se exploran consideraciones adicionales que son relevantes para el estudio.
- Capítulo 6: Como parte final se presentan las conclusiones y recomendaciones de la memoria. Se resumen los resultados más importantes obtenidos y presenta las posibilidades de trabajos futuros del trabajo desarrollado.
- Capítulo 7: Cita las referencias utilizadas en esta memoria.
- Capítulo 8: El capítulo corresponde a los anexos donde se presenta la información adicional utilizada en este estudio.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se realiza la búsqueda de toda la información necesaria para el sustento de la presente memoria.

2.1 Tipos de Tunnel Boring Machine

Las tuneladoras son máquinas integrales capaces de excavar la sección circular completa de un túnel. La cabeza de corte de la tuneladora está equipada con discos cortadores que son empujados contra la frente del túnel con cilindros hidráulicos. La transferencia de esta fuerza de empuje a través de los cortadores de disco crea zonas de fragmentación que se propagan debido al giro de la cabeza de corte permitiendo la excavación de la roca. Además, durante el avance la TBM cuenta con un sistema de sostenimiento del terreno, el cual se ejecuta dependiendo de las características geológicas de este (Bilgin et al, 2013). Actualmente existe una amplia variedad de tuneladoras disponibles para perforar túneles de diferentes diámetros a través de condiciones del suelo que van desde roca dura hasta suelo blando y terrenos intermedios (Figura 2.1). Este trabajo se enfoca en las tuneladoras de roca dura, ya que es el tipo de terreno predominante en la minería subterránea masiva.

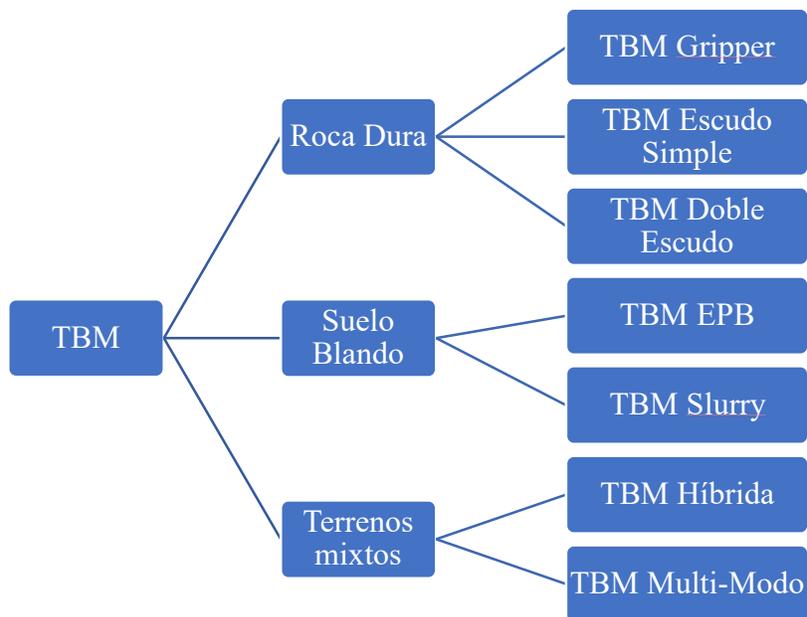


Figura 2.1: Clasificación de la TBM según tipo de terreno a excavar (Zheng et al, 2016).

Existen tres tipos de tuneladoras diseñadas para ser utilizadas en terrenos de roca dura. Por un lado, se encuentran las TBM Gripper que son tuneladoras concebidas principalmente para excavar en rocas duras y estables, sin gran necesidad de colocar sostenimiento en el túnel. En segundo lugar, la TBM de escudo simple que son tuneladoras mucho más complejas y se utilizan especialmente en la excavación de rocas incompetentes, frecuentemente inestables y a veces por debajo del nivel freático. Con la evolución de estos dos tipos de tuneladoras, se ha desarrollado la TBM de doble escudo que es un tipo de máquina capaz de trabajar como Gripper o como escudo simple, en función de la calidad del macizo rocoso, siendo la mejor solución para terrenos con tramos variables suelo-roca (Gratias et al, 2014).

2.1.1 Tipos de Tunnel Boring Machine en Roca Dura

2.1.1.1 TBM Gripper

Diseñadas para terrenos de roca dura y estable, estas máquinas son relativamente simples, constan de una cabeza giratoria, del diámetro nominal del túnel a excavar, la cabeza de corte está equipada con cortadores de disco que se sitúan estratégicamente para optimizar el corte de la roca. Mientras la cabeza gira, la tuneladora se apoya en los costados del túnel mediante un sistema de zapatas de anclaje o grippers que la mantienen estacionaria, unos cilindros de empuje se extienden empujando la viga principal de la máquina y transmitiendo un empuje que presiona a los cortadores contra la roca, logrando que esta se fracture y desprenda del frente de excavación. Cangilones instalados en la cabeza voltean y depositan el escombro en una cinta transportadora que los lleva hacia la parte trasera de la máquina para su evacuación del túnel. Una vez alcanzado el avance de excavación, las patas traseras de la tuneladora se extienden hasta el suelo, se retraen los cilindros de empuje y los grippers se posicionan para el siguiente ciclo de perforación. Se vuelven a anclar los grippers a los hastiales de túnel, se levantan las patas traseras y la perforación comienza nuevamente (Bilgin et al, 2013). En la Figura 2.2 se presenta un esquema de las partes de una TBM Gripper.

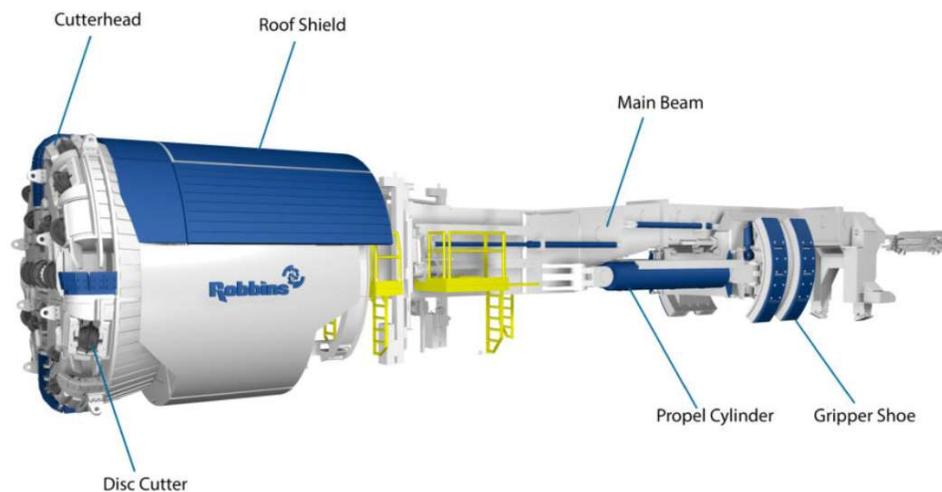


Figura 2.2: Esquema detallado de las partes de una TBM Gripper (Robbins Company, 2021).

2.1.1.2 TBM Escudo Simple

Para terrenos de roca dura con poca estabilidad, susceptibles a desprendimientos, se hace necesaria la incorporación de un escudo protector tras la cabeza de corte y la posterior colocación de un anillo de revestimiento prefabricado. El escudo no funciona como un sostenimiento temporal, sino que solo como una barrera que impide la caída de rocas dentro de la máquina y a los trabajadores. Para el avance la máquina puede apoyarse en el anillo de revestimiento, por lo que los grippers no son necesarios. El resto de los componentes son idénticos a los de una TBM Gripper sin escudo. En la Figura 2.3 se presenta un esquema de las partes de una TBM Escudo Simple (Bilgin et al, 2013).

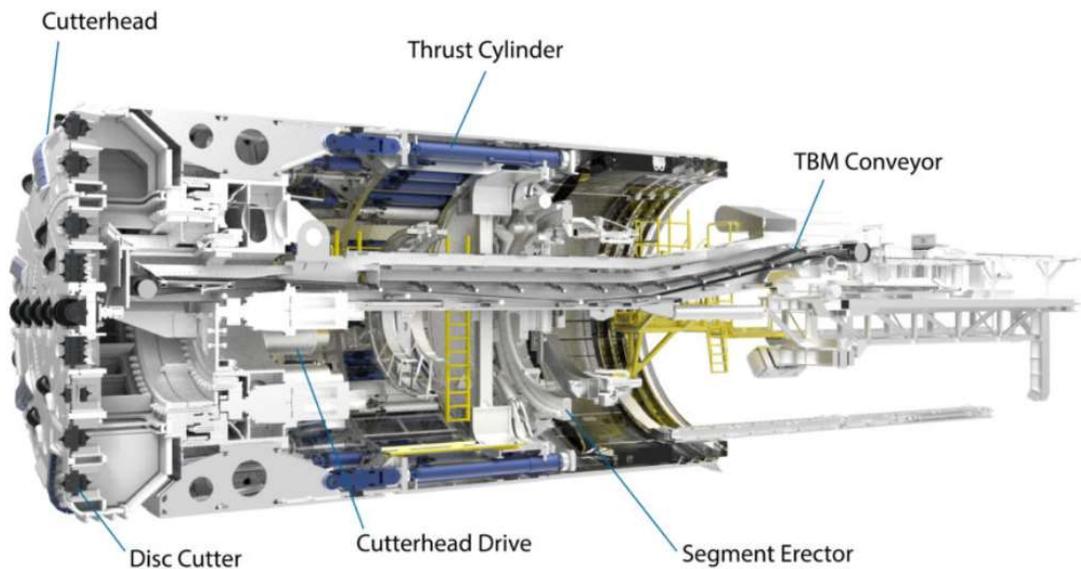


Figura 2.3: Esquema detallado de las partes de una TBM Escudo Simple (Robbins Company, 2021).

2.1.1.3 TBM Doble Escudo

Las máquinas doble escudo consisten en dos partes dispuestas una detrás de la otra, el escudo delantero está equipado con la cabeza de corte y con los cilindros principales de empuje, mientras que el escudo trasero alberga los cilindros auxiliares, los grippers de apoyo y el sistema erector de dovelas. Al interior y entre ambos escudos, se desliza un escudo telescópico de menor diámetro, que permite avanzar al escudo delantero manteniendo la máquina a cubierto y protegida del terreno durante el avance de excavación. Esta estructuración le permite distintos funcionamientos de acuerdo con la calidad del terreno excavado (Bilgin et al, 2013).

En terrenos de roca dura y estable esta TBM funciona como una TBM Gripper, donde los grippers son los encargados de resistir el empuje del avance y el torque producido por el giro de la cabeza de corte. La fijación segura de la parte trasera por parte de los grippers permite la colocación simultánea de un segmento de anillos en la cola del escudo, mientras la excavación se encuentra en progreso. En casos de que la roca sea muy estable, la colocación de revestimiento prefabricado puede ser omitida (Bilgin et al, 2013).

En terrenos inestables, donde los grippers no encuentran la resistencia necesaria para apoyarse en el macizo rocoso, esta TBM funciona como una TBM Escudo Simple. Los grippers se cierran y el empuje necesario para el avance puede ser soportado por el último anillo de dovelas colocado. Los escudos delantero y trasero se retraen y avanzan juntos, empujados por los cilindros de empuje auxiliares apoyados en el revestimiento. En este caso, no es posible realizar de forma simultánea la excavación y el montaje del anillo de dovelas como revestimiento (Bilgin et al, 2013).

En consecuencia, esta tuneladora puede trabajar como una TBM Gripper o una TBM Escudo Simple, en función de la calidad del macizo rocoso, siendo la mejor solución para tramos de tipología variable. En la Figura 2.4 se presenta un esquema de las partes principales de una TBM Doble Escudo.

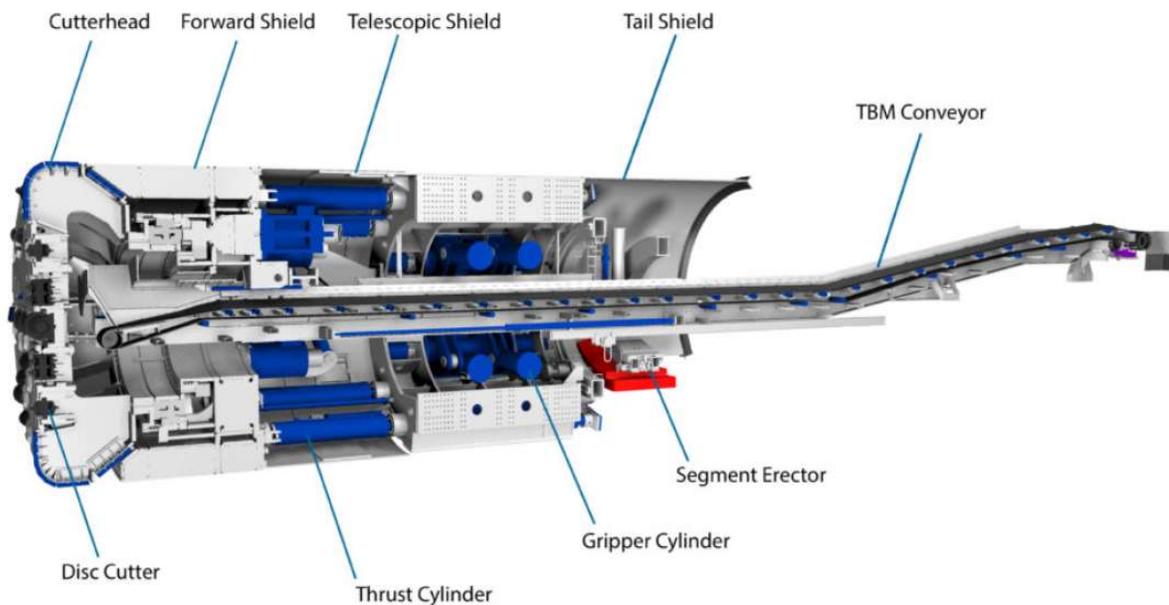


Figura 2.4: Esquema detallado de las partes de una TBM Doble Escudo (Robbins Company, 2021).

2.2 Operatividad de la Tunnel Boring Machine

2.2.1 Sistema Back-Up

El sistema back-up (Figura 2.5) está compuesto por 7 carros donde se encuentran instalados los equipos que hacen posible el funcionamiento de la TBM, los cuales son arrastrados por la máquina en su avance y que, normalmente, pueden tener longitudes desde 50 m hasta 130 m dependiendo del sistema de transporte de marina y otros componentes opcionales (Barioffi et al, 2011). Los componentes incorporados en el sistema back-up son los siguientes:

- Cabina de control y sistema de guiado
- Correa transportadora de marina
- Sistema depurador de polvo
- Sistema de agua industrial
- Carrete de cables de alta tensión
- Enrolladores de manguera de agua y aire comprimido
- Unidad de extensión y almacenamiento del conducto de ventilación
- Sistemas de grúas
- Pasarelas de seguridad
- Estación de extensión de la correa transportadora de marina
- Sistema de relleno o erector de dovelas

En el sistema back-up trabajan comúnmente 12 personas, entre las cuales se encuentran el operador de la TBM, el maestro mecánico y electrónico de la máquina, y el personal de apoyo, como eléctricos, mecánicos, soldadores, supervisores, encargados del ingreso de materiales y de prolongar la cinta transportadora, entre otras faenas (Barioffi et al, 2011).

El sistema back-up tiene una importancia tan alta como la misma tuneladora, ya que el ciclo de trabajo se dimensiona con el condicionante fundamental de que no se produzcan tiempos de espera en el frente ocasionados por las instalaciones auxiliares del back-up, por lo cual estas deben ser dimensionadas en base al tiempo de excavación de la tuneladora (Brox, 2013).



Figura 2.5: Sistema back-up de una TBM de escudo simple (Herrenknecht AG,2021).

2.2.2 Manejo de Marinas

La marina de la excavación se puede retirar del túnel mediante vagones de trenes, camiones o correa transportadora.

2.2.2.1 Transporte Ferroviario

El transporte requiere del dimensionamiento de vagones, locomotoras, colas de maniobra para los carros, sistema de descarga e instalación de vías. La operación eficiente depende de la calidad de las vías, las cuales instaladas o mantenidas de mala forma dan como resultado una velocidad de transporte reducida o descarrilamiento de los vagones. La instalación de las vías se lleva a cabo en el área entre la tuneladora y el sistema back-up, para ello se utiliza una grúa montada en un sistema de monorriel debajo de la correa transportadora (Bruland, 2000).

2.2.2.2 Transporte Camiones

Los camiones de transporte se ubican en la parte final del sistema back-up para recibir el material excavado de la frente del túnel como se muestra en la Figura 2.6. Para el transporte es necesario el relleno del camino excavado por la TBM para la circulación de los camiones que reciben la marina desde la correa transportadora de la tuneladora. Este relleno puede ser instalado simultáneamente a la excavación del túnel a través de segmentos prefabricados de concreto, o con la misma marina excavada si la calidad de la roca lo permite (Figura 2.7) (Bruland, 2000).

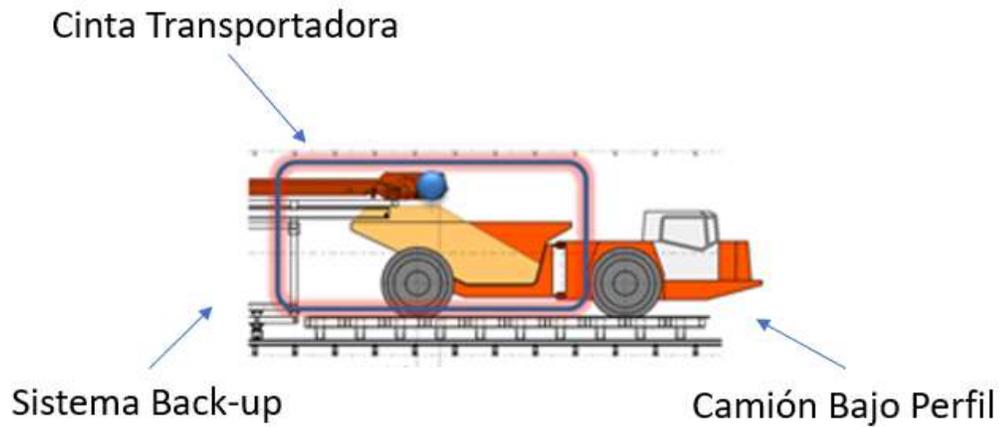


Figura 2.6: Esquema del traspaso del material excavado en el túnel desde la correa transportadora del sistema back-up al camión de transporte (Komatsu, 2019).

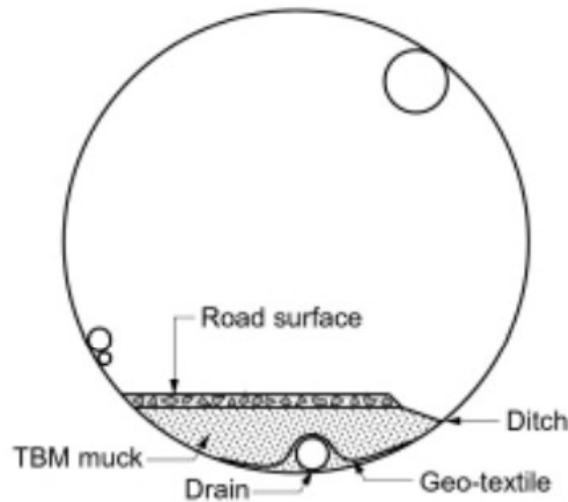


Figura 2.7: Esquema del relleno del piso de túneles excavados con TBM (Bruland, 2000)

2.2.2.3 Transporte con Correas Transportadoras

Normalmente, los escombros se eliminan en túneles medianos (6 m) y grandes (10 m) mediante correas debido al gran volumen de material que se debe transportar de manera eficiente sin afectar la excavación. Los sistemas de transporte requieren una cantidad significativa de energía, especialmente para túneles largos. Las capacidades típicas de las correas transportadora varían de 600 t/h a 1200 t/h (Brox, 2013).

2.2.3 Sitio de Montaje

Deben existir ubicaciones prácticas con suficiente área que faciliten el montaje de tuneladoras, Los portales de túneles en proyectos mineros usualmente están ubicados en la base de pendientes, donde pueden existir riesgos de caída de rocas y/o avalanchas. La disposición del sitio para una tuneladora es mucho mayor que la de una operación de perforación y tronadura y, por lo tanto, existe un mayor riesgo de caída de rocas que impacten las operaciones de tuneladora durante la construcción (Brox, 2013). Para los casos en los que las condiciones de la superficie no permiten el ensamble de la TBM se pueden excavar cavernas o cámaras de gran volumen para permitir el montaje de tuneladoras como el caso de El Teniente mostrado en la Figura 2.8. Dependiendo del tipo y tamaño de la tuneladora, el tiempo de ensamble varía desde las 10 semanas hasta las 18 semanas (Home, 2010).



Figura 2.8: Caverna de montaje de la TBM en El Teniente (Ofiara et al, 2016).

La TBM puede ser diseñada de tal forma que la parte más grande de la máquina sea la mitad de la cabeza de corte (Figura 2.9) con el objetivo de superar las limitaciones de espacio y tonelaje máximo de transporte impuestas por los túneles o piques de acceso a la caverna (Cigla et al, 2001).

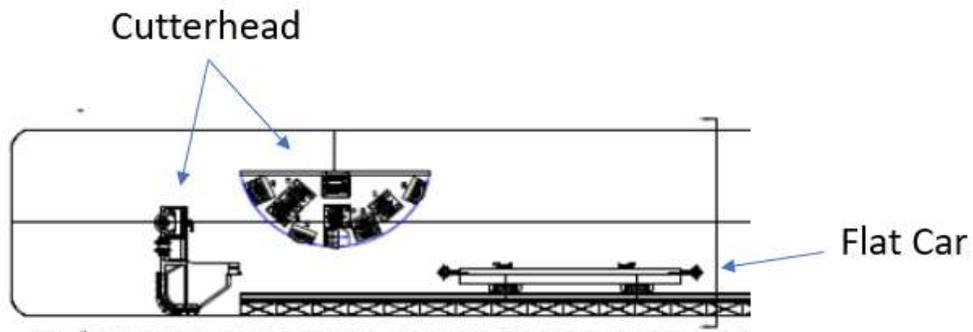


Figura 2.9: Esquema del cabezal de corte de una TBM ensamblada en dos partes (Robbins, 2020).

2.2.4 Retroceso desde el Túnel

Con sus escudos parciales, las tuneladoras Gripper ofrecen una ventaja especial en comparación a las tuneladoras de escudo simple y escudo doble. Al retraer todos los escudos, el diámetro total se reduce en la frente del túnel. Esto evita que la máquina se atasque y con la ayuda de los gripper, la máquina puede incluso replegarse por completo del túnel, si es necesario (Herrenknecht AG, 2021).

Para el caso de las tuneladoras de escudo simple y escudo doble, existe el diseño “Quick Removal System” utilizado en el proyecto de Túnel Inclinado Grosvenor en Australia, el cual permite el retroceso de la máquina, pero este se realiza en dos etapas, primero se desprende el núcleo de la TBM de los escudos para su retroceso, y luego en una segunda etapa se retiran los escudos (Gratias et al, 2014).

2.2.5 Relleno con dovelas

Una de las opciones para el relleno del piso del túnel es la utilización de dovelas de hormigón. La Figura 2.10 muestra unos de los diseños de esta clase de relleno el cual es una dovela de 1.5 m de ancho, tipo universal 6+1 k1/2, con una resistencia de 45 MPa, compuesta de 165 kg/m³ de acero en barras y 20 kg/m³ de fibra de acero (Geoconsult, 2020).



Figura 2.10: Modelo 3D de una dovela de suelo de hormigón (Geoconsult, 2020).

Su implementación requiere de la construcción de una planta de dovelas en la superficie (Figura 2.11) y la incorporación de equipos que trasladen las dovelas desde la planta hasta la TBM (Figura 2.12). La instalación de las dovelas se puede realizar simultáneamente con la excavación del túnel, el sistema de instalación del back-up permite la instalación de hasta 30 dovelas por día, de forma tal que el avance de la TBM no se vea afectada por esta operación (Geoconsult, 2020).

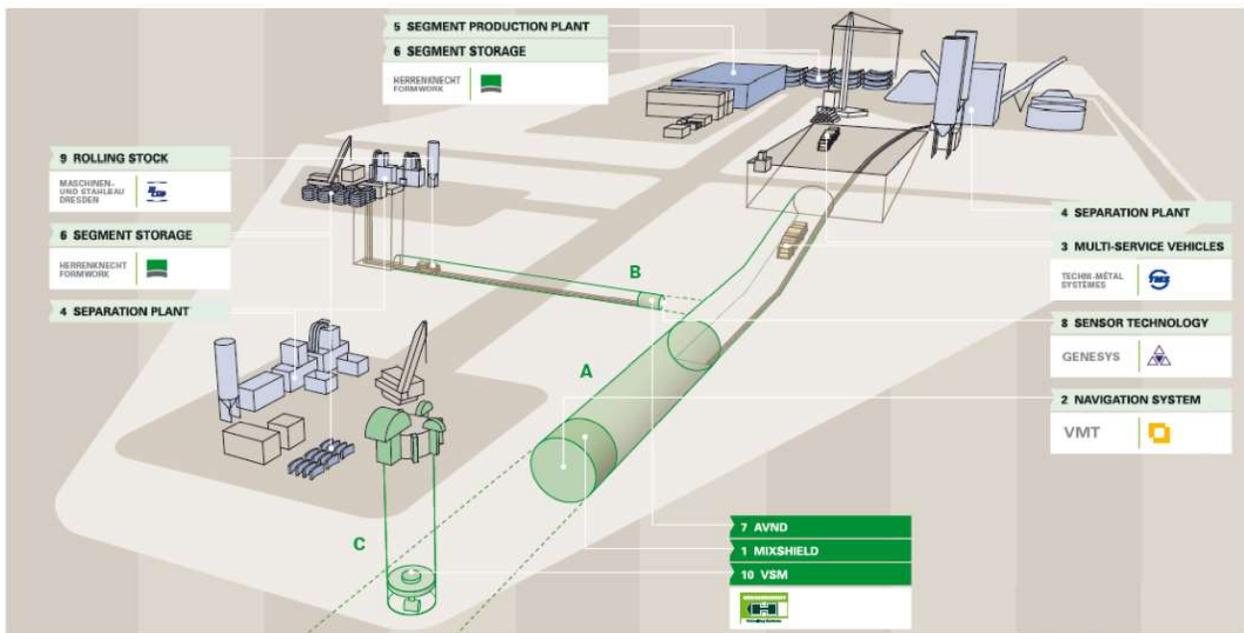


Figura 2.11: Esquema de una planta de producción de dovelas en superficie (Herrenknecht, 2019).



Figura 2.12: Flat car utilizado para el transporte de dovelas (Lewis Group, 2019).

La producción de segmentos requiere de gran precisión. Los parámetros importantes como la ruta del túnel con sus secciones rectas y curvas, y las sobrecargas del túnel deben tenerse en cuenta al diseñar los segmentos. La geometría de los segmentos individuales, así como la disposición de las juntas y su sellado, deben considerarse en la construcción de sistemas de moldeo. El resultado es un diseño de los segmentos que se puede moldear fácilmente y que también responde a las altas exigencias de la construcción de los túneles.

2.2.6 Características Técnicas Tunnel Boring Machine

2.2.6.1 Diámetro

Se han desarrollado máquinas con diámetros desde 1.2 m hasta más de 14 m para excavar en roca dura. El diámetro de una máquina determinada se puede cambiar cuando se reconstruye. Las modificaciones de $\pm 10\text{-}20\%$ son normales, dependiendo del diámetro y del fabricante. Para algunas máquinas, el diámetro puede cambiarse aún más; $\pm 100\%$ del diámetro inicial. Al especificar el diámetro de la máquina, se debe considerar que el desgaste de los cortadores puede reducir el diámetro del túnel hasta en 40 mm desde cortadores nuevos hasta cortadores desgastados (Bruland, 2000).

2.2.6.2 Pendiente

Se pueden construir tuneladoras para excavar en prácticamente todas las pendientes de túneles. La pendiente está limitada por el sistema de transporte del material excavado. El transporte ferroviario tiene un límite de pendiente de aproximadamente $\pm 2\%$, sin utilizar equipo especial. Al mismo tiempo, la pendiente del túnel debe ser superior a $\pm 0,15\%$ para facilitar el autodrenaje del túnel (Bruland, 2000).

El transporte por camión es factible para diámetros superiores a aproximadamente 8 m si se desea evitar estocadas de giro. El límite de pendiente práctico es entonces $\pm 15\%$, suponiendo un pavimento de alta calidad. El transporte por camión requiere una pendiente mínima del 0.25% para un buen drenaje (Bruland, 2000).

Una cinta transportadora continua es factible para diámetros de túnel aproximadamente mayores a 3 m. Se puede utilizar una cinta transportadora estándar para pendientes de túneles de hasta $\pm 20\%$. Dado que el uso de una cinta transportadora debe combinarse con un sistema de transporte diferente para personal, cortadores, dovelas, etc., la pendiente del túnel está limitada por el método de transporte auxiliar (Bruland, 2000).

2.2.6.3 *Radio de curvatura*

El radio de curvatura mínimo para el uso de la excavación mecanizada de túneles depende tanto de la tuneladora como del sistema de manejo de marinas. Las tuneladoras tienen un radio de curvatura mínimo de 40 a 80 m al excavar, sin excavar es de 15 a 25 m. Cuando el sistema de manejo de marinas considera el uso de cinta transportadora, el radio de curvatura mínimo es de 250 a 450 m para el funcionamiento eficiente y económico de la correa (Bruland, 2000).

En la actualidad están en desarrollo tuneladoras con radios de curvatura mínimos de 30 metros con el objetivo de lograr construir con estos equipos geometrías mineras complejas, o para otorgarle a la TBM mayor maniobrabilidad para evitar condiciones de roca de mala calidad o zonas de fallas geológicas (Brox, 2013).

2.3 Terrenos Desafiantes para Tunnel Boring Machine

- Altos esfuerzos: Se restringe la fragmentación de la roca por los cortadores de la TBM y se necesita una mayor fuerza de empuje para romper el macizo rocoso de forma efectiva. En consecuencia, la tasa de penetración de una TBM disminuye al aumentar el estrés in situ (Larsson, 2004).

- Incremento del flujo de agua: Puede ser necesario un recálculo del sostenimiento empleado, o modificación del ritmo de avance, lo cual a largo plazo produce una demora. Cuando la filtración de agua es mayor a la esperada, esta se puede acumular en la frente del túnel dependiendo del ángulo de inclinación del túnel, dificultando así las labores de fortificación y colocación de dovelas de hormigón (Figura 2.13) (Robbins, 2020).



Figura 2.13: Ingreso de agua en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).

- Macizos rocosos blocosos: Cuando el macizo se encuentra altamente fracturado y contiene estructuras desfavorables (Figura 2.14) se puede generar durante la excavación el colapso de bloques de roca en la cara del túnel lo que resulta en daños a los cortadores y cabezal de corte, así como también atrapamientos del cabezal (Barton, 2000).



Figura 2.14: Roca altamente fracturada encontrada en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).

- Zonas con fallas: Reducción significativa de la velocidad de avance debido a las labores necesarias para el acondicionamiento del macizo rocoso (lo cual necesita de la detención del proceso de excavación y consecuentemente aumenta los costos), o la necesidad de liberar el cabezal de corte de la máquina si se atasca, especialmente en caso de desplazamientos en el túnel (esto también afecta enormemente la seguridad del personal en el túnel) (Paltrinieri, 2015).

- Estallidos de roca: Afecta principalmente la tasa de avance de la TBM debido al desgaste anormal del cortador, la eliminación del material estéril y los problemas de agarre. Debido al tiempo de inactividad prolongado y frecuente causado por la eliminación del estéril, el daño anormal del cortador y del cabezal de corte, la tasa de avance se ve afectada bajo esta condición de estrés (Larsson, 2004).

Este último punto es particularmente importante debido a que, a diferencia de la PyT, el avance de la TBM no genera una disipación de la energía de deformación en las paredes del túnel, lo cual puede provocar estallidos de roca violentos que pone en riesgo la seguridad del personal, causar serios daños al equipo de excavación y a la integridad del túnel (Figura 2.15) (Rehbock-Sander & Jesel, 2018).



Figura 2.15: Daños generados en el túnel de excavación producto de eventos de estallido de roca en el Túnel Base San Gotardo (Rehbock-Sander & Jesel, 2018).

2.4 Estimación de Costos de una Tunnel Boring Machine

Esta sección proporciona métodos y datos necesarios para estimar los costos de excavación y los costos totales de construcción de túneles mediante TBM en roca dura.

Los modelos de estimación se basan en estudios en terreno y estadísticas de la construcción de túneles en Noruega y en el extranjero, incluidos más de 35 proyectos y más de 250 km de túnel. La base de datos completa se ha adquirido a través de estudios de campo y mapeo geológico realizados por el Departamento de Ingeniería de Edificación y Construcción de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) financiado por un socio externo (propietario o contratista del túnel). Como un intercambio por el apoyo externo, NTNU ha prometido no revelar ninguna información de la adquisición de los datos de campo. Por lo tanto, la base de datos no está disponible fuera de NTNU (Bruland, 2000).

La fecha del modelo de los costos de excavación es enero de 1999, por lo que los costos se actualizan a la fecha de enero de 2021 (1 NOK en 1999 = 1.57 NOK en 2021). Además, los costos son convertidos desde la moneda noruega a dólares americanos (1 NOK = 0.12 USD). Los costos normalizados incluyen todas las operaciones necesarias para excavar el túnel. En el caso de la operación del soporte de la roca, solo se considera la instalación de pernos. Una vez estimados los costos totales, se deben agregar costos en caso de condiciones imprevistas durante la excavación del túnel. Como regla general, los costos adicionales por condiciones imprevistas ascienden aproximadamente al 10% de los costos estimados (Bruland, 2000).

2.4.1 Costos de Adquisición

Los costos de adquisición corresponden al precio de todos los equipos despachados en el sitio del proyecto (Bruland, 2000). La Ecuación 2.1 y la Ecuación 2.2 permiten estimar los costos de adquisición de la TBM y del sistema back-up a partir del diámetro de la TBM.

$$C_{TBM} = 2.1409 * D_{TBM} - 2.0767$$

Ecuación 2.1: Costo de adquisición de la TBM (Bruland, 2000).

$$C_{back-up} = 0.4967 * D_{TBM} - 1.6442$$

Ecuación 2.2: Costo de adquisición del sistema back-up (Bruland, 2000).

Donde:

C_{TBM} : Costo de adquisición de la TBM [MUSD]

$C_{back-up}$: Costo de adquisición del sistema back-up [MUSD]

D_{TBM} : Diámetro de la TBM [m]

2.4.2 Costos de Montaje

Los costos de transporte de la tuneladora y del sistema back-up, hormigonado de los bloques de partida, montaje, desmontaje y retroceso de la máquina fuera del túnel en función del diámetro de la TBM se pueden estimar con la Ecuación 2.3 (Bruland, 2000).

$$C_M = 0.1507 * D_{TBM} + 0.3391$$

Ecuación 2.3: Costos montaje de la TBM y sistema back-up (Bruland, 2000).

Donde:

C_M : Costos de montaje de la TBM [MUSD]

D_{TBM} : Diámetro de la TBM [m]

2.4.3 Costos de Excavación y Sistema Back-up

La Figura 2.16 y Figura 2.17 muestran los costos de excavación y del sistema back-up en función del diámetro de la TBM y la tasa de penetración sobre la roca (Bruland, 2000).

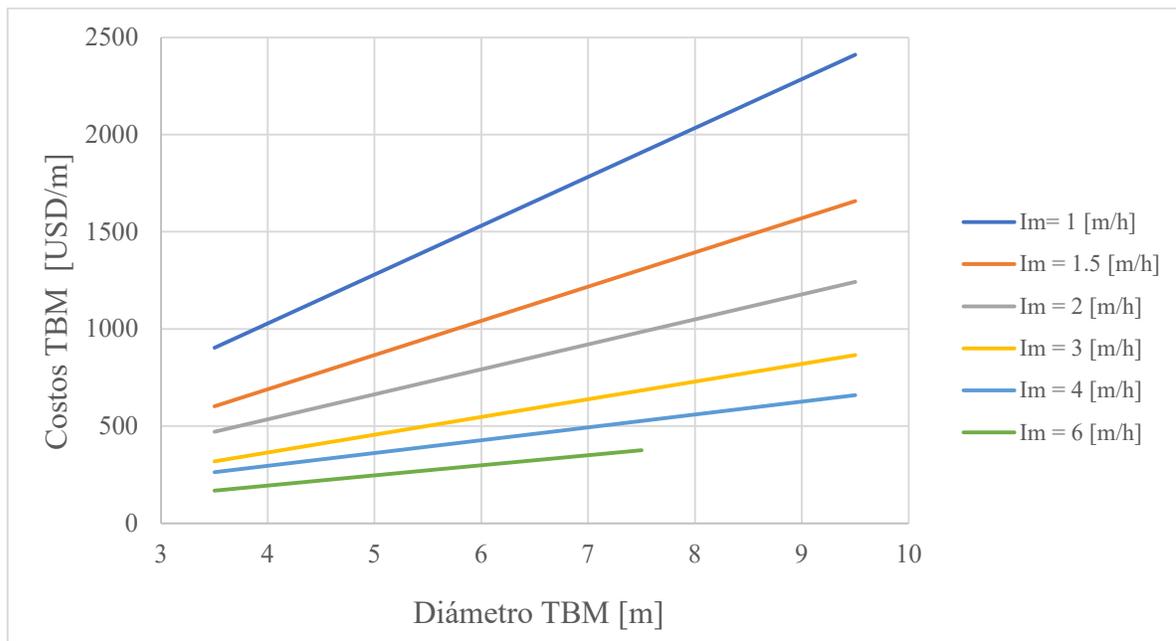


Figura 2.16: Costos de excavación de la TBM (I_m = tasa de penetración) (Bruland, 2000).

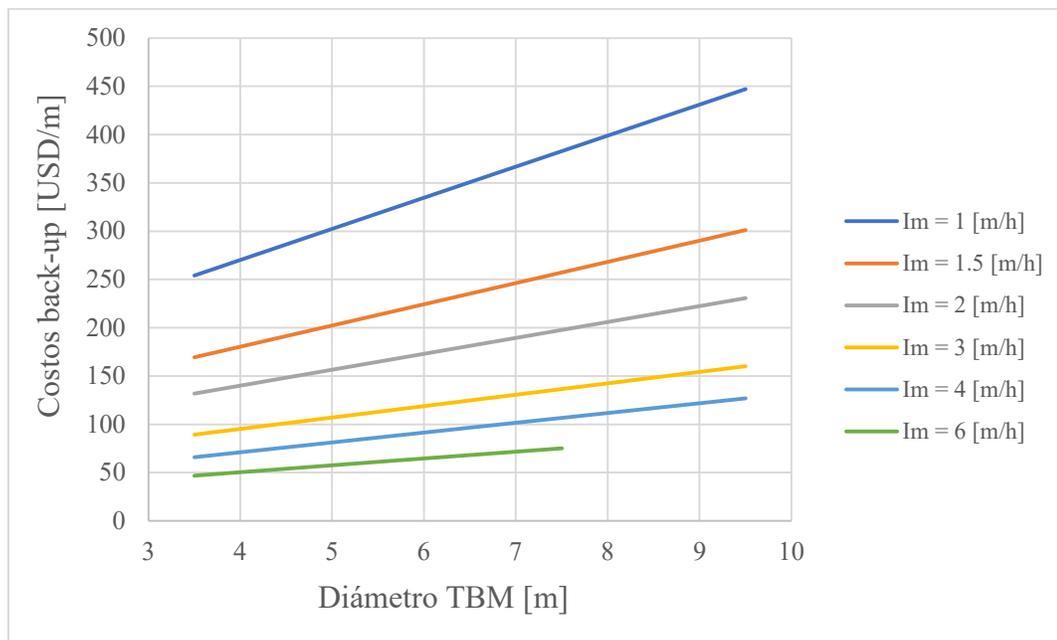


Figura 2.17: Costos sistema back-up (I_m = tasa de penetración) (Bruland, 2000).

2.4.4 Costos de Cortadores

Los costos de los cortadores incluyen los anillos, los rodamientos, los cangilones y otras partes de los cortadores (Bruland, 2000). La Figura 2.18 muestra los costos básicos de los cortadores en función de la vida útil de los anillos cortadores y su diámetro. Los costos promedio de los cortadores se calculan según la Ecuación 2.4.

$$c_b = c_{0b} \times \frac{N_{tbm}}{I_m}$$

Ecuación 2.4: Costos de los cortadores promedio (Bruland, 2000).

Donde:

c_b : Costos de los cortadores promedio [USD/m]

c_{0b} : Costos básicos de los cortadores [USD/m*h]

N_{tbm} : Número de cortadores en la cabeza de corte

I_m : Tasa de penetración sobre la roca [m/h]

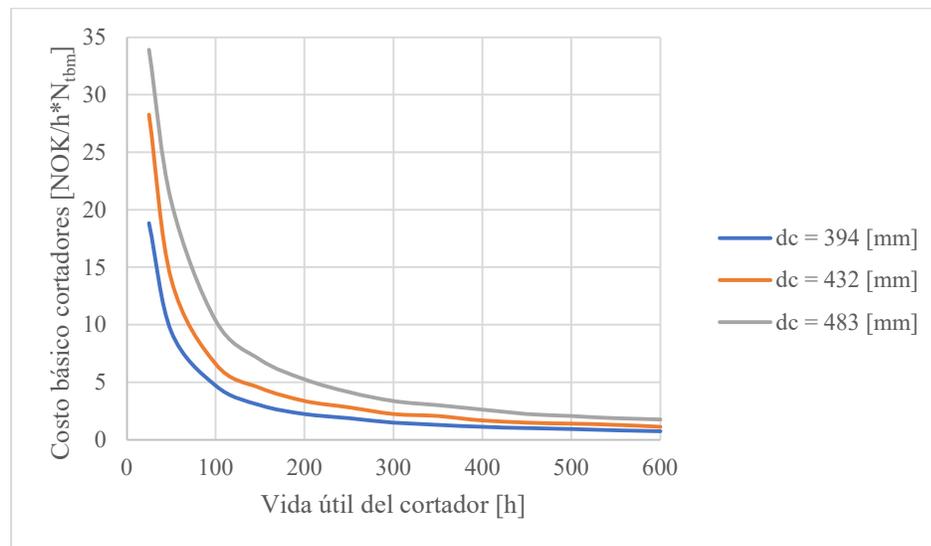


Figura 2.18: Costo de los cortadores (dc = diámetro de los cortadores) (Bruland, 2000).

2.4.5 Costos de Mano de Obra

La Figura 2.19 muestra los costos de la mano de obra en función de la tasa de penetración, el largo del túnel y la vida útil de los cortadores. Los salarios por hora se estiman en 42 USD/h + 50% de costos por seguro social para el trabajo en el túnel y 30 USD/h + 50% de costo por seguro social para el trabajo fuera del túnel.

El trabajo relacionado al soporte de roca no está incluido. Esto se refiere al soporte de roca que requiere que se detenga la excavación, es decir, hormigón proyectado, lechada. Sin embargo, se incluye el trabajo de soporte de roca realizado durante la excavación y que no aumenta la cuadrilla (Bruland, 2000).

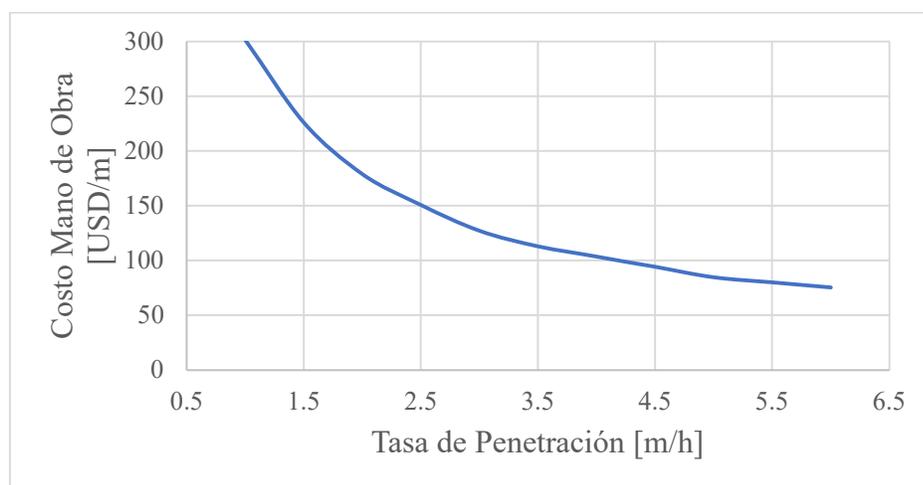


Figura 2.19: Costos mano de obra (Bruland, 2000).

2.4.6 Costo Mantenimiento y Reparación

Los costos de reparación y mantenimiento incluyen los costos de repuestos y costos de taller. Los costos de reparación y mantenimiento de la TBM y el sistema back-up se estiman de acuerdo a la Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6, junto con un factor de corrección de la tasa de penetración sobre la roca presentado en la Ecuación 2.7 (Bruland, 2000).

$$C_{m,TBM} = 15.757 * D_{TBM} + 1.3702$$

Ecuación 2.5: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM (Bruland, 2000).

$$C_{m,back-up} = 6.8509 * D_{TBM} + 5.1382$$

Ecuación 2.6: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up (Bruland, 2000).

$$k_m = 0.25 * I_m + 0.25$$

Ecuación 2.7: Factor de corrección del costo de mantenimiento (Bruland, 2000).

Donde:

$C_{m,TBM}$: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM [USD/h]

$C_{m,back-up}$: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up [USD/h]

k_m : Factor de corrección del costo de mantención

D_{TBM} : Diámetro de la TBM [m]

I_m : Tasa de penetración sobre la roca [m/h]

2.4.7 Costos de Servicio

Los costos del servicio incluyen materiales para el servicio de rutina como el cambio de aceite, lubricación y cambio de filtros. La Ecuación 2.8 y Ecuación 2.9 permiten estimar los costos de servicio para la TBM y el sistema back-up en función del diámetro de la TBM (Bruland, 2000).

$$C_{s,TBM} = 5.1382 * D_{TBM} + 10.276$$

Ecuación 2.8: Costos de servicios de la TBM (Bruland, 2000).

$$C_{s,back-up} = 0.8564 * D_{TBM} + 7.3647$$

Ecuación 2.9: Costos de servicios del sistema back-up (Bruland, 2000).

Donde:

$C_{s,TBM}$: Costos de servicios de la TBM [USD/h]

$C_{s,back-up}$: Costos de servicios del sistema back-up [USD/h]

D_{TBM} : Diámetro de la TBM [m]

2.4.8 Costos de Energía

Los costos incluyen el consumo de energía eléctrica estimados mediante la Ecuación 2.10 y corregidos por un factor de la tasa de penetración sobre la roca en la Ecuación 2.11. Se considera un costo de energía eléctrica de 0.1 USD/kWh (Bruland, 2000).

$$C_e = 400 * D_{TBM} - 700$$

Ecuación 2.10: Costos del consumo de energía (Bruland, 2000).

$$k_e = 0.0677 * I_m + 0.878$$

Ecuación 2.11: Factor de corrección del costo de energía (Bruland, 2000).

Donde:

C_e : Costos del consumo de energía [kWh/h]

k_m : Factor de corrección del costo de energía

D_{TBM} : Diámetro de la TBM [m]

2.5 Proyectos con Tunnel Boring Machine

A continuación, se presentan los antecedentes de algunos de los proyectos en los que se han utilizado TBM en roca dura.

2.5.1 San Manuel, EE. UU.

La mina San Manuel utilizó el método Block Caving para explotar su cuerpo mineralizado. El plan de desarrollo de la mina requirió la excavación de 12,800 metros en 2 niveles. Luego de un largo estudio para decidir el método de construcción de los túneles, se optó como mejor opción el uso de TBM, donde el mineral sería acarreado a superficie mediante correa transportadora (Figura 2.20) (Cigla et al, 2001).

La TBM excavó en un perfil estable de cuarzo monzonita, donde el UCS de la roca variaba entre 150 a 180 MPa. Uno de los problemas que se presentó durante la excavación, fue la presencia de arcilla que tapó el cabezal de la TBM impidiendo su movimiento normal. Existieron otros problemas que implicaron el cambio de algunos componentes de la TBM, estos cambios permitieron aumentar su rendimiento, llegando a 22 m/día. En general, esta fue una aplicación exitosa de TBM en minería profunda en roca dura, posibilitando a la mina cumplir con su cronograma acelerado para el desarrollo del nuevo yacimiento (Cigla et al, 2001).

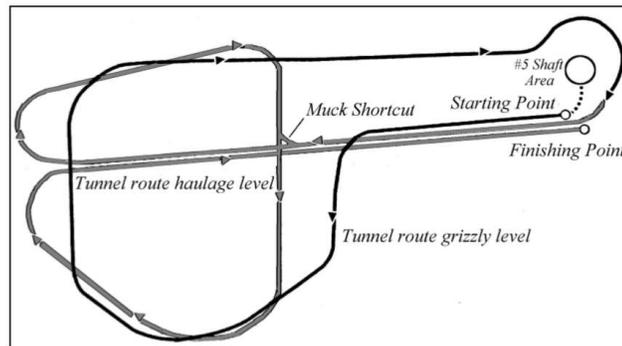


Figura 2.20: Ruta del túnel en la mina San Manuel (Cigla et al, 2001).

2.5.2 Stillwater, EE. UU.

Stillwater Mining Company (SMC) desarrolló una segunda mina subterránea de paladio y platino a unos 21 km al oeste de su operación en Montana. La compañía minera requería de un túnel de 5,650 m para obtener acceso al cuerpo mineralizo (Cigla et al, 2001).

Debido a sus éxitos anteriores con el uso de TBM, la mina Stillwater decidió utilizar una TBM para todos los desarrollos de acceso a la mina. El elemento más esencial en la aceleración del cronograma del proyecto fue establecer un segundo medio de acceso para el desarrollo subterráneo (Cigla et al, 2001).

Se utilizaron 2 TBMs, una para el Adit 1 y otra para el Adit 2 (Figura 2.21). El túnel de acceso Adit 1 de 4.6 m de diámetro se construyó con 0.5% de pendiente y con un largo de 5,650 m hasta llegar al cuerpo mineralizado, donde mayoritariamente el UCS de la roca variaba entre 60 y 190 MPa. En base a estas condiciones la TBM alcanzó un rendimiento promedio de 13 m/día (Cigla et al, 2001).

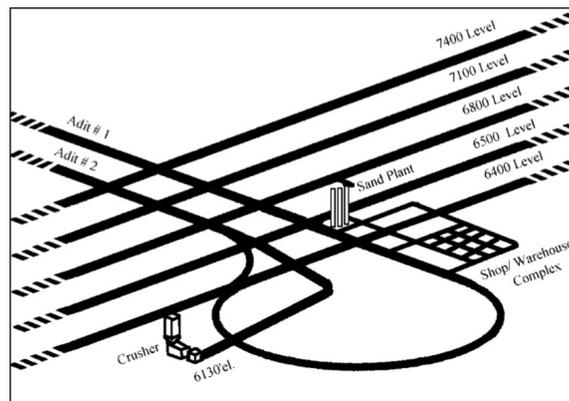


Figura 2.21: Layout Proyecto Mina Stillwater (Cigla et al, 2001).

2.5.3 El Teniente, Chile

Dos túneles de acceso de 10 km de largo cada uno fueron planificados para proporcionar acceso a una nueva área de trabajo de la mina. El desarrollo de esta nueva construcción es fundamental para la operación futura de las labores de la mina. Uno de los túneles tiene como finalidad el tráfico de autobuses para llevar la fuerza laboral a la mina y el otro para la correa transportadora principal para transportar el mineral fuera de la mina (Ofiara et al, 2016).

El contratista eligió usar el método convencional de perforación y tronadura, ya que este método puede realizar la excavación desde varias frentes simultáneamente y se pensó que permitiría una excavación más versátil y menos riesgosa. Sin embargo, como consecuencia de la alta profundidad y altos esfuerzos, se produjeron muchos estallidos de roca (Ofiara et al, 2016).

Debido al lento avance de las labores, el contratista solicitó a la compañía Robbins realizar un estudio para el uso de TBM para completar la construcción de los túneles. La TBM podría desplegarse rápidamente a través de los túneles construidos con perforación y tronadura y la TBM ofrecía altas tasas de avance y seguridad en las condiciones que se presentaban aun cuando el avance de los túneles se encontraba a la mitad cuando comenzó el estudio de la posibilidad de usar TBM (Ofiara et al, 2016).

2.5.4 Los Bronces, Chile

En el año 2008 en la División Los Bronces de Anglo American (Figura 2.22), con la necesidad de contar con un acceso permanente, expedito y seguro para sondear un futuro yacimiento de sulfatos, se comenzó a desarrollar la construcción de un túnel de 8,125 m de longitud desde un portal ubicado a 3,600 metros sobre el nivel del mar (Figura 2.23) (Barioffi et al, 2011).



Figura 2.22: Mina Los Bronces (Barioffi et al, 2011).



Figura 2.23: Portal de la TBM y camino de acceso (Barioffi et al, 2011).

La tuneladora utilizada para excavar este túnel es del tipo TBM de doble escudo acondicionada para realizar un ciclo de excavación de 1.4 m, con un diámetro de 4.5 m y 90 m de longitud incluyendo el sistema back-up (Figura 2.24). Las marinas de la excavación fueron llevadas a la superficie por una cinta transportadora, el sistema logístico se realizó a través de una vía férrea usando locomotoras diésel con sistemas de filtros de contaminantes de alta tecnología, la vía férrea fue montada sobre dovelas de piso de hormigón prefabricado. La fortificación del túnel fue compuesta por pernos de anclaje y malla de acero en terreno de buena calidad, mientras que en los sectores con terrenos de mala calidad geomecánica, se utilizaron dovelas metálicas para evitar la caída de roca fracturada (Barioffi et al, 2011).

Una vez alcanzada la roca competente, la TBM alcanzó tasas de avance por sobre los 20 m/día, superando en ocasiones los 35 m/día, con avances cercanos a los 400 m/mes, no sin dificultades, pero con una clara demostración de que se pueden obtener avances significativos con esta tecnología (Barioffi et al, 2011).



Figura 2.24: TBM Doble Escudo utilizada en Los Bronces (Barioffi et al, 2011).

2.5.5 Túnel de Base de San Gotardo

El Túnel de base de San Gotardo es un túnel ferroviario que se encuentra bajo los Alpes en Suiza y que conecta Alemania con Italia. Su construcción se debe al aumento del tránsito vehicular y ferroviario al cruzar los Alpes en el eje Norte-Sur de Europa. La construcción del túnel genera un medio más rápido de cruzar los Alpes donde trenes de pasajeros pueden circular hasta 250 km/h y a la misma vez trenes de carga de 4,000 ton pueden hacer uso del túnel sin problema. Este túnel corresponde a uno de los más largos y profundos del mundo llegando a medir 57 km de longitud. Está formado por dos túneles paralelos de 9 a 9.5 m de diámetro que se encuentran separados 40 m y que están conectados por galerías cada 325 m. Para la construcción del túnel se utilizaron 4 tuneladoras Gripper de la compañía Herrenknecht. Estas tuneladoras estuvieron a cargo de la construcción de más de 85 km de túneles, entre el año 2003 y año 2011, donde se excavaron más de 13.5 millones de metros cúbicos de roca (Figura 2.25). La construcción se dividió en 5 etapas de las cuales se separaron 2 TBMs por el lado Norte y 2 TBMs por el lado Sur (Herrenknecht, 2010).

Durante la construcción de la Estación Faído del Túnel Base del San Gotardo, se encontró una falla tectónica importante previamente desconocida e inesperada. Una vez completado el avance a través de la falla, ocurrieron eventos de estallido de roca importantes y sistemáticos en la roca competente Gneiss adyacente a la falla (Rehbock-Sander & Jesel, 2018).



Figura 2.25: Longitud de los tramos de túneles construidos en el proyecto Base de San Gotardo (Herrenknecht, 2010).

2.5.6 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, ubicado en la región Metropolitana, implica una nueva central hidroeléctrica de paso al interior del Valle Cajón del Maipo a unos 2,000 metros sobre el nivel del mar. Constituye un gran desafío en cuanto a construcción subterránea, ya que requiere de la excavación de 67 km de túneles en zonas de fallas y roca altamente alterada (Figura 2.26).



Figura 2.26: Sitio de montaje de la TBM Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).

Los túneles se excavan mediante dos métodos constructivos, el método convencional de perforación y tronadura en 38 km de longitud y mediante tuneladoras los 29 km restantes, para los cuales el proyecto Alto Maipo contempla tres TBMs (doble escudo y dos escudos simples) de última generación de diámetros 4.1, 4.5 y 6.9 metros respectivamente, construidas por las compañías Herrenknecht y Robbins.

Durante el proyecto se decide agregar dos TBM Gripper adicionales de 4.1 m de diámetro (Figura 2.27) a las máquinas consideradas en un inicio para la construcción de los túneles El Volcán y Alfalfal II de 7 km cada uno, para estos túneles los primeros 3 km son excavados con PyT y los 4 km restantes con TBM (Robbins, 2020).



Figura 2.27: TBM Gripper utilizada en el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).

2.5.7 Resumen de Proyectos

Después de la revisión de los proyectos con TBM en roca dura y en profundidad presentados anteriormente, se realiza una comparación de los parámetros considerados relevantes obtenidos en la excavación de los túneles.

Tabla 2.1: Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (elaboración propia).

Parámetro	San Manuel	Stillwater	El Teniente	Los Bronces	San Gotardo	Alto Maipo
Diámetro túnel [m]	4.6	4.6	4.6	4.5	9, 9.5	4.1, 4.5, 6.9
Largo perforado [km]	10.5	5.6	10	8	57	40
UCS [MPa]	150-180	60-190	200	75-200	90-200	70-180
Profundidad [m]	2,500	1,000	1,200	1,000	3,000	800
Tipo de TBM	Gripper	Gripper	Gripper	D. Escudo	Gripper	D/S Escudo
Rendimiento máximo [m/día]	44.5	20	12	35	18	33
Rendimiento promedio [m/día]	22.6	13	9.5	12	10	10

La Tabla 2.1 muestra cada uno de los proyectos analizados con los parámetros estudiados. Se puede desprender que el Túnel de Base de San Gotardo, es el túnel más largo construido y que se encuentra a mayor profundidad, teniendo resultados muy positivos y demostrando de esa manera que la TBM es una excelente tecnología que permite realizar excavaciones incluso en condiciones desafiantes.

2.6 Método de Explotación Block Caving

Esta sección explica la lógica de la extracción de minerales mediante Block Caving y se presenta como caso de estudio el proyecto mina Chuquicamata Subterránea, proyecto con el que se evalúa su compatibilidad con la excavación mecanizada posteriormente en este trabajo.

2.6.1 Descripción de la Explotación por Block Caving

El block caving corresponde a un método de explotación de minería subterránea basado en el principio de hundimiento y quiebre de mineral debido a la remoción de un área de soporte base del bloque lo suficientemente grande y la posterior extracción de este a través de un sistema de embudos o zanjas recolectoras. El vacío generado por la extracción de este material de la base es rellenado por la caída de material superior por acción de la gravedad, que sumado al proceso de atrición dado por el roce durante su descenso definen el tamaño del mineral en el punto de extracción. Una vez extraído desde este punto el material es trasladado hasta un pique de traspaso encargado de dirigirlo hasta el proceso siguiente ya sea de reducción o de transporte. Este último se encarga de llevarlo desde el interior de la mina a la planta de procesamiento para su posterior tratamiento (Vergara, 2014).

Para el desarrollo de este método se cuenta con los siguientes niveles donde se producen distintas tareas que permiten la explotación y extracción de mineral (Figura 2.28), estos son:

Nivel de Hundimiento: En este se realiza la socavación de la columna mineralizada, mediante perforación y tronadura.

Nivel de Producción: Aquí la roca es cargada desde el punto de extracción y transportada mediante equipos mecanizados hasta un pique de traspaso.

Nivel de Ventilación: Permite el ingreso de aire fresco y la descarga del viciado desde los niveles de producción.

Nivel de Acarreo: O de transporte intermedio, donde se produce el carguío y transporte de mineral proveniente desde el nivel de producción. Este nivel puede no ser necesario en algunas faenas mineras.

Nivel de Transporte: Se desarrolla las operaciones de carguío y transporte de mineral proveniente del nivel de acarreo o del nivel de producción directamente.

Nivel de Preacondicionamiento: Destinado a desarrollar el preacondicionamiento del macizo ya sea de forma hidráulica o con explosivos. Suele incorporarse en casos en que no es posible preacondicionar desde el nivel de producción.

Nivel de Reducción Secundaria: Se realiza la reducción de tamaño del mineral mediante martillos picadores.

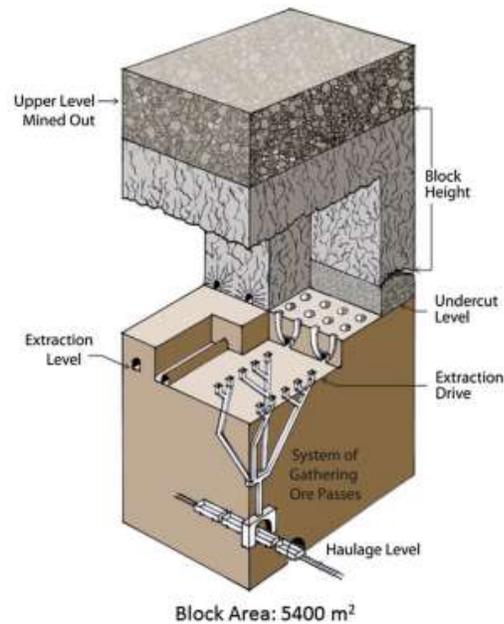


Figura 2.28: Esquema de los niveles de una mina Block Caving convencional (Flores & Catalan, 2019).

Los actuales avances en este método de explotación han llevado al surgimiento de lo que en un inicio correspondía a un híbrido entre el Block y Panel Caving, pero que hoy se considera una variante adicional, este es el Macrobloque, definido como la unidad básica de explotación, donde en cada uno se realiza de manera independiente las etapas de preparación, socavación y producción (Figura 2.29). Comprende áreas de 20,000 a 55,000 m² y entre cada uno de los bloques se dejan pilares destinados a mantener la estabilidad durante el desarrollo de las actividades en los macrobloques continuos (Vergara, 2014).

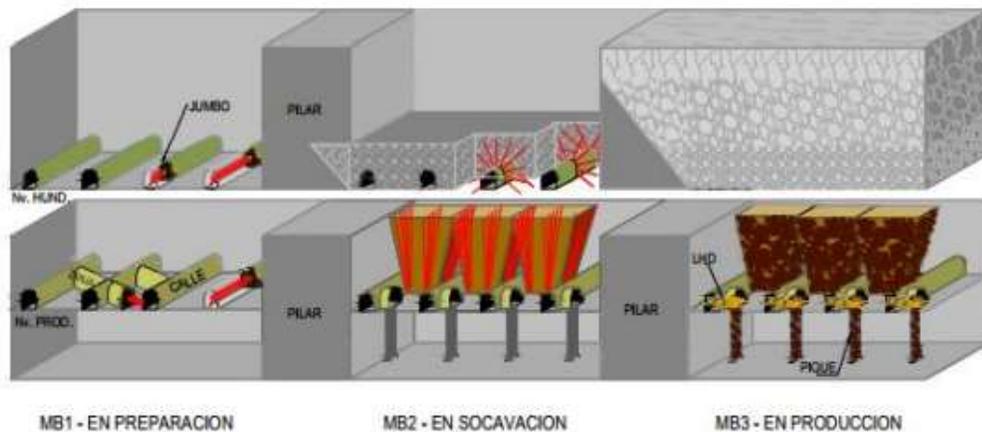


Figura 2.29: Esquema de la secuencia de construcción de Macrobloques (Vergara, 2014).

2.6.2 Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

2.6.2.1 Descripción del Proyecto

El Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) consiste en la transformación del histórico rajo abierto Chuquicamata a una mina subterránea Block Caving de gran escala que considera la extracción rentable de 1,760 Mt de mineral de un 0.7% de cobre y 512 ppm de molibdeno a una tasa de extracción de 140,000 tpd, lograda después de siete años de ramp-up, durante 38 años. El proyecto contempla 3 niveles, con hasta dos niveles operando simultáneamente, cinco túneles de entrada de aire principales, dos piques principales de extracción de aire, una rampa de acceso principal y una rampa para el transporte de toda la producción de la mina a la superficie (Figura 2.30). El primer nivel se encuentra a 200 m por debajo del fondo del rajo y extraerá columnas de mineral de hasta 400 m de altura (Paredes et al,2018).

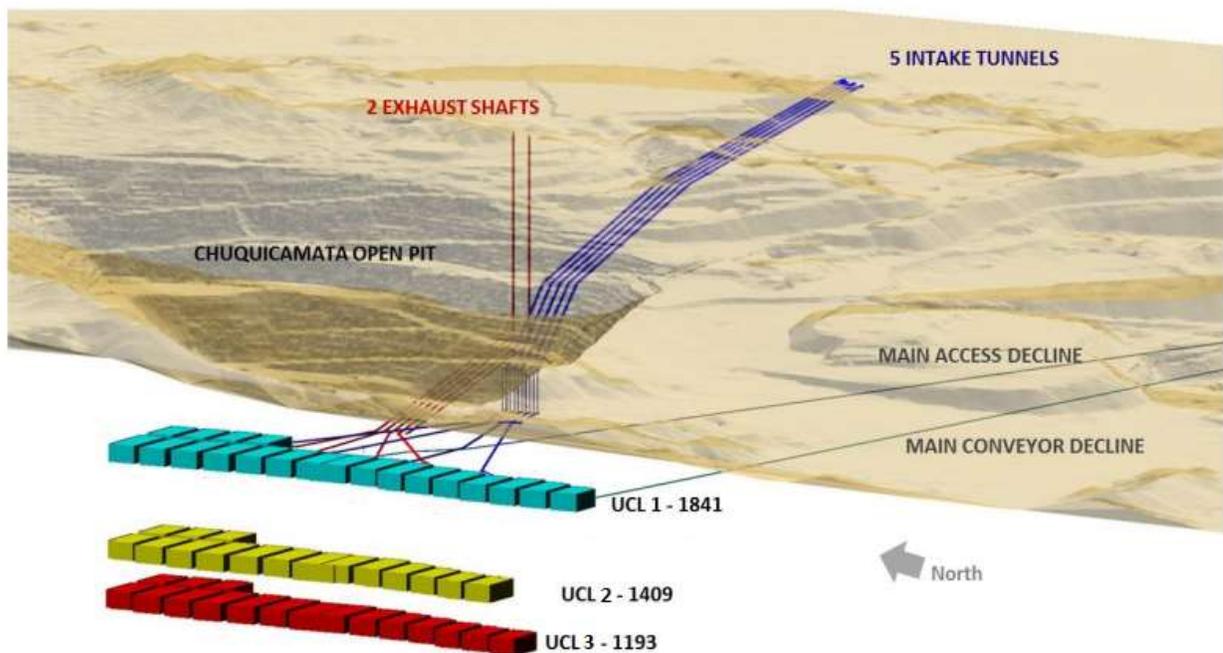


Figura 2.30: Configuración de la mina Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).

2.6.2.2 Diseño de la Mina

El diseño de la mina se basa en siguiente proceso de producción (Figura 2.31) (Paredes et al,2018):

- Se inicia con el uso de precondicionamiento intensivo del macizo rocoso, que consiste en la aplicación de fracturamiento hidráulico y tronadura confinada para mejorar la fragmentación y el caving del macizo rocoso.
- Continúa con la aplicación de una socavación alta (20 m) en el nivel de hundimiento para minimizar las detenciones de flujo en la parte inicial de la extracción de la columna de mineral.
- El mineral derrumbado se carga mediante LHD de 20 t en los puntos de extracción del nivel de producción, se transporta y se descarga directamente en un pique de traspaso que alimenta un chancador giratorio.
- El mineral chancado es transportado por una cinta transportadora intermedia hacia el sistema principal de manejo de mineral.

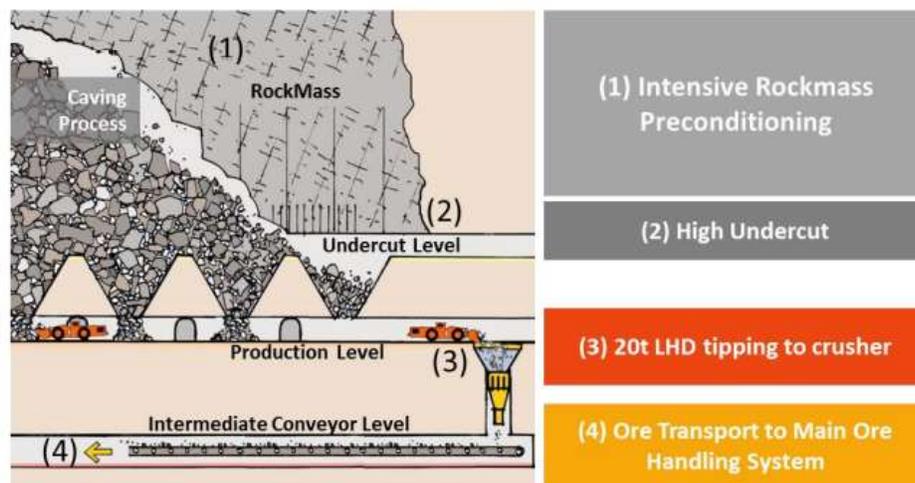


Figura 2.31: Esquema del proceso de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).

El diseño de la mina considera seis subniveles: hundimiento, producción, chancado, inyección de aire, extracción de aire y transporte intermedio, además de un nivel adicional para el hidrofracturamiento y monitoreo del caving (Figura 2.32).

El nivel de hundimiento se encuentra 18 m por encima del nivel de producción. El pique que alimenta la cámara de chancado está inmediatamente contiguo al piso del nivel de producción. 20 m por debajo del nivel de producción, la galería de inyección de aire, con orientación norte-sur, cruza hacia el lado este del macrobloque. Finalmente, 26 m por debajo del nivel de inyección, la galería de extracción de aire, con orientación norte-sur, cruza hacia el lado occidental del macrobloque (Paredes et al,2018).

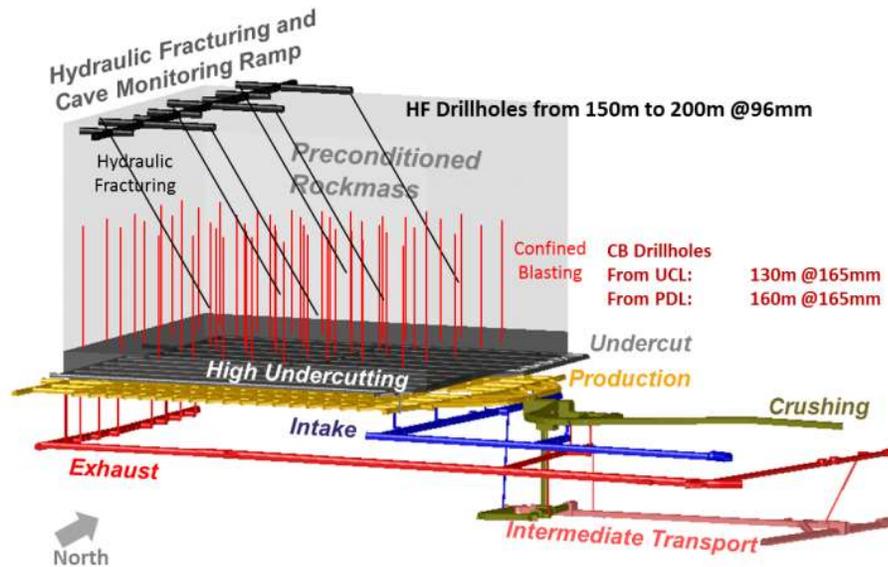


Figura 2.32: Diseño de los niveles de un Macrobloque en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).

Las dimensiones de cada macrobloque son 340 m de largo y 128 m de ancho, con cuatro calles de producción y 144 puntos de extracción. La malla de extracción es una malla Teniente de 16x16, es decir, con 32 m entre las calles de extracción y 16 m entre los puntos de extracción. Además, se considera dejar un pilar de 30 m entre macrobloques (Flores & Catalan, 2019).

El diseño de la mina considera una cámara de chancado por cada dos macrobloques, lo que establece una distancia de desplazamiento promedio para el LHD de 250 a 300 m. En el nivel de producción, los LHD descargan en el pique de traspaso ubicado en el lado este del par de macrobloques. La zona de descarga está diseñada para permitir el vaciado simultáneo de cuatro LHD como se muestra en la Figura 2.33 (Paredes et al, 2018).

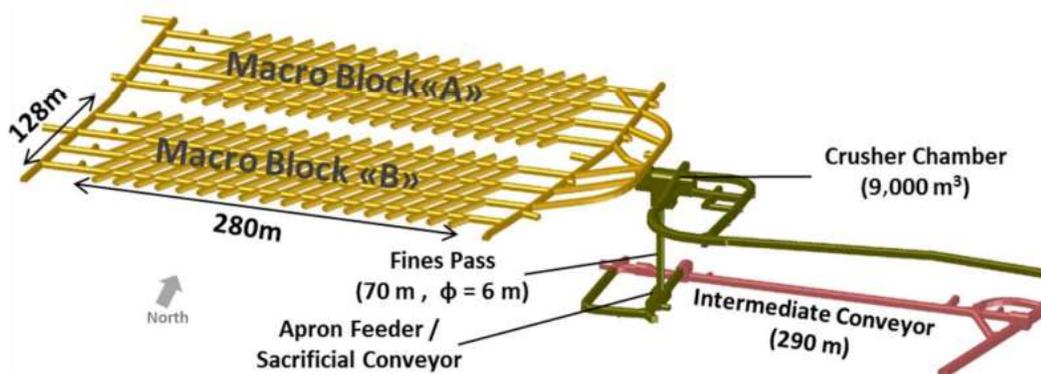


Figura 2.33: Diseño del nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).

2.6.2.3 Secuencia de Preparación

La secuencia de preparación del macrobloque sigue la lógica en que el hundimiento (es decir, la abertura de la primera batea) se inicia después de que todo el macrobloque está completamente preparado, lo que significa que se ha realizado el 100% del desarrollo, se ha ejecutado el 100% de la construcción (pavimentos, puntos de extracción, etc.) y se ha preacondicionado el macrobloque. Dadas las tasas de desarrollo consideradas en los cronogramas y logradas durante la ejecución del proyecto, el tiempo total entre el inicio del desarrollo de un macrobloque (una vez que se encuentran disponibles los primeros accesos) y la tronadura de la primera batea para este diseño es de 36 meses (Figura 2.34) (Paredes et al, 2018).

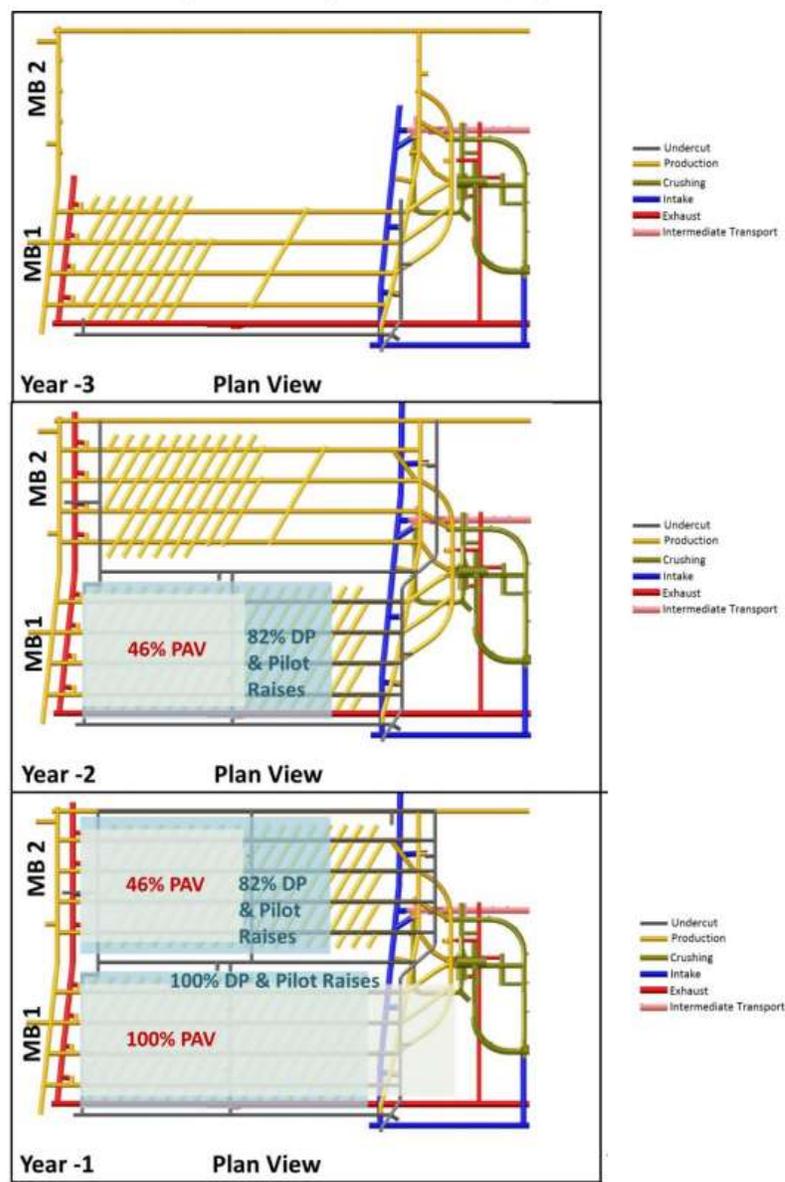


Figura 2.34: Secuencia de preparación de macrobloques en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).

2.6.2.4 Secuencia de Extracción

La estrategia de extracción es iniciar la producción a partir de los macrobloques N1 y S1 ubicados en el centro del primer nivel y subsiguientemente explotar los macrobloques contiguos del norte y del sur (Figura 2.35). Existe un requisito absoluto para preparar y poner en producción dos macrobloques por año logrando así el perfil de producción. La secuencia óptima prevista de los macrobloques es tener al menos seis en producción, dos en inicio de hundimiento, dos en preacondicionamiento, dos en construcción y dos en desarrollo, como se muestra en la Figura 2.36 (Flores & Catalan, 2019).

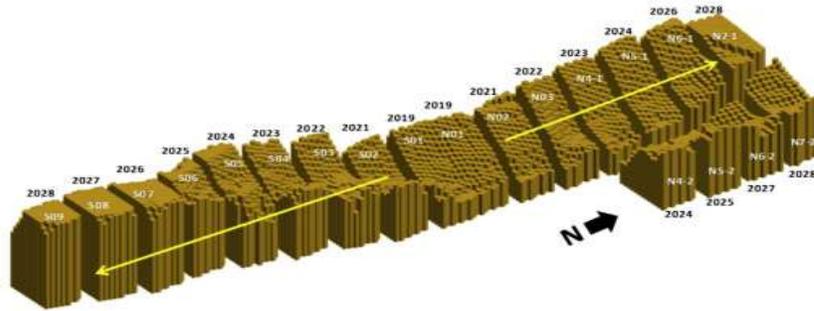


Figura 2.35: Dirección de la explotación de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).

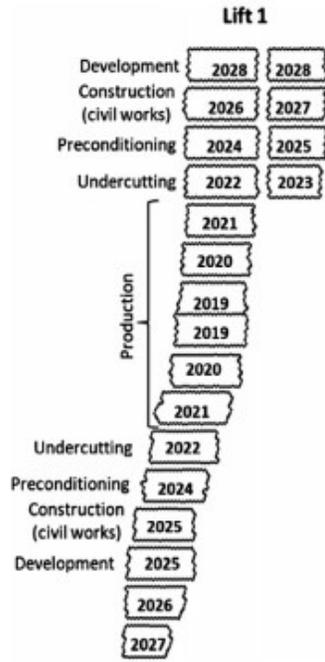


Figura 2.36: Secuencia óptima de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de la Metodología

La metodología de este trabajo (Figura 3.1) se alinea con los objetivos específicos expuestos en la Sección 1.3.2, la cual se basa en cinco etapas principales. La primera etapa consiste en la determinación de los parámetros de funcionamiento de las TBM a través de una revisión bibliográfica que permita examinar en detalle los proyectos previamente realizados con excavación mecanizada, estudiando cuáles son las características de los túneles que pueden ser construidos a través de ellas, y comprender cuáles son las limitaciones de las TBM para su operación en los diseños actuales de la minería subterránea.

La siguiente fase consiste en la definición del caso base de la preparación de los túneles horizontales de los macrobloques del primer nivel del proyecto Chuquicamata Subterránea explotada por Block Caving. Esto es seguido por el diseño de 2 casos propuestos en los que se propone adaptar la construcción de los túneles del nivel de producción a los requerimientos de las TBM.

En la tercera etapa se busca estimar los tiempos y costos de construcción de los niveles de producción mediante la realización de una simulación de Montecarlo, esta simulación considera la variabilidad de las tasas de avance de la TBM; los casos evaluados en la simulación corresponden a los dos diseños propuestos en la fase anterior. Luego, en una cuarta etapa se calcula el impacto económico que los diseños tienen sobre el inicio de la producción de la extracción de cobre basado en los resultados de la simulación.

Finalmente, en base al análisis realizado y la información de los proyectos investigados, se genera una discusión acerca del uso de excavación mecanizada en minería masiva en términos de diseño para concluir sobre los principales beneficios del uso de la TBM y las dificultades que pueden presentarse con respecto a su implementación y de esta forma evaluar la aplicabilidad de esta tecnología en la industria minera.

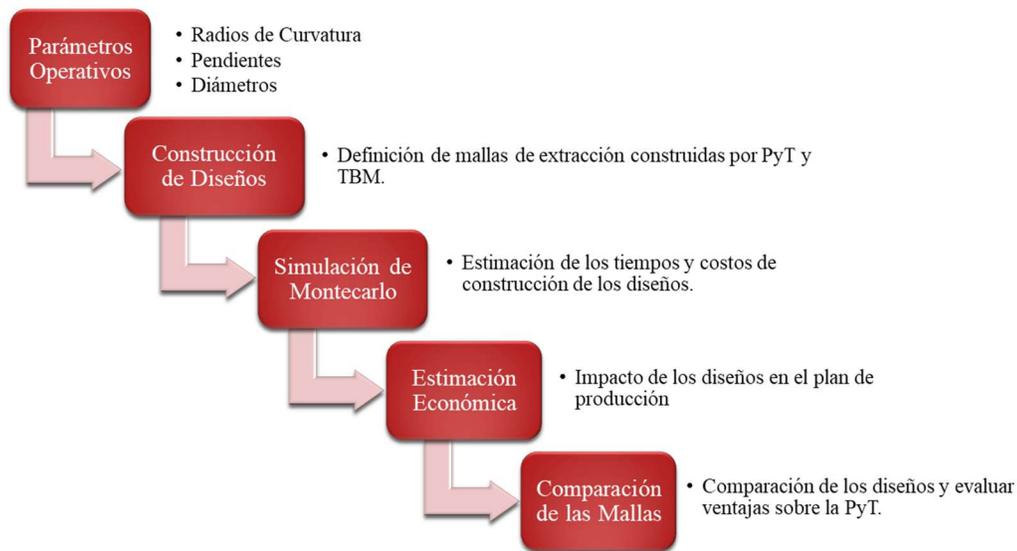


Figura 3.1: Metodología de la memoria (elaboración propia).

3.2 Parámetros Principales

3.2.1 Parámetros Perforación y Tronadura

En esta sección se detallan los elementos considerados para la construcción de túneles con PyT, se toman como referencia los parámetros reportados por el proyecto Chuquicamata Subterránea, en los casos en que se requiere de información adicional se utilizan los parámetros de la mina subterránea El Teniente en Chile de los túneles con características similares a las del caso de estudio obtenidos durante la Práctica Profesional III.

3.2.1.1 Sección de los Túneles

La sección de los túneles del nivel de producción varía de acuerdo con las necesidades operacionales de cada uno de los sistemas de Block Caving. Para este estudio se considera túneles en el nivel de producción de dimensiones de 5 metros de ancho, 4.8 metros de alto y un área de 22.3 m². Mientras que la sección de los túneles del nivel de hundimiento tiene dimensiones de 4 metros de ancho, 4.6 metros de alto y un área de 17.2 m² (Figura 3.2). Estos túneles son representativos del proyecto Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).

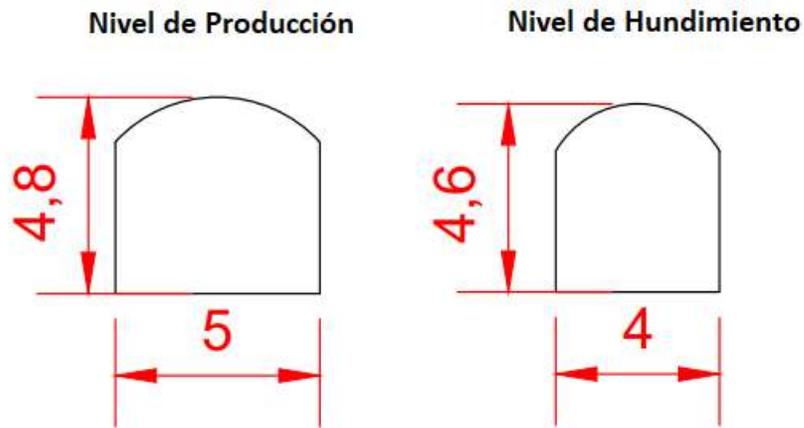


Figura 3.2: Sección de los túneles del nivel de producción y hundimiento (elaboración propia).

3.2.1.2 Tiempo de ciclo

En la Tabla 3.1 se indica el tiempo que se demora cada actividad para el ciclo de excavación, según su tamaño de sección.

Tabla 3.1: Tiempo requerido para cada actividad de un ciclo de PyT para distintas secciones del túnel (Práctica Profesional III, 2020).

Actividad	Unidad	Secciones	
		4 x 4.6 [m]	5 x 4.8 [m]
Avance por ciclo	[m/ciclo]	3	3
Perforación de Frente	hr	2.9	3.2
Carguío de Explosivos	hr	2.4	2.4
Quemada de Frente	hr	0.6	0.6
Ventilación y Chequeo Gases	hr	1.0	1.0
Extracción Marinas	hr	2.6	3.7
Acuñadura	hr	0.8	0.8
Inspección Frente	hr	0.5	0.5
Topografía	hr	0.5	0.5
Pre-Proyección de Shotcrete (5cm)	hr	1.0	1.1
Colocación Perno Malla Frente	hr	1.9	2.8
Total	hr	14.1	16.6

3.2.1.3 Flota de Equipos

En la Tabla 3.2 se detalla el número de equipos por flota para la construcción de túneles con perforación y tronadura dimensionados de acuerdo con los cronogramas de Chuquicamata Subterránea. Se considera un factor operacional del 70 % para el cálculo de las horas efectivas de trabajo y se establece un número de 4 frentes operativas para el desarrollo del nivel de producción y 2 frentes operativas para el nivel de hundimiento.

Tabla 3.2: Flota de equipos utilizados por nivel para las labores de desarrollo con perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).

Flota de equipos	Nivel de Producción	Nivel de Hundimiento
	Unidades	Unidades
Jumbo	4	2
Scoop	3	2
Mixer	1	1
Roboshot	1	1
Perno Enmallador	2	1
Afianzado de Malla	4	2
Camión Bajo Perfil	4	-

3.2.1.4 Costos de Excavación

En la **Tabla 3.3** se reportan los costos de cada actividad de la PyT en dólares por metros excavado para cada uno de los niveles. Además, se estima un costo adicional para las carpetas de rodado en ambos niveles de 1,030 USD/m.

Tabla 3.3: Costos por actividad de la perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).

Actividad	Nivel de Producción	Nivel de Hundimiento
	Costos [USD/m]	Costos [USD/m]
Perforación	628	561
Tronadura	583	521
Transporte Marina	448	401
Fortificación	2,854	2,552
Total	4,513	4,036

En la Tabla 3.4 se detallan los costos por unidad de los equipos utilizados durante el ciclo de la PyT.

Tabla 3.4: Costo de los equipos utilizados en perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).

Flota de equipos	Costo [kUSD/un]
Jumbo	1,020
Scoop	1,090
Mixer	336
Roboshot	680
Perno Enmallador	1,000
Afianzado de Malla	850.5
Camión	970

3.2.2 Parámetros Tunnel Boring Machine

3.2.2.1 Características Técnicas

Estudiando en detalle algunos de los proyectos que han utilizado la excavación mecanizada en los últimos años se pueden reconocer las capacidades y limitaciones operativas de las tuneladoras, esta información es útil para diseñar los niveles de producción, de forma tal que estos niveles puedan ser construidos con esta tecnología. Los parámetros y características de la TBM que se utilizan para el diseño se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Parámetros de TBM utilizados para el diseño de los niveles de producción (elaboración propia).

Parámetros TBM	
Tipo	Gripper
Largo [m]	90
Diámetro [m]	6.1
Radio de giro mínimo al excavar [m]	40
Radio de giro mínimo sin excavar [m]	15
Número de cortadores	42
Diámetro de cortadores [mm]	483
Vida útil cortadores [h]	105
RPM	8

La extracción de la marina se realiza mediante la utilización de camiones, los cuales cargan el material desde la correa transportadora del sistema back-up de la TBM y la transportan hasta los puntos de vaciado ubicados en la cabecera de los macrobloques aprovechando el sistema de manejo de materiales de la mina.

3.2.2.2 Sección del Túnel

Debido a la forma circular de los túneles excavados por TBM, es necesario tener en cuenta el relleno del piso de los túneles para permitir la operatividad de los equipos al interior de la mina. Por esta razón se define el diámetro de la TBM en 6.1 metros de forma tal que luego de la incorporación del relleno, la sección resultante tenga las mismas dimensiones de alto y ancho que la sección de los túneles del nivel de producción excavados por perforación y tronadura. Para el relleno se consideran las dovelas descritas en la Sección 2.2.5 de 1.5 metros de ancho y 6.9 m^3 .

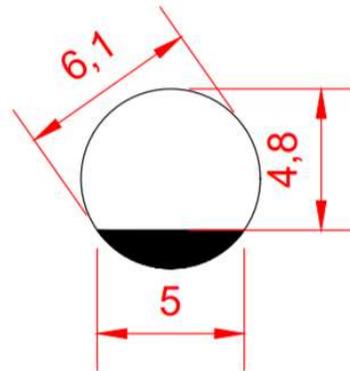


Figura 3.3: Sección del túnel construido por TBM (elaboración propia).

3.2.2.3 Caverna de Montaje

Para el montaje de la TBM dentro de la mina se requiere de la construcción de una caverna de 12.1 metros de ancho, 10.2 metros de alto y 35 metros de largo y una rampa de inicio de 55 metros como muestra la Figura 3.4. La caverna es la zona en la que las partes de la TBM son ensambladas y a medida que se montan las partes se ingresan en la rampa para dar espacio al ensamble de los carros posteriores.

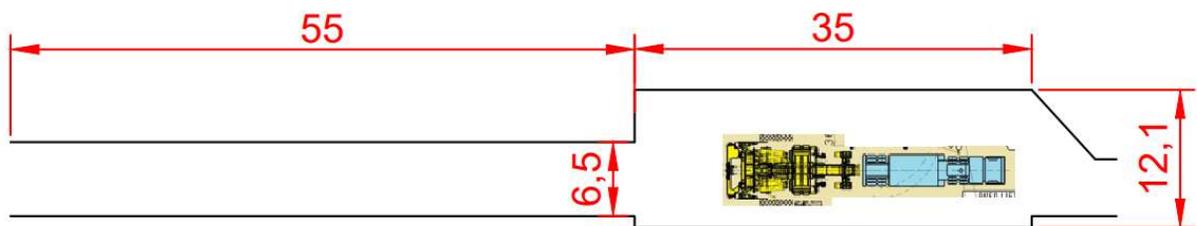


Figura 3.4: Esquema con las dimensiones de la caverna de montaje y la rampa de inicio de la TBM (elaboración propia).

La TBM de 6.1 metros de diámetros requiere de un túnel de 6.5 x 6.5 m para iniciar la excavación el cual debe ser construido con PyT, la Figura 3.5 muestra las secciones de la caverna y del túnel de inicio.

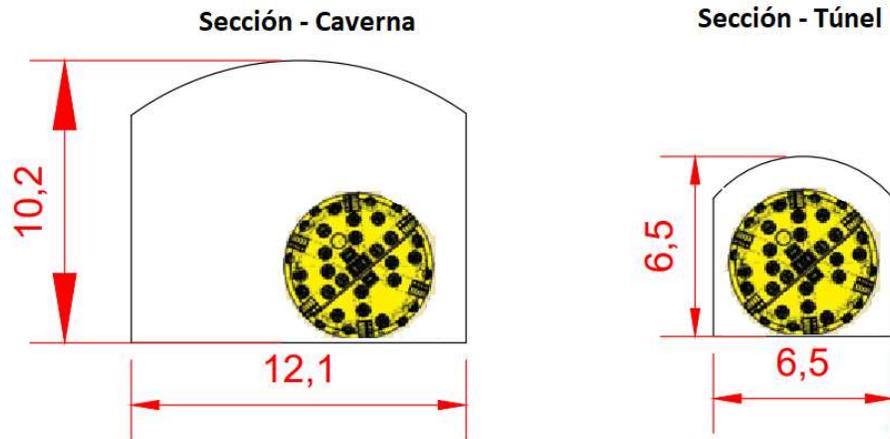


Figura 3.5: Sección de la caverna de montaje de la TBM y los túneles de inicio de la excavación (elaboración propia).

3.2.2.4 Costos de Excavación

La estimación de los costos de excavación de la TBM se basa en metodología presentadas en la Sección 2.4.

Para la construcción de la caverna de montaje se estima un costo de 800 kUSD y se escala el costo de la construcción de los túneles 6.5 x 6.5 m con los costos de los túneles del nivel de producción, obteniéndose un costo de 7,922 USD/m.

Además, se considera un costo de construcción de la planta de dovelas para el relleno del piso de 5 MUSD y un costo de producción de 2,000 USD por dovela (Geoconsult, 2020).

3.2.3 Simulación de Montecarlo

En esta etapa se busca estimar los tiempos y costos de los diseños propuestos en la etapa anterior a construir con excavación mecanizada y PyT. Para ello se ejecutan 1,000 simulaciones para tener una cantidad representativa de los resultados.

El caso base con el que se comparan los resultados de las simulaciones se define como el caso de estudio del proyecto Chuquicamata Subterránea, por lo que inicialmente se calcula el plan de desarrollo considerando solo la excavación con perforación y tronadura de acuerdo con los cronogramas del proyecto y los costos se estiman con los parámetros registrados en la sección 3.2.1.4.

La simulación se centra en la preparación de los 4 macrobloques iniciales, con el objetivo de estimar la cantidad de tiempo que se puede adelantar o retrasar el inicio de la producción. Los resultados de los tiempos y costos se reportan a través de histogramas y el código de la simulación se escribe en el lenguaje Matlab.

La estimación de los tiempos de construcción de la TBM se basa en los resultados obtenidos de la predicción del rendimiento de una TBM en la construcción de un túnel que se encuentra a 1,700 m de profundidad, perteneciente a una mina subterránea en Chile utilizando el modelo de Colorado School of Mines (CSM), este modelo es muy utilizado para el cálculo de rendimiento de la TBM en rocas duras. El modelo CSM se desarrolla a partir de pruebas a escala real donde discos cortadores de diferentes tamaños son sometidos a una fuerza de corte en distintos tipos de rocas, para determinar una fuerza normal y de rodadura a partir de las propiedades de roca intacta como la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción (Rodríguez, 2020).

Para este estudio se selecciona la condición del terreno con menor UCS promedio y con mayor variabilidad de los estudiados en dicha predicción de rendimiento, el cual posee una distribución normal de la compresión uniaxial de la roca media de 131.6 MPa y una desviación estándar de 47.7 MPa (Figura 3.6). El ajuste de la distribución de los datos de rendimiento utilizada en la simulación corresponde a una Distribución de Pareto Generalizada ($k=-0.5$, $\sigma = 29.6$, $\mu = 6.9$).

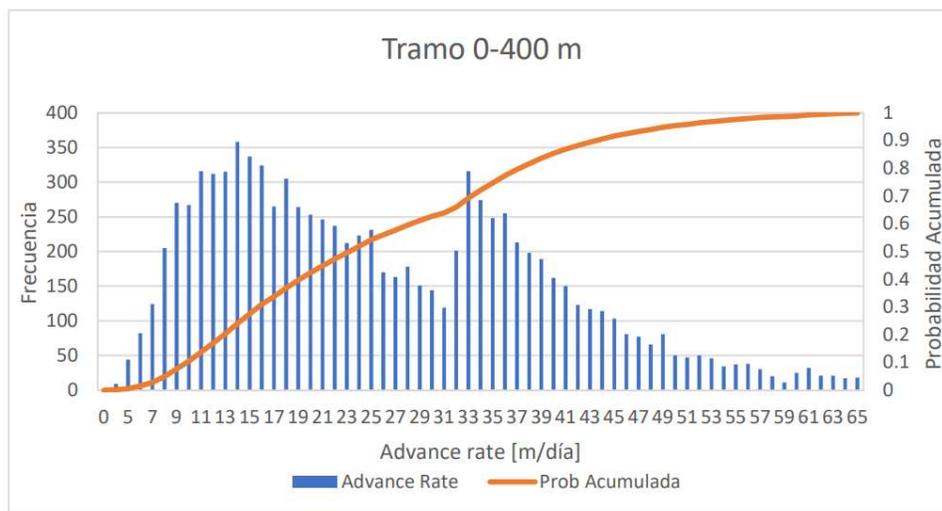


Figura 3.6: Histograma de la estimación de la tasa de avance diaria de la TBM para un UCS de la roca promedio de 131.6 MPa (Rodríguez, 2020).

3.2.4 Lógica de la Simulación

Para la simulación de los escenarios se definen inicialmente como variables de entrada los metros de desarrollo a excavar con cada método, el número de macrobloques a preparar, las tasas de avance de cada método especificadas en las secciones 3.2.1.2 y 3.2.3, los costos de excavación por metro detallados en las secciones 3.2.1.4 y 3.2.2.4, el tiempo requerido para la construcción de la caverna de montaje y el tiempo de ensamble de la TBM antes del inicio de las labores de la tuneladora y la secuencia en la que los métodos ejecutan la excavación.

En la secuencia constructiva se establece que las labores correspondientes a la PyT en un macrobloque se realizan en las frentes que estén disponibles. En los casos en que para acceder a una frente se requiere que la TBM termine su trabajo en una calle se debe esperar a la finalización de las labores de relleno de piso e instalación de la fortificación definitiva. Además, en el escenario en que la TBM debe retroceder de una calle, se define un tiempo de 14 días de reposicionamiento para comenzar la excavación de la calle siguiente.

Una vez estimados los tiempos de excavación de todos los desarrollos, se procede a adicionar los tiempos requeridos para la pavimentación de los túneles construidos con PyT, para la perforación de las chimeneas slot de las bateas y el preacondicionamiento. Dichos tiempos se basan en el plan de preparación de Chuquicamata Subterránea (Sección 0). La Figura 3.7 muestra un diagrama del modelo de simulación desarrollado en este trabajo.

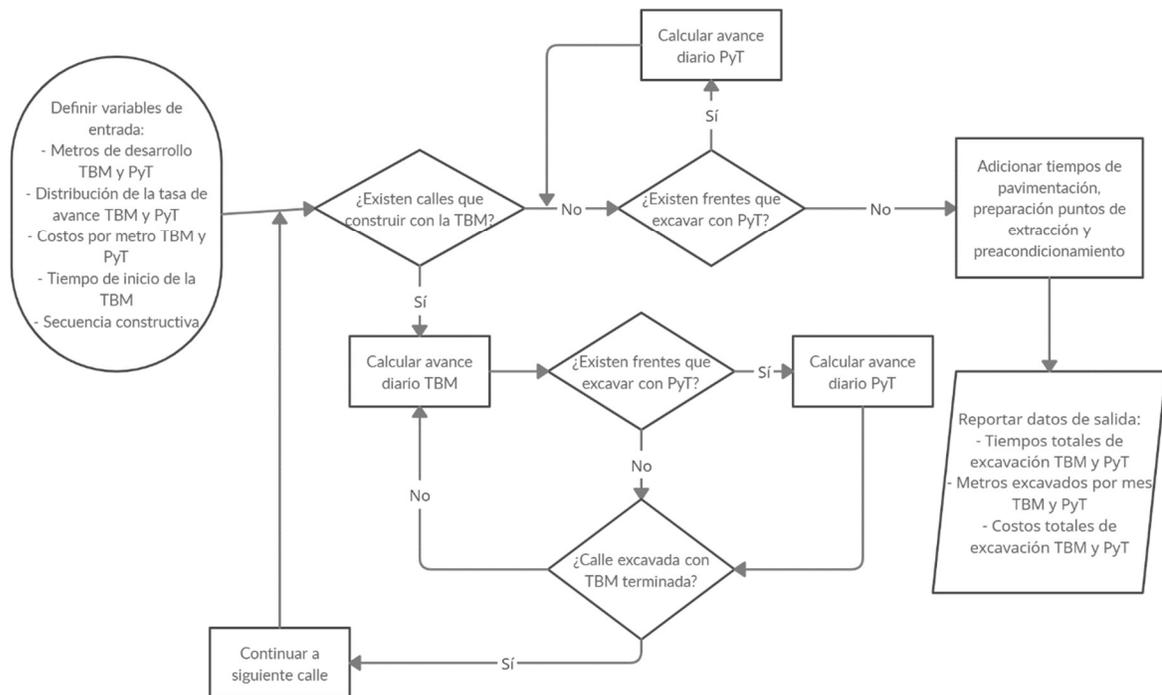


Figura 3.7: Diagrama de la lógica de la simulación de Montecarlo (elaboración propia).

3.2.5 Estimación Económica

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se realiza una estimación del impacto económico que el uso de la TBM puede tener al adelantar o retrasar el inicio de la explotación. Para ello, se toma como referencia el plan de producción de la extracción de cobre del primer nivel del proyecto Chuquicamata Subterránea mostrado en la Figura 3.8 (Flores & Catalan, 2019).

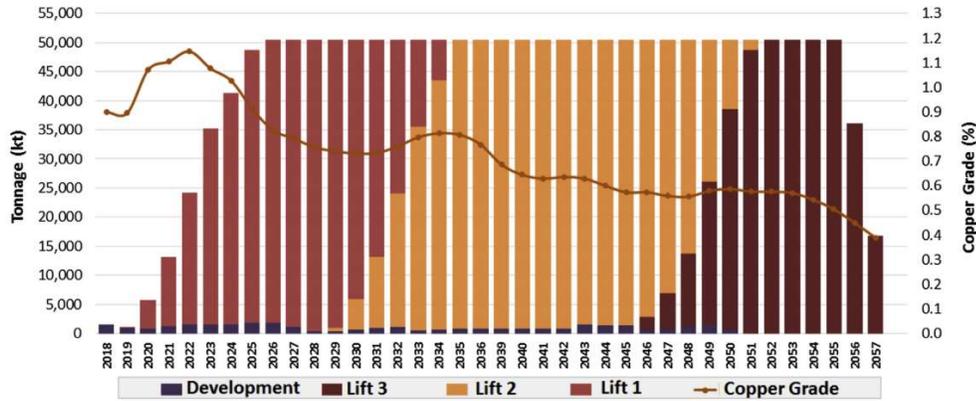


Figura 3.8: Plan de producción de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).

En la Figura 3.9 se tiene el plan de producción del primer nivel, este plan considera un ramp-up de 7 años, una producción máxima de 50 Mt y un tiempo de producción de 15 años. A partir de este plan de producción se calculan los ingresos anuales de la extracción del mineral para cada uno de los casos evaluados, considerando los parámetros de la Tabla 3.6.

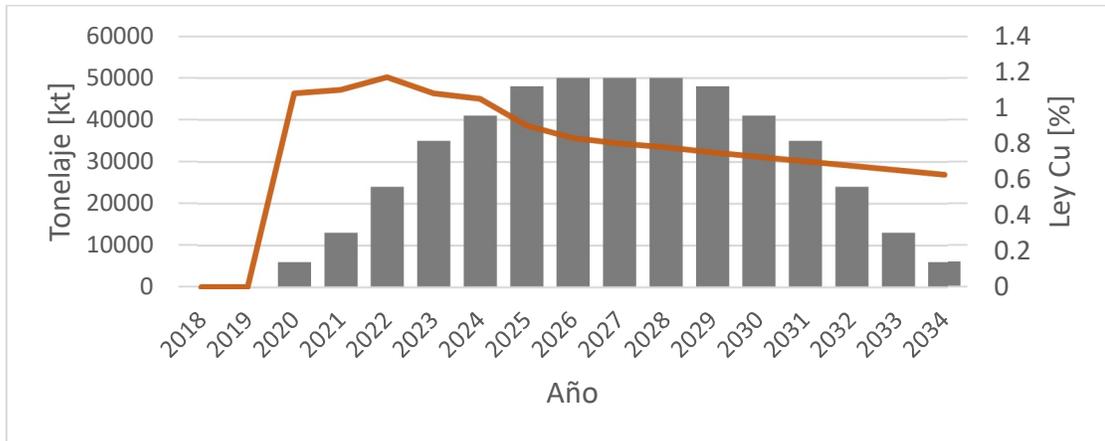


Figura 3.9: Plan de producción del primer nivel de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).

Tabla 3.6: *Parámetros económicos utilizados para la evaluación económica (elaboración propia).*

P Cu [USD/lb]	2.7
Costo venta [USD/lb]	0.3
Costo mina [USD/t]	5
Costo planta [USD/t]	9
Tasa de descuento [%]	10
Recuperación [%]	85

3.3 Desarrollo de la Metodología

3.3.1 Diseños Nivel de Producción y Hundimiento Caso Base

La definición del diseño del nivel de producción y el nivel de hundimiento se basa en el proyecto Chuquicamata Subterránea, en la Figura 3.10 se observa el diseño que corresponde a un Block Caving explotado por macrobloques. Las dimensiones de cada macrobloque son 343 m de largo y 128 m de ancho, con cuatro calles de producción y 144 puntos de extracción. La malla de extracción es una malla Teniente de 16x16, es decir, con 32 m entre las calles de extracción y 16 m entre los puntos de extracción. Además, se considera dejar un pilar de 30 m entre macrobloques. La Figura 3.11 muestra el diseño del nivel de hundimiento el cual tiene las mismas dimensiones que el nivel de producción, pero tiene un cruzado a la mitad del macrobloque en lugar de las zanjas de producción (Flores & Catalan, 2019).

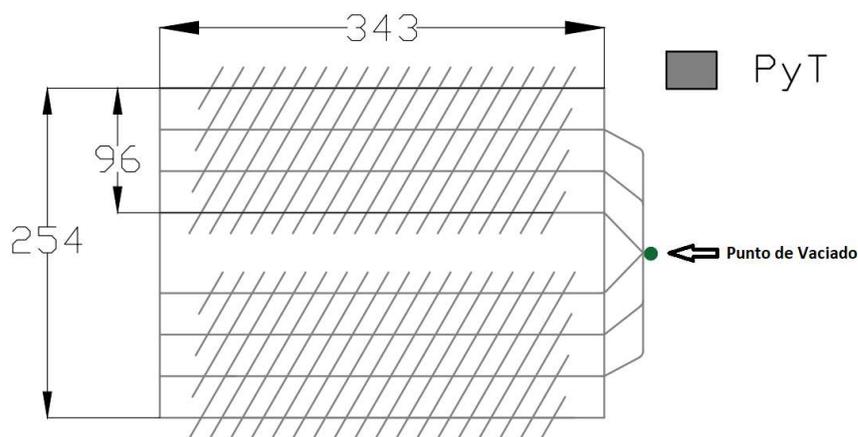


Figura 3.10: Diseño nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).

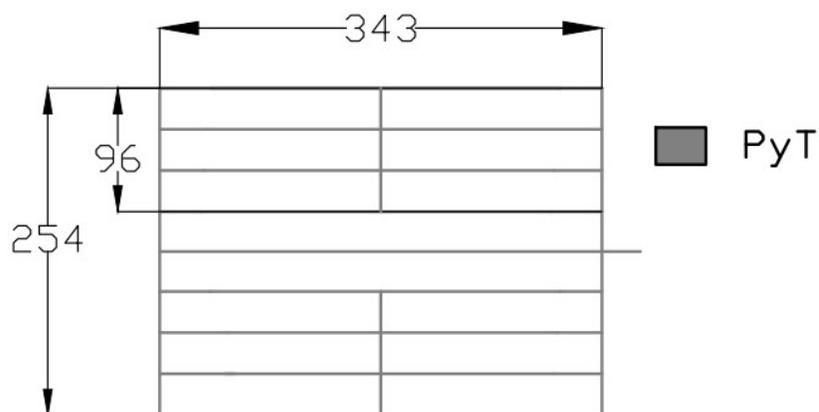


Figura 3.11: Diseño nivel de hundimiento de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).

A partir del diseño del nivel de producción del caso de estudio, se proponen 2 distintas modificaciones al diseño de forma tal que la mayor cantidad de desarrollos del nivel sean construidos mediante la utilización de TBM. Todos los niveles son diseñados en el software AutoCad.

3.3.2 Diseños Nivel de Producción Tunnel Boring Machine

A continuación, se muestran los diseños propuestos del nivel de producción que permiten la utilización de la TBM (Figura 3.12) de los 4 primeros macrobloques a desarrollar; en color rojo se observan los desarrollos construidos por TBM, y en color gris se observan los desarrollos que deben ser construidos con PyT debido a las restricciones de los radios de giro de la TBM. El Diseño 1 considera la construcción de las 4 calles de un macrobloque, mientras que el Diseño 2 considera solo la construcción de 2 calles de un macrobloque.

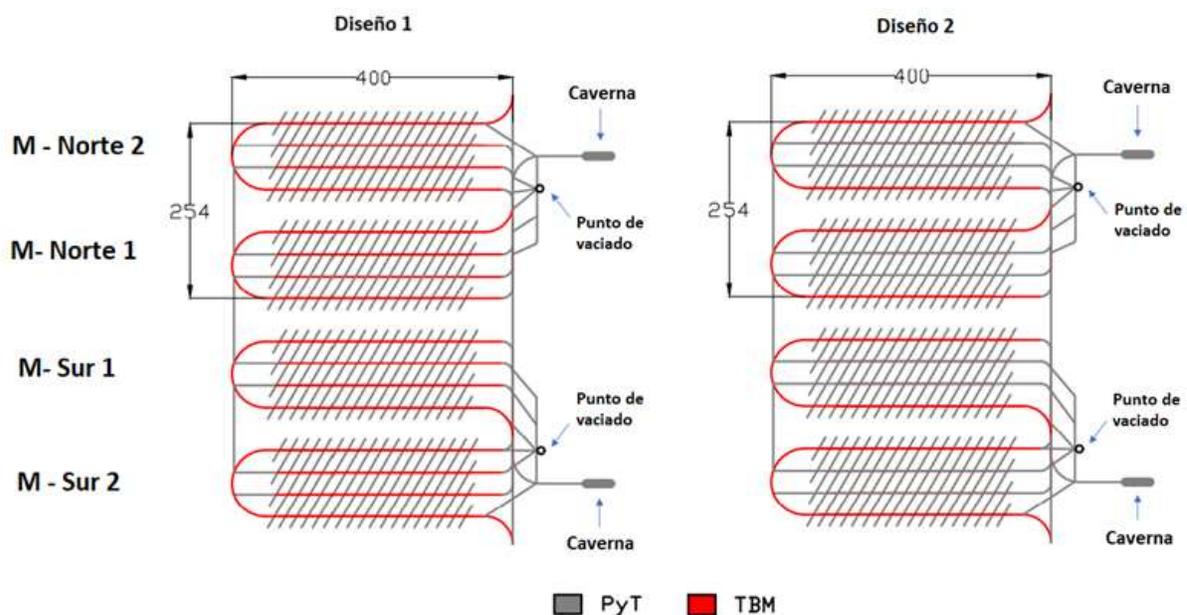


Figura 3.12: Diseños propuestos de los desarrollos de los niveles de producción de 4 macrobloques construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).

Los diseños tienen en consideración la ubicación de las cavernas de montaje en la cabecera de los macrobloques. Se mantienen el número de los puntos de vaciado a los del caso de estudio (uno por cada dos macrobloques) y en la misma posición, donde están ubicadas las salas de chancado (Figura 3.13). La construcción de la caverna se realiza accediendo desde los túneles de la cámara de chancado previamente construidos (Figura 2.33). Se utilizan 2 TBM en la construcción para cumplir con la secuencia de preparación de los macrobloques del caso base (preparación simultánea de los macrobloques al norte y al sur) presentada en la sección 2.6.2.4.

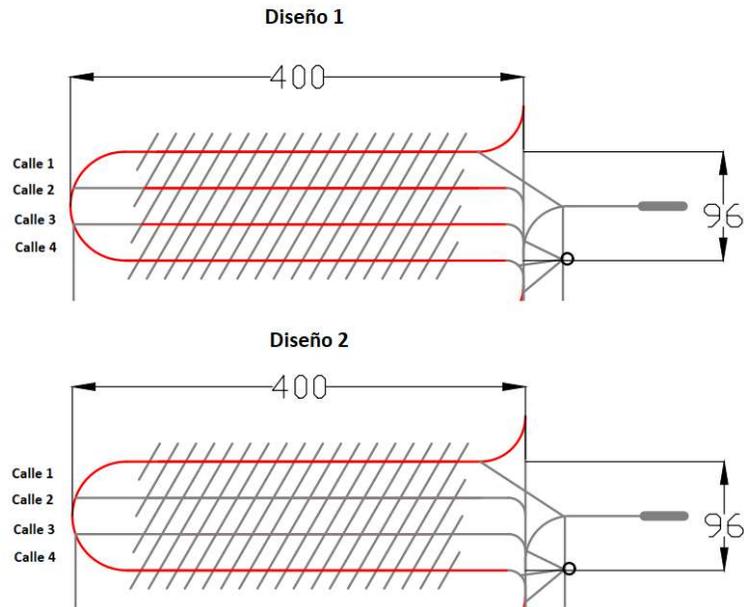


Figura 3.13: Diseños de los desarrollos del nivel de producción de 1 macrobloque construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).

Para los diseños se requiere de la construcción de las zonas en que existen intersecciones de los túneles mediante PyT debido a que las TBM no pueden construir estas intersecciones sin paredes donde apoyarse. Dichas intersecciones deben tener un radio de giro mínimo de 15 metros para la movilidad de la TBM. La TBM tiene un radio de giro mínimo al excavar de 40 metros por lo que las zanjas de producción no pueden ser construidas por este método.

El Diseño 1 considera la construcción de las calles 1, 2, 3 y 4 de cada macrobloque con TBM, donde en las calles 2 y 3 se requiere del retroceso de la TBM para continuar a las siguientes calles. El Diseño 2 considera solo la construcción de las calles 1 y 4 de cada macrobloque con TBM, evitando de esa forma el retroceso de la tuneladora.

Tabla 3.7: Metros a construir por macrobloques para cada diseño del nivel de producción (elaboración propia).

Caso Base		Diseño 1		Diseño 2	
PyT		TBM + PyT		TBM + PyT	
Total [m]	4,494	Total [m]	4,783	Total [m]	4,783
		PyT		PyT	
		Total [m]	3,195	Total [m]	3,789
		TBM		TBM	
		Rectas [m]	1,280	Rectas [m]	686
		Curvas [m]	309	Curvas [m]	309
		Total [m]	1,588	Total [m]	994

La Tabla 3.7 cuantifica los metros de desarrollos de cada uno de los diseños, donde para el caso base se tiene una cantidad de 4,494 metros de desarrollos por macrobloque, y para los diseños que incluyen el uso de TBM esta cantidad aumenta a 4,783 metros.

3.3.3 Secuencia de Construcción Caso Base

La Figura 3.14 y Figura 3.15 muestran la secuencia de construcción de los túneles de los niveles de producción y hundimiento para 4 macrobloques de acuerdo con los tiempos planificados en el caso de estudio y los rendimientos reportados en la sección 3.2.1.2, donde se observa la preparación de dos macrobloques por año.

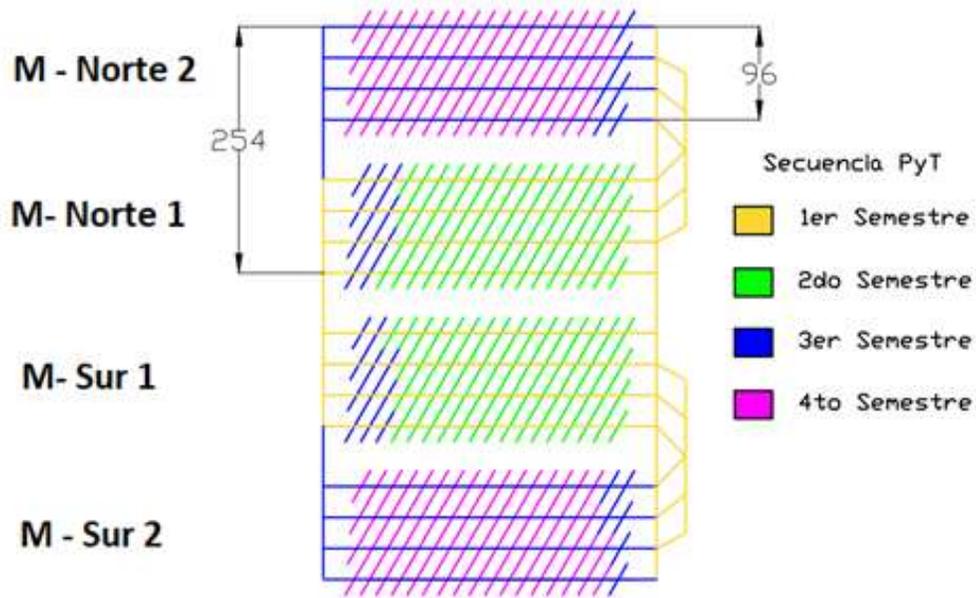


Figura 3.14: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción del caso base (elaboración propia).

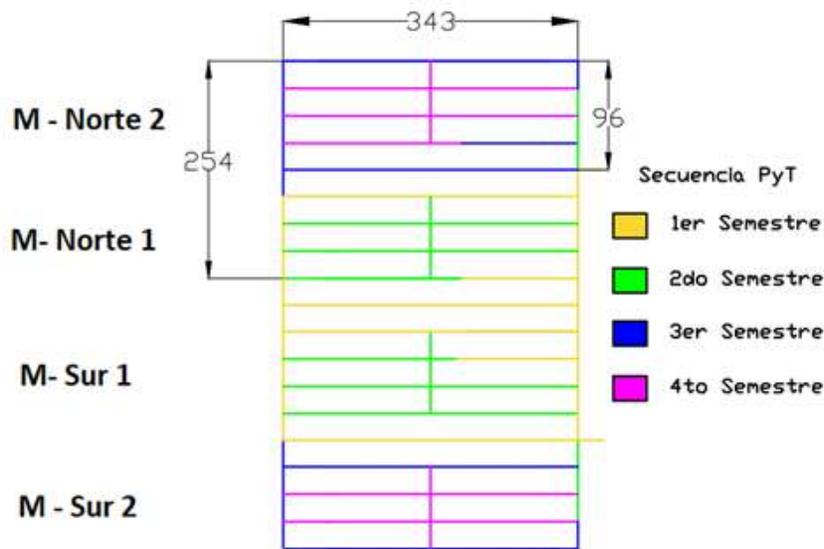


Figura 3.15: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de hundimiento del caso base (elaboración propia).

3.3.4 Secuencia de Construcción Tunnel Boring Machine

Para el inicio de la excavación con TBM se requiere de la previa construcción de los túneles 6.5 x 6.5 m en la cabecera de los macrobloques, los cuales se realizan paralelamente a las labores de construcción de las cavernas y el montaje de la TBM. La Figura 3.16 muestra en color negro los túneles 6.5 x 6.5 m por los que transita la TBM y en color gris los túneles de 5 x 4.8 m que conectan al punto de vaciado.

La Figura 3.17 muestra el orden de construcción con TBM de las calles del nivel de producción para el Diseño 1, donde para el macrobloque Norte 1 la excavación comienza con la calle 2, luego la TBM retrocede para continuar con la calle 3, después retrocede nuevamente para entrar por la calle 4 y salir por la calle 1 hacia el macrobloque Norte 2. Para el macrobloque Sur 1 la secuencia es simétrica. La Figura 3.18 muestra la secuencia de construcción después de cada calle terminada. Para el Diseño 2 la secuencia es idéntica, pero sin la construcción de las calles 2 y 3 de los macrobloques.

Durante la excavación de las calles, la marina se carga directamente en camiones de bajo perfil en la zona posterior del sistema back-up y transportan el material hasta los puntos de vaciado, para las calles 1 y 4 el piso se rellena a medida que avanza la excavación por lo que los camiones pueden ubicarse sin problema detrás de la TBM, para las calles 2 y 3 debido a que la calle no puede ser rellena hasta el retroceso de la TBM se requiere de la extensión de la correa transportadora una vez todo el sistema back-up ha entrado en la calle excavada para que los camiones carguen el material desde el inicio de la calle.

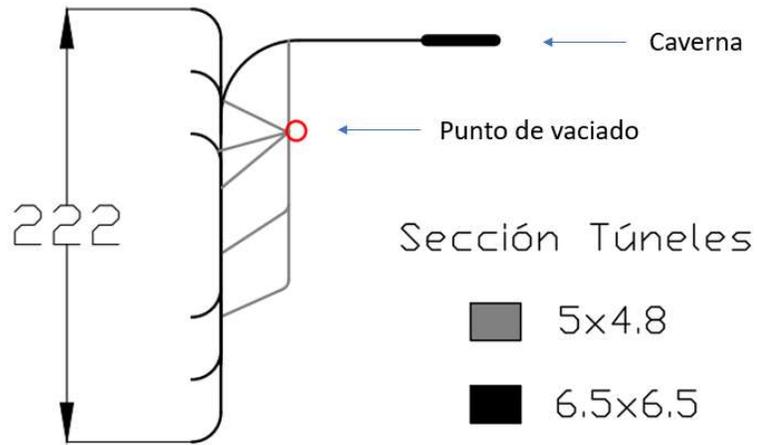


Figura 3.16: Desarrollos iniciales antes del inicio de la excavación de la TBM (elaboración propia).

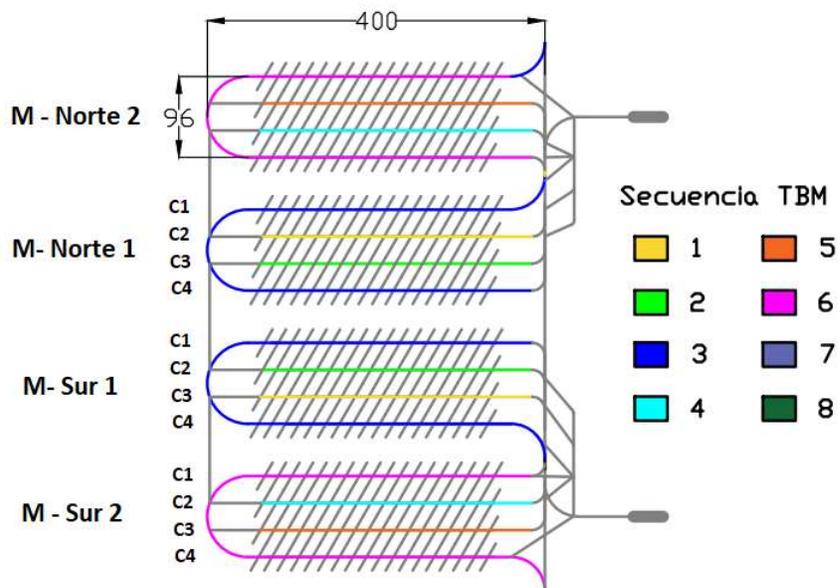


Figura 3.17: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción con TBM de los 4 macrobloques iniciales (elaboración propia).

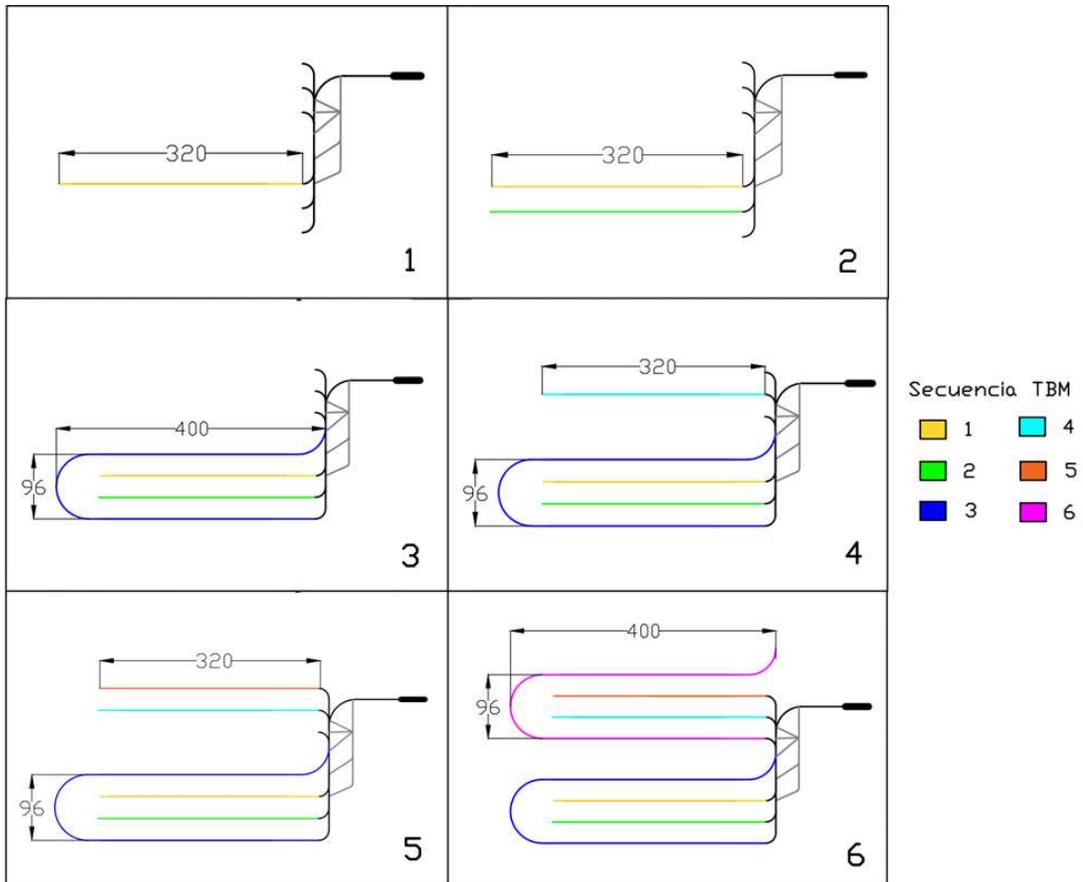


Figura 3.18: Secuencia de construcción de las calles del nivel de producción con TBM de 2 macrobloques (elaboración propia).

4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en base a la metodología descrita en el capítulo anterior. Principalmente los resultados para esta memoria corresponden a la simulación de la preparación de los macrobloques de los 2 diseños propuestos y el impacto económico sobre el plan de producción.

4.1 Simulación de Montecarlo

El Gráfico 4.1 muestra los histogramas de los tiempos de preparación estimados por la simulación de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el Diseño 1 y Diseño 2, donde los resultados para el Diseño 1 tienen una media de tiempos de preparación de 52 meses, una desviación estándar de 2 meses, un mínimo de 48 meses y un máximo de 61 meses. Para el Diseño 2 la media de los tiempos de preparación es de 50 meses, la desviación estándar de 1.7 meses, un mínimo de 48 meses y un máximo de 57 meses.

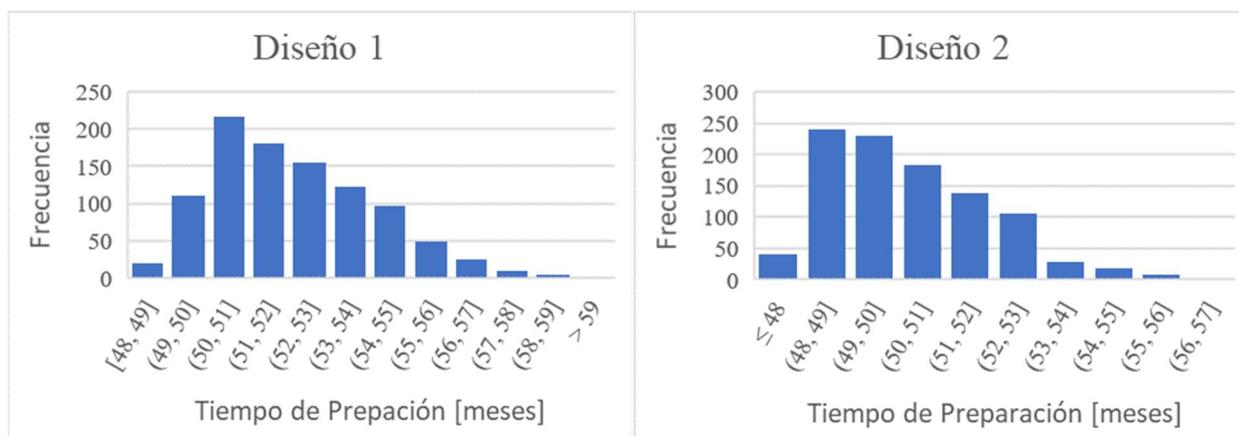


Gráfico 4.1: Histograma de los tiempos de preparación de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).

El Gráfico 4.2 muestra los histogramas de los costos de preparación estimados por la simulación de 4 macrobloques para el Diseño 1 y Diseño 2, donde los resultados para el Diseño 1 tienen una media de costos de preparación de 199 MUSD, una desviación estándar de 3.4 MUSD, un mínimo de 193 MUSD y un máximo de 210 MUSD. Para el Diseño 2 la media de los costos de preparación es de 198 MUSD, la desviación estándar de 2.5 MUSD, un mínimo de 194 MUSD y un máximo de 205 MUSD.

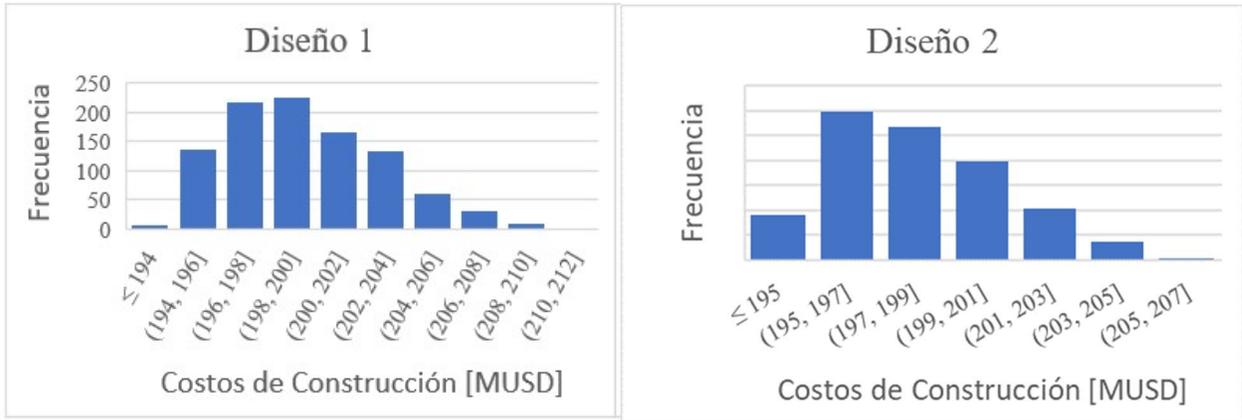


Gráfico 4.2: Histograma de los costos de preparación actualizados de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).

La Tabla 4.1 resume los resultados obtenidos en las simulaciones, donde se puede observar que para el caso del Diseño 1 y Diseño 2 se tiene un aumento del tiempo de preparación de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 de 4 meses y 2 meses respectivamente, y un aumento de los costos de preparación de 55 MUSD y 54 MUSD respectivamente. La Tabla 4.2 presenta el detalle de los costos totales actualizados.

Tabla 4.1: Tiempos y costos de preparación obtenidos de la simulación para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).

Escenarios	Tiempo [meses]	VAC [MUSD]
Caso Base	48	144
Diseño 1	52	199
Diseño 2	50	198

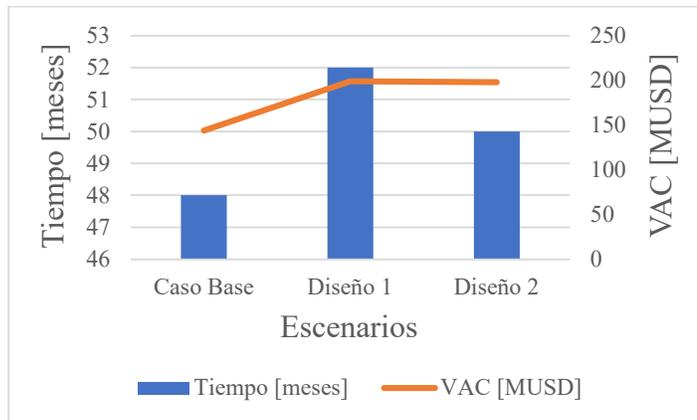


Tabla 4.2: Resumen de los costos totales actualizados para para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).

Escenarios	Inversión [MUSD]	Excavación PyT [MUSD]	Excavación TBM [MUSD]	Pavimentación [MUSD]	Total [MUSD]
Caso Base	27.6	102.1	0	14.4	144.1
Diseño 1	76.2	79.3	38.3	5.4	199.2
Diseño 2	76.2	89.6	24.7	7.4	197.8

4.2 Programa de Preparación Caso Base

La Figura 4.1 y la Figura 4.2 muestran el programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el caso base, donde se planifican las actividades de desarrollos horizontales de los niveles de producción y hundimiento, la preparación de los puntos de extracción y bateas, pavimentación de los túneles y el preacondicionamiento.

La preparación comienza en el mes 1 con la construcción en paralelo de los desarrollos de los niveles de producción y el nivel de hundimiento de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 hasta mediados del mes 13, para después desplazar estas operaciones a los macrobloques Norte 2 y Sur 2. Luego, en el mismo mes en los macrobloques Norte 1 y Sur 1 comienza la preparación de los puntos de extracción que tiene que ver con la perforación de las chimeneas slot para la posterior abertura de las bateas, aproximadamente 2 meses después se procede a ejecutar las labores de instalación de las carpetas de rodado en el nivel de producción en las zonas donde ya se han preparado los puntos de extracción. Una vez se han preparado todos los puntos de extracción, durante un año se llevan a cabo las labores de preacondicionamiento. La preparación completa de dos macrobloques toma un tiempo de 36 meses, plazo que concuerda con el cronograma del caso de estudio del proyecto Chuquicamata Subterránea.

M - Norte 1 y M - Sur 1	Año	1												2											
Actividad	Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									

M - Norte 1 y M - Sur 1	Año	3												4											
Actividad	Mes	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									

Figura 4.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del caso base (elaboración propia).

M - Norte 2 y M - Sur 2	Año	1												2											
Actividad	Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									

M - Norte 2 y M - Sur 2	Año	3												4											
Actividad	Mes	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									

Figura 4.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del caso base (elaboración propia).

4.3 Programas de Preparación Simulación

La Figura 4.3 y la Figura 4.4 muestran el programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el Diseño 1, específicamente, estos planes corresponden al caso de tiempo de preparación promedio obtenidos en las simulaciones.

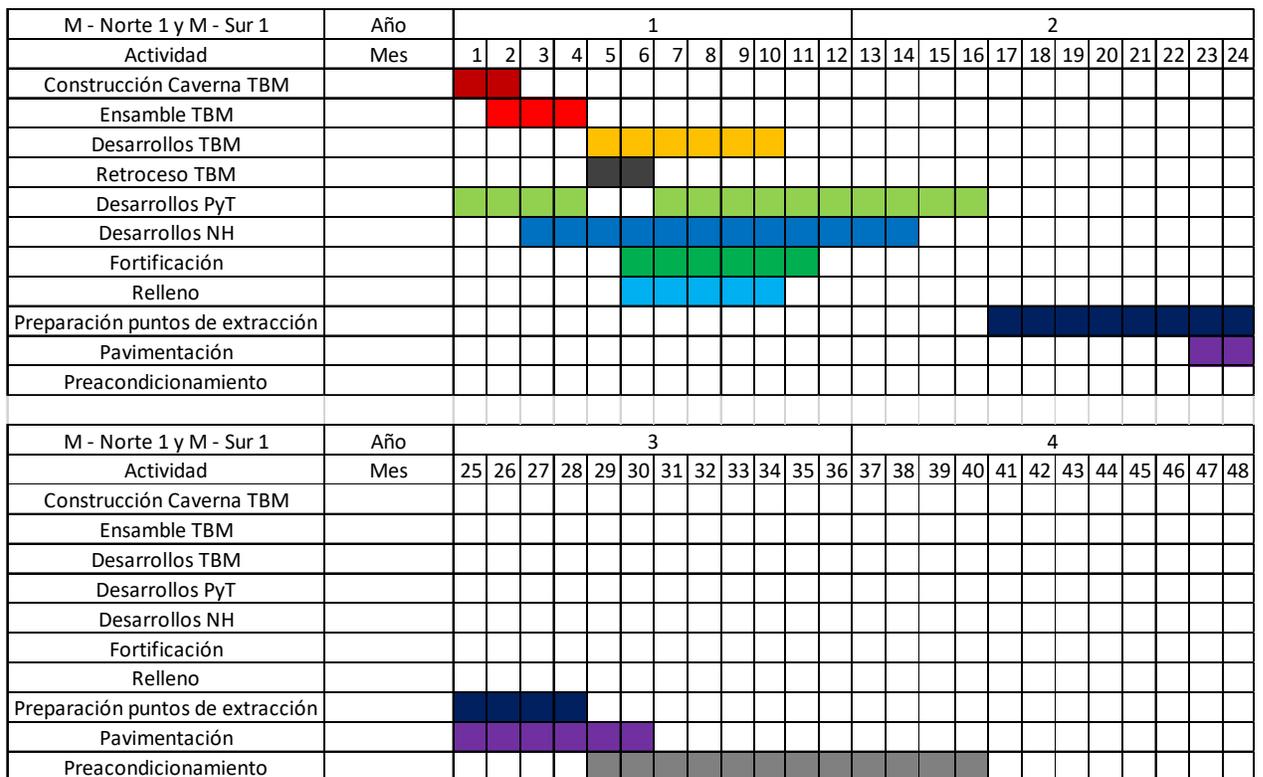


Figura 4.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 1 (elaboración propia).

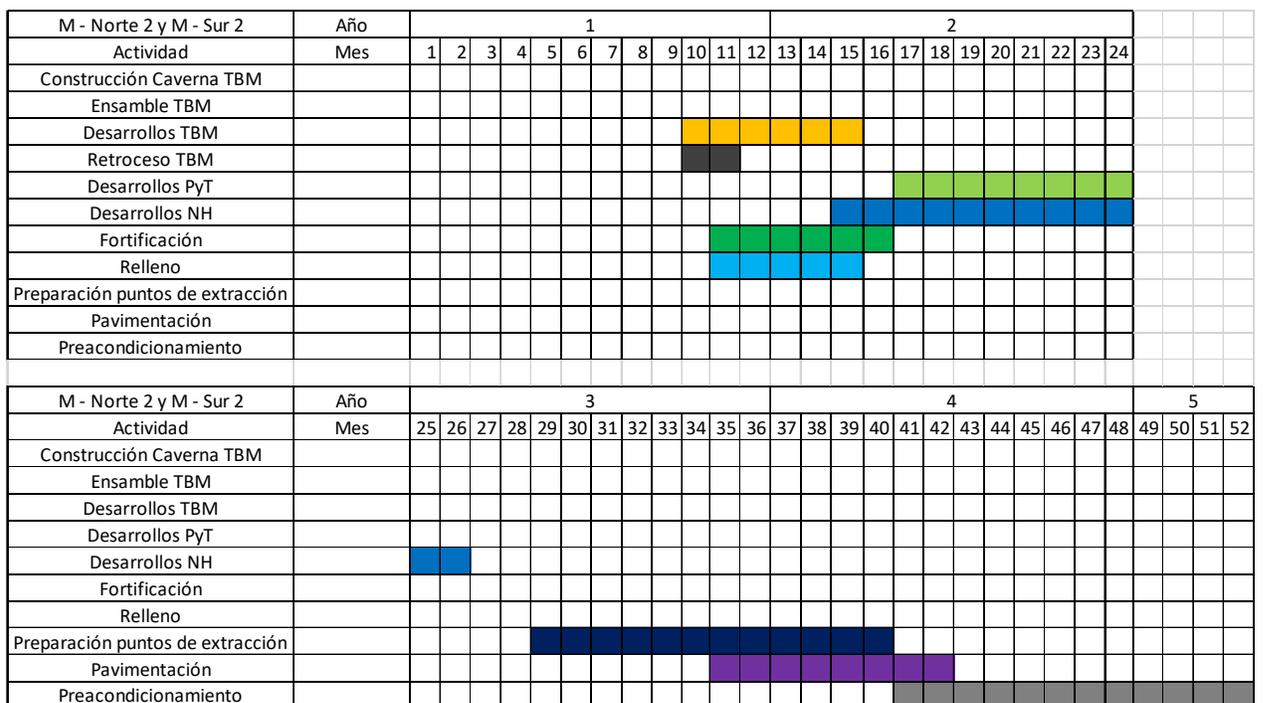


Figura 4.4: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 1 (elaboración propia).

La Figura 4.5 y la Figura 4.6 muestran el programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el Diseño 2.

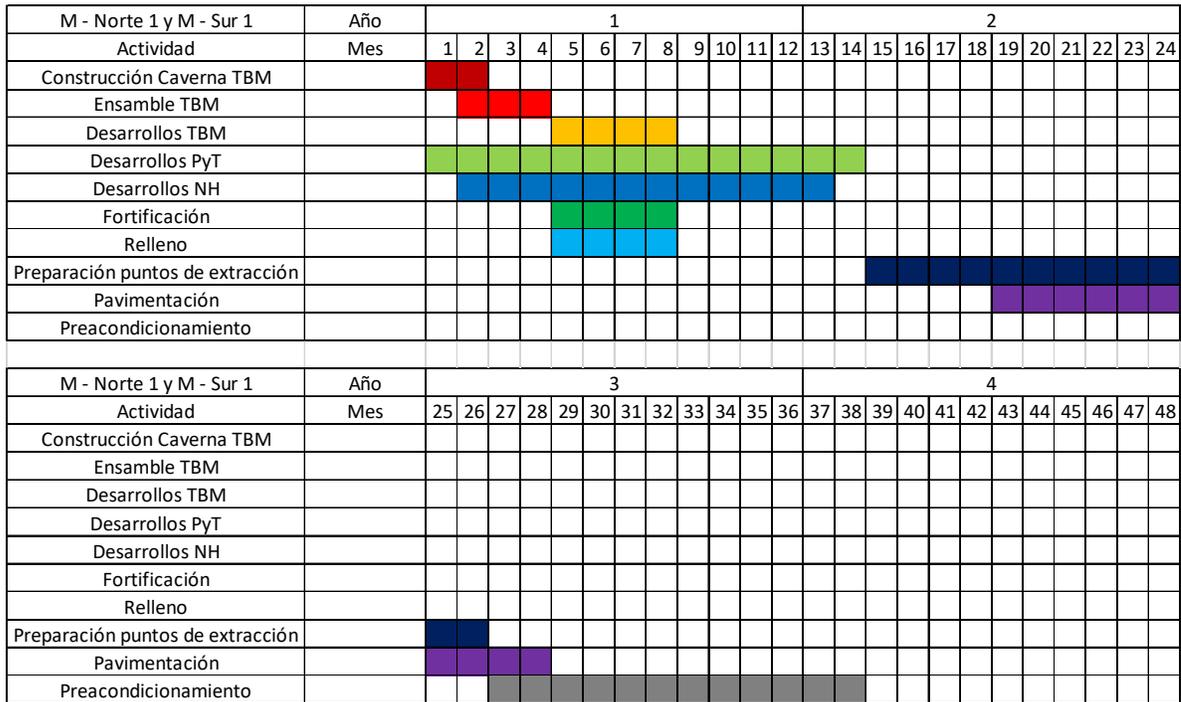


Figura 4.5: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 2 (elaboración propia).

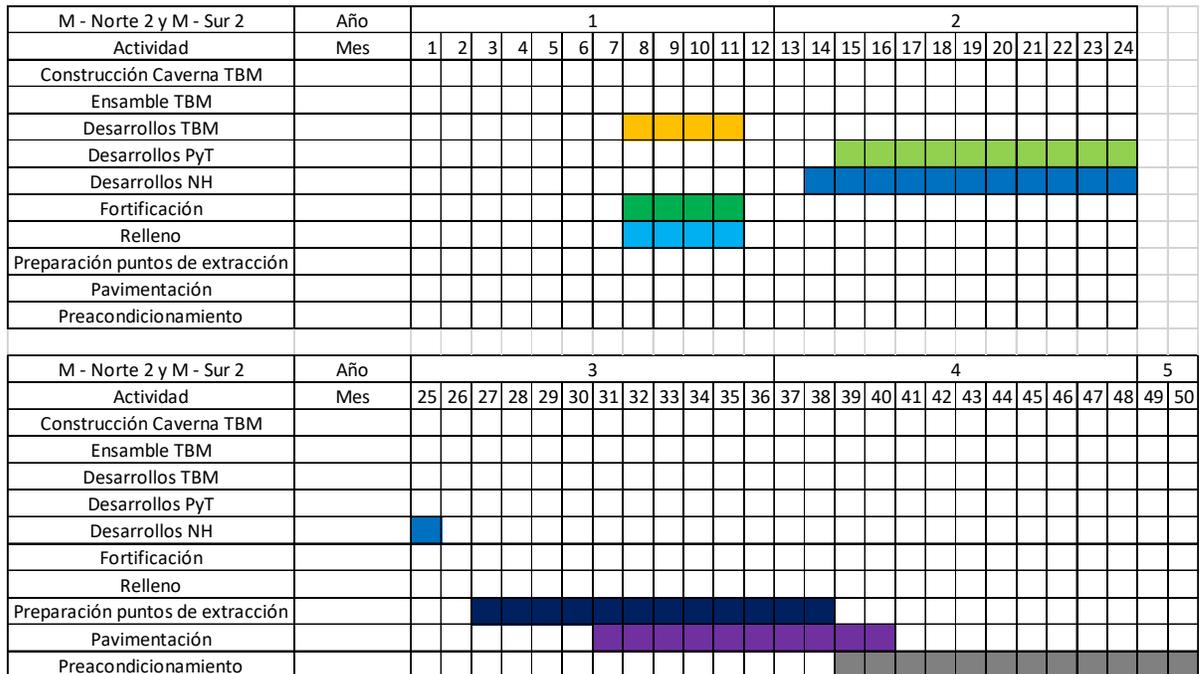


Figura 4.6: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 2 (elaboración propia).

4.4 Plan de Desarrollos Horizontales Caso Base

El Gráfico 4.3 muestra el plan de desarrollos horizontales del nivel de producción (color azul) y el nivel de hundimiento (color naranja) de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el caso base, determinado mediante los rendimientos de los equipos de perforación y tronadura, donde se observa la excavación de la totalidad de los túneles en un tiempo de 25 meses.

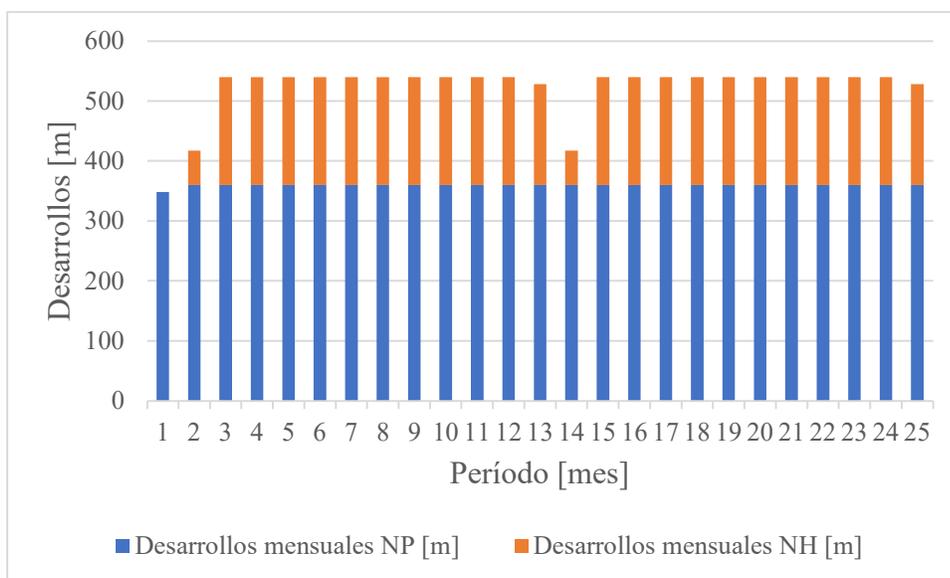


Gráfico 4.3: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del caso base para 4 macrobloques (elaboración propia).

4.5 Plan de Desarrollos Horizontales Simulados

El Gráfico 4.4 muestra el plan de desarrollos horizontales de las labores realizadas con TBM, las labores de perforación y tronadura en el nivel de producción y en el nivel de hundimiento de los macrobloques Norte 1, Norte 2, Sur 1 y Sur 2 para el Diseño 1 y Diseño 2. Específicamente, estos planes corresponden al caso de tiempo de preparación promedio obtenidos en las simulaciones. La Tabla 4.3 registra los avances promedio y máximo obtenidos para cada uno de los diseños.

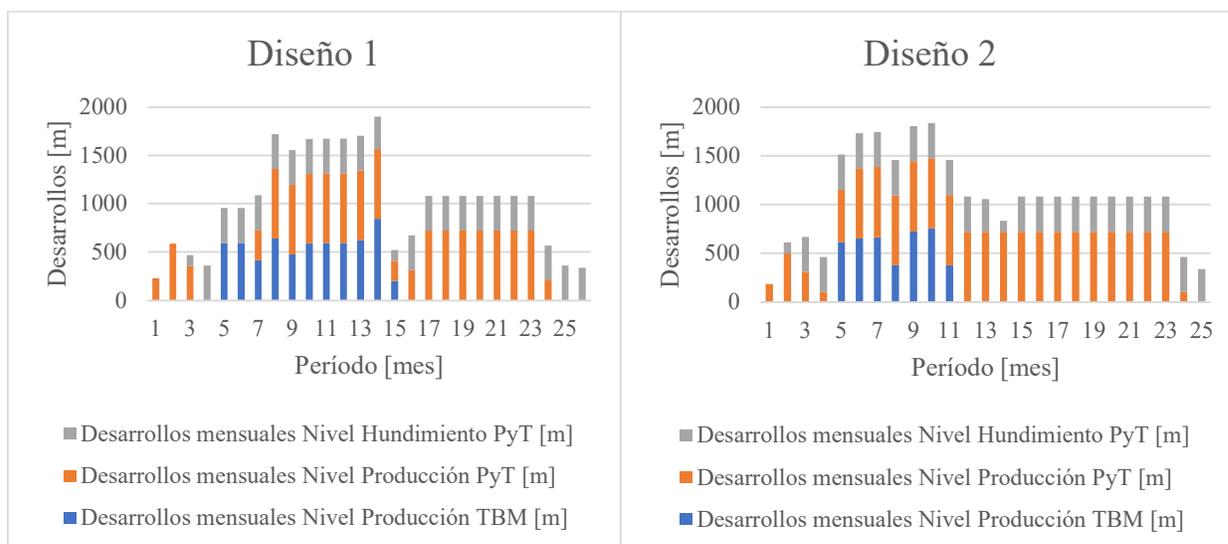


Gráfico 4.4: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del Diseño 1 y Diseño 2 para 4 macrobloques (elaboración propia).

Tabla 4.3: Costos unitarios de la excavación con TBM y avances promedio y máximo obtenidos de las simulaciones del Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).

Escenarios	Avance Promedio [m/d]	Avance Máximo [m/d]	Costo Unitario TBM [USD/m]
Diseño 1	16.5	37.2	5,556
Diseño 2	13.8	32.6	5,991

4.6 Estimación Económica

El Gráfico 4.5 se determinan los beneficios anuales actualizados obtenidos de la extracción del mineral de cobre de acuerdo con el plan de producción del caso base establecido en la Sección 3.2.5 y los beneficios anuales actualizados considerando un retraso en el inicio de la producción para los casos del Diseños 1 y Diseño 2 de acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones.

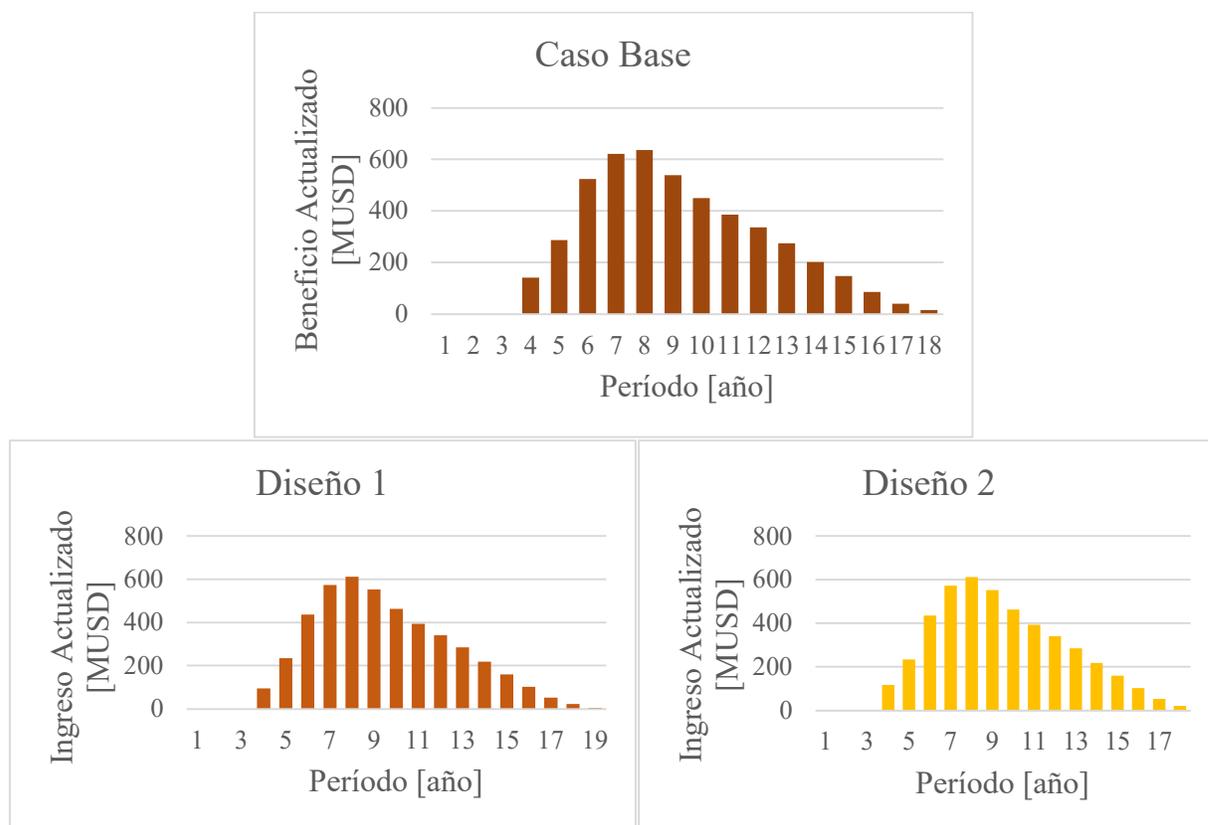


Gráfico 4.5: Beneficios anuales actualizados para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).

En la Tabla 4.4 se observa la suma de los beneficios actualizados anuales para cada uno de los escenarios evaluados, donde en comparación a los 4,681 MUSD de beneficios del caso base, se tiene una disminución en los beneficios totales de 142 MUSD y 124 MUSD para el caso del Diseño 1 y el caso del Diseño 2 respectivamente.

Tabla 4.4: Beneficios actualizados totales para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).

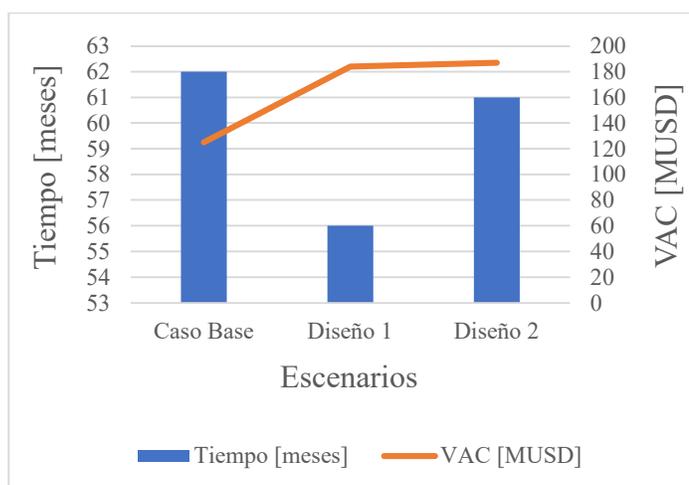
Escenarios	Total Beneficios Actualizados [MUSD]
Caso Base	4,681
Diseño 1	4,539
Diseño 2	4,557

4.7 Evaluación Número de Frentes

Para evaluar el impacto del número de frentes disponibles para la perforación y tronadura en los casos propuestos, se decide disminuir el número de equipos de la flota de PyT para las labores del nivel de producción de forma que se trabaje con 2 frentes operativas. Bajo esta condición se vuelven a simular la preparación de los 4 primeros macrobloques del nivel.

Tabla 4.5: *Tiempos y costos de preparación al tener 2 frentes operativas para la PyT en el nivel de producción para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).*

Escenarios	Tiempo [meses]	VAC [MUSD]
Caso Base	62	125
Diseño 1	56	184
Diseño 2	61	187



La Tabla 4.5 muestra un aumento significativo en los tiempos de preparación de los macrobloques en comparación a los escenarios simulados originalmente, sin embargo, se evidencia que bajo estas condiciones la implementación de la TBM en el Diseño 1 permite una reducción de los tiempos de preparación en 6 meses con respecto al caso base, y para el Diseño 2 la diferencia de tiempo con el caso base es de 1 mes. Los programas de preparación de los macrobloques para cada caso se presentan en la Sección 9.2 de Anexos.

5 DISCUSIÓN

En el presente capítulo se busca realizar un análisis y discusión en base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

5.1 Diseños Nivel de Producción

Al examinar los distintos diseños propuestos de los niveles de producción se puede evidenciar que en todos los casos la cantidad de desarrollos por macrobloque aumenta levemente en comparación al caso base en un 6 %.

Por otro lado, debido a las restricciones operativas de la TBM, las zanjas de producción y algunos de los túneles de conexión entre macrobloques deben ser construidos por PyT, estos desarrollos corresponden a un 67 % de los desarrollos totales de un macrobloque en el caso del Diseño 1. Es decir, menos de la mitad de los desarrollos horizontales de un macrobloque pueden ser construidos por TBM. En el caso del Diseño 2 los desarrollos construidos con PyT aumentan a un 79 % de los desarrollos totales de un macrobloque debido a la incorporación de dos de las calles de producción.

Un radio de giro mínimo al excavar de 15 metros permitiría que la TBM al finalizar la construcción de una calle de producción pueda girar excavando directamente hacia la siguiente calle, posibilitando la construcción de todas las calles de producción sin la necesidad de retroceder la TBM del túnel disminuyendo los tiempos de construcción.

Este radio mínimo también permite el acceso de la TBM para la construcción de las zanjas de producción, sin embargo, para este caso se requiere que la TBM retroceda luego de la construcción de cada zanja, lo cual como se evidencia en este trabajo puede no ser beneficioso para el cronograma del proyecto. Además, para continuar a la siguiente zanja luego de retroceder, la TBM pierde una pared de apoyo de los grippers para la excavación; por estas razones la utilización de TBM para la construcción de las zanjas de producción no es viable por actualmente.

Como la TBM solo puede encargarse de construir las calles del nivel de producción, desde el punto de vista del diseño las tuneladoras están más capacitadas para la construcción de los túneles del nivel de hundimiento, ya que el 90 % de los desarrollos de ese nivel pueden ser construidos por excavación mecanizada.

5.2 Tiempos de Preparación

A partir de los resultados de las simulaciones, se verifica que, a pesar de las mayores tasas de avance en la construcción de túneles de las tuneladoras, estas no permiten tener tiempos de preparación de los macrobloques menores que el método convencional, donde para el caso del Diseño 1 los tiempos aumentan en promedio un 8 % (4 meses) causando una disminución de los beneficios de la explotación del mineral de un 3 % (142 MUSD). Esto se debe a las interferencias que la presencia la TBM en los túneles produce en las labores de perforación y tronadura, por ejemplo, al comienzo de la excavación de la primera calle de producción, no existen frentes disponibles para la PyT hasta que la TBM haya retrocedido de la calle y se rellene el piso del túnel excavado.

En el caso del Diseño 2 el aumento de los tiempos es de un 4 % (2 meses) y una disminución de los beneficios de la explotación del mineral de un 2.7 % (124 MUSD), este tiene un menor tiempo de preparación de los macrobloques en comparación al Diseño 1, debido a que el retroceso de la TBM de los túneles perjudica el desempeño de las demás labores de construcción, demostrando que es preferible planificar secuencias de construcción que eviten la necesidad del retroceso de la tuneladora para mejorar los tiempos de preparación.

5.3 Secuencia de Construcción

El programa del Diseño 1 revela que los retrasos en la preparación de los macrobloques se deben principalmente a las labores de PyT en el nivel de producción, debido a que no hay frentes disponibles para dichas labores hasta dos meses después del inicio de la excavación con TBM. Esto hace que todas las labores posteriores (preparación de los puntos de extracción y preacondicionamiento) se retrasen la misma cantidad de tiempo, lo cual influencia las labores en los macrobloques siguientes.

En cambio en el Diseño 2, las labores de PyT pueden iniciar en el mismo mes que el inicio de excavación con TBM debido a que las frentes de las calles centrales de los macrobloques están disponibles logrando tiempos de la construcción de los túneles del nivel de producción menores a los del caso base, lo cual posiciona a este diseño sobre el Diseño 1, sin embargo, el tiempo adicional de la construcción de la caverna de montaje, el ensamble de la TBM y la construcción de los túneles 6.5 x 6.5 m antes del inicio de la excavación aumentan el tiempo global de la preparación.

Considerando solo el proceso de construcción de los desarrollos horizontales del nivel de producción, el Diseño 1 toma aproximadamente la misma cantidad de tiempo en la construcción de los túneles que el caso base (12 meses), mientras que el Diseño 2 se demora una cantidad de 10 meses en la construcción de los túneles. Sin embargo, la TBM comienza a excavar los túneles de los macrobloques posteriores mientras las labores de PyT aún no se completan en los macrobloques iniciales, esto implica que los macrobloques posteriores no pueden ser preparados en un tiempo menor a los del caso base.

5.4 Costos de Construcción

Los costos totales de la preparación de los macrobloques utilizando ambos métodos de excavación aumentan en un 38 % en comparación a la utilización de solo PyT, esto se debe a la mayor inversión requerida en el caso del uso de TBM y su mayor costo unitario de construcción de túneles como se muestra en la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3.

En el caso base la inversión corresponde a un 19 % del costo total de la preparación de los macrobloques, mientras que en los casos que incorporan el uso de TBM la inversión es el 39 % de los costos totales, debido a que al costo de inversión de la PyT se debe añadir la inversión para la compra de la TBM y las infraestructuras adicionales que las tuneladoras requieren para su funcionamiento (cavernas de montaje, planta de dovelas).

En cuanto a los costos de excavación por metro de la TBM, estos son superiores a los de la PyT en un 24 % y un 33 % para el Diseño 1 y Diseño 2 respectivamente, principalmente debido al costo adicional de relleno del piso con dovelas. Sin embargo, como se observa en la Gráfico 5.1, los costos de PyT tienen mayor participación en los costos totales que los costos de excavación con TBM debido a que la mayor cantidad de desarrollos se realiza con este método. Esto hace que la suma de los costos de excavación de la TBM y la PyT del Diseño 1 y Diseño 2 sean ligeramente mayores al costo de excavación del caso base (Tabla 4.2).

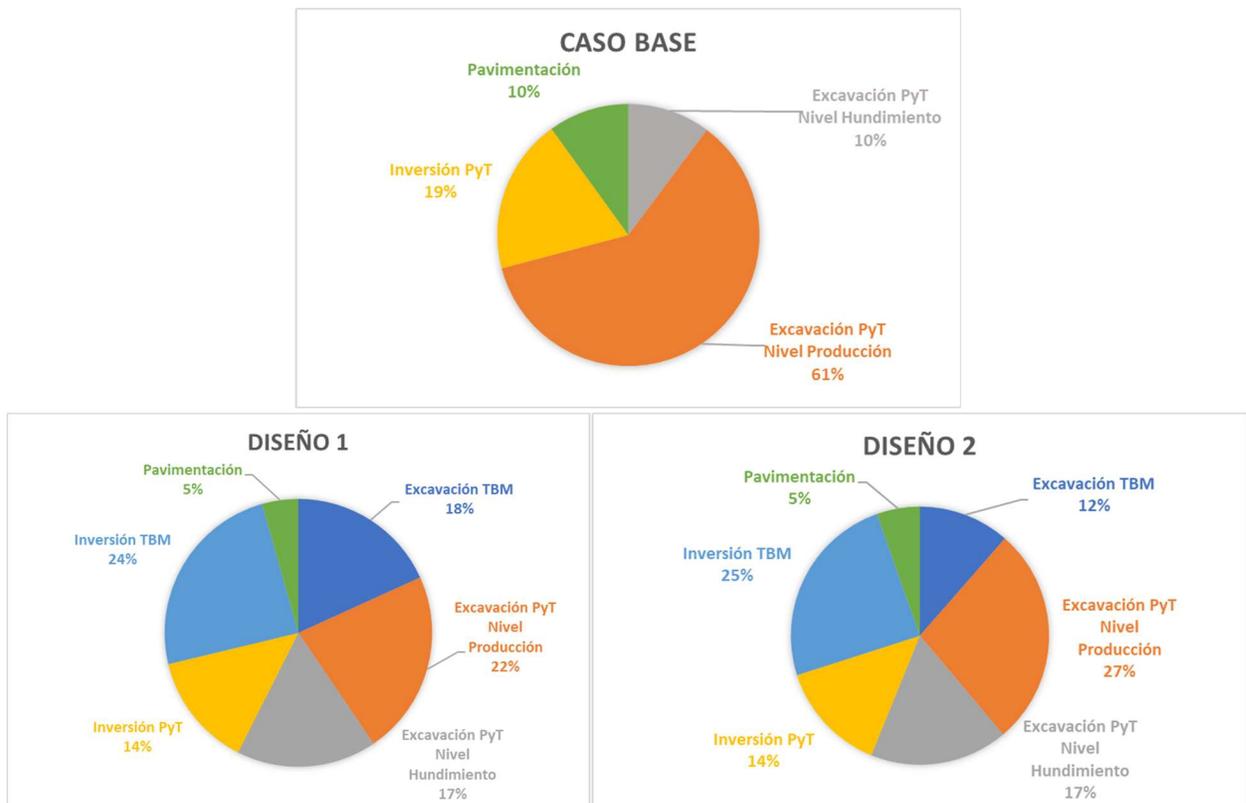


Gráfico 5.1: Porcentaje de los costos totales por actividad para cada caso (elaboración propia).

Asumiendo que la preparación de todos los siguientes macrobloques del primer nivel de Chuquicamata Subterránea tiene los mismos costos que los primeros 4 macrobloques, se puede obtener un valor aproximado del costo total del nivel. La Tabla 5.1 muestra el VAN de la preparación del primer nivel el cual corresponde a la diferencia entre los beneficios de la extracción del mineral obtenidos en la Tabla 4.4 y los costos totales de preparación para cada uno de los casos, donde se observa que para el caso del Diseño 1 el VAN disminuye en 212 MUSD en comparación al caso base y para el caso del Diseño 2 el VAN disminuye en 189 MUSD en comparación al caso base.

Tabla 5.1: Estimación del VAN para la preparación de todos los macrobloques del primer nivel de Chuquicamata Subterránea para el caso base, Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).

Escenarios	Costos Totales Actualizados [MUSD]	Beneficios Totales Actualizados [MUSD]	VAN [MUSD]
Caso Base	385.5	4,681	4,295
Diseño 1	455.4	4,539	4,084
Diseño 2	450.9	4,557	4,106

5.5 Características Geomecánicas

El modelo de la simulación considera condiciones ideales de la roca en la que no existen eventos que retrasen o detengan la operación de la TBM. Sin embargo, existen condiciones del terreno en roca dura que pueden causar problemas para la TBM como macizos rocosos blocosos, zonas de fallas, estallidos de roca, drenaje de agua y altos esfuerzos. La ocurrencia de una o más de estas condiciones del terreno pueden ocasionar la detención de las labores de excavación por días o hasta meses en el peor de los casos en que se produzcan daños severos o un atrapamiento de la TBM en la frente de excavación.

Si bien existen soluciones para lidiar con estos terrenos desafiantes para la excavación con TBM, como sondeos avanzados, perforaciones de inyección de lechada o la implementación de fortificaciones más robustas como mallas de alambre con pernos, anclajes en roca, arcos de acero, vigas de anillo o el sistema McNally; estas labores adicionales pueden disminuir la utilización de la TBM hasta un 15 % perjudicando el desempeño de la máquina (Robbins, 2020), lo cual incide en las tasas de avance en la construcción de los túneles y como se observa en la sección anterior puede tener serias consecuencias en el cronograma de la preparación de los macrobloques.

La resistencia a la compresión uniaxial de la roca también es un parámetro relevante durante el desempeño de la TBM, un estudio realizado en el proyecto Deccan Traps en la India muestra una relación inversamente proporcional entre el UCS y la tasa de penetración sobre la roca (Figura 5.1), por lo que a mayor UCS menor es el avance de la excavación producto de la menor penetración de la TBM (Jain et al, 2016). Por otro lado, terrenos inestables pueden estar relacionados a bajos UCS de la roca, en dichos terrenos la utilización de la máquina disminuye debido a las labores de fortificación adicionales para estabilizar el túnel, lo cual también disminuye el avance de la excavación (Hassanpour et al, 2011).

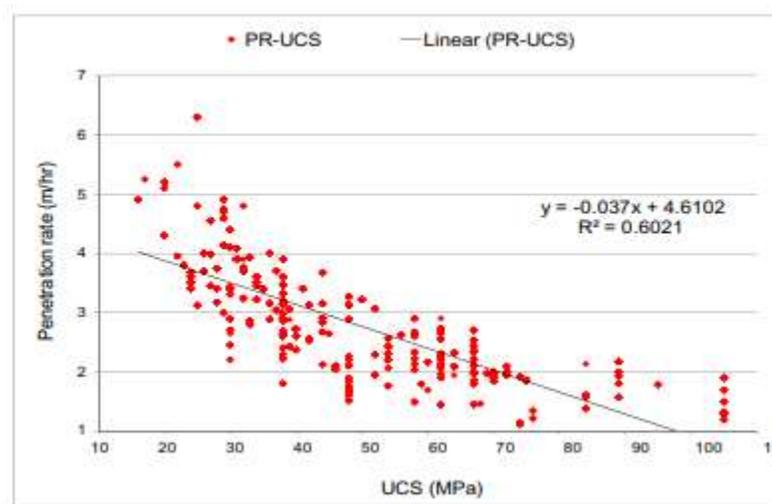


Figura 5.1: Correlación entre el UCS y la tasa de penetración de la TBM (Jain et al, 2016).

La geología del terreno también incide en los tiempos de excavación, como muestra la Figura 5.2 la vida útil de los cortadores depende del tipo de roca en el túnel, donde rocas del tipo cuarcita, granito y gneiss son las que producen un mayor desgaste de los cortadores afectando el desempeño de la TBM debido a la mayor frecuencia en el recambio de los cortadores (Bruland, 2000).

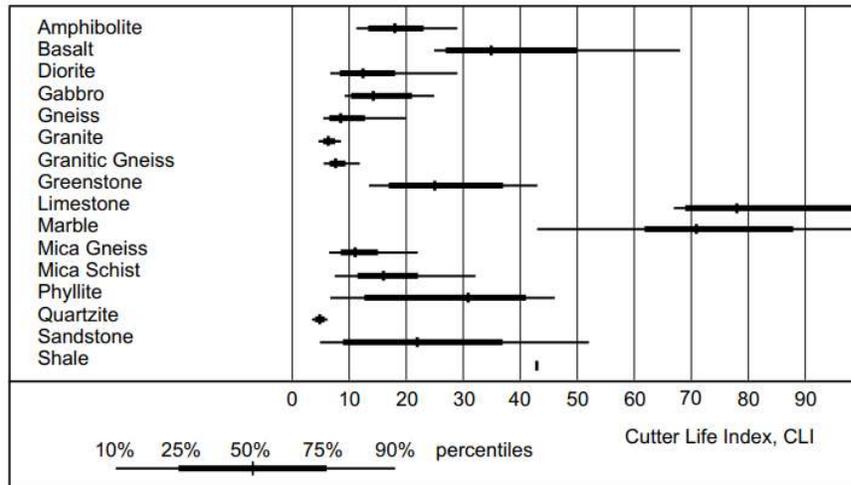


Figura 5.2: Índice de la vida de los cortadores por tipo de roca (Bruland, 2000).

5.6 Logística de Construcción

La planificación de la logística de todo proyecto que utiliza una TBM es clave para evitar retrasos en el avance de la construcción de los túneles. Algunos proyectos muestran que los tiempos de inproductividad con frecuencia alcanzan hasta el 60% del tiempo total de trabajo (Scheffer et al, 2014). Por lo tanto, el desempeño del proyecto no solo se correlaciona con la tasa de avance, sino que también se ve afectado una planificación inexacta de la logística en el lugar de trabajo. Debido al comportamiento complejo y las interacciones sensibles de los procesos logísticos y de producción, un solo proceso interrumpido puede provocar perturbaciones en toda la cadena de procesos.

La primera etapa en la planificación de la logística del proyecto es la compra de la tuneladora y los componentes, donde el proceso de adquisición de la TBM comienza con el envío de las ofertas de los fabricantes de TBM incorporando todos los requisitos del proyecto (diámetro de TBM y características técnicas, condiciones geológicas, profundidad del túnel, roca o suelo, UCS de la roca, etc). Una vez la empresa contratante elige la mejor oferta, se inician los trámites de contratación con el fabricante de tuneladoras. Tras la firma del contrato, se finaliza el diseño detallado de la TBM y luego se inician los procesos de fabricación de cada componente (Kesikbaş & Akkartal, 2018). El paso final es la entregar de la tuneladora en el sitio de construcción y su posterior montaje, todo el proceso de adquisición de la TBM tiene típicamente un tiempo de 12-14 meses (Home, 2010).

Un factor para tener en cuenta en los proyectos mineros es la ubicación geográfica del portal del túnel, el acceso al portal debe tener caminos apropiados de baja pendiente para permitir la movilización práctica del equipo de tuneladoras. El peso de las tuneladoras es del orden de 100 t, y por lo general se requieren vehículos para llevar las tuneladoras a las áreas del portal para el montaje. Alternativamente, la carga útil máxima para helicópteros de alta capacidad está limitada a 20 t y, por lo tanto, restringe el uso de tuneladoras solo a modelos pequeños en ubicaciones remotas (Brox, 2013). Si bien muchos sitios mineros existentes tienen un acceso bien establecido que facilitará el uso de tuneladoras a través de caminos, a menudo se requerirán requisitos de acceso especiales para nuevos proyectos mineros remotos, particularmente en terrenos montañosos.

Durante el proceso de excavación, el propósito de los procesos logísticos es apoyar estos procesos mediante la entrega de los materiales necesarios para la excavación como las dovelas y la eliminación del terreno excavado. El objetivo más importante de los procesos logísticos es evitar perturbaciones en los procesos de producción por falta de capacidad o material (Scheffer et al, 2014). Para ello, se debe considerar la localización en superficie de acopios para el material excavado y lugares para el almacenamiento de las dovelas. En los proyectos civiles en lugares poblados donde los túneles a excavar superan los 8 km, uno de los desafíos es la ubicación de accesos auxiliares al túnel principal para facilitar las labores de logística (Rubiralta et al, 2019). Los proyectos mineros tienen la ventaja de poder aprovechar el sistema de manejo de materiales de la mina para la extracción del material excavado, donde la capacidad no es problema debido a que las minas subterráneas de Block Caving requieren que el sistema tenga una capacidad para la extracción de miles de toneladas diarias de mineral. En cuanto a las dovelas, se puede utilizar la caverna de montaje como lugar de almacenamiento para mantener el suministro de materiales cercano a la excavación.

Otro elemento importante que considerar en la logística para el uso de tuneladoras es la disponibilidad de energía. Los requisitos de energía para las tuneladoras varían según el tamaño y pueden variar desde 1,5 MW para una tuneladora de 4 m de diámetro hasta 8 MW para una tuneladora de 10 m de diámetro; requisitos adicionales de energía para la construcción de túneles con TBM incluyen ventilación e iluminación. Se pueden lograr ahorros sustanciales del orden de millones de dólares operando tuneladoras desde un suministro eléctrico principal, como una red nacional, en comparación con los generadores que funcionan con diésel (Brox, 2013).

6 Conclusiones

Las Tunnel Boring Machines se han utilizado para la construcción de diversos túneles en proyectos mineros con el fin de acceso, transporte de mineral, drenaje, exploración, suministro de agua y desviación de agua, pero no se han utilizado para los túneles de preparación minera. Estos proyectos han visto el uso económicamente beneficioso de las tuneladoras de forma exitosa, y existe una mayor conciencia de la utilidad de las tuneladoras para los proyectos mineros debido a que las tuneladoras ofrecen beneficios clave con sus altas tasas de avance, lo cual es una ventaja económica única reconocida para los proyectos donde el tiempo es esencial para avanzar en el desarrollo minero.

Los radios de giro mínimos actuales de las tuneladoras de 40 metros permiten su utilización para la construcción de las calles de producción de los diseños de los niveles de producción de la minería Block Caving, sin embargo, el uso de TBM no descarta las operaciones de la perforación y tronadura, pues los desarrollos adicionales como las zanjas de los puntos de extracción o las conexiones entre calles deben seguir siendo construidas mediante el método convencional. Un radio de giro mínimo de 15 metros posibilitaría la construcción de la totalidad de los desarrollos del nivel de producción, lo cual permite tiempos de construcción de los macrobloques considerablemente menores y consiguientemente un adelanto del inicio de producción de cada macrobloque y un menor ramp-up del plan de producción.

La implementación de las tuneladoras en las labores de desarrollo de los niveles de producción ocasiona mayores tiempos de preparación de los macrobloques en comparación a la alternativa de usar solamente perforación y tronadura. La TBM provee tiempos de construcción de los túneles notoriamente menores a la perforación y tronadura, sin embargo, esta ventaja no puede ser aprovechada en su totalidad debido a que los niveles deben ser construidos utilizando ambos métodos y existen restricciones de las frentes disponibles para la PyT cuando la TBM está excavando en el mismo macrobloque. Estas interferencias generan retrasos en la construcción de los túneles y por lo tanto en el cronograma global de la preparación de los macrobloques.

Los costos totales de los casos que utilizan la TBM son superiores a los casos que solo utilizan la PyT principalmente debido al costo adicional de relleno del piso con dovelas y a la mayor cantidad de inversión necesaria para el funcionamiento de la tuneladora (caverna de montaje y planta de dovelas). Bajo estos escenarios la utilización de TBM no parece ser competitiva desde el punto de vista económico, sin embargo, vale la pena considerar que hay otros parámetros de decisión como la estabilidad del macizo rocoso y el potencial riesgo de las personas y la infraestructura donde la TBM eventualmente puede aportar positivamente en el proyecto al mejorar la seguridad de los trabajadores y no exponerlos a los peligros de estar en la frente de excavación.

Condiciones del terreno en roca dura como macizos rocosos blocosos, zonas de fallas, estallidos de roca, drenaje de agua y altos esfuerzos pueden causar problemas para la TBM que retrasen o detengan la operación, dependiendo de la adversidad de las condiciones y de las soluciones implementadas, estas demoras pueden ser del orden de días o meses. La cantidad de tiempo de retrasos tiene directo impacto en el cronograma global de la preparación de los macrobloques.

La adquisición de la TBM, la ubicación del portal de acceso, la entrega de los materiales necesarios para la excavación como las dovelas y la eliminación del terreno excavado son los procesos logísticos más importantes para tener en cuenta para lograr buenos tiempos de desempeño del proyecto. Los proyectos mineros que estén ubicados en lugares remotos de difícil acceso tienen la desventaja de dificultar la operación de traslado de la TBM al sitio, pero tienen la ventaja de poder aprovechar el sistema de manejo de materiales de la mina para la extracción del material excavado.

6.1 Trabajo Futuro

Considerando los diseños propuestos en este estudio y con el fin de lograr determinar el mejor diseño del nivel de producción para el uso de TBM, se recomienda crear un algoritmo computacional que permita encontrar el diseño óptimo de las mallas del nivel de producción que minimice la cantidad de metros adicionales de túneles en comparación a las mallas típicas de Block Caving y que permita encontrar la mejor secuencia de construcción de los túneles con TBM que minimice las interferencias con la perforación y tronadura.

Otro punto interesante por estudiar es la incorporación al modelo de las interferencias operacionales entre los mismos equipos de perforación y tronadura, y evaluar el impacto de dichas interferencias sobre las tasas de avance. También se pueden simular escenarios con condiciones de roca desafiantes para el funcionamiento de la TBM y evaluar los riesgos que pueden existir en el programa de construcción.

Finalmente, se recomienda evaluar los diseños de otros niveles de la mina como los niveles de hundimiento, transporte y ventilación para la utilización de TBM, debido a que estos niveles tienen diseños más simples que el nivel de producción y pueden verse beneficiados de las tasas de avance de las tuneladoras.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Sifferlinger, N. A., Hartlieb, P., & Moser, P. (2017). The importance of research on alternative and hybrid rock extraction methods. *BHM berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 162(2), 58-66.
- Zheng, Y. L., Zhang, Q. B., & Zhao, J. (2016). Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 287-299.
- Zhang, C., Feng, X., Zhou, H., Qiu, S., & Wu, W. (2012). A top pilot tunnel preconditioning method for the prevention of extremely intense rockbursts in deep tunnels excavated by TBMs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 289-309.
- Zhang, C., Feng, X. T., Zhou, H., Qiu, S., & Yang, Y. (2014). Rock mass damage induced by rockbursts occurring on tunnel floors: a case study of two tunnels at the Jinping II Hydropower Station. *Environmental earth sciences*, 71(1), 441-450.
- Rehbock-Sander, M., & Jesel, T. (2018). Fault induced rock bursts and micro-tremors—Experiences from the Gotthard Base Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 358-366.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2013). *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC press.
- Home, L., & Askilrud, O. G. (2011). Tunnel boring machines in mining. *SME Mining Engineering Handbook, third ed. SME, USA*, 1255-1270.
- Luxner, T., Deen, J., & Koski, M. (2012). Use of tunnel boring machines at Stillwater Mining's underground PGM mines. *Mining Engineering*, 64(12).
- Brox, D. (2013). Technical considerations for TBM tunneling for mining projects. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 334, 498-505.
- Barioffi, A., Fernandez, E., Ciocca, G., & Grandori, R. (2011). DS Compact TBM dealing with complex and unexpected geology in Los Bronces Exploratory Tunnel. In *Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2011* (pp. 1370-1382).
- Flores, G., & Catalan, A. (2019). A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 549-561.
- Bruland, A. (2000). *Hard rock tunnel boring*. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi.
- Macias, F. J., & Bruland, A. (2014). D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method. In *ISRM Regional Symposium-EUROCK 2014*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Gharahbagh, E. A., & Mojtabai, N. (2013). Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 22-33.

- Rodríguez Toro, C. (2020). Desafíos geomecánicos para el uso de TBM en minería masiva de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177569>
- D. Ofiara, G. Watson. (2016). The next generation of TBMs for mining application. TBMSinminingWTC2016.
- Ryan Gratias, C. A., & Willis, D. (2014). The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining. *North American Tunneling: 2014 Proceedings*.
- Bruland, A. (1998). Prediction model for performance and costs, Norwegian TBM tunnelling, Publication No. 11. *Norwegian Tunnelling Society*.
- Paredes, P., Rodríguez, F., Castro, R., Morales, D., & Garcia, D. (2019). Design and evaluation of single-phase drawbell excavation at the Chuquicamata underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(12), 1061-1070.
- Rubiralta, N., Hernández, Á., Ergut, S., & Shaban, A. (2019). Logistic challenges for TBM operation during Sofia Metro Line 3 extension.
- Scheffer, M., Rahm, T., Duhme, R., Thewes, M., & König, M. (2014, December). Jobsite logistic simulation in mechanized tunneling. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014* (pp. 1843-1854). IEEE.
- Robbins. (2020). Túneles profundos con TBM en Los Andes chilenos: Un estudio comparativo de dos desafiantes proyectos tuneleros en Chile. Webinar Túneles con TBM: Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE).
- Geoconsult Group. (2020). Experiencias en Diseño, Construcción y Estrategias de Licitación de Túneles Excavados en Suelo con TBM. Webinar Túneles con TBM: Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE).
- Herrenknecht. (2019). Nuevos desarrollos en equipos de Excavación Mecanizada. Concepto TBM flexible para roca dura en minería. Simposio Internacional Excavación Mecánica de Túneles TBM-TBS y Megaproyectos Subterráneos CODELCO-MOP. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE).
- Lewis Group. (2019). Experiencia Desarrollo Túnel Olmos con TBM. Simposio Internacional Excavación Mecánica de Túneles TBM-TBS y Megaproyectos Subterráneos CODELCO-MOP. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE).
- Herrera, G. (2020). Informe de Práctica Profesional III. Universidad de Chile.
- Herrenknecht AG. (2021). Gripper TBM. [en línea] <https://www.herrenknecht.com/en/products/product-detail/gripper-tbm/>.
- Robbins Company. (2021). Tuneladoras. [en línea] <https://www.robbinstbm.com/es/nuestros-productos/tunnel-boring-machines/>.
- Vergara Pérez, Y. (2014). Altura de columna en block/panel caving. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131058>.

Jain, P., Naithani, A. K., & Singh, T. N. (2016). Estimation of the performance of the tunnel boring machine (TBM) using uniaxial compressive strength and rock mass rating classification (RMR)—A case study from the Deccan traps, India. *Journal of the Geological Society of India*, 87(2), 145-152.

Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 595-603.

8 ANEXO A

8.1 Resumen Extendido

Análisis de la Aplicabilidad de TBM en Nivel de Producción de Minería Block Caving

Gabriel HERRERA¹, Luis Felipe ORELLANA², Nelson MORALES³, Hans GÖPFERT⁴.

¹ Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

² Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

³ Advanced Mining Technology Center, FCFM - Universidad de Chile

⁴ Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

Contacto

Gabriel Herrera (gabriel.herrera@ug.uchile.cl)

Luis Felipe Orellana (luisfelipe.orellana@ing.uchile.cl)

Nelson Morales (nelson.morales@amtc.cl)

Hans Göpfert (hansgopfert@hotmail.com)

Ideas Clave:

- Uso de TBM en Block Caving
- Diseño Nivel de Producción
- Simulación Montecarlo

Resumen

Las TBM proporcionan una alternativa competitiva para llegar a los yacimientos subterráneos de gran profundidad. Pueden ayudar a lograr inicios de producción más tempranos y un retorno de inversión más rápido, debido a sus altas tasas de avance en la construcción de los túneles para el acceso al yacimiento y el transporte de minerales. El objetivo de este estudio es analizar la aplicabilidad de la excavación mecanizada tipo Tunnel Boring Machine (TBM) en la minería subterránea masiva Block Caving. El uso de TBM permite la construcción de las calles de producción de los niveles de producción y provee tiempos de construcción de los túneles notoriamente menores a la perforación y tronadura, sin embargo, esta ventaja no puede ser aprovechada en su totalidad debido a que los niveles deben ser construidos utilizando ambos métodos y existen restricciones de las frentes disponibles para la PyT cuando la TBM está excavando en el mismo macrobloque. Estas interferencias generan retrasos en la construcción de los túneles y por lo tanto en el cronograma global de la preparación de los macrobloques.

Abstract

TBM's provide a competitive alternative to reach deep underground deposit. They can help to achieve earlier production starts and a faster return on investment, due to their high rates of progress in the construction of the tunnels for access to the ore body and the transport of minerals. The objective of this study is to analyze the applicability of the mechanized excavation Tunnel Boring Machine (TBM) in the Block Caving massive underground mining. The use of TBM allows the construction of the drives of the production level and provides construction times for the tunnels significantly shorter than drilling and blasting, however, this advantage cannot be fully exploited because the levels must be built using both methods and there are restrictions on the fronts available for P&T when the TBM is digging in the same macroblock. These interferences generate delays in the construction of the tunnels and therefore in the overall schedule for the preparation of the macroblocks.

1. Introducción

Es posible proyectar el futuro de la industria minera hacia la minería subterránea, ya que los yacimientos en superficie que actualmente se explotan a cielo abierto se están agotando y se acercan a sus límites económicos, sin mencionar las restricciones ambientales que son cada vez mayores. Las TBM proporcionan una alternativa competitiva para llegar a los yacimientos subterráneos de gran profundidad. Pueden ayudar a lograr inicios de producción más tempranos y un retorno de inversión más rápido, debido a sus altas tasas de avance en la construcción de los túneles para el acceso al yacimiento y el transporte de minerales.

El objetivo de este estudio es analizar la aplicabilidad de la excavación mecanizada tipo Tunnel Boring Machine (TBM) en la minería subterránea masiva Block Caving. Específicamente, determinar las capacidades y limitaciones de la TBM en la construcción de túneles, adaptando el diseño de los niveles de producción a las características de funcionamiento de las TBM, y estimar tiempos y costos de construcción de dichos diseños.

2. Metodología

La primera etapa de este estudio consiste en la determinación de los parámetros de funcionamiento de las TBM a través de una revisión bibliográfica, la siguiente fase corresponde a la definición y construcción del caso base correspondiente al diseño minero del proyecto Chuquicamata Subterránea explotada por Block Caving, seguido por el planteamiento de 2 casos propuesto en los que se logre adaptar el diseño y la secuencia de la construcción de las calles del nivel de producción a los requerimientos de las TBM, en la tercera etapa se busca estimar los tiempos y costos de la preparación de los macrobloques mediante la realización de una simulación de Montecarlo, luego, en una cuarta etapa se calcula el impacto económico que los diseños tienen sobre el plan de producción basado en los resultados de la simulación, para ello, se toma como referencia el plan de producción de la extracción de cobre del primer nivel del proyecto Chuquicamata Subterránea.

3. Resultados

De los resultados obtenidos en las simulaciones para la preparación de los 4 primeros macrobloques de la mina, se puede observar que con respecto al caso base para el Diseño 1 y Diseño 2 se tiene un aumento de los tiempos de preparación de los macrobloques de 4 meses y 2 meses respectivamente, y un aumento de los costos de preparación de 112 MUSD y 111 MUSD respectivamente. El retraso del inicio de la producción producto de los mayores tiempos de preparación se traduce en una disminución en la cantidad de beneficios totales de 142 MUSD y 124 MUSD para Diseño 1 y Diseño 2 respectivamente.

4. Discusión

Al examinar los diseños propuestos de los niveles de producción y para radios de giro mínimo de la TBM de 40 metros se puede evidenciar que la cantidad de desarrollos por macrobloque aumenta en comparación al caso base levemente en un 6 %. El uso de TBM no descarta las operaciones de la perforación y tronadura, pues solo el 33 % de los desarrollos del nivel de producción pueden ser construidos con TBM debido a la limitante de sus radios de giro actuales. Se requiere de un radio de giro mínimo de 15 metros para la construcción de las zanjas de los puntos de extracción.

5. Conclusión

La TBM provee tiempos de construcción de los túneles notoriamente menores a la perforación y tronadura, sin embargo, esta ventaja no puede ser aprovechada en su totalidad debido a que los niveles deben ser construidos utilizando ambos métodos y existen restricciones de las frentes disponibles para la PyT cuando la TBM está excavando en el mismo macrobloque. Estas interferencias generan retrasos en la construcción de los túneles y por lo tanto en el cronograma global de la preparación de los macrobloques.

Bibliografía

- Zheng, Y. L., Zhang, Q. B., & Zhao, J. (2016). Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 287-299.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2013). *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC press.
- Home, L., & Askilrud, O. G. (2011). Tunnel boring machines in mining. *SME Mining Engineering Handbook, third ed. SME, USA*, 1255-1270.
- Brox, D. (2013). Technical considerations for TBM tunneling for mining projects. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 334, 498-505.
- Flores, G., & Catalan, A. (2019). A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 549-561.
- Bruland, A. (2000). *Hard rock tunnel boring*. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi.
- Alber, M. (2000). Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics. *Tunnelling and underground space technology*, 15(1), 55-64.
- Rodríguez Toro, C. (2020). Desafíos geomecánicos para el uso de TBM en minería masiva de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177569>
- Paredes, P., Rodríguez, F., Castro, R., Morales, D., & Garcia, D. (2019). Design and evaluation of single-phase drawbell excavation at the Chuquicamata underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(12), 1061-1070.

9 Anexo B

9.1 Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov

9.1.1 Tasa de Avance TBM

Tabla 9.1: Estadística de los datos de tasa de avance TBM.

Estadística	Data
Número de datos	9,647
Promedio [m/d]	26.1
Desviación Estándar [m/d]	13.3
Mínimo [m/d]	4
Máximo [m/d]	65

H_0 : La muestra sigue una distribución Generalizada de Pareto ($k=-0.5$, $\sigma = 29.6$, $\mu = 6.9$).

H_1 : La muestra no sigue una distribución Generalizada de Pareto ($k=-0.5$, $\sigma = 29.6$, $\mu = 6.9$).

Al realizar el test de Kolmogorov-Smirnov, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 9.2: Parámetros test de Kolmogorov-Smirnov para la tasa de avance TBM.

D	0.0138
Valor p	0.0429
α	0.05

Como el valor p es mayor que el valor crítico con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se acepta la hipótesis nula.

9.2 Programas de Preparación

M - Norte 1 y M - Sur 1	Año	1												2											
Actividad	Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									
M - Norte 1 y M - Sur 1	Año	3												4											
Actividad	Mes	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									
M - Norte 2 y M - Sur 2	Año	1												2											
Actividad	Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									
M - Norte 2 y M - Sur 2	Año	3												4											
Actividad	Mes	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									
M - Norte 2 y M - Sur 2	Año	5												6											
Actividad	Mes	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Desarrollos Nivel de Producción																									
Desarrollos Nivel de Hundimiento																									
Preparación puntos de extracción																									
Pavimentación																									
Preacondicionamiento																									

Figura 9.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del caso base (elaboración propia).

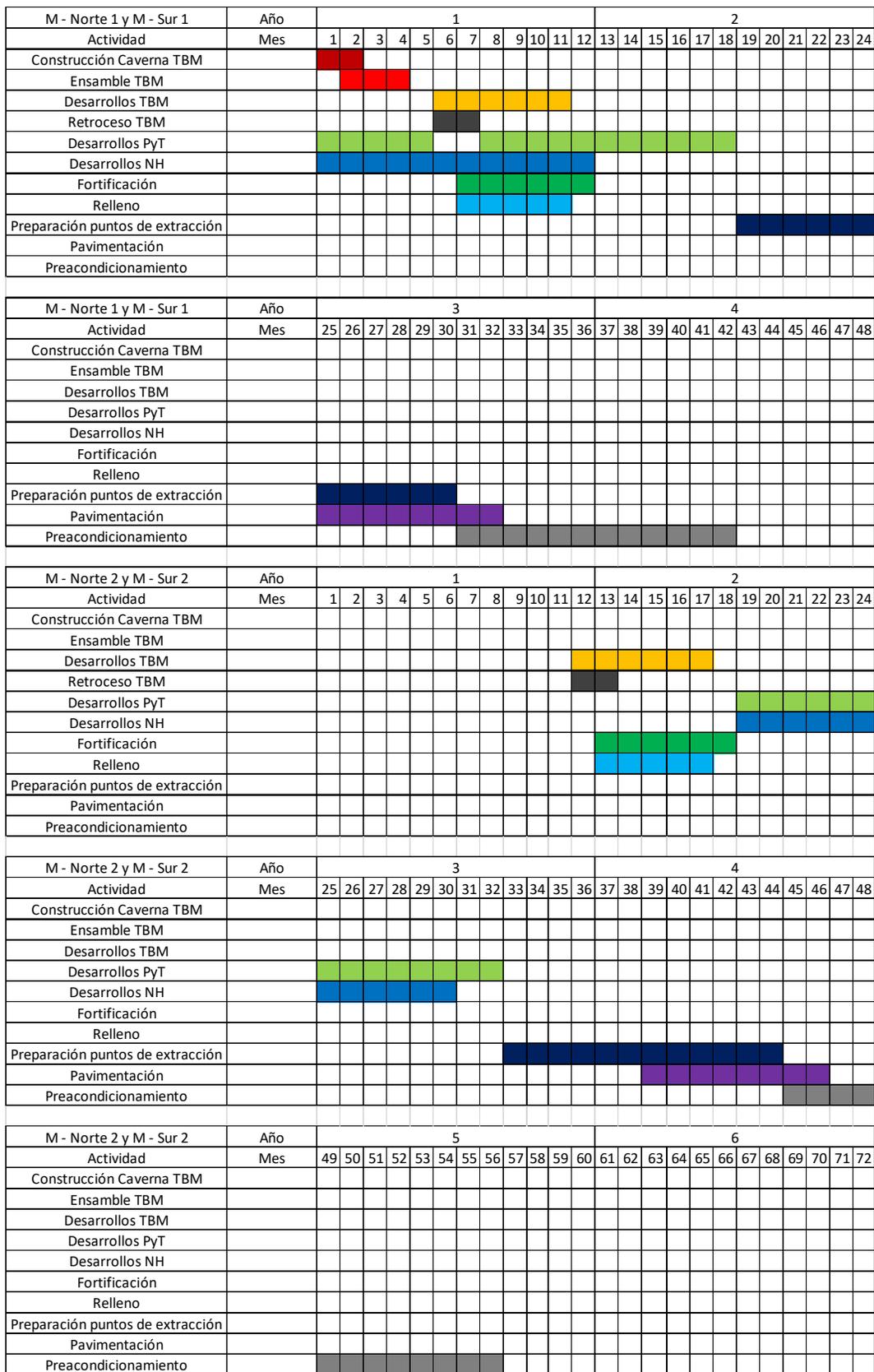


Figura 9.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 1 (elaboración propia).

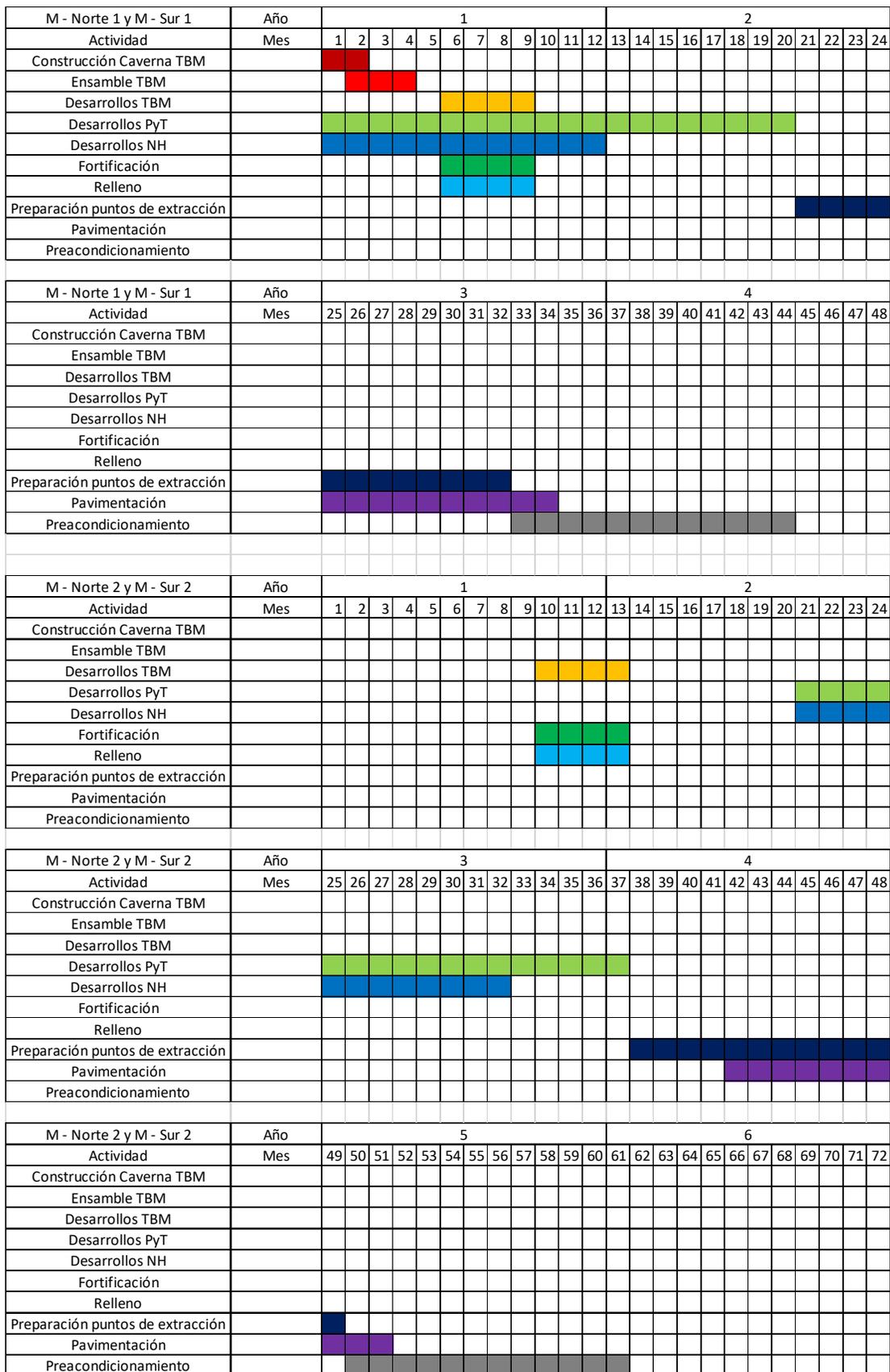


Figura 9.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 2 (elaboración propia).

9.3 Código de Programación

9.3.1 Variables

n = número de la simulación actual

realizaciones = número de simulaciones totales a realizar

desarrollos_PyT = metros a desarrollar por PyT

desarrollos_TBM = metros a desarrollar por TBM

desarrollos = metros totales a desarrollar

avance_PyT = metros desarrollados por PyT

avance_TBM = metros desarrollados por TBM

avance = metros desarrollados totales

pd1 = distribución tasa de avance TBM

ar = tasa de avance diario TBM

ar_PyT = tasa de avance diario PyT

dia = número del día actual

dia_PyT = número de días PyT

TBM_days = número de días TBM

dia_total = número de días totales

m = número de meses PyT

l = número de meses TBM

dia_ci = día término construcción calle i

fc = factor de conversión tasa de descuento

c_PyT = costo por metro PyT

PyT_costs_ac = costo acumulado PyT

Costo_PyT = costo diario PyT

PyT_costs = costos totales PyT

Im = tasa de penetración TBM

Cutter_costs = costos cortadores TBM

TBM_costs = costos de excavación TBM

Backup_equipment_costs = costos de sistema back-up TBM

Transport_costs = costo cinta transportadora TBM

Labor_costs = costo mano de obra TBM

TBM_costs_ac = costo acumulado TBM

Costos_TBM = costo diario TBM

TBM_cost = costos totales TBM

PyT_VAC = costos totales actualizados PyT

TBM_VAC = costos totales actualizados TBM

Total_VAC = costos totales actualizados

9.3.2 Código Diseño 1

```
n=1;
realizaciones=1000;
while n<realizaciones+1
  avance_M1=0;
  pd1 = makedist('GeneralizedPareto','k',-0.54347,'sigma',29.596,'theta',6.9071);
  ar(1:2000,1:1)=random(pd1,2000,1);
  dia=0;
  calle_M1=1;
  Costos_TBM=0;
  m=1;
  l=1;
  fc=0;
  Metros_mes=0;
  dia_c1=0;
  dia_c2=0;
  dia_c3=0;
  dia_c4=0;
  dia_c5=0;
  dia_c6=0;
  TBM_cost=0;
  PyT_costs=0;
  Maintenance_costs=720*24;
  Service_costs=290*24;
  Energy_costs=1.8*100*24;
  while calle_M1<7
    if calle_M1==1
      dia=dia+1;
      avance_M1=avance_M1+ar(n);
      if avance_M1>1
```

```

    calle_M1=calle_M1+1;
    avance_M1=1;
    dia_c1=dia;
end
%TBM costs
Im=ar(n)/7.2;
Cutter_costs=1302/Im;
if Im<1
    TBM_costs=8700;
elseif Im<1.5
    TBM_costs=(Im-1)*(5900-8700)/(1.5-1)+8700;
elseif Im<2
    TBM_costs=(Im-1.5)*(4500-5900)/(2-1.5)+5900;
elseif Im<3
    TBM_costs=(Im-2)*(3100-4500)/(3-2)+4500;
elseif Im<4
    TBM_costs=(Im-3)*(2400-3100)/(4-3)+3100;
elseif Im<6
    TBM_costs=(Im-4)*(1700-2400)/(6-4)+2400;
else
    TBM_costs=1700;
end
%Backup equipment costs
if Im<1
    Backup_equipment_costs=1825;
elseif Im<1.5
    Backup_equipment_costs=(Im-1)*(1225-1825)/(1.5-1)+1825;
elseif Im<2
    Backup_equipment_costs=(Im-1.5)*(950-1225)/(2-1.5)+1225;
elseif Im<3
    Backup_equipment_costs=(Im-2)*(700-950)/(3-2)+950;
elseif Im<4
    Backup_equipment_costs=(Im-3)*(500-700)/(4-3)+700;
elseif Im<6
    Backup_equipment_costs=(Im-4)*(375-500)/(6-4)+500;
else
    Backup_equipment_costs=375;
end
%Basic labour costs
if Im<1
    Labor_costs=1725*0.8625;
elseif Im<2
    Labor_costs=((Im-1)*(1075-1725)/(2-1)+1725)*0.8625;
elseif Im<3
    Labor_costs=((Im-2)*(775-1075)/(3-2)+1075)*0.8625;
elseif Im<4
    Labor_costs=((Im-3)*(600-775)/(4-3)+775)*0.8625;
elseif Im<5
    Labor_costs=((Im-4)*(525-600)/(5-4)+600)*0.8625;

```

```

elseif Im<6
    Labor_costs=((Im-5)*(450-525)/(6-5)+525)*0.8625;
else
    Labor_costs=450*0.8625;
end
Costos_TBM=Costos_TBM+((Cutter_costs+TBM_costs*1.1+Backup_equipment_costs+Labor_
costs)*ar(n)+Maintenance_costs+Service_costs+Energy_costs)*1.57*0.12*1.075*1.12;
if dia==30*m
    if m==1
        TBM_cost(1,m)=Costos_TBM;
        TBM_costs_ac(1,m)=Costos_TBM;
        fc(m,1)=1/(1.00797414^m);
        Metros_mes(1,m)=avance_M1;
        m=m+1;
    else
        TBM_costs_ac(1,m)=Costos_TBM;
        TBM_cost(1,m)=TBM_costs_ac(1,m)-TBM_costs_ac(1,m-1);
        fc(m,1)=1/(1.00797414^m);
        Metros_mes(1,m)=avance_M1;
        m=m+1;
    end
end
end
end
PyT_costs(1,p)=Costo_PyT-PyT_costs_ac(1,p-1);
fc(p,1)=1/(1.00797414^p);
TBM_cost(1,p)=0;
PyT_days(n)=dia_PyT-dia_M1;
TBM_days(n)=dia;
total_days(n)=dia_PyT;
avance=avance_TBM+avance_PyT;
%Costos
Costo_total=TBM_cost+PyT_costs;
PyT_VAC(n)=(PyT_costs*fc)/1000000;
TBM_VAC(n)=(TBM_cost*fc)/1000000;
Total_VAC(n)=(Costo_total*fc)/1000000*1.0986;
n=n+1;
end

```