



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE MODELAMIENTO PARA OPTIMIZAR EL PLAN DE PREPARACIÓN MINERA EN MCHS

POR

CARLOS JAVIER REBOLLEDO MARDONES

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar por el título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

René Gómez Puigpinos

Profesor Coguía

Gonzalo Nelis Suazo

Profesionales Supervisores

Claudio Córdova Garat, Karl Mühlenbrock Carvajal, Camila Mesina
Sepúlveda

Noviembre 2025

© 2025 Carlos Javier Rebolledo Mardones

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a mi familia, mis padres, que sin su sacrificio esto hubiera sido imposible, mi padre, Carlos Andrés Rebolledo Godoy, que se partía el lomo para que yo pudiera estudiar, él fue mi primer ejemplo para seguir hasta el final, mi viejito lindo que siempre daba todo por su familia espero poder devolverle la mano ahora que pueda titularme, mi madre, Lisette Mardones que siempre me apoyó en todo, siempre estuvo ahí para escuchar mis problemas, siempre me aguantó todo y me guio en cada momento, siempre mis padres me apoyaron e incentivaron en ser mejor, quiero agradecerles a ambos y decirles que son lo más grande.

A mi hermano Andrés que siempre estuvo ahí apoyándome también, que a pesar de irme de la casa y no poder aconsejarlo día a día se convirtió en una persona admirable, que en todo momento me confío lo que le sucedía y me decía que le sucedía para guiarlo, siempre me recordó que él estaba ahí para mí y quiero devolverle la mano la una vez esté trabajando.

Estoy muy agradecido del apoyo que me brindó toda mi familia en general, tanto por parte de mi padre y de mi madre, ambas partes estuvieron ahí cuando más las necesité.

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a los profesionales que estuvieron apoyándome en todo momento, principalmente a Claudio Córdova, Karl Mühlenbrock, Camila Mesina y Catalina Morales, siempre me otorgaron su apoyo y confianza para desarrollar este trabajo, todos ellos muy grandes profesionales y estoy orgulloso de haber estado en la Superintendencia de Gestión Producción, de igual forma agradecer el apoyo constante del docente Gonzalo Nelis.

A mi grupo de amigos el bazar de la bety el cual estuvo presente durante toda mi carrera universitaria, en los ramos aprobados y reprobados, todas las risas y buenos momentos que vivimos por el dc, son inolvidables y fueron un gran aporte a mi persona.

A Grupete, que siempre nos estuvimos apoyando dentro y fuera de la cancha, nunca decepcionaron y me siento muy orgullo de la gran amistad que formamos como equipo.

Agradezco a la División Chuquicamata de CODELCO, especialmente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD), por el apoyo brindado en recursos y por el ambiente propicio que hizo posible la realización de este trabajo.

Finalmente, siempre estaré agradecido de las personas especiales para mí.

RESUMEN

El estudio presenta una herramienta integrada para apoyar la planificación minera, desde el área de preparación minera en la mina Chuquicamata Subterránea, pensada para transformar el diseño en un plan ejecutable y trazable. La solución se organiza en tres piezas que trabajan juntas: (i) un agendamiento tipo RCPSP que ordena las labores de preparación según sus duraciones, precedencias y límites de capacidad, y con ello arma un plan base factible; (ii) un simulador operativo por turnos que baja ese plan a la realidad del interior mina, incorporando ventanas de ventilación y tronadura, compatibilidades entre labores y traslados de equipos entre niveles, además de la variabilidad de tiempos; y (iii) un referente de alcance máximo construido desde la lógica de las tronaduras y rendimientos típicos, que sirve como cota práctica para dimensionar la carga mensual y contrastar lo planificado. Con este conjunto, la planificación de preparación queda ordenada y verificable, y sus resultados se pueden usar directamente en terreno.

La herramienta se apoya en una interfaz gráfica que centraliza parámetros (frentes, recursos, calendarios y reglas), valida consistencia mínima y produce salidas estandarizadas: plan de avance mensual, programación por turnos, reportes con trazabilidad de asignaciones y exportaciones espaciales (DXF/GLB). El caso de estudio se acota a macrobloques y horizonte de corto plazo con mayor incidencia operacional. La evaluación compara planes generados con planes existentes y ejecución real a través de métricas simples y trazables, identificando desalineaciones, cuellos de capacidad y holguras temporales antes de su ocurrencia en terreno.

En la práctica, la herramienta permitió dejar atrás planillas sueltas y trabajar con un plan único, trazable y fácil de revisar. El Plan de Actividades Mensual propuesto (PAM propuesto) fue más certero frente a lo que ocurrió en terreno: presentó desvíos menores respecto del avance real, anticipó cuellos de capacidad y ordenó mejor la asignación por turnos. Pensando en su adopción, la plataforma reúne a ingeniería y operación sobre la misma base de información (PAM, turnos y DXF/GLB), con visibilidad compartida y margen para acordar ajustes antes de que aparezcan los problemas. Además, el modelo mostró una desviación promedio cercana al 7,8% (versus ~14,3% del PAM SGP), y abril fue el mes de mejor ajuste, con una brecha prácticamente nula (≈ 1 m) respecto del avance real. Con esta base, el enfoque puede replicarse y escalarse a otros sectores de la mina sin cambiar la forma de trabajar.

ABSTRACT

The study presents an integrated tool to support mine planning from the mine preparation area at the Chuquicamata Underground Mine, designed to turn design into an executable and traceable plan. The solution is organized into three components that work together: (i) an RCPSP-type scheduler that orders preparation tasks by duration, precedence, and capacity limits, thereby building a feasible baseline plan; (ii) a shift-based operational simulator that brings that plan down to underground reality, incorporating ventilation and blasting windows, task compatibilities, and equipment transfers between levels, as well as time variability; and (iii) a maximum-throughput reference built from blasting logic and typical productivities, which serves as a practical upper bound to size the monthly workload and benchmark the plan. Taken together, preparation planning becomes orderly and verifiable, and the results can be used directly in the field.

The tool is supported by a graphical interface that centralizes parameters (work fronts, resources, calendars, and rules), checks basic consistency, and produces standardized outputs: monthly advance plan, shift scheduling, traceable assignment reports, and spatial exports (DXF/GLB). The case study is limited to macro-blocks and a short-term horizon with the greatest operational impact. The evaluation compares model-generated plans with existing plans and actual execution using simple, traceable metrics, identifying misalignments, capacity bottlenecks, and temporary slack before they occur in the field.

In practice, the tool made it possible to move away from scattered spreadsheets and work with a single, traceable, easy-to-review plan. The proposed Monthly Work Plan (PAM) was closer to the executed plan: it showed smaller deviations from actual advance, anticipated capacity bottlenecks, and improved shift-level assignment. The platform brings engineering and operations onto the same information base (PAM, shift schedules, and DXF/GLB), with shared visibility and room to agree on adjustments before problems arise. In addition, the model showed an average deviation of about 7.8% (versus ~14.3% for the SGP PAM), and April was the best-fitting month, with a virtually negligible gap (≈ 1 m) relative to actual advance. On this basis, the approach can be replicated and scaled to other areas of the mine without changing the current workflows.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo General	2
1.1.2.	Objetivos específicos.....	2
1.2.	Alcances y limitaciones del estudio	3
2.	ANTECEDENTES GENERALES	4
2.1.	División Chuquicamata Subterránea	4
2.2.	Transición de Chuquicamata rajo a minería subterránea	6
2.2.1.	Método de explotación Chuquicamata	7
2.3.	Diseño Mina Chuquicamata.....	8
2.3.1.	Nivel de hundimiento	8
2.3.2.	Nivel de producción	9
2.3.3.	Nivel de acarreo:.....	9
2.3.4.	Subnivel de chancado:.....	9
2.3.5.	Subnivel inyección y extracción de aire:.....	9
2.3.6.	Subnivel de transporte intermedio:.....	9
2.4.	Preparación Minera	11
2.4.1.	Excavaciones mineras	12
2.4.1.1.	Desarrollos Horizontales	12
2.4.1.2.	Desarrollos Verticales	15
2.4.2.	Obras civiles	15
2.4.2.1.	Marcos y vigas de los puntos de extracción.	15
2.4.2.2.	Muros de confinamiento de pilares.	16
2.4.2.3.	Pavimentación de las vías de rodado.	18
2.5.	Planificación de la Preparación Minera.....	19
2.5.1.	Tipos de planes	19
2.6.	Optimización en la Planificación Minera.....	20
2.7.	Gurobi Optimizer	20

2.7.1.	Programación Lineal	22
2.7.2.	Programación Entera-Mixta	22
2.7.3.	Actividades	23
2.7.4.	Precedencias	23
2.7.5.	Restricciones.....	23
2.8.	Utilización de MonteCarlo.....	24
3.	DESARROLLO	25
3.1.	Agendamiento de actividades (RCPS)	26
3.1.1.	Layout de la Mina.....	27
3.1.2.	Lógica de agendamiento y selección de actividades.	30
3.1.3.	Código de Optimización con Gurobi.....	31
3.1.4.	Salidas esperadas del agendamiento.....	33
3.2.	Programa de simulación	33
3.2.1.	Funcionamiento del programa.....	34
3.2.2.	Interfaz gráfica.....	37
3.2.3.	Salidas esperadas de la simulación.....	39
3.3.	Metodología de alcance máximo posible	40
4.	RESULTADO	42
4.1.	Resultados Agendamiento de Actividades	42
4.2.	Resultado Programa de simulación	46
4.3.	Resultado Alcance máximo posible	50
4.4.	Comparativa de planes	50
4.4.1.	Planes de trabajo caso de estudio	51
4.4.2.	Comparación PAM propuesto	53
4.4.3.	Desviaciones en los planes	54
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1.	Recomendaciones	57

6.	REFERENCIAS	58
7.	ANEXOS	61
7.1.	Planes obtenidos de Agendamiento de Actividades	61
7.2.	Detección de frentes	63
7.3.	Cantidad de frentes por niveles.....	64
7.4.	Resumen de los planes obtenidos	67

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Ubicación geográfica de la mina Chuquicamata [3].</i>	4
<i>Figura 2. Vista rajo abierto mina Chuquicamata 2009 [3].</i>	5
<i>Figura 3. Explotación en configuración Macrobloques [4].</i>	5
<i>Figura 4. Vista isométrica rajo y nivel de producción subterránea [3].</i>	6
<i>Figura 5. Vista planta proyección del rajo con el nivel productivo de mina subterránea [3].</i>	7
<i>Figura 6. Footprint de MCHS (nivel de producción) con identificación de macrobloques, 2024 [6].</i>	8
<i>Figura 7. Diseño minero para la unidad básica de explotación PMCHS [7].</i>	10
<i>Figura 8. Esquema de distribución de niveles dentro de un Panel Caving [8].</i>	11
<i>Figura 9. Ciclo minero para desarrollo horizontal de túneles clásico [14].</i>	14
<i>Figura 10. Secuencia de Construcción de un Punto de Extracción para el MB central [16].</i>	16
<i>Figura 11. Secuencia de Construcción de un Muro de Confinamiento MB central [16].</i>	17
<i>Figura 12. Secuencia de Construcción de la Carpeta de Rodado [16].</i>	18
<i>Figura 13. Metodología de resolución de Gurobi considerando un GAP [20].</i>	22
<i>Figura 14. Metodología de trabajo.</i>	25
<i>Figura 15. MB S05 NP segmentado.</i>	28
<i>Figura 16. Segmentación de la parte Oeste del NP.</i>	29
<i>Figura 17. Base de datos de labores segmentadas NP.</i>	30
<i>Figura 18. Bloques principales del programa.</i>	31
<i>Figura 19. Flujo del programa Agendamiento de Actividades.</i>	32
<i>Figura 20. Identificación frentes de trabajo en DXF.</i>	35
<i>Figura 21. Actividades del ciclo minero que sigue el programa.</i>	36
<i>Figura 22. Diagrama de flujo del programa de planificación minera.</i>	37
<i>Figura 23. Interfaz gráfica del programa de planificación minera.</i>	39
<i>Figura 24. Diagrama de flujo de metodología Alcance máximo posible.</i>	41
<i>Figura 25. Orden de construcción sector Oeste MB S05 NE.</i>	43
<i>Figura 26. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de acarreo.</i>	44
<i>Figura 27. Carta Gantt para la construcción del NH.</i>	44
<i>Figura 28. Utilización de recursos en el nivel de extracción.</i>	45
<i>Figura 29. Plan operativizado obtenido del programa mes de mayo.</i>	46
<i>Figura 30. Avance diario mes de abril.</i>	47
<i>Figura 31. Plan Diario (POD) mes de junio.</i>	47
<i>Figura 32. Nomenclatura del POD.</i>	48

<i>Figura 33. Comentarios de la IA para la simulación mes de junio.</i>	48
<i>Figura 34. DXF nivel de hundimiento con avances incluidos.</i>	49
<i>Figura 35. GLB MB S05 con los avances del mes incluidos.</i>	50
<i>Figura 36. Compilado de planes obtenidos de las metodologías de trabajo.</i>	52
<i>Figura 37. Comparativa de planes PAM Propuesto, REAL y PAM SGP.</i>	53
<i>Figura 38. Desviación de planes respecto al avance real.</i>	54
<i>Figura 39. Desviación promedio de los planes en el periodo del caso de estudio.</i>	55
<i>Figura 40. Afirmación de la localización de las frentes en el archivo DXF.</i>	63
<i>Figura 41. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Producción.</i>	65
<i>Figura 42. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Extracción.</i>	65
<i>Figura 43. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Hundimiento.</i>	66
<i>Figura 44. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Inyección.</i>	66
<i>Figura 45. Compilado general de los planes del trabajo.</i>	67

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base [21].</i>	35
<i>Tabla 2. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de marzo.</i>	42
<i>Tabla 3. Compilado de tronaduras por mes y su alcance máximo posible.</i>	50
<i>Tabla 4. PAM Propuesto para el caso de estudio.</i>	52
<i>Tabla 5. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de abril.</i>	61
<i>Tabla 6. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de mayo.</i>	62
<i>Tabla 7. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de junio.</i>	62
<i>Tabla 8. Datos obtenidos de la detección de frentes por el programa.</i>	64

NOMENCLATURA

CODELCO:	Corporación Nacional del Cobre, Chile.
GRMD:	Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.
SGP:	Superintendencia de Gestión Producción.
GEX:	Grandes Excavaciones.
LHD:	Load Haul Dump, Palas utilizadas en Mina Chuquicamata Subterránea.
NP:	Nivel de Producción.
NH:	Nivel de Hundimiento.
NI:	Nivel de Inyección.
NA:	Nivel de Acarreo.
NE:	Nivel de Extracción.
OO.CC:	Obras Civiles.
PEX:	Punto de Extracción.
MCHS:	Mina Chuquicamata Subterránea.
PMCHS:	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.
POD:	Plan Diario.
Zj:	Zanja.
PAM:	Plan de Actividades Mensual.
PAM SGP:	Plan de Actividad Mensual realizado por la Superintendencia de Gestión Producción.
MB:	Macrobloque.
GLB:	Formato 3D de visualización.
DXF:	Formato ACAD.

1. INTRODUCCIÓN

La preparación minera subterránea enfrenta el desafío de convertir el diseño en un plan ejecutable y trazable en terreno [1]. En operaciones de la escala de MCHS, la coexistencia de múltiples niveles, restricciones de seguridad y disponibilidad acotada de recursos se combina con información dispersa entre áreas [2]. Este contexto favorece brechas plan–real, ajustes reactivos y dificultades para controlar el desempeño mensual.

En el estado actual, la elaboración del Plan de actividad mensual (PAM) y su bajada a Plan operativo diario (POD) se apoya en planillas y criterios locales, con trazabilidad limitada de las decisiones y visibilidad parcial de restricciones críticas: ventanas de ventilación y tronadura, compatibilidades entre labores y traslados de equipos entre niveles [3]. Como resultado, emergen cuellos de capacidad, solapamientos y una utilización irregular de recursos que compromete la predictibilidad del corto plazo.

Desde la gestión, se requiere un mecanismo estandarizado que integre precedencias y capacidades, de modo que anticipe cargas inviables y entregue salidas homogéneas para ingeniería y operación [4]. Sin una referencia confiable para comparar la carga del mes, no se puede asegurar que el plan sea realizable [1].

En este trabajo se presenta una propuesta integrada orientada a reducir la brecha plan–real y fortalecer la trazabilidad del programa de preparación de corto plazo en MCHS (MB S04–S05). La solución articula un esquema de planificación con restricciones, una verificación dinámica por turnos y un referente superior de alcance mensual, generando salidas estandarizadas para su adopción operativa [5].

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Crear una herramienta de modelamiento matemático que optimice y operativice el plan de preparación minera en MCHS, reduciendo los tiempos de elaboración del plan mensual, semanal y diario.

1.1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una planificación integrada y completa que abarque desde la planificación estratégica de largo plazo hasta la programación operativa de corto plazo, facilitando así la gestión integral y eficiente del proceso minero.
- Obtener un plan optimizado de preparación minera para el sector Mina Sur, específicamente en los macrobloques S04 y S05, para ser comparado y posteriormente mejorado respecto del plan actualmente en ejecución.
- Proporcionar herramientas y métodos específicos para la gestión ágil y efectiva de cambios operativos que puedan surgir durante la ejecución del plan minero, asegurando una rápida adaptación frente a contingencias y variaciones del proyecto.

1.2. Alcances y limitaciones del estudio

Los alcances definidos de esta memoria se presentan a continuación:

- El modelo se construirá y validará para la Mina Subterránea, específicamente el sector Mina Sur, Macrobloques Sur 4 y 5.
- Se considerarán los siguientes niveles de la mina, estos son: Nivel de Hundimiento, Nivel de Producción, Nivel de Inyección, Nivel de Extracción y finalmente Nivel de Acarreo.
- El horizonte de trabajo es marzo a junio del 2025.
- No se considerarán la incertidumbre de programa dentro del modelo.
- Se utilizará criterio de experto, rendimientos históricos y programas de Largo Plazo para definir las capacidades

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. División Chuquicamata Subterránea

La Mina Chuquicamata Subterránea es un proyecto emblemático de la minería chilena que ha transformado la histórica mina a cielo abierto de Chuquicamata en una operación subterránea de gran envergadura [2]. Esta se localiza en la precordillera de la segunda Región de Antofagasta, en la Provincia del Loa, a 15 km al norte de la ciudad de Calama, de manera más específica, las ordenadas geográficas son las siguientes: latitud $22,31^{\circ}$ S y longitud $68,92^{\circ}$ O [6].

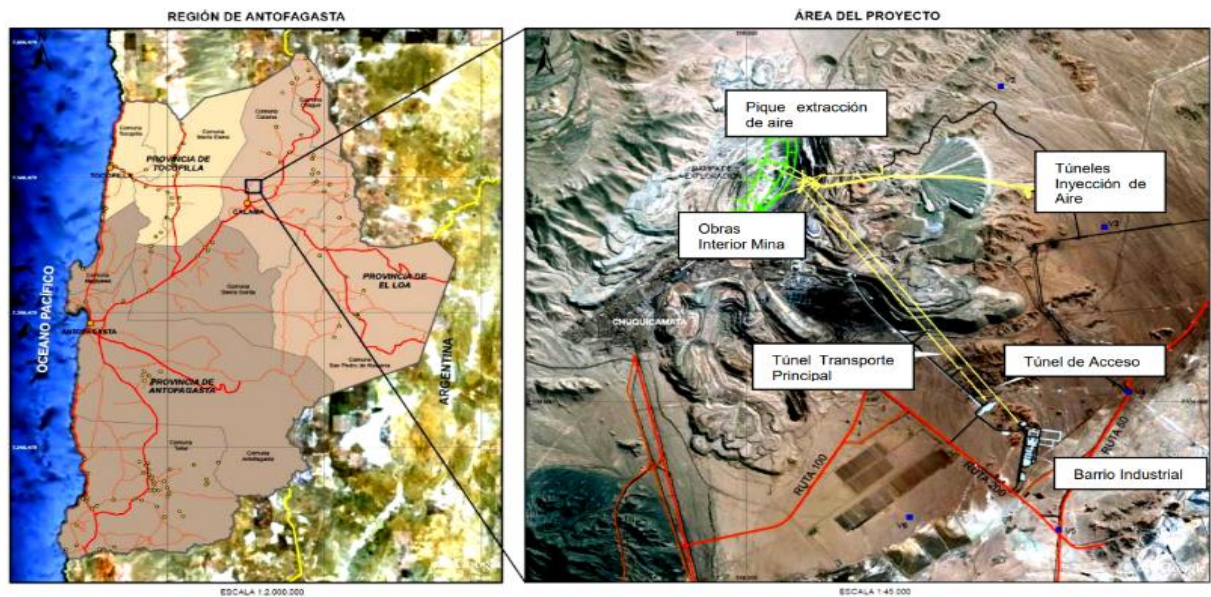


Figura 1. Ubicación geográfica de la mina Chuquicamata [7].

Con una profundidad sobre los 1100 m, un largo mayor a 4500 m y un ancho de 3000 m, Chuquicamata es uno de los rajes abiertos más grandes del mundo con más de 100 años de historia, con una distancia de 11.000 m que recorren los equipos de transporte desde el fondo del rajo hasta botaderos o planta concentradora con una razón lastre/mineral de >4 . Además, desde el año 2018, el rajo abierto está alcanzando su límite económico [7].

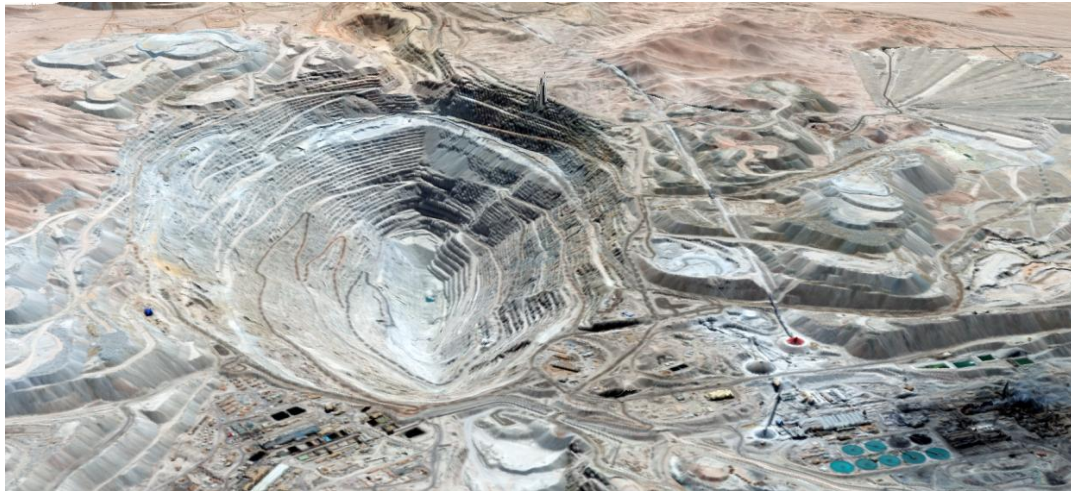


Figura 2. Vista rajo abierto mina Chuquicamata 2009 [7].

Después de más de un siglo de explotación a cielo abierto, Chuquicamata enfrentó desafíos relacionados con la profundidad creciente del rajo y los costos asociados a la extracción superficial. Para abordar estos desafíos, se decidió la transición a una operación subterránea utilizando el método de block caving macrobloques como se puede ver en la Figura 3.

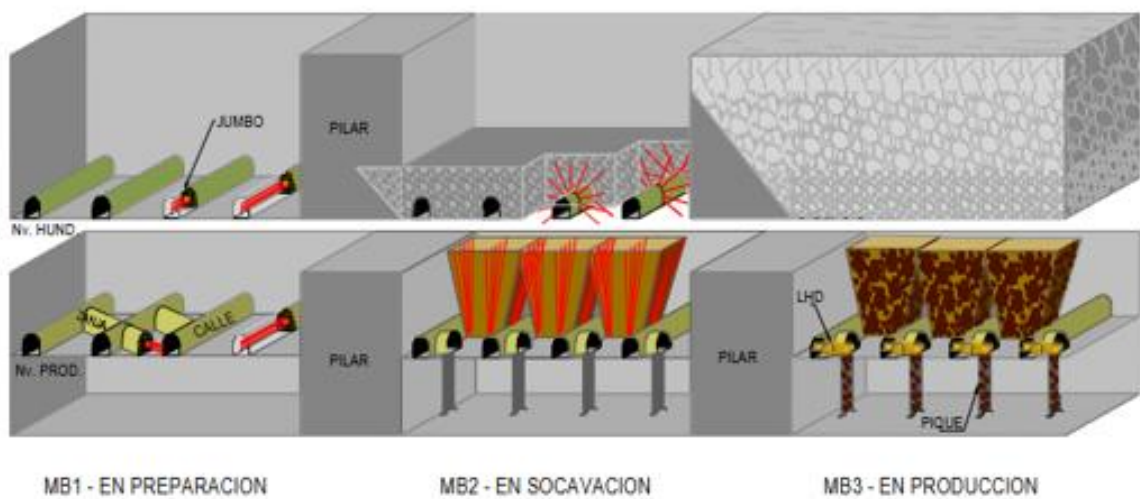


Figura 3. Explotación en configuración Macrobloques [8].

2.2. Transición de Chuquicamata rajo a minería subterránea

Bajo el escenario del punto anterior, la explotación masiva por hundimiento (block caving) permite recuperar el yacimiento a gran profundidad con menores costos unitarios, mayor continuidad de flujo y mejor control de riesgos, justificando la adopción del esquema subterráneo en MCHS.

Esta transición implica enfrentar múltiples retos técnicos y logísticos, como la incorporación de tecnologías avanzadas para la excavación segura y efectiva de túneles y para la extracción del mineral. Una planificación meticulosa y el desarrollo de infraestructura subterránea confiable son esenciales para mantener la seguridad de los trabajadores y asegurar la continuidad operativa del proyecto [9].

Las Figuras 4 y 5 que acompañan esta descripción ofrecen una visión detallada de la mina Chuquicamata, destacando tanto la topografía del rajo abierto en sus etapas finales, como también el primer nivel subterráneo de MCHS. Estas figuras permiten entender claramente las dimensiones involucradas en el proyecto y los desafíos ingenieriles a los que se enfrenta. La considerable diferencia de altura, con la roca original elevándose aproximadamente 300 metros sobre el primer nivel subterráneo y una extensión longitudinal cercana a los 900 metros, evidencia la gran escala del proyecto y la complejidad operativa asociada. En definitiva, estas representaciones visuales son herramientas fundamentales para comprender la magnitud y los desafíos técnicos inherentes a la operación minera de Chuquicamata.

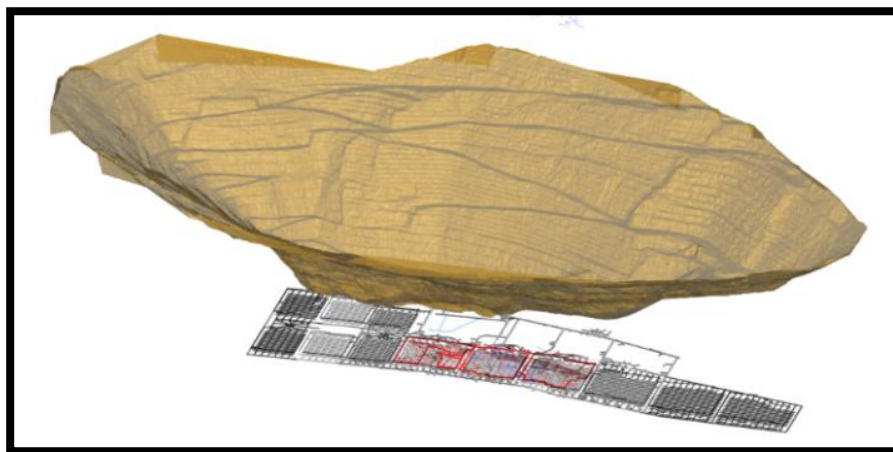


Figura 4. Vista isométrica rajo y nivel de producción subterránea [7].



Figura 5. Vista planta proyección del rajo con el nivel productivo de mina subterránea [7].

2.2.1. Método de explotación Chuquicamata

El método de explotación seleccionado para el PMCHS corresponde a Block Caving en una Variante de Macrobloques (MB's), lo que fue definido en el Estudio de Prefactibilidad del Proyecto; y durante los Estudios de Ingeniería de Valor de Estudio de Factibilidad del PMCHS, se complementó la definición con un trade off de riesgo entre el método de explotación Block Caving variante MB's y Panel Caving. Los resultados ratificaron la variante MB's mostrando ventajas económicas y de riesgos tanto en diseño base, como en aquellos con planes de mitigación de riesgos. En la Figura 6 se muestra el funcionamiento conceptual de los MB's.

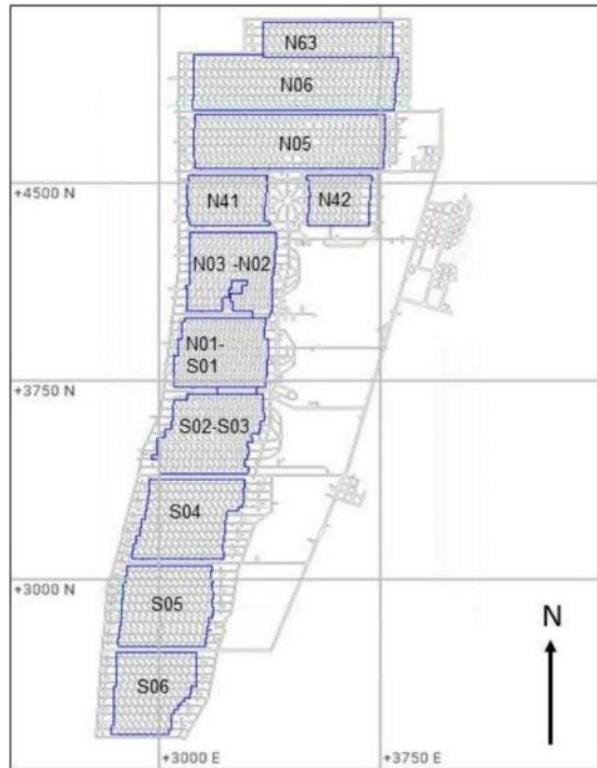


Figura 6. Footprint de MCHS (nivel de producción) con identificación de macrobloques, 2024 [3].

2.3. Diseño Mina Chuquicamata

La Mina Chuquicamata Subterránea (MCHS) está estructurada en distintos subniveles que soportan el proceso de explotación por hundimiento. Cada subnivel tiene un propósito definido: hundimiento, producción, acarreo, chancado, ventilación o transporte intermedio, los cuales están interconectados mediante galerías y sistemas de infraestructura auxiliar. Esta configuración permite gestionar los flujos de mineral y aire de manera controlada, manteniendo la continuidad de la operación. El diseño adoptado considera parámetros geotécnicos, logísticos y de seguridad que permiten la operación en gran escala bajo condiciones controladas.

2.3.1. Nivel de hundimiento

Este nivel se ubica justo encima del nivel de producción y es donde se realizan importantes operaciones como la perforación y tronadura en 29 paradas radiales. Estas paradas, que incluyen perforaciones específicas conocidas como tiros negativos, permiten la conexión con el nivel de producción a través de estructuras llamadas bateas.

2.3.2. Nivel de producción

El nivel de producción es esencial en la operación subterránea, ya que alberga galerías principales que cumplen un propósito: Facilitan la extracción y transporte del mineral. Aquí se encuentran los puntos de extracción (PEX), donde operan los equipos de carga LHD (Load-Haul-Dump), encargados de recoger el mineral para llevarlo hasta las correas transportadoras que lo trasladan hacia la superficie o las plantas de procesamiento.

Optimizar este nivel es crucial debido a su impacto directo en la eficiencia operativa y en la seguridad del personal. Una correcta gestión puede reducir tiempos, aumentar la producción y mejorar significativamente la seguridad global de la operación. Mantener estable este nivel es fundamental para asegurar una extracción continua y alcanzar los objetivos económicos esperados.

2.3.3. Nivel de acarreo:

El Nivel de Acarreo constituye el corredor logístico para mover mineral y estéril desde los frentes hacia los puntos de chancado/traspaso o piques. Su función principal es descongestionar los niveles productivos, asegurar continuidad de flujo y segregación de rutas para equipos y personas.

2.3.4. Subnivel de chancado:

Este sector alberga el chancado primario, conocido como Gran Excavación (GEX). En este punto se reduce el tamaño del mineral extraído para su traslado al sistema de traspaso y procesamiento. Las salas de chancado presentan diámetros superiores a 15 m, lo que permite instalar la infraestructura y los equipos requeridos para operar a gran escala.

2.3.5. Subnivel inyección y extracción de aire:

Estos subniveles forman parte vital del sistema de ventilación subterráneo. El subnivel de inyección aporta aire fresco al interior de la mina, asegurando condiciones respiratorias seguras, diluyendo gases nocivos y regulando la temperatura ambiente. Por su parte, el subnivel de extracción retira el aire contaminado que contiene gases peligrosos y partículas en suspensión, manteniendo un entorno laboral seguro y saludable.

2.3.6. Subnivel de transporte intermedio:

En este nivel, el mineral ya chancado se colecta desde cada macrobloque activo y se conduce, mediante correas y estaciones de transferencia, hasta los silos subterráneos de acopio del nivel.

La Figura 7 muestra una visión clara y detallada de la disposición de cada uno de estos niveles y subniveles junto a su ubicación en distintas cotas dentro de la mina.

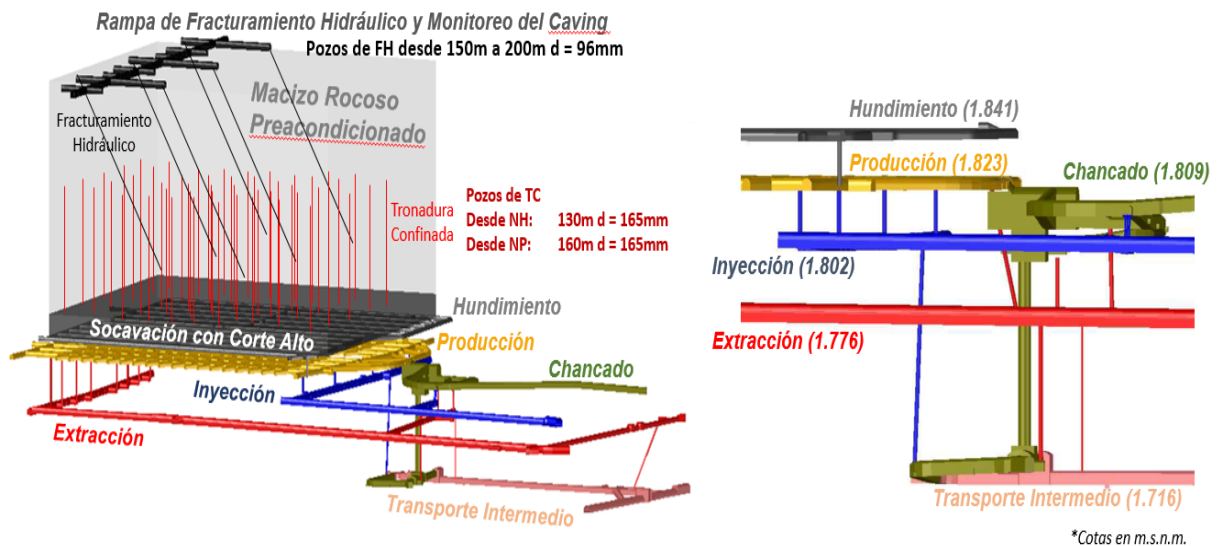


Figura 7. Diseño minero para la unidad básica de explotación PMCHS [10].

Además de los niveles recién mencionados, pueden existir otros según sean las necesidades propias de cada operación. Por ejemplo, un Nivel de Preacondicionamiento en donde se centren estas actividades de preparación, o un Nivel de Drenaje que permita el mejor manejo de las aguas dentro de la mina. La Figura 8 muestra un ejemplo de una mina de Block Caving, la distribución de los niveles en sus diferentes cotas y los elementos que conectan dichos niveles.

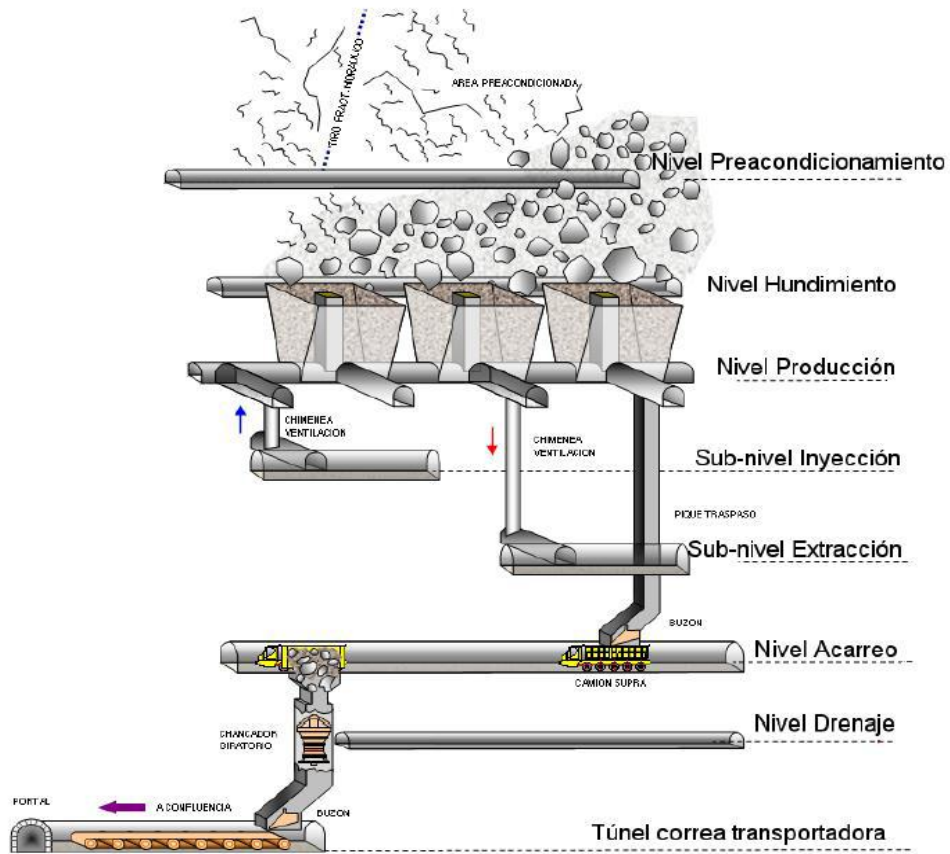


Figura 8. Esquema de distribución de niveles dentro de un Panel Caving [11].

2.4. Preparación Minera

Según [12], la preparación minera comprende el conjunto de actividades gestionadas para desarrollar las labores y construir la infraestructura necesaria en una mina subterránea, dentro de un área definida por el Programa de Preparación. Estas actividades son esenciales para garantizar que se cuenten con los espacios y estructuras requeridas por el Plan Minero de producción. El concepto abarca todas las fases involucradas en un proyecto, incluyendo sus alcances, cronogramas, costos asociados y optimización de los recursos disponibles.

Desde el punto de vista operativo, la preparación minera forma parte de la Fase de Construcción Minera, la cual se lleva a cabo en todos los niveles o sectores necesarios para iniciar y ampliar las operaciones. En esta fase, las actividades mineras son continuas y secuenciales, lo que hace que su ejecución oportuna sea crítica, ya que cualquier retraso podría afectar significativamente los tiempos de entrega y la puesta en marcha del proyecto.

El método de explotación elegido determina las restricciones específicas asociadas a la preparación minera. En el caso del método Block Caving, a diferencia del Panel Caving, la fase de producción no puede comenzar sin que todas las labores hayan sido completamente desarrolladas, incrementando así las interferencias y restricciones que deben gestionarse adecuadamente [13]. Asimismo, es fundamental disponer oportunamente de toda la infraestructura y los servicios necesarios para alcanzar los rendimientos esperados y cumplir con la ruta crítica definida. En ciertos proyectos, esto implica la construcción temporal de infraestructuras denominadas facilidades constructivas, destinadas a brindar servicios básicos y adecuados durante la fase de construcción [14].

Dentro del proceso general de preparación minera, existen principalmente tres tipos de actividades que se realizan en gran escala para lograr la adecuada infraestructura y área excavada requerida para la producción: excavaciones mineras, obras civiles (OO.CC) y montaje de infraestructura [12].

2.4.1. Excavaciones mineras

Las excavaciones mineras comprenden tanto los desarrollos horizontales como verticales que deben ejecutarse en los distintos niveles o sectores de la mina, junto con las labores complementarias asociadas, como el saneamiento, la fortificación y la estabilización de las áreas [12]. Es importante señalar que, según la ubicación o etapa del desarrollo, la fortificación implementada puede ser de carácter temporal [15], ya que su propósito principal es garantizar condiciones seguras para los trabajadores mientras se llevan a cabo las fases del ciclo de excavación.

2.4.1.1. Desarrollos Horizontales

En términos técnicos, los desarrollos horizontales en MCHS corresponden a excavaciones de roca realizadas mediante la técnica de perforación y tronadura [16]. Este método es ampliamente aceptado en minería subterránea gracias a su eficacia y adecuación a las condiciones del entorno. El ciclo comienza con la perforación usando equipos mecanizados tipo Jumbo. Luego se efectúa la tronadura y la ventilación de la frente para eliminar gases y polvo. A continuación, un equipo LHD transporta el material extraído hacia puntos de acopio o puntos de vaciado (PVAC) según el nivel. Desde allí se efectúa el carguío a camión (cuando corresponde) para su traslado a chancado/traspaso. La acuñadura de la frente se realiza manualmente desde un elevador hidráulico o con equipos acuñadores, reduciendo así el riesgo de caída de rocas para los trabajadores. Finalmente, la fortificación de la galería se ejecuta instalando pernos, malla metálica y shotcrete, según el grado de soporte requerido, cerrando de este modo el ciclo de desarrollo [17]. Las etapas del ciclo se enumeran a continuación:

1) Perforación de tiros de avance: Se utiliza un Jumbo frontal de dos brazos con perforación computarizada para realizar los tiros donde se colocarán los explosivos, siguiendo la ubicación marcada previamente con pintura según el diseño del diagrama de disparo.

2) Carguío de explosivos: La carga de explosivos en los barrenos perforados por el Jumbo la realiza personal calificado y certificado, siguiendo preferentemente el diseño establecido en el diagrama de disparo, aunque en la práctica a veces se ajusta según la experiencia del operador.

3) Tronadura: Antes de la tronadura, se delimita un área de seguridad de al menos 200 metros y se bloquean todos los accesos cercanos, incluidos los destinados a la ventilación de los gases generados.

4) Ventilación de la frente tronada: Después de la tronadura, se debe ventilar la frente hasta que los gases tóxicos disminuyan a niveles seguros (40 ppm CO, 1,6 ppm SO₂ y 25 ppm NO₂, según la normativa chilena, Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería, artículos 223-226). Una vez verificado esto, se retiran las barreras de acceso para continuar con las labores.

5) Regado de marina: Se aplica agua a la roca tronada para minimizar la liberación de gases y evitar la contaminación de los piques, controlando además la concentración de gases durante la remoción.

6) Extracción de marina: El mineral es extraído de la frente mediante equipos LHD, y luego es llevado a puntos de vaciado o camiones dumper que son encargados de llevar el material a botadero o puntos de vaciado (PVAC).

7) Acuñadura: Utilizando un acuñador mecanizado se golpea las paredes de la frente y roca caja con el fin de limpiar de posibles caídas de roca de menor escala que hayan quedado sueltas post tronadura.

8) Perforación de pernos: Una vez acuñado se retira el material sobrante y se procede a realizar perforaciones de fortificación en las cajas y corona de la galería. Para esta función se utiliza el jumbo de fortificación.

9) Fortificación primaria con pernos: Una vez terminadas las perforaciones en la roca de caja y techo se procede a preparar la lechada para la colocación de pernos helicoidales. Esta es una mezcla de cemento, agua y aditivos que hace la acción de fijar el perno que se ingresa en el orificio de la

perforación. Seguido se le ingresa una planchuela para fijar el perno a la roca. Esta acción la hace una cuadrilla compuesta de mineros y una grúa.

10) Fortificación secundaria con malla: Una vez que los pernos helicoidales están correctamente fijados y la lechada ha fraguado, se procede a instalar una malla metálica tipo gallinero sobre la superficie de la excavación. Esta malla refuerza la estabilidad del macizo rocoso, ya que ayuda a contener fragmentos sueltos. Para asegurarla, se retiran temporalmente las planchuelas, se extiende la malla y luego se vuelven a colocar las planchuelas presionándola firmemente contra la roca, garantizando su correcta sujeción y adherencia.

11) Sujeción de malla con tacos: Antes de aplicar el shotcrete, se debe asegurar que la malla esté bien adherida a la roca. Para lograrlo, se perforan puntos específicos con un taladro percutor y se instalan tacos con ojete, en un proceso conocido como “hilteo de malla”, que refuerza la sujeción de la malla y mejora la calidad del soporte.

12) Proyección de shotcrete: La etapa final de la fortificación y del ciclo de avance consiste en la aplicación de shotcrete, para lo cual se utiliza un mixer que transporta continuamente la mezcla desde la planta hasta la frente de trabajo. Esta mezcla se proyecta mediante un equipo Robotshot en capas sucesivas de 3 a 4 cm, cubriendo paredes y techo de forma ascendente y progresiva. El brazo del equipo gira en círculos y se mantiene perpendicular a la superficie para asegurar una cobertura pareja y evitar desprendimientos o rechazo del material. Gracias a los aditivos, el shotcrete fragua rápidamente, permitiendo aplicar una segunda capa cuando la primera comience a endurecer, logrando así una protección estructural uniforme.

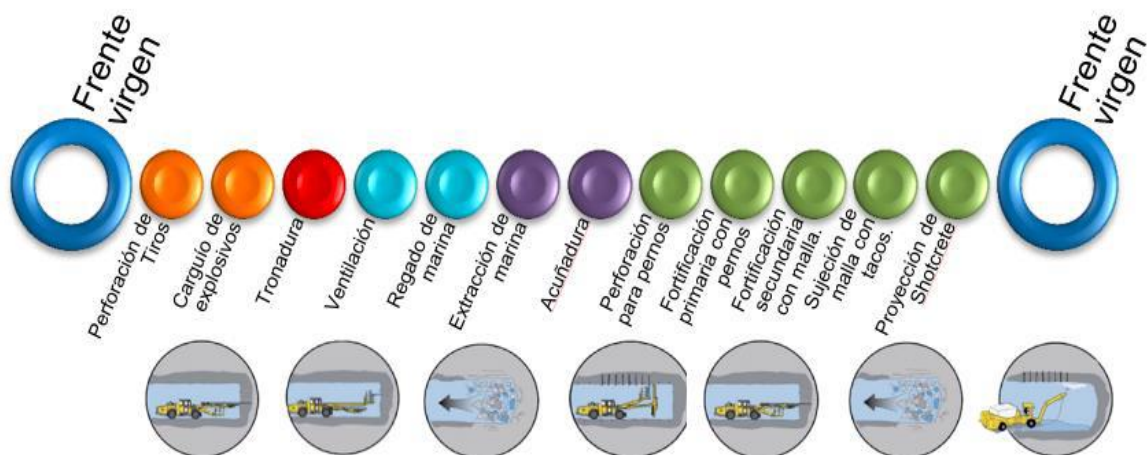


Figura 9. Ciclo minero para desarrollo horizontal de túneles clásico [17].

2.4.1.2. Desarrollos Verticales

En la Mina Chuquicamata Subterránea (MCHS), los desarrollos verticales se ejecutan mediante dos sistemas principales, seleccionados según ubicación y diámetro de perforación:

1) Raise Borer: Este método consiste en perforar un tiro piloto descendente con una máquina electrohidráulica (motor eléctrico de 150 a 500 HP, según diámetro y longitud), y luego ampliar la chimenea hacia arriba usando un escariador que corta por secciones. Requiere dos superficies de trabajo (superior e inferior), un sistema de piscinas para decantar detritus y recircular agua, y eventualmente cementar tramos inestables para garantizar la estabilidad del tiro. Los rendimientos dependen de la calidad del macizo rocoso: se estima un avance de 10 a 12 metros diarios para tiros piloto de 13 3/4" y de 4 a 6 metros por día para escariados de hasta 6 metros de diámetro.

2) Blind Hole: El método utiliza una máquina electrohidráulica instalada en el nivel inferior para perforar chimeneas en forma ascendente. El proceso se basa en abrir un tiro guía adelantado unos 60 cm al escariador, que excava la sección completa mientras el material cae por gravedad a un colector, minimizando riesgos. El equipo MD-150, común en MCHS, opera con motor eléctrico de 150 HP y barras estabilizadas que se agregan para alcanzar alturas de hasta 100 metros. Los equipos disponibles permiten diámetros de chimenea entre 0,7 y 2,0 metros.

2.4.2. Obras civiles

Las obras civiles en minería se centran en la ejecución de estructuras de hormigón, ya sea armado o simple. Entre las construcciones más relevantes se encuentran los puntos de extracción, los muros de confinamiento y las carpetas de rodado, junto con otras obras complementarias [12]. En los Macrobloques N01 y S01 de MCHS, destacan como obras civiles más representativas las siguientes [4]:

2.4.2.1. Marcos y vigas de los puntos de extracción.

Este diseño fue ejecutado en el macrobloque Central y el tramo descrito forma parte de la planificación de corto plazo del Área de Preparación Minera.

La construcción del punto de extracción inicia con la fortificación de la visera, lo que implica en primer lugar la instalación de cables específicos que refuerzan esta zona. Para completar adecuadamente esta etapa, es necesario que la zanja correspondiente esté previamente conectada.

Durante el proceso constructivo, se utiliza un jumbo de un solo brazo, equipado con una mordaza hidráulica especial que permite sujetar las barras durante los cambios de éstas. Además, para instalar los cables en la visera se emplea un manipulador telescópico que cuenta con una plataforma de trabajo, junto a una lechadora de funcionamiento eléctrico para inyectar lechada. Posteriormente, estos cables se tensan mediante un equipo hidráulico especializado. Una vez finalizada esta etapa con cables, se instalan los pernos de anclaje para sostener la armadura estructural [12].

Concluida la etapa de fortificación mediante pernos, se continúa con el montaje de la armadura metálica. Esta armadura se fija directamente a la roca mediante pernos para asegurar la estabilidad necesaria previa al hormigonado. Posteriormente, se instala el moldaje, preparando la estructura para la colocación del hormigón, lo que garantiza que no queden espacios vacíos. Para esta tarea, se utiliza una bomba eléctrica de hormigón que impulsa el material hacia el interior del molde [12].

El proceso completo de construcción de un punto de extracción tiene una duración aproximada de 5 a 7 días. En la Figura 10 se muestra un esquema claro de la secuencia constructiva descrita.

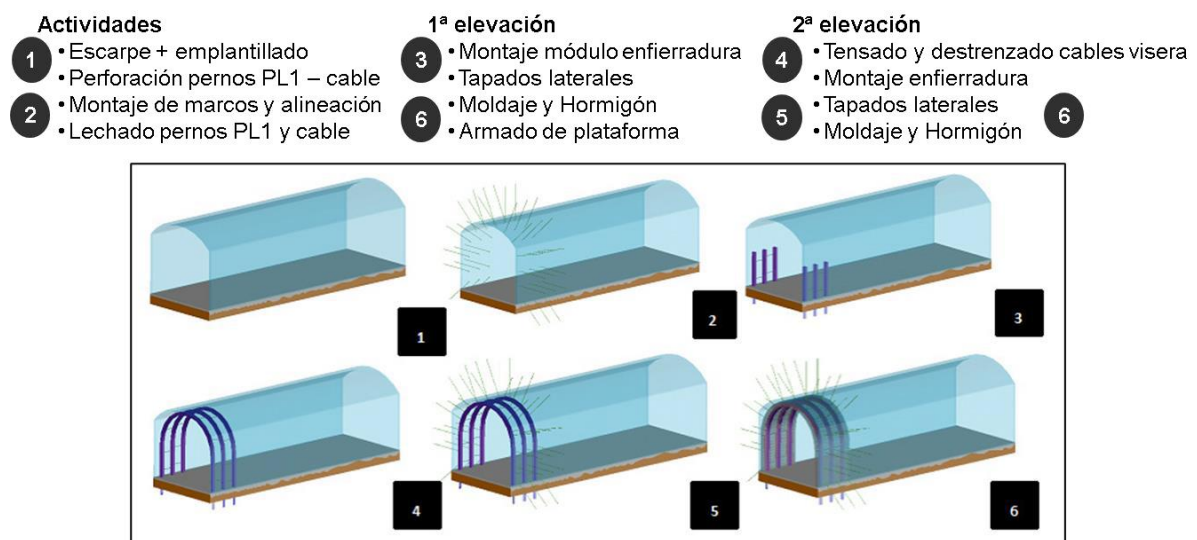


Figura 10. Secuencia de Construcción de un Punto de Extracción para el MB central [1].

2.4.2.2. Muros de confinamiento de pilares.

Estas obras constituyen la fortificación definitiva en las paredes de las galerías del nivel de producción. Su estructura desempeña principalmente dos funciones: primero, soportar la

redistribución de esfuerzos generados por el hundimiento del material desde el nivel superior; y segundo, asegurar una geometría precisa de las galerías, facilitando así la operación segura y eficiente del equipo, especialmente de las palas cargadoras manejadas por los operadores [12].

La construcción comienza con un levantamiento topográfico exhaustivo en la zona donde se levantarán los muros, con el fin de determinar si es necesario realizar trabajos adicionales de desquinche. Una vez terminado este estudio y ejecutados los desquinces que sean requeridos, se continúa con la perforación para instalar los cables y los pernos de anclaje que sostendrán la armadura. Posteriormente, se procede a instalar los cables y los pernos mencionados, seguida de la colocación de la armadura junto con el moldaje en toda la superficie del muro [12].

Finalmente, al igual que con los puntos de extracción, el hormigón es vertido mediante una bomba especializada y compactado mediante vibradores eléctricos de inmersión. Todo el proceso constructivo toma aproximadamente entre 7 y 9 días (ver Figura 11).

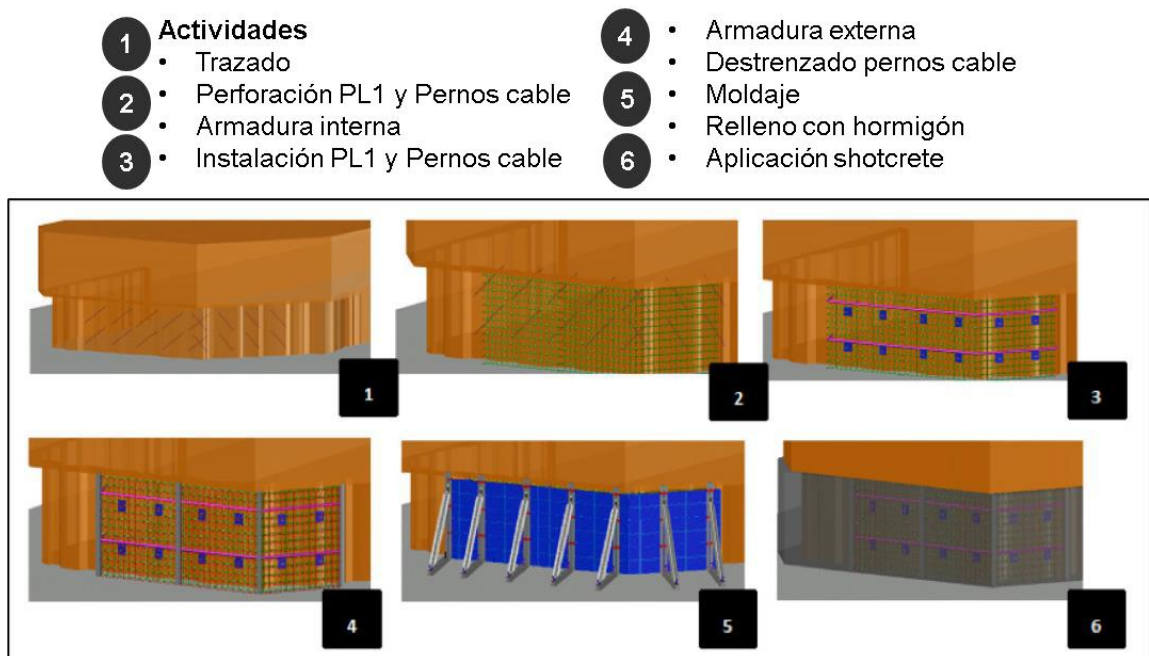


Figura 11. Secuencia de Construcción de un Muro de Confinamiento MB central [1].

2.4.2.3. Pavimentación de las vías de rodado.

El objetivo principal de estas obras es mejorar la calidad del piso para minimizar el desgaste de los neumáticos y aumentar la velocidad de circulación de los equipos en las galerías. Esto es fundamental tanto en el nivel de transporte como en el nivel de producción, ya que reduce tiempos de ciclo, consumo y detenciones por mantenimiento.

El proceso comienza con un levantamiento topográfico detallado, seguido por trabajos de escarpe y limpieza profunda del piso hasta llegar a la roca base, realizando posteriormente un soplado y lavado exhaustivo. Una vez preparada la superficie, se ejecuta el relleno con hormigón (emplantillado). De acuerdo con el diseño vigente, a continuación, se habilitan los PEX, se construyen los muros de confinamiento y, posteriormente, se instala la carpeta final, manteniendo las pendientes y especificaciones del proyecto.

El hormigón de la carpeta final se coloca en secciones alternadas de aproximadamente tres metros de longitud, compactándose cuidadosamente mediante vibradores de inmersión para asegurar la calidad y uniformidad del acabado. Luego de un período de fraguado de alrededor de 24 horas, se ejecuta un corte longitudinal con el fin de evitar la aparición de fisuras en la superficie terminada [12]. El procedimiento detallado puede observarse claramente en la Figura 12.



Figura 12. Secuencia de Construcción de la Carpeta de Rodado [1].

2.5. Planificación de la Preparación Minera

Así como en un proyecto minero se elaboran planes de producción, es igualmente necesario definir planes de preparación minera que respalden y garanticen dicha producción. En la División Chuquicamata, se desarrollan planes de preparación minera a distintos plazos: largo, mediano y corto, con el objetivo de cumplir con las metas productivas de los proyectos en operación o próximos a ejecutarse. A continuación, se describen los principales tipos de planes vinculados a la preparación minera.

2.5.1. Tipos de planes

- Plan de Negocio y Desarrollo (PND): Es un plan de largo plazo desarrollado por la división con un foco a un año, y respecto a la preparación minera, proporciona estimaciones generales sobre la magnitud de las obras necesarias para asegurar el cumplimiento de los planes de producción.

- 0 + 12: Se hace una proyección del plan de trabajo mensual con rendimientos históricos para el año completo.

3 + 9: Se utilizan los planes de trabajo y cierre de mes de los tres meses anteriores a la creación del plan y se proyectan los siguientes nueve meses en adelante según los rendimientos de los planes seleccionados.

- 6 + 6: Se utilizan los planes de trabajo y cierre de mes de los seis meses anteriores a la creación del plan y se proyectan los siguientes seis meses en adelante según los rendimientos de los planes seleccionados.

- Plan Actividades Mensual (PAM): Se realiza mes a mes buscando cumplir hitos propuestos en los planes anteriores. Para realizar el PAM, se deben tener en consideración la perforación real, el rendimiento histórico de los equipos, cantidad de equipos y la propuesta de crecimiento del mes siguiente. En función de lo anteriormente mencionado, se puede generar un plan que contemple el nivel de producción y también de hundimiento, dependiendo de la cantidad de perforación necesaria para poder cumplir el PAM de crecimiento o alcanzar el rendimiento eficiente de los equipos si el crecimiento es menor o inexistente.

- Plan Semanal: Es un vector de trabajo de lo que se estima hacer durante la semana para alcanzar a realizar el PAM.
- Plan Diario (POD): Plan de trabajo diario. Se realiza turno a turno y es muy cambiante dependiendo del estado de las operaciones en interior mina.

2.6. Optimización en la Planificación Minera

La optimización de la planificación minera se ha desarrollado con éxito y es ampliamente aplicada en la minería a cielo abierto, principalmente porque en este tipo de operación la orientación del avance es única: se extiende de forma descendente y hacia fuera de los límites del rajo. En contraste, la planificación en minería subterránea presenta una complejidad mucho mayor, dado que durante la vida útil de la mina pueden existir múltiples direcciones de expansión, determinadas en gran parte por el método de explotación elegido [5]. A esto se suma que cada mina subterránea posee un diseño singular y sus operaciones se ajustan a las particularidades de cada yacimiento, lo que dificulta el desarrollo de algoritmos de optimización universales [18].

Esta misma complejidad implica que, en muchas ocasiones, los algoritmos de resolución no sean aplicables o no logren resolver eficazmente los problemas de optimización planteados, por lo que se recurre a enfoques heurísticos. Si bien tanto un algoritmo de optimización como una heurística se basan en procedimientos iterativos definidos paso a paso que comparan soluciones sucesivas hasta alcanzar la convergencia, la diferencia esencial radica en que el algoritmo de optimización busca la mejor solución posible, mientras que la heurística busca un equilibrio práctico entre la calidad de la solución y el tiempo de cálculo requerido.

2.7. Gurobi Optimizer

Gurobi es un tipo especial de software llamado "solucionador". Sin embargo, Gurobi no tiene una interfaz gráfica como las aplicaciones habituales para el consumidor. Se interactúa con él mediante lenguajes de programación como Python, AIMMS y R, por lo que es necesario saber programar. Y también se necesita saber cómo crear un modelo matemático [19].

Gurobi es un solucionador de optimización de última generación que se especializa en la resolución de modelos de programación lineal (LP), cuadrática (QP) y entera-mixta (MILP y MIQP). Este

software fue desarrollado desde su base para aprovechar eficientemente los procesadores multi-núcleo modernos, y se encuentra disponible sin costo para fines académicos.

Para resolver modelos LP y QP, Gurobi emplea versiones altamente optimizadas del método símplex (en sus variantes primal y dual), entre otros algoritmos. En el caso de los modelos MILP, integra técnicas avanzadas como planos de corte (cutting planes) y heurísticas robustas que permiten acelerar el proceso de búsqueda de soluciones. Además, todos los modelos se benefician de procesos de presolve avanzados que reducen la complejidad del modelo antes de su resolución, identificando posibles soluciones o simplificaciones anticipadamente.

Un concepto clave en la evaluación de los resultados generados por Gurobi es el llamado GAP de optimización, el cual representa un porcentaje de tolerancia con respecto al valor óptimo. Este indicador sirve para validar la calidad de la solución obtenida: a menor GAP, mayor precisión. En la Figura 13, se representa gráficamente el comportamiento del valor objetivo a lo largo del tiempo de ejecución. En estos modelos lineales, el problema se transforma en un conjunto de ecuaciones lineales que se resuelven mediante iteraciones matriciales. En este proceso, la curva verde muestra cómo se incrementa el valor objetivo desde cero a medida que el algoritmo mejora la solución, mientras que la curva roja representa una cota superior que disminuye con el tiempo, acercándose a la curva verde sin llegar a superarla. La optimización se detiene cuando la diferencia entre ambas curvas (es decir, el GAP) cae por debajo del umbral definido por el usuario.

El uso de un GAP como criterio de parada es común en algoritmos de optimización, ya que perseguir una solución completamente exacta podría demandar tiempos de cómputo excesivos, sin una mejora significativa en el resultado práctico. En el contexto del presente estudio, se busca maximizar una función de beneficio basada en parámetros técnico-económicos, considerando un GAP específico como criterio de precisión, lo cual será detallado más adelante en el caso de estudio.

Otros modelos de decisión, como las reglas de decisión o las heurísticas, pueden resultar en decisiones subóptimas porque exploran solo un pequeño porcentaje de las posibles soluciones. Gurobi, en cambio, puede proporcionar una optimalidad demostrable. Y para una empresa, la diferencia entre decisiones "subóptimas" y "óptimas" puede representar millones en ingresos.

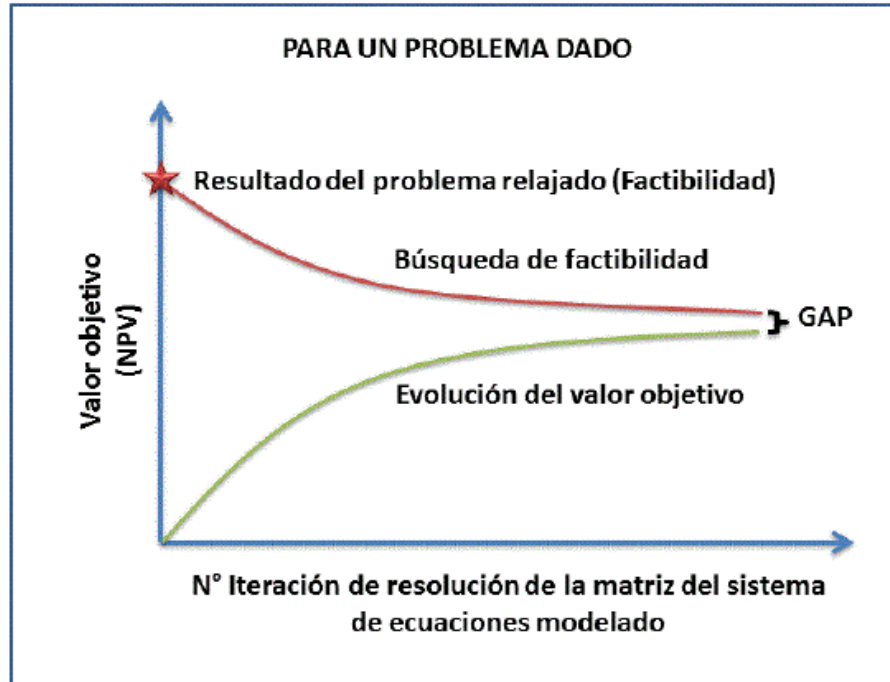


Figura 13. Metodología de resolución de Gurobi considerando un GAP [20].

2.7.1. Programación Lineal

La programación lineal es una rama de la programación matemática orientada a optimizar una función objetivo de carácter lineal, bajo un conjunto de restricciones también lineales que definen el espacio factible del problema. Estas restricciones se expresan como un sistema de ecuaciones o inecuaciones, y las variables involucradas deben asumir valores reales no negativos.

En caso de requerirse que dichas variables tomen solo valores enteros, el problema se transforma en un caso de programación entera. Los primeros modelos aplicados a la planificación minera utilizaron programación lineal como base, con el objetivo principal de maximizar el valor presente neto (VPN) o flujo de caja descontado, considerando una tasa de interés determinada. Esta técnica permite agendar la secuencia de extracción futura de sectores del pit final, respetando las restricciones estructurales, operativas y económicas planteadas [21].

2.7.2. Programación Entera-Mixta

La programación entera-mixta (PEM) abarca aquellos problemas de optimización en los que algunas variables de decisión deben ser enteras o binarias, mientras que otras pueden ser continuas. Este tipo de modelamiento representa una combinación entre distintas categorías de variables, permitiendo

representar sistemas más complejos y realistas. Un caso típico de PEM es aquel donde se mezcla la asignación de decisiones discretas (como si una actividad se ejecuta o no) con variables continuas asociadas a magnitudes como tiempos, costos o recursos. Este enfoque mixto permite una mayor flexibilidad para modelar problemas reales, especialmente en contextos industriales como la planificación minera.

Para la construcción del modelo se toma en cuenta trabajos relacionados con este formato de agendamiento [22]:

2.7.3. Actividades

En el modelo de optimización aplicado a la preparación minera de MCHS, las actividades corresponden a las labores constructivas y de desarrollo incluidas en el layout (rampas, galerías, zanjas, cabeceras, entre otras). Cada actividad se define como una unidad independiente en la base de datos, lo que permite asignarle parámetros como longitud, nivel de avance requerido y capacidad disponible por periodo. Esto facilita que el algoritmo de Gurobi secuencie de manera coherente el orden de ejecución en función de los recursos y la ruta crítica del plan.

2.7.4. Precedencias

Las precedencias en el modelo representan las dependencias constructivas entre labores. Por ejemplo, una cabecera debe estar terminada antes de iniciar las galerías asociadas, o bien, una rampa de acceso debe completarse antes de habilitar las labores de ventilación en ese sector. Estas relaciones se modelan mediante restricciones lineales que aseguran que el programa respete la lógica de construcción propia de la mina y evite solapamientos inviables en terreno.

2.7.5. Restricciones

Las restricciones implementadas responden a condiciones técnicas y operativas específicas del sector Mina Sur (MB S04 y S05). Entre las principales:

- Capacidad por periodo: limita el metraje de avance mensual, en función del rendimiento histórico de equipos y dotaciones.
- Recursos críticos: controla la asignación de equipos Jumbo, cuadrillas y mixers, evitando sobreutilización.
- Secuencia operativa: obliga a que ciertas labores de preparación (ej. zanjas de extracción) estén finalizadas antes de ejecutar obras civiles asociadas (PEX, muros de confinamiento).

- Incompatibilidades: impide la ejecución simultánea de actividades en un mismo frente cuando comparten recurso o generan interferencias (ej. tronadura y fortificación en la misma zona).
- Ventanas temporales: permiten definir periodos específicos en los que se deben iniciar determinadas labores críticas, de acuerdo con el Plan de Largo Plazo.

2.8. Utilización de MonteCarlo

Es una simulación de probabilidad múltiple que permite estimar posibles resultados de un evento incierto. En términos simples consiste en la generación de números aleatorios de diferentes variables regidas por alguna distribución de probabilidad un número determinado de veces. Las variables utilizadas deben tener una incertidumbre inherente y su distribución está definida por datos históricos o criterio experto. Cada escenario aleatorio de las variables produce un resultado posible y a medida que se hagan más iteraciones del evento incierto, los resultados obtenidos tenderán a comportarse como una distribución normal según el teorema del límite central [23].

3. DESARROLLO

Este capítulo cuenta con tres etapas y cada una representa una metodología de trabajo, estas tienen una relación en conjunta y su orden está dado de la siguiente manera:

- La primera, es una etapa de agendamiento de actividades de largo plazo que está relacionada a programación con recursos limitados (RCPS).
- La segunda etapa, es de un programa de simulación que operativiza el plan de la etapa anterior y mediante programación entrega datos de salida útiles para el trabajo diario en el área de preparación minera.
- La tercera etapa consta de un agregado en el programa de simulación que tiene relación con el número de tronaduras realizadas para con eso proyectar el máximo avance posible.



Figura 14. Metodología de trabajo.

Como muestra la Figura 14, el proceso de planificación y optimización se debe realizar en orden de etapas, es decir, la primera etapa es ejecutada y posterior entrega un plan de trabajo, anual y mensual, luego este plan es ocupado por la segunda etapa, la cual detalla de manera más precisa y hace entrega de un plan de trabajo operativizado. Finalmente, la tercera etapa es obtenida por consecuencia de la segunda etapa.

3.1. Agendamiento de actividades (RCPSP)

El problema de agendamiento de actividades con recursos limitados (RCPSP) se formula como un modelo de optimización cuyo objetivo es secuenciar labores sujetas a restricciones de precedencia y disponibilidad de recursos. En el contexto de la preparación minera de MCHS, cada actividad corresponde a una labor de desarrollo (galerías, rampas, cabeceras, zanjas, etc.) incluida en el layout de los macrobloques S04 y S05.

Variables de decisión

$$x_{a,t} = 1 \quad (1)$$

Si la actividad α comienza en el periodo t ; 0 en caso contrario.

Función objetivo

El modelo busca minimizar el tiempo total de finalización del plan de preparación, equivalente a completar todas las labores de desarrollo en el menor horizonte posible:

$$\min \sum_{t \in T} t \cdot x_{sink,t} \quad (2)$$

Donde *sink* es una actividad ficticia que representa el término del proyecto.

Restricciones

1. Asignación única: cada actividad debe programarse exactamente una vez:

$$\sum_{t \in T} x_{a,t} = 1 \quad \forall a \in A \quad (3)$$

2. Restricciones de capacidad: la suma de recursos consumidos por todas las actividades en un periodo no puede exceder la capacidad máxima disponible (ejemplo: metros de avance por mes, número de frentes o dotación de jumbos):

$$\sum_{a \in A} C_{ar} x_{a,t} \leq C_r \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4)$$

3. Precedencias: ciertas labores solo pueden comenzar cuando otras han terminado (ejemplo: no se puede iniciar una galería si no se ha construido la cabecera que la habilita).

4. Dominio de variables:

$$x_{a,t} \in \{0,1\}, \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (5)$$

Inputs del modelo

- Actividades: extraídas del layout en DXF y cargadas en la base de datos.
- Precedencias: relaciones constructivas entre labores.
- Recursos: capacidades mensuales (metros/mes, número de equipos, dotaciones).

Outputs del modelo

- Plan de trabajo anual y mensual con orden de ejecución de labores.
- Distribución de frentes por periodo para cada nivel.
- Identificación de posibles cuellos de botella cuando la capacidad asignada no es suficiente.

3.1.1. Layout de la Mina

Es el proceso inicial en la etapa de Agendamiento de Actividades y como se menciona en el alcance, el sector específico dentro de Chuquicamata Subterráneo es la mina sur, justamente el MB S04 y MB S05, contemplando los cinco niveles, NP, NH, SNI, SNE y NA.

Se seccionan las labores del layout, por ejemplo, Cabeceras, Calles, Rampas, Galerías, Zanjas, Frontones y cada construcción que esté en los diseños. A cada sección se le asignará el nombre de la labor principal, pero diferenciado con un guion y el número correspondiente a la orientación Norte a

Sur y Oeste a Este, para así almacenarlos en una base de datos para ser utilizados más adelante en la programación total.

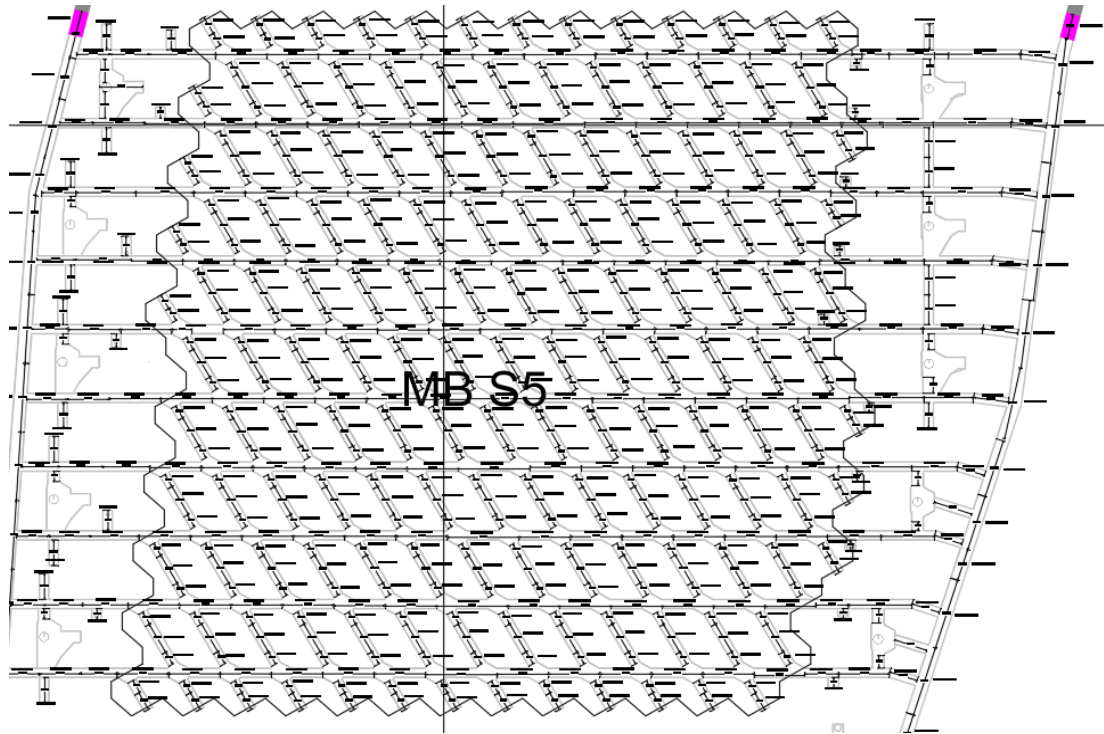


Figura 15. MB S05 NP segmentado.

El nivel de producción que se muestra en la Figura 15 concentra la mayor cantidad de actividades dentro de los cinco niveles, con un volumen significativo de metros a desarrollar. Este nivel tiene además la máxima prioridad en el orden de construcción. La Figura 16 muestra el detalle de cómo está segmentada una parte del nivel de producción del MB S05.

ACTIVIDADES ca	METROS ca	Precedencias ca	TIPO	ACTIVIDADES zj	METROS zj	Precedencia zj
CA PD S05 01 - 1	14,26	CAB PD S05 01 - 11	b1	ZJ PD S05 01 - 1	6	CA PD S05 01 - 4
CA PD S05 01 - 2	17,67	CA PD S05 01 - 1	b1	ZJ PD S05 01 - 2	8,34	ZJ PD S05 01 - 1
CA PD S05 01 - 3	15,47	CA PD S05 01 - 2	b1	ZJ PD S05 02 - 1	6	CA PD S05 01 - 5
CA PD S05 01 - 4	22	CA PD S05 01 - 3	b1	ZJ PD S05 02 - 2	8,34	ZJ PD S05 02 - 1
CA PD S05 01 - 5	22	CA PD S05 01 - 4	b1	ZJ PD S05 02 - 3	6	CA PD S05 01 - 5
CA PD S05 01 - 6	22	CA PD S05 01 - 5	b1	ZJ PD S05 02 - 4	14,02	ZJ PD S05 01 - 3
CA PD S05 01 - 7	22	CA PD S05 01 - 6	b1	ZJ PD S05 02 - 5	6	CA PD S05 02 - 4
CA PD S05 01 - 8	22	CA PD S05 01 - 7	b1	ZJ PD S05 03 - 1	6	CA PD S05 01 - 6
CA PD S05 01 - 9	22	CA PD S05 01 - 8	b1	ZJ PD S05 03 - 2	8,34	ZJ PD S05 03 - 1
CA PD S05 01 - 10	30,61	CA PD S05 01 - 11	b1	ZJ PD S05 03 - 3	6	CA PD S05 01 - 6
CA PD S05 01 - 11	22	CA PD S05 01 - 12	b1	ZJ PD S05 03 - 4	14,02	ZJ PD S05 03 - 3
CA PD S05 01 - 12	22	CA PD S05 01 - 13	b1	ZJ PD S05 03 - 5	6	CA PD S05 02 - 5
CA PD S05 01 - 13	22	CA PD S05 01 - 14	b1	ZJ PD S05 03 - 6	6	CA PD S05 02 - 5
CA PD S05 01 - 14	22	CA PD S05 01 - 15	b1	ZJ PD S05 03 - 7	14,02	ZJ PD S05 03 - 6
CA PD S05 01 - 15	22	CA PD S05 01 - 16	b1	ZJ PD S05 03 - 8	6	CA PD S05 03 - 4

Figura 17. Base de datos de labores segmentadas NP.

La precisión y el sentido lógico al momento de asignar las precedencias a las actividades es vital. Se pueden asignar múltiples precedencias a una actividad, de manera de indicarle al programa que el desarrollo de algunas labores debe ser a la par de otras. La Figura 17 muestra cómo se almacenan las frentes dentro de la base de datos del proceso de agendamiento.

3.1.2. Lógica de agendamiento y selección de actividades.

Una vez incorporado el layout de la mina en la base de datos, las actividades y sus precedencias se almacenan en formato Excel para ser utilizadas en el proceso de agendamiento. En esta etapa se definen las variables del modelo, las cuales dependen del periodo y de la capacidad asignada a cada uno de ellos. Cada periodo tiene un metraje máximo de avance, y el programa selecciona los frentes que pueden ejecutarse dentro de ese límite. Esta capacidad se implementa como restricción absoluta, por lo que el plan se invalida si los recursos asignados no son adecuados.

Por esta razón, la selección de actividades debe ser realista para evitar cuellos de botella o capacidades no utilizadas durante la optimización. Las capacidades asignadas por periodo provienen del Plan de Largo Plazo y corresponden a rendimientos históricos por frente y por nivel. Con base en esa información, el código de optimización determina el número de actividades que pueden ejecutarse hasta completar el nivel.

En algunos casos, el programa no utiliza la totalidad de la capacidad asignada debido a que el metraje de ciertas actividades no coincide con el disponible en el periodo. Cuando esto ocurre en la práctica y

genera retrasos, es necesario ajustar la base de datos incorporando esas frentes pendientes, de modo que el modelo vuelva a optimizar y entregue un nuevo plan de trabajo.

Basándose en lo mencionado anteriormente existe una cantidad definida para la realización de las obras al igual que pueden estar distintas empresas involucradas en el desarrollo de estas mismas. Es por ello que se consideran, además de las actividades, las precedencias y precedencias auxiliares, para tener un control del desarrollo minero al momento de simular el método de optimización.

3.1.3. Código de Optimización con Gurobi

A continuación, se presenta el flujo de trabajo del módulo de optimización del Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos (RCPSP), el cual toma en cuenta Actividades, Precedencias, Capacidad, Restricciones y Objetivo.

Para ello es necesario describir en que consiste cada bloque del código, y qué variables se utilizan. La Figura 18 muestra un listado de las etapas que se desarrollan en el programa.

Excel base de datos	• Las Actividades se encuentran almacenadas • Precedencias estan definidas
Periodos utilizados	• Cantidad de tiempo para la construcción del nivel, en meses
Capacidades por Periodo	• Cantidad maxima de metros disponibles para el avance que corresponde a cada Periodo.
Restricciones	• Para que no ocurran problemas de solapamiento de actividades, se respeten las precedencias y, capacidades utilizadas no superen el límite
Función Objetivo	• Se da como objetivo la realización de la construccion en el menor tiempo posible aprovechando al máximo las capacidades.
Modelo Optimización con Gurobi	• Gerena matrices y modelos de optimizacion con todo lo anterior para obtener la ruta optima
Outputs	• Excel con el orden de construcción dado por mes. • Carta gantt de un año con las actividades que se realizaran por mes.

Figura 18. Bloques principales del programa.

Dentro de la optimización puede que haya que ajustar algunas variables, puesto que en la etapa de Modelo de Optimización con Gurobi detecta si la solución es factible o no, por lo que puede ser necesario modificar alguna de las etapas de Capacidades por Periodo, Restricciones o hacer un ajuste en la parte del Excel base de datos.

Finalmente, el flujo que posee el código en esta primera etapa es el definido en la Figura 19.

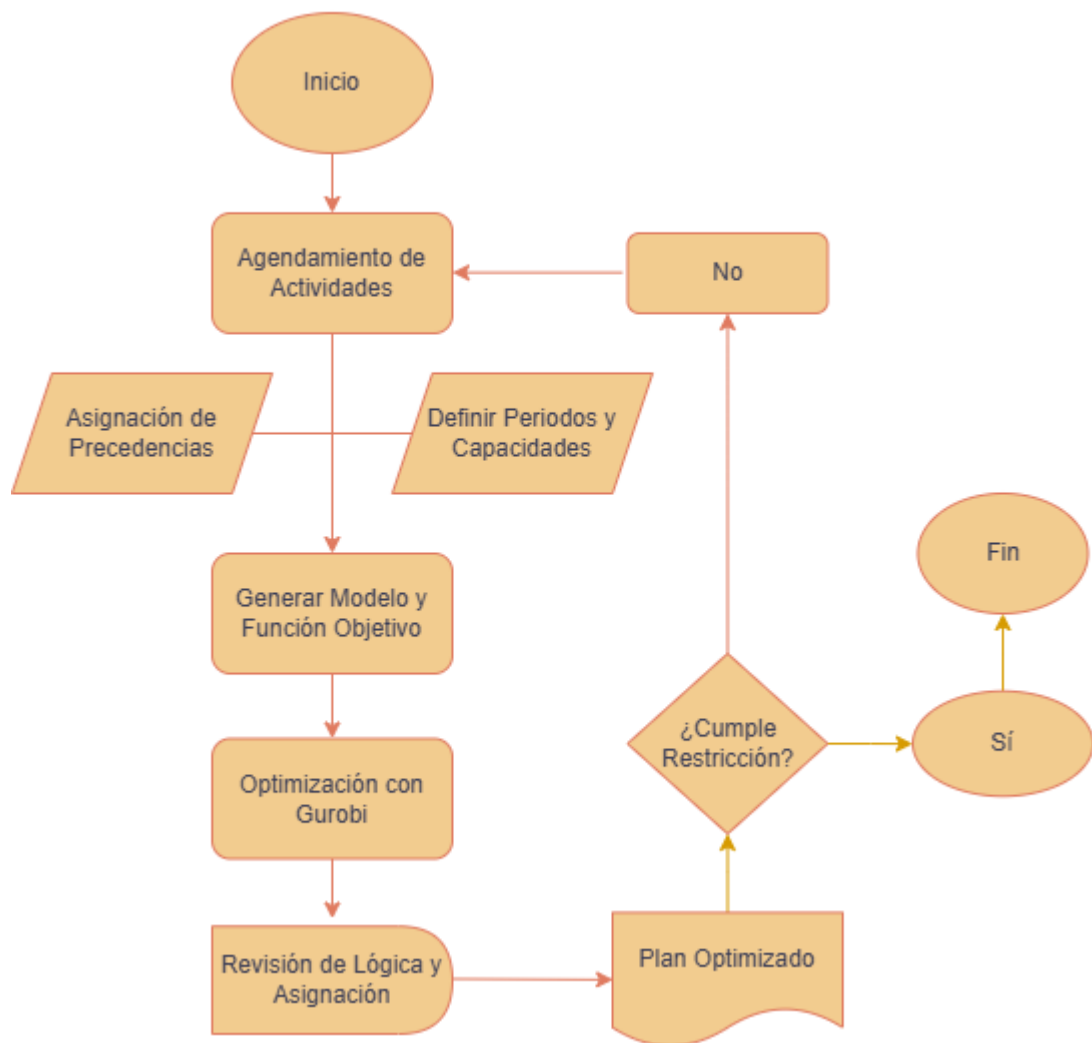


Figura 19. Flujo del programa Agendamiento de Actividades.

3.1.4. Salidas esperadas del agendamiento

El módulo de agendamiento (RCPSP) produce un conjunto de salidas estandarizadas que permiten operacionalizar el plan y facilitar su revisión por parte del equipo de preparación minera. Las salidas esperadas son:

1. Plan de trabajo anual y mensual (PAM) del agendamiento. Corresponde a la secuencia programada de frentes para cada periodo, considerando precedencias y límites de capacidad.
2. Archivo DXF con orden de construcción. Para cada nivel, el modelo exporta un DXF que codifica el mes de ejecución de cada frente; sirve para validar espacialmente la lógica de construcción y para preparar presentaciones operacionales.
3. Gráfico de frentes por mes. Entrega la carga de frentes programada por periodo, útil para anticipar requerimientos de dotación y equipos.
4. Carta Gantt del plan. Muestra la duración y superposición de las labores seleccionadas, reforzando la lectura temporal del plan.

3.2. Programa de simulación

La etapa de simulación juega un papel esencial para la propuesta de innovación en el plan de preparación minera, puesto que aporta eficacia en la creación del PAM, de una manera más automatizada y realista con las condiciones de interior mina que presenta esta operación.

Esta etapa tiene dos funciones para el área de preparación minera: la primera, simular el Programa Mensual tomando en cuenta la dotación de personal y equipos en el área de trabajo en interior mina, para posterior ingresarlo en la interfaz de simulación y ejecutar el programa. De esta forma se obtiene un resultado operativizado, el cual puede ser visto como un indicador sobre la posibilidad de que el plan pueda ser realizado según los recursos que se poseen en el sector para el mes correspondiente. La segunda función, consiste en ingresar el plan generado por la etapa de agendamiento de actividades, la cual entrega el plan completo obtenido desde métodos de optimización. Este plan se ejecuta en el simulador y se obtiene la operativización de ese plan. Como resultado, el avance del plan

operativizado puede ser menor en metros, puesto que considera restricciones adicionales que existen en interior mina.

En cuanto al código de esta etapa consta de un proceso de identificación de frentes, que se realiza en un archivo DXF mediante la creación de un círculo en la frente y una línea en su centro que indica hacia dónde va su dirección. Posterior a eso, el primer código detecta esa frente, sus coordenadas, la cota en la que se encuentra, nivel al que pertenece y su dirección.

Posterior a eso, se cargan los datos recolectados anteriormente en el simulador, que entrega un plan de preparación con trabajos en las frentes al detalle, es decir, el minuto a minuto de cada actividad en interior mina.

La simulación trata de replicar el trabajo realizado en terreno, considerando tiempos de ciclos para cada actividad, restricciones entre etapas del ciclo minero, la convivencia y distribución entre los equipos de trabajo, frentes disponibles y restricciones horarias para algunas etapas del ciclo minero.

3.2.1. Funcionamiento del programa

El programa diseñado tiene como finalidad reproducir de manera computacional lo que ocurre en la preparación minera en interior mina, particularmente en los macrobloques S04 y S05. A diferencia de la planificación tradicional en Excel, el modelo implementa una lógica de simulación que permite representar paso a paso las actividades que conforman el ciclo minero. En esta lógica, el usuario ingresa información inicial como el listado de frentes disponibles o puede iniciar la simulación de detección de frentes como se muestra en la Figura 20, los metros proyectados por frente, la dotación de equipos y las cuadrillas asignadas. Estos datos son procesados por el programa, que se encarga de organizar la ejecución de las labores siguiendo tanto las precedencias constructivas como las restricciones operativas definidas para la mina.

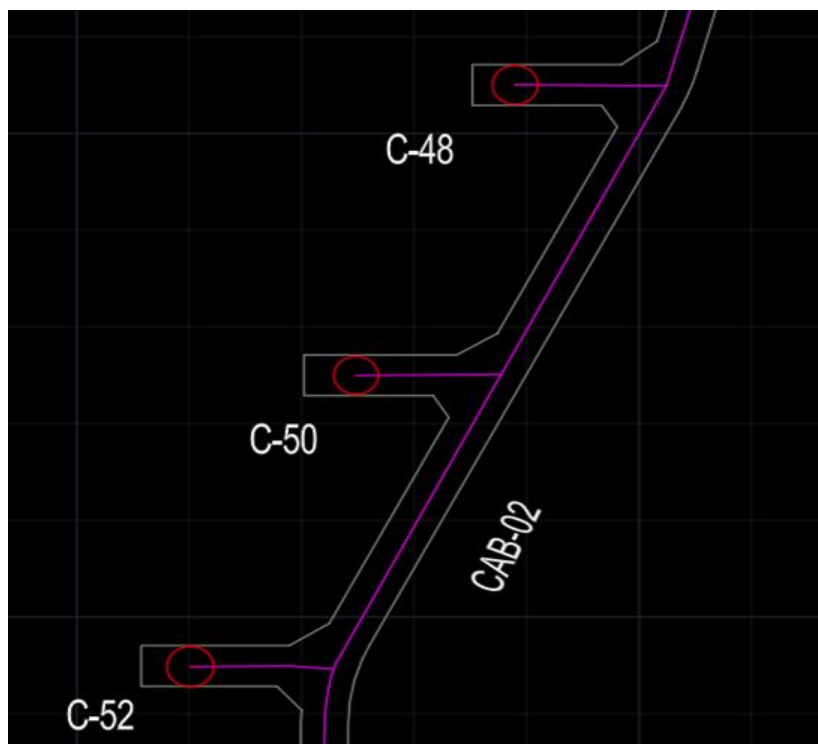


Figura 20. Identificación frentes de trabajo.

La estimación de los tiempos de cada actividad constituye un aspecto central de la simulación. Para ello se consideraron valores mínimos, máximos y modales recopilados de literatura técnica y validados por especialistas en la División.

Tabla 1. Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base [24].

Actividad	Tiempo Mínimo [min]	Tiempo Moda [min]	Tiempo Máximo [min]
Perforación	157	192	227
Cargado explosivo	130	144	158
Tronadura	36	36	36
Ventilación	60	60	60
Acuñadura	36	48	58
Pernos	101	135	184
Lechado	87	105	123
Mallado	110	120	130
Shotcrete	66	66	97

Los tiempos que muestra la Tabla 1 fueron incorporados en el programa bajo un enfoque probabilístico, empleando simulación Monte Carlo con distribución triangular. Este procedimiento otorga mayor realismo al modelo, ya que no todos los ciclos en interior mina tienen una duración constante, sino que varían según condiciones de terreno, disponibilidad de equipos y experiencia de las cuadrillas.

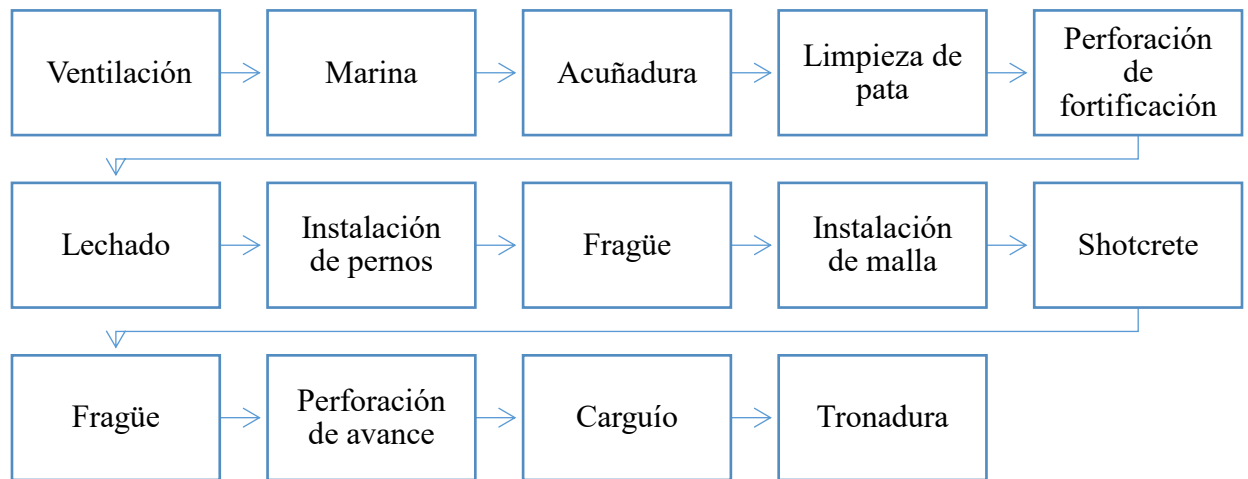


Figura 21. Actividades del ciclo minero que sigue el programa.

El modelo también incluye actividades que no siempre son visibles en la planificación convencional como se observa en la Figura 21, como el traslado de equipos. Esta “actividad oculta” se considera tanto cuando un equipo cambia de frente dentro de un mismo nivel como cuando debe desplazarse a un nivel diferente. La incorporación de este factor es clave, ya que en la práctica dichos traslados impactan directamente en la productividad y rara vez son incluidos en las planificaciones manuales.

Finalmente, el programa integra un conjunto de restricciones que aseguran la coherencia de los resultados. Entre ellas destacan: límites de capacidad de jumbos y dumpers, secuencias de precedencia entre actividades de desarrollo, restricciones de ventilación y tronadura en horarios específicos, y el máximo de metros permitidos por periodo.

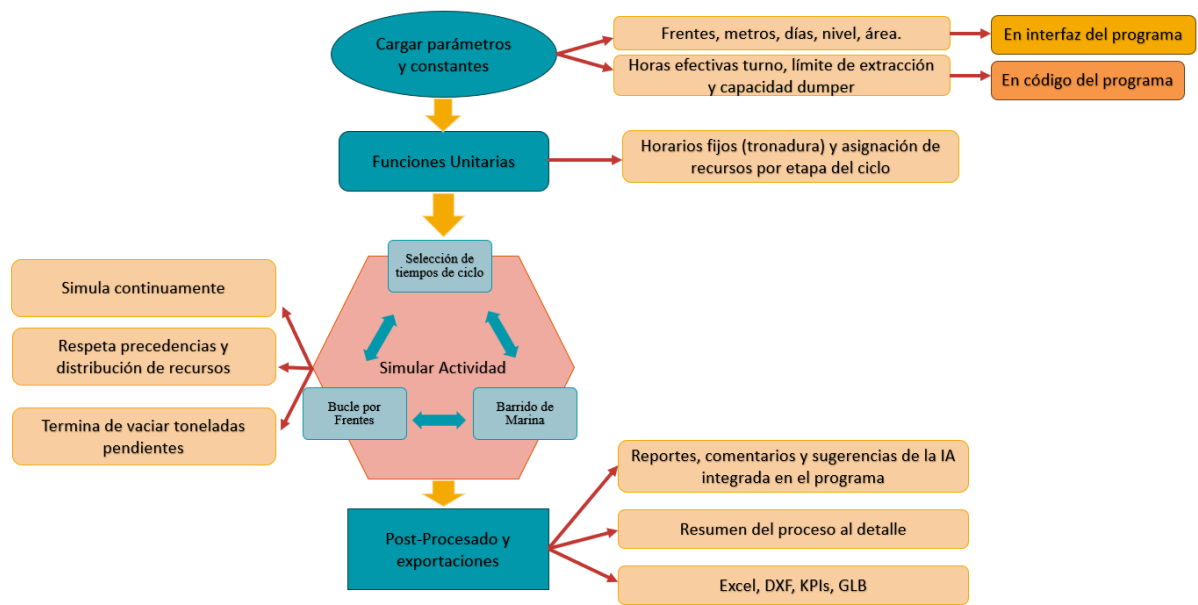


Figura 22. Diagrama de flujo del programa de planificación minera.

El funcionamiento completo se encuentra sintetizado en el diagrama de flujo que se observa en la Figura 22 que acompaña esta sección, el cual resume las etapas de carga de parámetros, ejecución de funciones unitarias, simulación del ciclo y post-procesamiento de resultados.

3.2.2. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica constituye el punto de control del simulador. Organiza los parámetros en secciones que facilitan el ingreso de información y la ejecución del modelo sin depender de planillas externas. La interfaz se observa en la Figura 23 y se estructura en tres áreas: recursos, frentes y comandos.

1. Recursos disponibles (panel superior izquierdo): Permite definir los recursos vigentes en interior mina al inicio de la simulación:
 - Días a simular.
 - Equipos: Jumbos de avance y de fortificación, mixers, roboshot, acuñador mecanizado, retroexcavadoras y dumpers.
 - Cuadrillas por turno.
2. Frentes y parámetros operativos (panel inferior): Formulario asociado a cada frente para contextualizar la simulación. Incluye:
 - Nombre del frente y nivel.

- Etapa del ciclo en que se encuentra.
 - Dirección (DIR) con opción de precarga desde DXF.
 - Sección/área y coordenadas X–Y (opcionales).
 - Metros a ejecutar, fecha y hora de inicio.
 - Precedencia respecto de otros frentes (opcional).
 - Opción “Extra” para extender la simulación del frente hasta completar los días definidos (opcional).
3. Comandos de ejecución (botonera): Concentra las acciones principales del programa y son las que dan partida a la simulación.
- Agregar frentes, Guardar parámetros, Eliminar última frente, Cargar parámetros (simulaciones previas).
 - Iniciar simulación y Cancelar ejecución.
 - C.F Excel para autocargar las últimas frentes detectadas desde planillas.
4. Visor 3D integrado: Visualización interactiva del layout (niveles y túneles). Permite rotar, acercar/alejar y validar espacialmente los frentes seleccionados antes de ejecutar.
5. Racional del diseño: La interfaz se implementó para modernizar, agilizar y estandarizar el proceso de elaboración del PAM, reduciendo errores de traspaso y mejorando la trazabilidad entre parámetros de entrada y salidas.
6. Rendimiento de ejecución: El tiempo de corrida depende del número de frentes/equipos; en pruebas representativas (31 días, 33 frentes y distribución completa de recursos) la simulación demoró un tiempo aproximado de 50 segundos en generar los resultados.

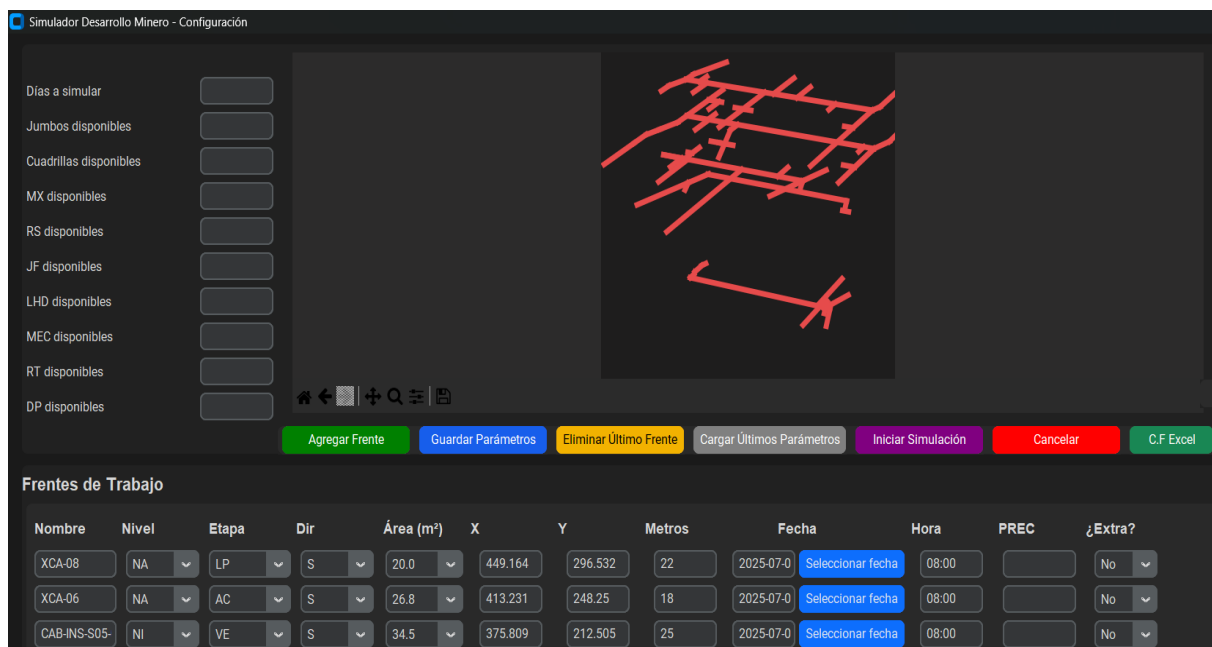


Figura 23. Interfaz gráfica del programa de planificación minera.

3.2.3. Salidas esperadas de la simulación

El módulo de simulación del ciclo minero produce un conjunto de salidas operativizadas que reflejan la ejecución del plan bajo restricciones reales (ventanas de ventilación y tronadura, dotación por turno, traslados de nivel y variabilidad de tiempos). Estas salidas permiten llevar la programación a nivel de turno y soportar la toma de decisiones en terreno. Las salidas esperadas son

1. Excel operativo con la simulación completa: Esto especifica en que minuto del día se realiza cada actividad, se entrega también el flujo y distribución de equipos de trabajo en las frentes programadas, especifica en qué turno se realiza cada etapa, todo bajo las reglas fijadas en el código del programa, donde se mostrará el tonelaje de marina extraído de avance en cada frente, el equipo o personal que se utiliza en cada actividad, la hora y el turno en el que se realiza la actividad, al igual que la duración de la actividad.
2. Avance diario por tronadura: Se entrega un gráfico en donde muestra el día a día de las tronaduras, indicando la labor donde se realizó la tronadura.
3. La planificación de turno (POD): La planificación diaria es clave para mantener un ciclo minero continuo y eficiente. Habitualmente, el jefe de terreno del turno saliente elabora el plan

para el turno entrante. Con base en ese plan, el jefe de terreno distribuye los recursos y, al cierre del turno, deja preparada la planificación del siguiente; así se sostiene el ciclo turno a turno en interior mina. El programa propuesto genera esta planificación de forma consistente con la ubicación de equipos en la mina, el estado de avance de las últimas etapas del ciclo y la dotación requerida para el turno que ingresa.

4. Comentarios de la IA vinculada en línea: El programa incluye un módulo automático de apoyo que, al ejecutar la simulación, analiza los resultados y entrega recomendaciones puntuales por sector. Estas observaciones se registran como comentarios breves (≤ 50 palabras) directamente en el archivo de salida (Excel), para facilitar la revisión operativa y la toma de decisiones.
5. DXF con los avances incorporados: Como apoyo a la planificación en el SGP, el sistema genera un DXF con los avances consolidados. Este formato permite usar la misma base tanto para construir el PAM mensual como para los cierres de mes. En el caso de estudio, se entrega un DXF por cada nivel de la mina, con foco en los macrobloques S04 y S05, donde predominan los desarrollos horizontales.
6. GLB con los niveles completos y avances incluidos: Para presentaciones operacionales, se exporta un GLB que integra en una sola vista el estado total de los trabajos por nivel. El modelo 3D muestra las labores que se están ejecutando en cada nivel (NH, NP, NE, NI y NA de MCHS), lo que facilita el seguimiento visual y la comunicación con las áreas que intervienen durante el trabajo.

3.3. Metodología de alcance máximo posible

Esta sección presenta una metodología para estimar el máximo avance alcanzable en el mes de planificación, considerando únicamente las tronaduras ejecutables según el plan. El resultado depende de un factor teórico, con el que se calcula el máximo de metros mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Alcance máximo} = N^{\circ} \text{ de tronaduras} * \text{Avance teórico por tronadura} \quad (6)$$

Definiendo las variables que se toman en cuenta son:

1. N° de tronaduras: el máximo que se alcanza durante la simulación que realiza el programa.
2. Avance teórico por tronadura: valor estándar que se utiliza, es de 3.5 metros.

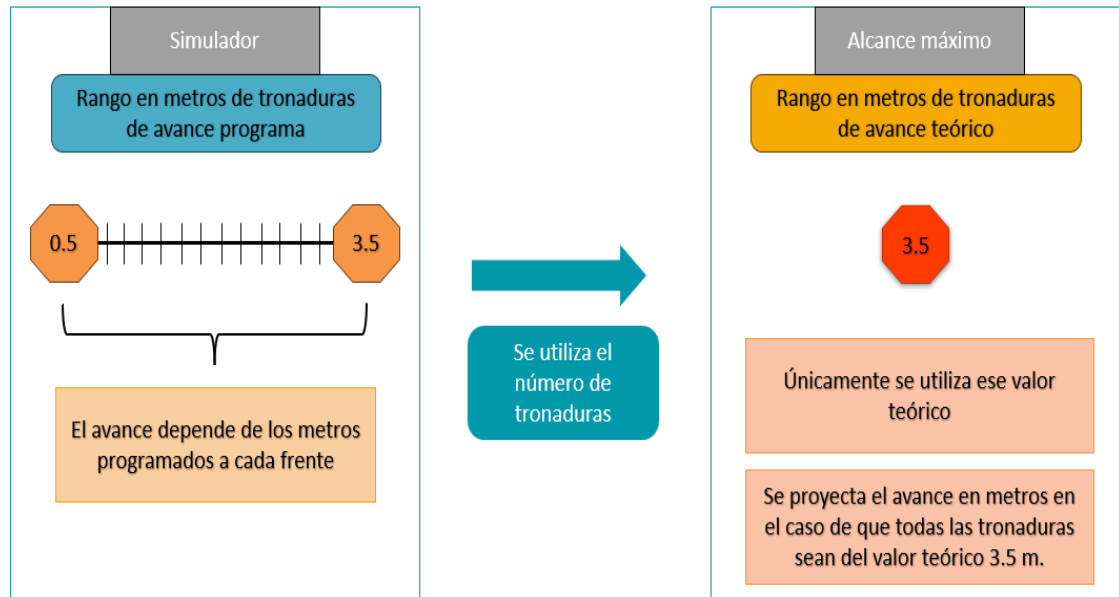


Figura 24. Diagrama de flujo de metodología Alcance máximo posible.

La Figura 24 muestra como es la diferencia y en cómo se relacionan las tronaduras horizontales en el programa, con la de esta metodología, mientras que el programa puede realizar tronaduras dentro de ese rango, esta variante solamente toma en cuenta el avance teórico de 3.5 metros.

4. Resultado

Este capítulo presenta los resultados del trabajo (agendamiento, simulación y cota de alcance) y las comparativas con los planes reales utilizados en el área de preparación minera.

4.1. Resultados Agendamiento de Actividades

En esta sección se presentan los resultados del agendamiento para los macrobloques S05 en el periodo marzo–junio.

Tabla 2. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de marzo.

Nivel	Actividad	Metros	Área
ACA	GAL BZN S05 01 - 1	11	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 1	20	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 2	15	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 3	27	34.5
EXT	GAL EXS S05 01 - 1	9	26.8
EXT	GAL EXS S05 02 - 1	7	26.8
HD	CA HD S05 10 - 14	22	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 1	13	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 2	42	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 1	29	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 2	34	19.9
INS	GAL INS S05 03 - 1	29	34.5
INS	GAL INS S05 03 - 2	18	34.5
NP	CAB PD S05 02 - 1	11	28
Total		287	14

El plan mostrado corresponde al producto principal del módulo de agendamiento. Se utiliza como base para articular la planificación desde el largo hacia el corto plazo, partiendo por marzo, y sirve de insumo directo para el plan propuesto.

En la Tabla 2 se muestra la selección de frentes resultante del modelo de optimización para el mes de marzo. El esquema incluye 14 frentes en cinco niveles y estima un avance mensual de 287 m lineales.



Figura 25. Orden de construcción sector Oeste MB S05 NE.

En el DXF que se muestra en la Figura 25 del subnivel de extracción del macrobloque S05 se indica el orden de construcción de cada frente mediante una numeración correlativa, cada número representa un mes calendario a partir de marzo (1 = marzo, 2 = abril, ..., 10 = diciembre). Con ello, el código entrega a la vez un plan mensual y una proyección de largo plazo de la secuencia de labores.

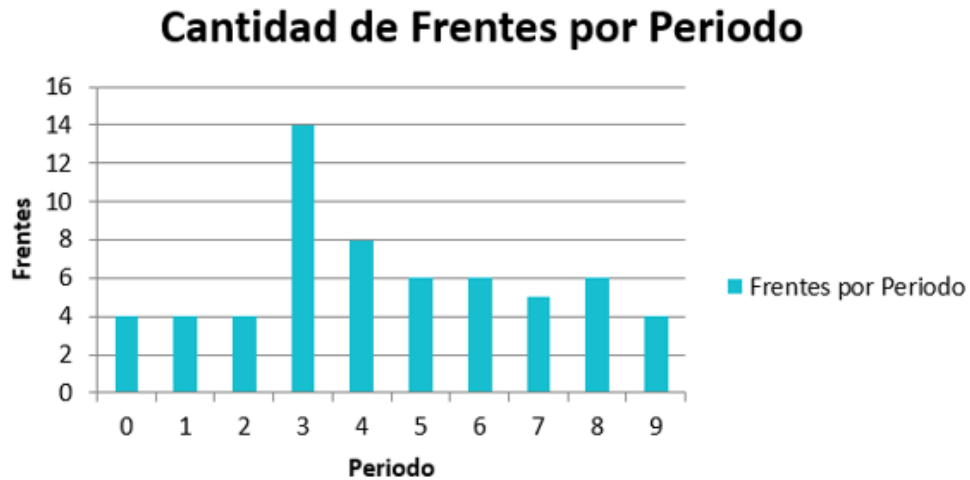


Figura 26. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de acarreo.

Lo que muestra el gráfico que se observa en la Figura 26 son los meses en que se necesitaría aumentar la dotación de personal y equipos en interior mina. Como se mencionó anteriormente, como este gráfico de frentes del nivel de acarreo, hay para cada nivel del sector de la mina que se pueden observar en el Anexo 7.3.

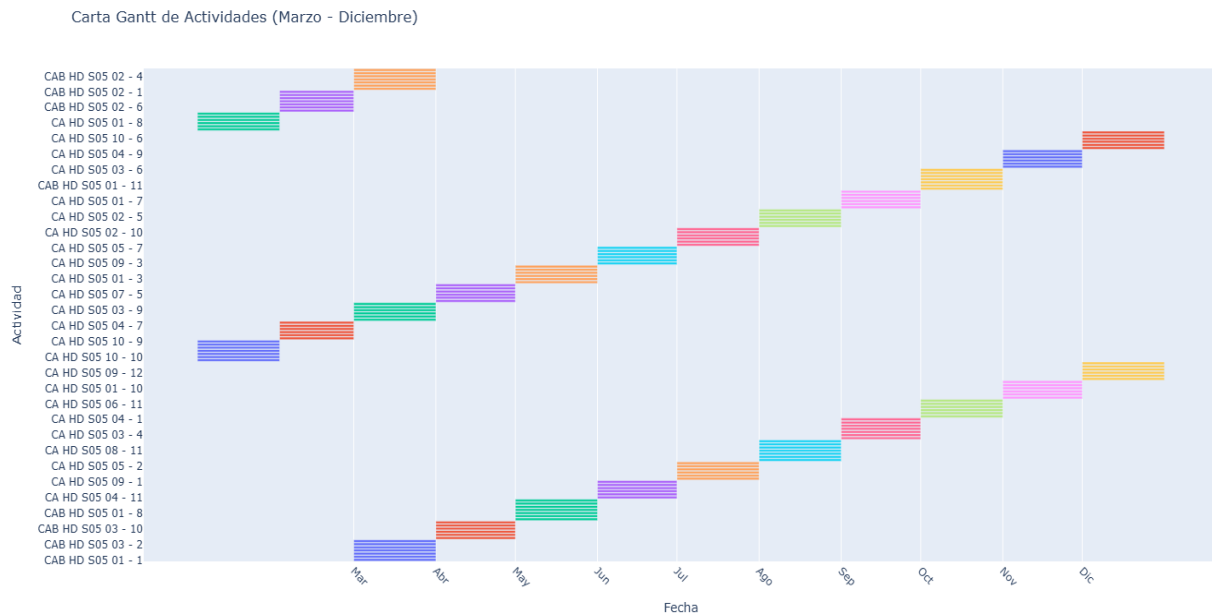


Figura 27. Carta Gantt para la construcción del NH.

El diagrama de Gantt de la Figura 27 identifica los frentes y permite exponer el resultado de manera directa, consultando la precedencia y el orden de ejecución de las actividades definidas por la simulación para el nivel de hundimiento.

Para verificar el uso de la capacidad otorgada, se incorpora una salida que contrasta capacidad asignada vs. utilizada por período. Esta lectura permite detectar holguras o sobrecargas y ajustar la planificación donde corresponda.

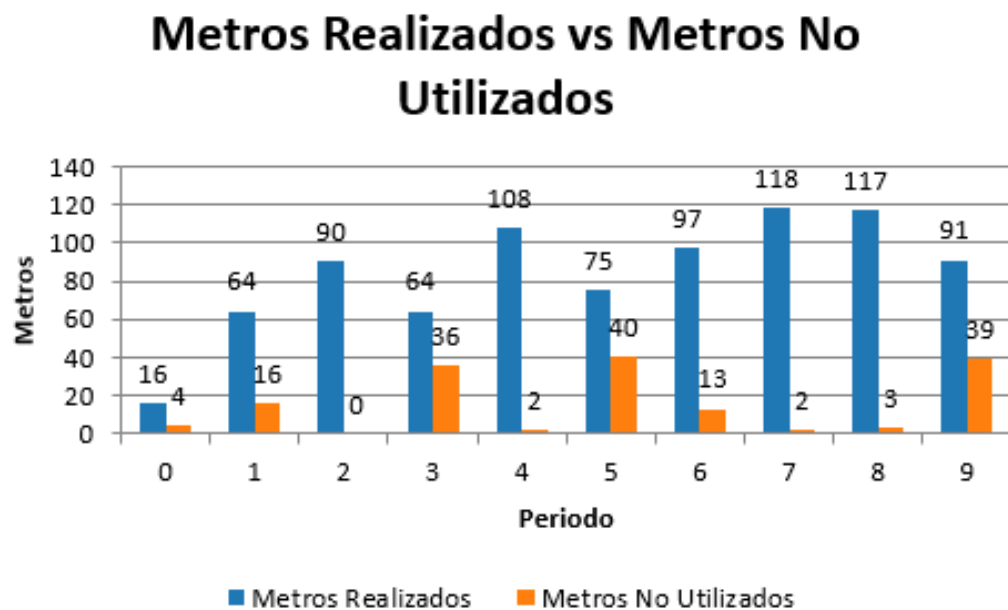


Figura 28. Utilización de recursos en el nivel de extracción.

La Figura 28 presenta la utilización de metros por período en el nivel de extracción, distinguiendo metros realizados y metros no utilizados. Esta lectura permite justificar la asignación de recursos mes a mes e identificar márgenes de construcción superiores o inferiores a lo planificado.

Según los resultados obtenidos, en marzo se otorgan 20 m para el nivel de extracción; el modelo reasigna 4 m a otro nivel y programa 16 m en extracción. Este ajuste evidencia la flexibilidad del plan para equilibrar la carga entre niveles.

4.2. Resultado Programa de simulación

Los outputs entregados por el programa son los siguientes:

1) Excel operativo:

Para mayo, el programa genera la simulación de trabajo como se observa en la Figura 29 y la exporta en un Excel operativo para revisar en detalle la utilización de equipos y labores, así como detectar y corregir solapamientos.

El plan de trabajo reporta el avance final del mes; según los resultados obtenidos, para mayo el total asciende a 399 m.

Actividad	Etap	Jumbo Asignado	Cuadrilla Asignada	MX Asignado	RS Asignado	JF Asignado	LHD Asignado	MEC Asignado	Turno	Duración
CAB-INS-S05-01	MOV						LHD3		A	60 min
GAL-EXS-S05-02	MOV						LHD1		A	60 min
CAB-EXS-S05-01	PA	J101							A	189 min
C-50 / XC-01 W	M						LHD3		A	60 min
XC-01	M						LHD3		A	60 min
C-48 / XC-1 E	AC							MEC1	A	43 min
C-48 / XC-1 W	MOV						LHD1		A	60 min
C-48 / CAB2	PF					JF2			A	87 min
C-50 / CAB2	PE		C1						A	123 min
C-52 / CAB2	SH			MX2	RS2				A	72 min
CAB-HD-S05-02	PA	J103							A	194 min
CAB-SLOT-HD-S04/CA-HD-S04-05N	M						LHD1		A	60 min
ZI-PD-S05-13	MOV						LHD2		A	60 min
CAB-PD-S05-02	SH			MX3	RS3				A	85 min
CA-52 / CAB 2 W	MOV						LHD2		A	60 min
EXTENSIÓN RAC-SMM-S04-01	L		C1						A	60 min
CA-50 / ZI 13 W	MOV								A	20 min
CA-50 / CAB 2 W	MOV								A	20 min
XC-PD-S05-01	SH			MX1	RS1				A	75 min
GAL-INS-S05-02	MOV						LHD2		A	60 min
GAL-EXS-S05-02/ FC-01 W	AC							MEC3	A	45 min

Figura 29. Plan operativizado obtenido del programa mes de mayo.

2) Avance diario de la simulación:

La Figura 30 muestra el avance diario de tronaduras registrado por la simulación. Este output permite identificar cuellos de botella, reconocer días de alta carga y anticipar sobreasignaciones, para gestionar una programación más balanceada en interior mina. Para el caso de estudio, según los resultados obtenidos, puede proyectarse el cumplimiento del plan en ausencia de contingencias, dado que el número de avances disminuye con el tiempo y las barras se reducen progresivamente, lo que indica que varios frentes se completan.

En abril el avance real alcanzó 414 m, mientras que el programa proyectó 405 m. La diferencia es 9 metros (2,17%), esto se considera aceptable, pues al revisar el avance diario en Figura 30, se observan ventanas sin actividades que explican el gap. De haber planificado más metros en el plan, ese gap sería menor y entregaría un plan más preciso.

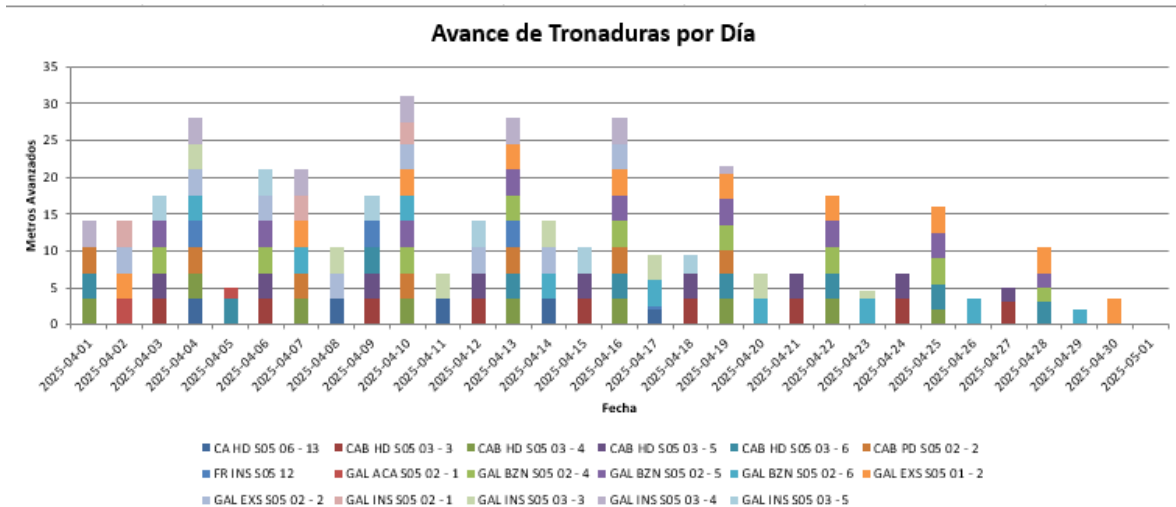


Figura 30. Avance diario mes de abril.

3) La planificación de turno en el plan diario (POD):

Para junio, las Figuras 31 y 32 presentan el resultado y la nomenclatura del Plan Diario (POD) correspondiente al 01/06/2025. El detalle describe la operación en interior mina, con hora de inicio y término de cada etapa del ciclo. Las tronaduras se programan al final del turno, por lo que existe un desfase temporal respecto de las demás etapas. Este output ofrece un formato alternativo para el POD, complementario al que se utiliza en terreno.

Fecha	Frete	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30
2025-06-01	C-48 / CAB2				PF	PF	PF				PE	PE	PE	PE											
2025-06-01	C-50 / CAB2	VE	VE				M				AC			LP					PF	PF	PF				
2025-06-01	C-52 / CAB2				PA	PA	PA	PA	PA	PA	PA			CA	CA	CA	CA								TR
2025-06-01	CAB-EXS-IN1-05				PE	PE	PE	PE	PE			L	L	L	L										
2025-06-01	CAB-HD-S05-02				M					AC		LP						PF	PF	PF					
2025-06-01	CAB-INS-S05-01			LP				PF	PF	PF		PE	PE	PE	PE										
2025-06-01	FR-INS-S05-13				MA	MA	MA	MA				SH	SH												
2025-06-01	FR-INS-S05-14			LP				PF	PF	PF		PE	PE	PE	PE										
2025-06-01	FRMAR-EXS-S05-01				M					AC		LP						PF	PF	PF					
2025-06-01	GAL-ACA-S05-02				PA	PA	PA	PA	PA	PA	PA	CA	CA	CA	CA										TR
2025-06-01	GAL-BZN-S05-02				M					AC		LP						PF	PF	PF					
2025-06-01	GAL-EXS-S05-02		FR	FR				MA	MA	MA	MA			SH	SH										
2025-06-01	GAL-INS-S05-03				PF	PF	PF				PE	PE	PE	PE											
2025-06-01	XC-01				L	L	L	L	FR	FR					MA	MA	MA	MA							
2025-06-01	C48/Z13				PF	PF	PF				PE	PE	PE	PE											
2025-06-01	CS0/Z13-E				PA	PA	PA	PA	PA	PA	PA			CA	CA	CA	CA								TR
2025-06-01	CS0/Z13-W				L	L	L	L	FR	FR				MA	MA	MA	MA								
2025-06-01	CABPD-02	VE	VE		M		AC	LP		PF	PF	PF		PE	PE	PE	PE								
2025-06-01	s04		FR	FR			MA	MA	MA	MA		SH	SH												

Figura 31. Plan Diario (POD) mes de junio.

VE	Ventilación	L	Lechado
MARINA	Marina	FR	Frague
M	Marina LHD	MA	Malla
AC	Acuñadura	SH	Shotcrete
LP	Limpieza de pata	PA	Perforacion de avance
PF	Perforacion Fortificación	CA	Carguio
PE	Colocación de Pernos	TR	Tronadura

Figura 32. Nomenclatura del POD.

4) Comentarios de la IA vinculada en línea:

Para el mes de junio, los comentarios que fueron obtenidos desde el programa generados por OpenAI, se muestra en Figura 33, de forma de complementar de otro punto de vista la simulación de ese mes. Según estos comentarios, el profesional a cargo puede tomar acción con anticipación y planificar una mantención a futuro para un equipo antes que suene en la alerta.

Bloque	Observación	Acción práctica
Cumplimiento	Global: 99.9%, NI: 99.3%	Reforzar monitoreo en NI para alcanzar 100%.
Equipos extra	Se requieren 1 Jumbo adicional (20% mejora)	Si no hay, optimizar uso de Jumbos actuales y aumentar turnos.
Interferencias	CAB-SLOT-HD-S04/CA-HD-S04-05N y otros (DS132, Cap. 4, Art. 12)	Planificar desvíos y coordinar con operaciones para minimizar impacto.
Mantenciones	⌚: Día 1, J101: Día 9, J102: Día 9, J103: Día 8	a) Sin mitigación: 50 m perdidos. b) Con mitigación: 20% recuperación, ajustar turnos.
Observación	Alarmas en equipos indican necesidad de revisión	Implementar un plan de mantenimiento preventivo más riguroso.

Figura 33. Comentarios de la IA para la simulación mes de junio.

5) DXF con los avances incorporados:

Para el caso de estudio y como output, se entrega el mes de junio con los avances en las respectivas frentes. La franja de color naranja que se observa en la Figura 34 muestra los avances que se realizan, mientras que la línea de color morado, son las labores existentes en el nivel, es decir, lo que ya está construido. Este output se utiliza para la realización del PAM del mes de junio, el programa lo entrega con el formato listo para ser cargado en los archivos del área de preparación minera.

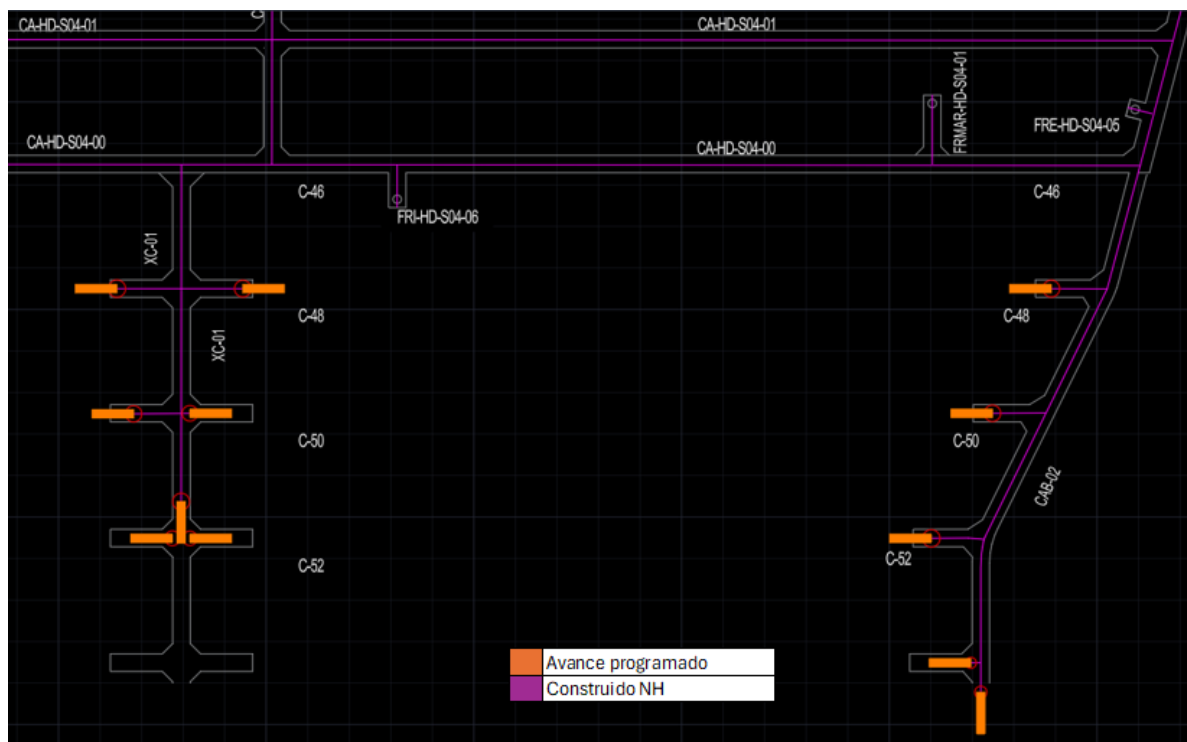


Figura 34. DXF nivel de hundimiento con avances incluidos.

6) GLB con los niveles completos y avances incluidos

La Figura 35 corresponde a la simulación que ocurre en el mes de junio y muestra la diferencia entre avances de 3.5 metros y avances que son menores a 3.5 metros, esas frentes están marcadas y se puede interpretar como una oportunidad de mejora para el desarrollo minero, es decir, que en el mes de junio se podrá avanzar más de lo planeado por esta metodología.

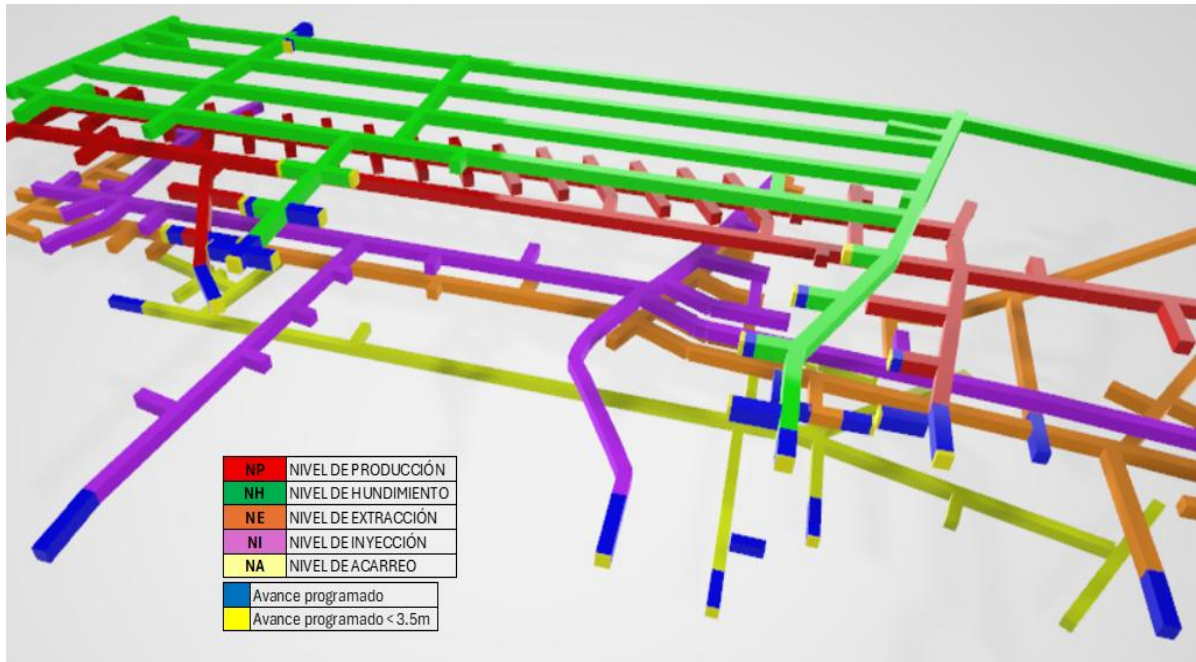


Figura 35. GLB MB S05 con los avances del mes incluidos.

4.3. Resultado Alcance máximo posible

El programa genera esta variación en formato texto para estimar el máximo alcanzable. La Tabla 3 presenta, para el caso de estudio, el máximo posible por mes, considerando solo tronaduras de desarrollo (avance). El valor obtenido se utiliza como limitante/cota superior para compararlo con los demás planes.

Tabla 3. Compilado de tronaduras por mes y su alcance máximo posible.

Mes	Número de tronaduras	Alcance máximo [m]
Marzo	86	301
Abril	122	427
Mayo	120	420
Junio	122	427

4.4. Comparativa de planes

En esta sección se comparan, para el periodo marzo–junio en los macrobloques S04–S05 de MCHS, el PAM SGP, el Plan Agendamiento (RCPSP), el Plan Simulado, el Plan de Alcance Máximo Posible

y el PAM Propuesto. La evaluación se realiza contra el avance real, con el objetivo de identificar el plan que mejor reproduce el desempeño observado y sustentar la adopción operativa del PAM Propuesto.

Luego de los outputs entregados por el programa, las comparativas entre metodologías, planes reales utilizados y recopilación de resultados, se definen los siguientes planes.

1. Agendamiento: Plan generado con la metodología de Agendamiento de Actividades.
2. Simulado: Plan operativizado, ingresado en la interfaz del programa.
3. Alcance máximo: Como alcance máximo según el número de tronaduras.
4. PAM Propuesto: Promedio entre los planes entregados por las metodologías expuestas.

$$PAM\ Propuesto = \frac{Agendamiento + Simulado + Alcance}{3} \quad (7)$$

Estos planes obtenidos de las metodologías se comparan con los siguientes:

1. PAM SGP: Plan de trabajo mensual que se utiliza en el área de preparación minera de la SGP.
2. REAL: El resultado de lo realizado en avances horizontales durante el mes.

4.4.1. Planes de trabajo caso de estudio

Como primer paso se agrupan los planes obtenidos de cada metodología por separados, como se observa en la Figura 36. Su unidad de medida es metros, y la comparativa abarca un periodo de 4 meses (marzo, abril, mayo y junio).

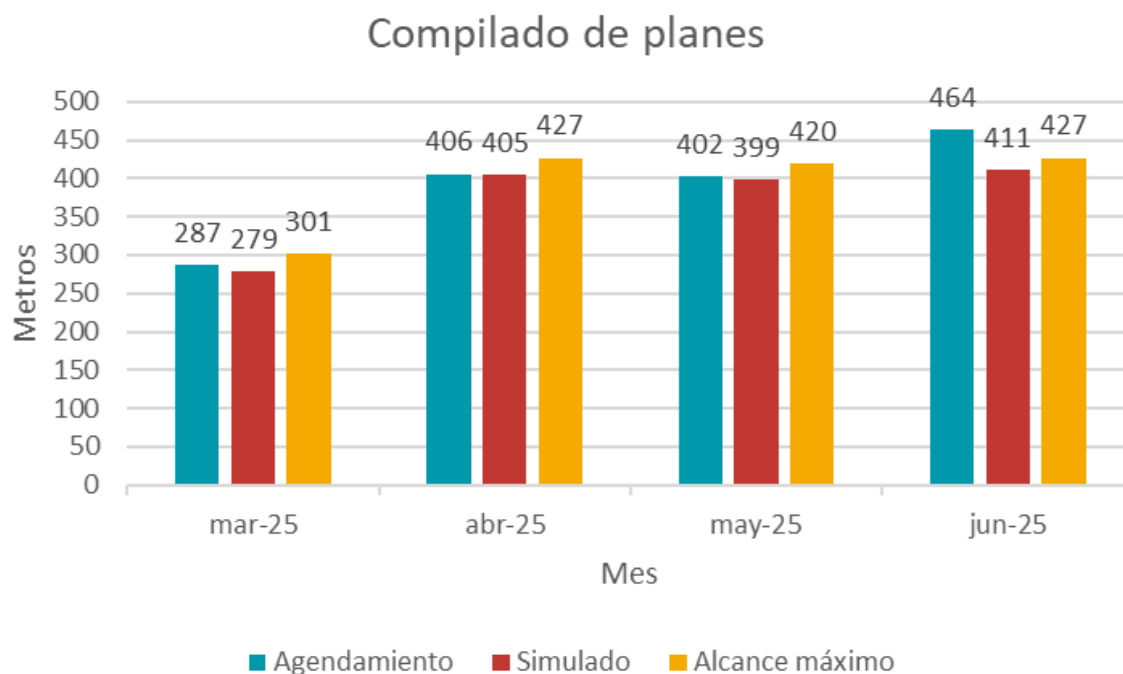


Figura 36. Compilado de planes obtenidos de las metodologías de trabajo.

Se evaluaron tres metodologías con el objetivo de seleccionar aquella que entregue una planificación más alineada con el avance real observado en el sector Mina Sur. Para este caso, tras el análisis, se adopta de forma inicial un promedio entre los planes obtenidos por las tres metodologías. Con este criterio, el plan propuesto para el área de preparación minera del SGP se presenta a continuación, expresado en metros.

Tabla 4. PAM Propuesto para el caso de estudio.

Plan / Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio
PAM Propuesto	289 m	413 m	407 m	434 m

Dado que el método empleado es un promedio simple, cada metodología aporta el mismo peso al plan resultante. Antes de presentar el plan de trabajo (Tabla 4), se realiza una comparativa para medir el grado de acierto de cada plan frente al avance real. La comparación considera el PAM SGP y el avance real (REAL) en los meses analizados (marzo–junio). El objetivo es determinar cuál alternativa se aproxima mejor al desempeño observado.

El resultado esperado de esta comparativa es que el PAM Propuesto sea más asertivo que el PAM SGP utilizado en el área de preparación. Con ello se habilita una planificación más precisa para los siguientes meses, considerando rendimientos, tiempos de ciclo, y la disponibilidad de equipos y personal en interior mina.

Para las comparativas no se toma en cuenta lo que es adherencia en el plan de trabajo.

4.4.2. Comparación PAM propuesto

La recopilación de datos de las metodologías permite realizar un análisis comparativo entre planes. Se contrastan las diferencias entre los planes de trabajo y el avance real en interior mina. En particular, se comparan el PAM Propuesto y el PAM SGP con el avance real.

La Figura 37 muestra, para marzo–junio 2025, el PAM SGP, el avance real y el PAM Propuesto.

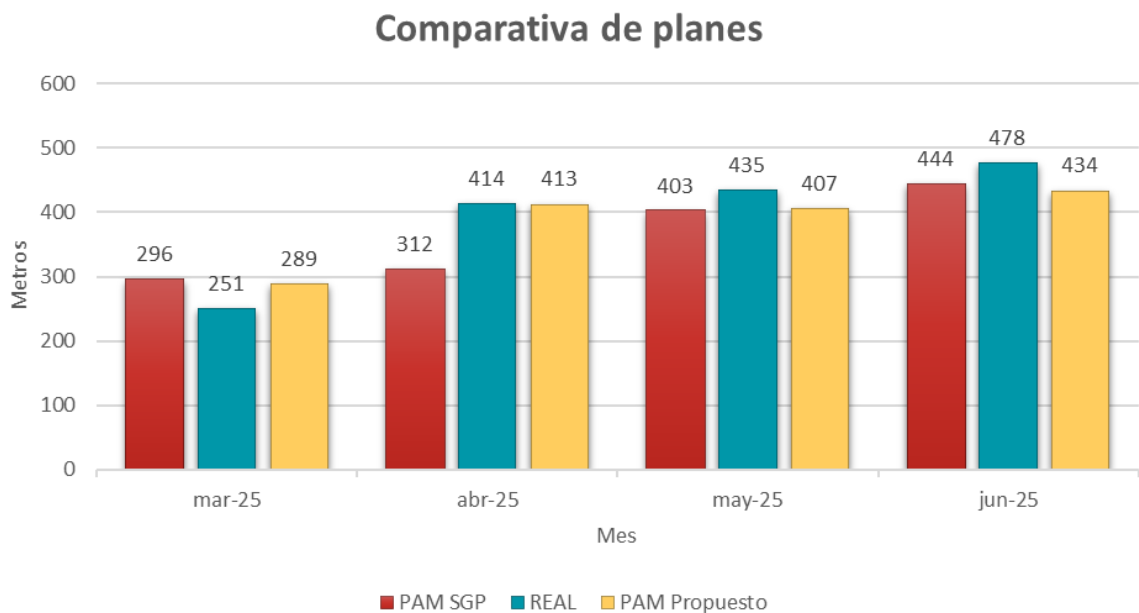


Figura 37. Comparativa de planes PAM Propuesto, REAL y PAM SGP.

El detalle mensual es el siguiente:

- Marzo. REAL = 251 m; PAM SGP = 296 m (+45 m); PAM Propuesto = 289 m (+38 m). Ambos sobreestiman, pero el Propuesto reduce la brecha respecto del SGP.
- Abril. REAL = 414 m; PAM SGP = 312 m (–102 m); PAM Propuesto = 413 m (–1 m). El Propuesto reproduce prácticamente el comportamiento real, mientras que el SGP queda rezagado por no capturar el salto de capacidad y la priorización de frentes que sí recoge la simulación.
- Mayo. REAL = 435 m; PAM SGP = 403 m (–32 m); PAM Propuesto = 407 m (–28 m). Mes con desvíos moderados, donde el Propuesto muestra ligera ventaja.
- Junio. REAL = 478 m; SGP = 444 m (–34 m); PAM Propuesto = 434 m (–44 m). Ambos subestiman el avance real, pero el PAM SGP queda 10 m más cerca.

4.4.3. Desviaciones en los planes

En esta subsección se cuantifica la desviación mensual de cada plan respecto del avance real para el periodo marzo–junio en MB S04–S05. La desviación se calcula como (Plan – Real) y se reporta en metros. Los valores positivos indican sobreestimación del avance y valores negativos indican subestimación.

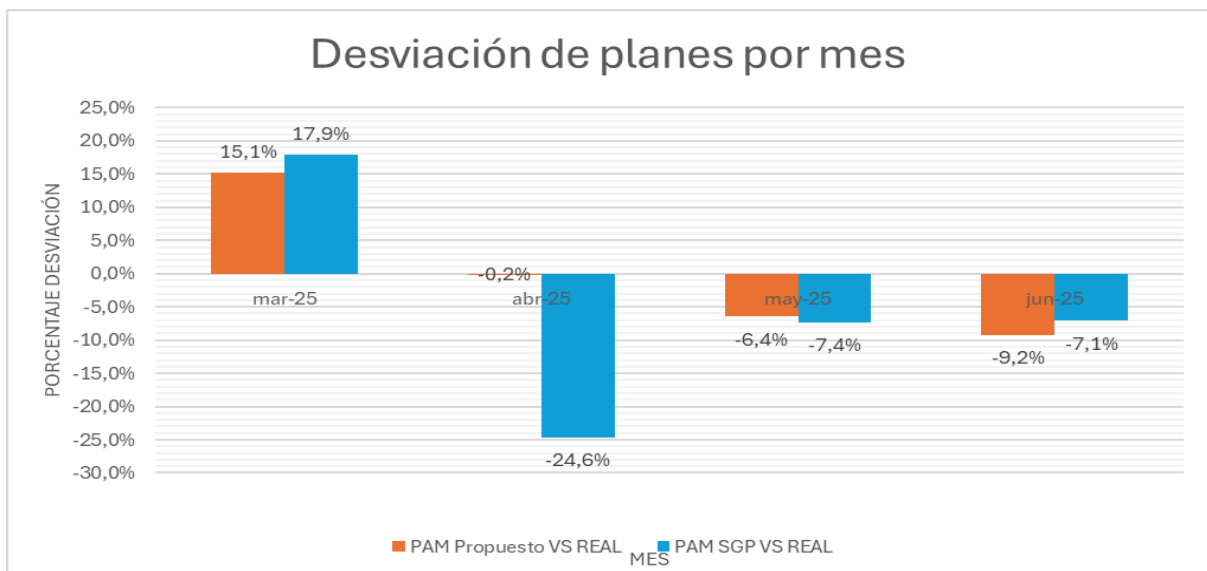


Figura 38. Desviación de planes respecto al avance real.

El gráfico en la Figura 38 muestra la diferencia en porcentaje de desviación utilizado en las comparaciones.

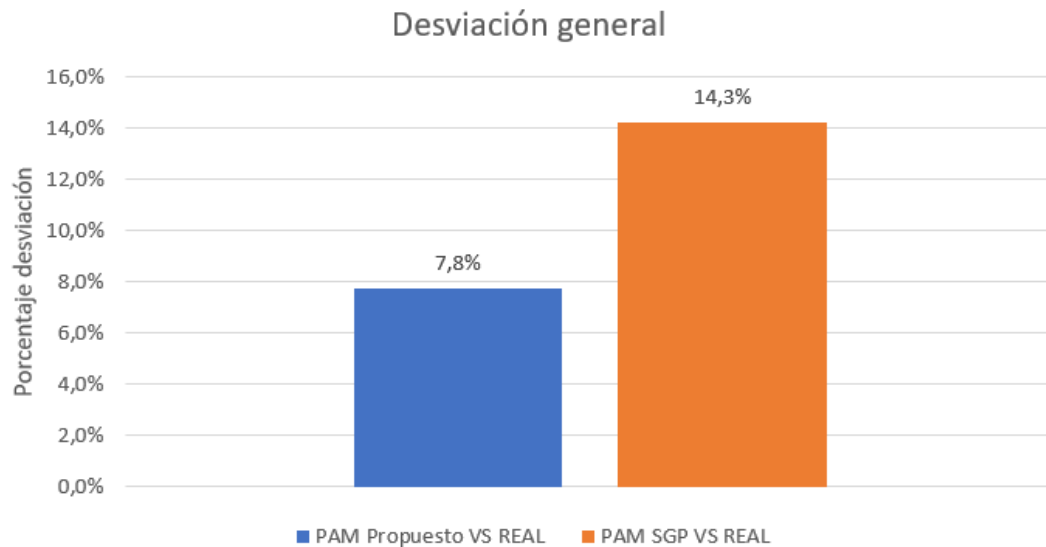


Figura 39. Desviación promedio de los planes en el periodo del caso de estudio.

Finalmente, el gráfico que se muestra en la Figura 39 muestra que el PAM SGP entregado por el área de preparación minera presenta una desviación promedio de 14,3% respecto del avance real en los meses de marzo a junio, mientras que el PAM Propuesto presenta 7,8% en el mismo periodo. Expresado en términos absolutos y tomando como base el avance real acumulado de 1.578 m, esto corresponde a una desviación acumulada de aproximadamente 226 m para el PAM SGP y 123 m para el PAM Propuesto.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el desarrollo de esta memoria se tuvo la oportunidad de crear e implementar una herramienta que integra optimización y simulación aplicada a la planificación minera, desde el largo plazo hasta el corto plazo, para la mina Chuquicamata Subterránea, en los macrobloques Sur 04 y 05. Mediante este modelo propuesto, se logró establecer en la parte de preparación minera que el plan de trabajo entregado por el programa es más preciso en comparación al método tradicional utilizado hasta ahora en el área.

En la creación de la herramienta, cada componente aporta una capa de certeza distinta. El agendamiento tipo RCPSP entrega la estructura factible del plan, ordena duraciones, precedencias y límites de capacidad y evita soluciones imposibles desde el origen. La simulación por turnos traduce ese plan a la realidad operativa, incorporando ventanas de ventilación y tronadura, compatibilidades y variabilidad de tiempos (Monte Carlo), con lo cual afina el calce diario y revela cuellos u holguras antes de ejecutarse. Finalmente, el referente de alcance máximo actúa como cota práctica basada en tronaduras y rendimientos típicos, útil para dimensionar la carga mensual y controlar expectativas. Juntas, estas tres piezas elevan la precisión del programa, reducen desviaciones y dejan un plan auditable y trazable que conversa bien con la operación.

Adicionalmente, en la segunda etapa, la implementación de una interfaz gráfica resultó ser una herramienta fundamental para facilitar la interacción entre el usuario y el programa. Esta interfaz permite gestionar eficazmente los datos de entrada, ajustar parámetros utilizados al igual que visualizar el sector en cual se estará trabajando, lo que incrementa la eficiencia operativa y el agrado del personal de preparación minera.

Con datos operativos vigentes, la herramienta mostró un desempeño consistente: la desviación promedio del plan mensual (PAM) bajó de 14,8% con el esquema tradicional a 7,8% con la metodología propuesta. En la comparativa mensual, abril fue el mes de mejor ajuste (diferencia de pocos metros respecto del avance real), y marzo también exhibió una brecha menor; en cambio, mayo y junio concentraron las mayores diferencias (del orden de decenas de metros), asociadas a ventanas operativas más restrictivas y traslados entre niveles. Aun así, el paquete de salidas (PAM, programación por turnos, reportes trazables y DXF/GLB) permitió anticipar cuellos, llenar vacíos de calendario y dejar una trazabilidad clara de decisiones. En síntesis, la herramienta hace el trabajo más simple y preciso que los métodos tradicionales: entrega planes ejecutables y auditables, reduce la

brecha plan–real y deja una base estandarizada para sostener la mejora continua de la planificación de preparación.

5.1. Recomendaciones

Se recomienda extender el programa a otros sectores y niveles de MCHS, con el propósito de estandarizar la metodología como práctica habitual del área de preparación. Adicionalmente, habilitar una red interna para la actualización continua del estado de frentes, que permita programación automática con monitoreo.

Para que la herramienta pase de prototipo a producto en el área de preparación, lo primero es estandarizar estrictamente los datos y las salidas. Esto implica congelar plantillas únicas de entrada (Frentes, Recursos, Tiempos de Ciclo, Calendarios), con nombres de campos, unidades y validaciones incorporadas; además de un diccionario de datos que defina códigos de actividades, reglas de precedencia y capas DXF. Del lado de los resultados, fija formatos y nombres de archivo invariables para que cualquier usuario pueda utilizarlos. Esta estandarización reduce errores, permite automatizar chequeos y viabiliza la integración con reportes y presentaciones sin retrabajos.

Mantener actualizados los tiempos de ciclo y parámetros operativos para asegurar el funcionamiento correcto del programa. Esta actualización mejora los KPIs reportados y permite representar con mayor fidelidad la operación en interior mina.

El programa tiene potencial para añadir a su repertorio de forma completa las actividades de OO.CC al programa.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Fernández, «Introducción a la Planificación de Obras Subterráneas,» Universidad de Chile, Santiago, Chile., 2021.
- [2] Codelco - Vicepresidencia de Proyectos, «Estudio de factibilidad mina Chuquicamata Subterránea,» Codelco, Santiago, Chile., 2009.
- [3] CODELCO, «Actualización dominios estructurales Chuquicamata Subterránea 2024,» Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD), CODELCO-Chile, Calama, Chile, 2024.
- [4] M. K y N. R, «Construction of the first macro block at the Chuquicamata Underground project,» de *Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining (pp. 127-139).*, Santiago, Chile., 2020.
- [5] C. Alford, M. Brazil y D. H. Lee, «Optimisation in Underground Mining,» de *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, New York, NY, USA, Springer, 2006, p. 561–577.
- [6] Google LLC, «Chuquicamata – Codelco (Google Maps),» Google, 18 Octubre 2024. [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Chuquicamata,+Codelco>.
- [7] Vicepresidencia de proyectos CODELCO, CHILE, «Estudio de prefactibilidad proyecto mina chuquicamata subterranea,» CODELCO - Chile, Santiago, 2009.
- [8] Vicepresidencia de proyectos CODELCO, CHILE, «Estudio de prefactibilidad Proyecto Mina Chuquicamata Subterranea,» Vicepresidencia de Proyectos (VP), CODELCO-Chile, Santiago, Chile., 2009.
- [9] M. R. Sandoval, «Optimización del plan de producción conjunto cielo abierto-subterránea,» CSIRO y AMTC, Santiago, Chile., 2018.

- [10] CODELCO (Chile), «Concepto de Macro Bloque, Unidad de explotación independiente.,» CODELCO-CHILE, Santiago, 2017.
- [11] V. Kazakidis, «Design and operating principles in caving methods.,» Conference handout, Montreal, Quebec, Canadá., 2012.
- [12] Camhi, «Optimización de los procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2012.
- [13] H. Toro, «Programación Multicriterio de Excavaciones Horizontales en el Corto Plazo.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2017.
- [14] Sepúlveda, «Plan Estratégico de Facilidades Constructivas para Preparación Minera Módulo Inicial de Explotación Proyecto Nuevo Nivel Mina.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2017.
- [15] J. Vásquez, «Optimización de planes mineros en minas explotadas por Panel Caving incluyendo actividades de preparación minera.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2017.
- [16] A. J, «Dimensionamiento de Distancias entre Puntos de Extracción y Niveles de Producción - Socavación para Método Panel Caving en Roca Primaria Mina El Teniente.,» División El Teniente (DET), CODELCO-Chile, Santiago, Chile., 2002.
- [17] L. D, «Metodología de asignación de recursos en desarrollos de minería subterránea.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2014.
- [18] A. M. Newman, E. Rubio, R. Caro, A. Weintraub y K. Eureka, «A Review of Operations Research in Mine Planning.,» *Interfaces*, vol. 40, nº 3, p. 222–245, 2010.

- [19] Gurobi Optimization, LLC, «Supported Problem Types,» Gurobi, 2024. [En línea]. Available: <https://www.gurobi.com/resources/supported-problem-types/>. [Último acceso: 17 02 2025].
- [20] W. A. Rocher Anda, «Secuenciamiento óptimo de preparación minera subterránea,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2012.
- [21] T. B. Johnson, «Optimum Open Pit Mine Production Scheduling,» University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA, 1968.
- [22] T. González, «Modelamiento del plan anual de preparación minera de la División El Teniente utilizando el modelo de optimización UDESS,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2018.
- [23] IBM, «What is Monte Carlo simulation?,» IBM, 2020. [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/cl-es/cloud/learn/monte-carlo-simulation>. [Último acceso: 24 05 2025].
- [24] G. Herrera Pino, «Análisis de la aplicabilidad de TBM en nivel de producción de minería Block,» niversidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago, Chile., 2021.

7. ANEXOS

7.1. Planes obtenidos de Agendamiento de Actividades

A continuación, se muestran los planes que fueron obtenidos por esa metodología, todos están pensados con el 100% de adherencia, si no se logra obtener un porcentaje de adherencia alto se debe volver a simular la optimización con lo que se alcanzó a realizar y lo que no se logró realizar.

Tabla 5. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de abril.

Nivel	Actividad	Metros	Área
ACA	GAL ACA S05 02 - 1	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 4	30	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 5	30	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 6	30	34.5
EXT	GAL EXS S05 01 - 2	36	26.8
EXT	GAL EXS S05 02 - 2	28	26.8
HD	CA HD S05 06 - 13	16	26.8
HD	CAB HD S05 03 - 3	31	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 4	30	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 5	30	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 6	31	19.9
INS	FR INS S05 12	11	20
INS	GAL INS S05 02 - 1	10	34.5
INS	GAL INS S05 03 - 3	22	34.5
INS	GAL INS S05 03 - 4	22	34.5
INS	GAL INS S05 03 - 5	20	34.5
NP	CAB PD S05 02 - 2	24	28
Total		406	

Tabla 6. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de mayo.

Nivel	Actividad	Metros	Área
ACA	GAL BZN S05 01 - 1	11	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 1	20	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 2	15	34.5
ACA	GAL BZN S05 02 - 3	27	34.5
EXT	GAL EXS S05 01 - 1	9	26.8
EXT	GAL EXS S05 02 - 1	7	26.8
HD	CA HD S05 10 - 14	22	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 1	13	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 2	42	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 1	29	19.9
HD	CAB HD S05 03 - 2	34	19.9
INS	GAL INS S05 03 - 1	29	34.5
INS	GAL INS S05 03 - 2	18	34.5
NP	CAB PD S05 02 - 1	11	28
Total		287	

Tabla 7. Plan de trabajo generado por Agendamiento de actividades mes de junio.

Nivel	Actividad	Metros	Área
ACA	GAL ACA S05 01 - 1	6	34.5
ACA	GAL ACA S05 01 - 2	5	34.5
ACA	GAL ACA S05 01 - 3	5	34.5
ACA	GAL ACA S05 01 - 4	2	34.5
ACA	GAL ACA S05 02 - 2	7	34.5
ACA	GAL ACA S05 02 - 3	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 10	24	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 11	31	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 4	7	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 5	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 6	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 7	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 8	5	34.5
ACA	GAL BZN S05 01 - 9	2	34.5
EXT	FR EXS S05 13 - 1	20	29.7
EXT	FR EXS S05 25 - 1	20	29.7
EXT	GAL EXS S05 01 - 4	24	26.8

HD	CA HD S05 01 - 11	26	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 3	30	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 4	31	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 5	30	19.9
HD	CAB HD S05 01 - 6	30	19.9
INS	FR INS S05 09	6	20
INS	FR INS S05 10	6	20
INS	FR INS S05 11	6	20
INS	GAL INS S05 02 - 2	30	34.5
INS	GAL INS S05 02 - 3	30	34.5
INS	GAL INS S05 02 - 4	30	34.5
NP	CAB PD S05 02 - 3	31	28
Total		464	29

7.2. Detección de frentes

Una parte del programa realiza esta labor, previamente el código se calibra y se le entre valores fijos de cota y diferencia entre niveles. Esto se realiza para la fácil detección de información de frentes y una manera qué nivel es la frente a tratar. El programa entrega un mensaje al momento de ejecutarlo como se observa en la Figura 45, para posterior almacenar esa información como la Figura x muestra, esos datos son ingresados directamente al programa por el programa para la simulación.

```

✖ Frentes detectados: 33
🎯 Nivel NA: 4 frente(s) detectado(s)
🎯 Nivel NE: 5 frente(s) detectado(s)
🎯 Nivel NH: 14 frente(s) detectado(s)
🎯 Nivel NI: 3 frente(s) detectado(s)
🎯 Nivel NP: 7 frente(s) detectado(s)

```

Figura 40. Afirmación de la localización de las frentes en el archivo DXF.

Tabla 8. Datos obtenidos de la detección de frentes por el programa.

nivel	x	y	z	azimut
NA	449,164	296,532	-84	270
NA	413,231	248,25	-84	270
NI	375,809	212,505	-22	272,28
NI	575,566	171,513	-22	268,89
NE	518,936	306,886	-34	262,53
NE	545,31	241,157	-34	271,84
NH	227,405	244,868	18	180
NH	231,63	244,858	18	0
NH	231,631	274,981	18	0
NH	218,076	274,858	18	180
NH	229,513	253,699	18	270
NH	244,363	305,02	18	0
NH	214,058	305,02	18	180
NH	438,988	305,02	18	180
NH	424,848	274,981	18	180
NH	410,114	244,858	18	180
NH	419,616	214,858	18	180
NH	422,031	207,752	18	270
NH	153,283	432,106	18	80,23
NH	155,423	444,526	18	270
NP	199,79	256,915	0	300,02
NP	470,818	254,859	0	260,83
NP	466,601	246,571	0	180
NA	92,241	334,614	-84	180
NP	180,498	276,474	0	180
NP	191,129	276,48	0	0
NP	460,13	276,449	0	180
NP	680,184	279,497	0	249,44
NA	416,379	265,595	-84	0
NI	208,231	166,399	-22	261,14
NE	436,681	286,036	-34	180
NE	424,109	287,374	-34	90
NE	448,444	286,038	-34	0

7.3. Cantidad de frentes por niveles

Las Figuras 41 a 44 muestran los gráficos con la cantidad de frentes por periodo que corresponden para cada nivel obtenidas del método de Agendamiento de actividades.

Cantidad de Frentes por Periodo

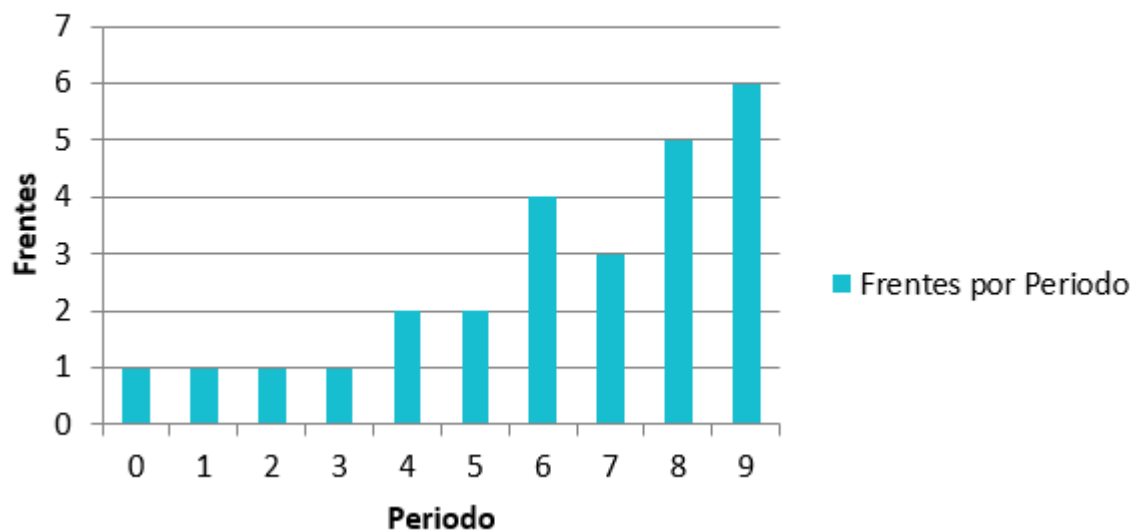


Figura 41. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Producción.

Cantidad de Frentes por Periodo

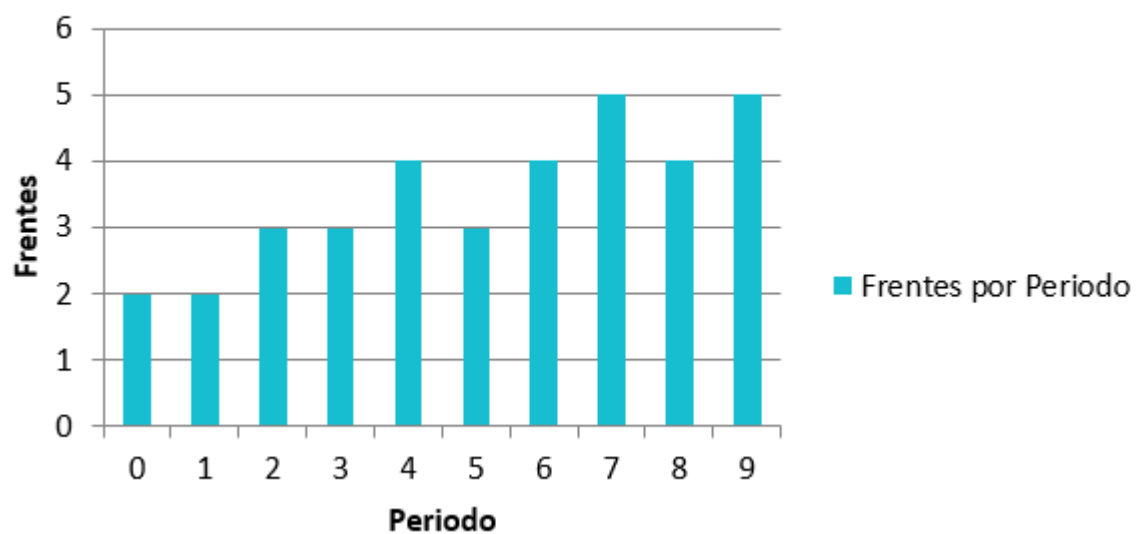


Figura 42. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Extracción.

Cantidad de Frentes por Periodo

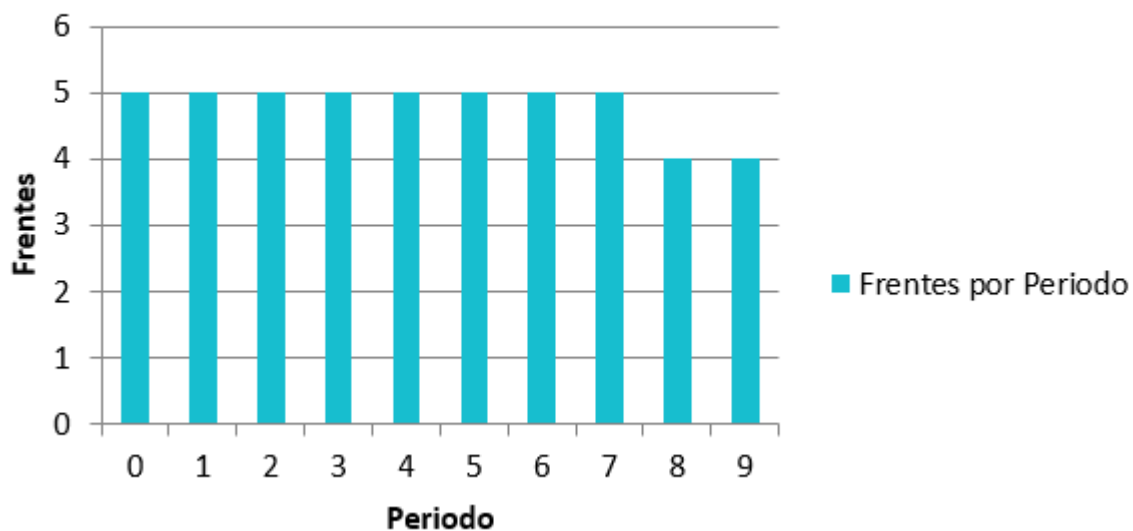


Figura 43. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Hundimiento.

Cantidad de Frentes por Periodo

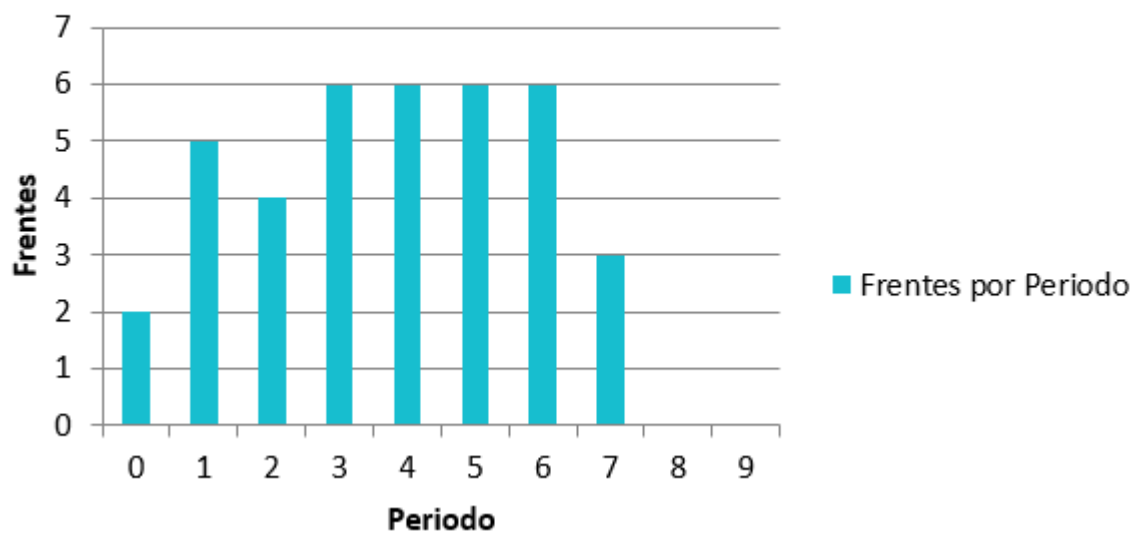


Figura 44. Gráfico de cantidad de frentes obtenido para el nivel de Inyección.

7.4. Resumen de los planes obtenidos

Los planes obtenidos a lo largo de todo el trabajo se encuentran en la Figura 45.

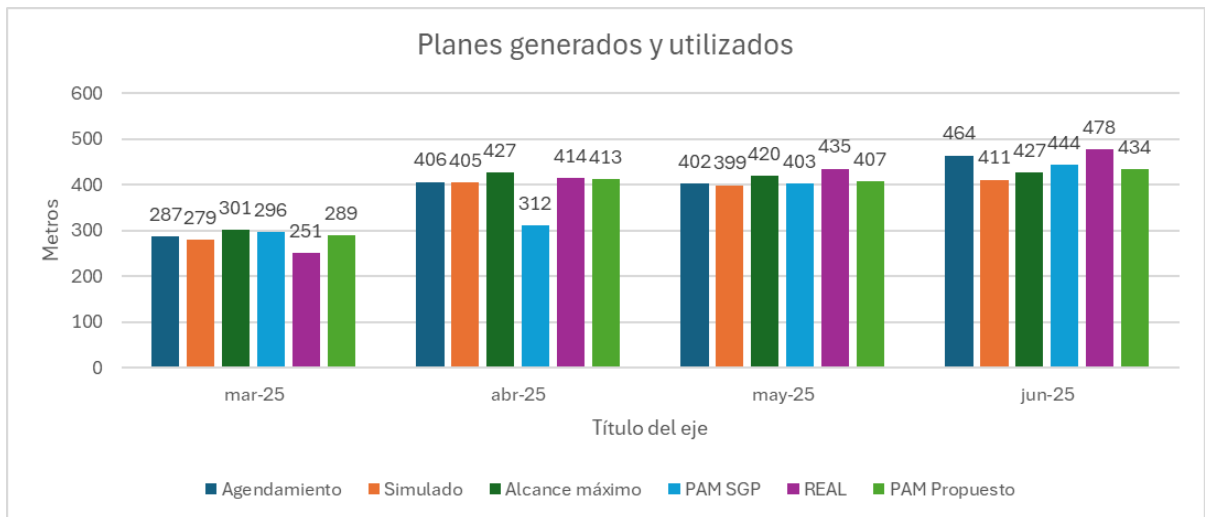


Figura 45. Compilado general de los planes del trabajo.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE MODELAMIENTO PARA OPTIMIZAR EL PLAN DE PREPARACIÓN MINERA EN MCHS		
Nombre Memorista: CARLOS JAVIER REBOLLEDO MARDONES		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. René Gómez P.
Calificación	7.0	
Fecha	04.12.2025	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor: Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Ramón Díaz N.		 Prof. Gonzalo Nelis S.
Resumen		
El estudio presenta una herramienta integrada para apoyar la planificación minera, desde el área de preparación minera en la mina Chuquicamata Subterránea, pensada para transformar el diseño en un plan ejecutable y trazable. La solución se organiza en tres piezas que trabajan juntas: (i) un agendamiento tipo RCPSP que ordena las labores de preparación según sus duraciones, precedencias y límites de capacidad, y con ello arma un plan base factible; (ii) un simulador operativo por turnos que baja ese plan a la realidad del interior mina, incorporando ventanas de ventilación y tronadura, compatibilidades entre labores y traslados de equipos entre niveles, además de la variabilidad de tiempos; y (iii) un referente de alcance máximo construido desde la lógica de las tronaduras y rendimientos típicos, que sirve como cota práctica para dimensionar la carga mensual y contrastar lo planificado. Con este conjunto, la planificación de preparación queda ordenada y verificable, y sus resultados se pueden usar directamente en terreno.		

La herramienta se apoya en una interfaz gráfica que centraliza parámetros (frentes, recursos, calendarios y reglas), valida consistencia mínima y produce salidas estandarizadas: plan de avance mensual, programación por turnos, reportes con trazabilidad de asignaciones y exportaciones espaciales (DXF/GLB). El caso de estudio se acota a macrobloques y horizonte de corto plazo con mayor incidencia operacional. La evaluación compara planes generados con planes existentes y ejecución real a través de métricas simples y trazables, identificando desalineaciones, cuellos de capacidad y holguras temporales antes de su ocurrencia en terreno.

En la práctica, la herramienta permitió dejar atrás planillas sueltas y trabajar con un plan único, trazable y fácil de revisar. El Plan de Actividades Mensual propuesto (PAM propuesto) fue más certero frente a lo que ocurrió en terreno: presentó desvíos menores respecto del avance real, anticipó cuellos de capacidad y ordenó mejor la asignación por turnos. Pensando en su adopción, la plataforma reúne a ingeniería y operación sobre la misma base de información (PAM, turnos y DXF/GLB), con visibilidad compartida y margen para acordar ajustes antes de que aparezcan los problemas. Además, el modelo mostró una desviación promedio cercana al 7,8% (versus ~14,3% del PAM SGP), y abril fue el mes de mejor ajuste, con una brecha prácticamente nula (≈ 1 m) respecto del avance real. Con esta base, el enfoque puede replicarse y escalarse a otros sectores de la mina sin cambiar la forma de trabajar.