

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



**SISTEMA DE GESTIÓN PARA ASIGNACIÓN DE RECURSOS
EN DESARROLLOS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA
CON MÚLTIPLES FRENTES**

Autor:
Sebastián Alejandro Cea Larenas

Memoria de Título para optar al título profesional de:

Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía:
Víctor Encina Montenegro

Profesor co-guía:
Carolina Herrera Pichihueche

2025
Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Sistema de gestión para asignación de recursos en desarrollos de minería subterránea con múltiples frentes

Nombre del candidato(a): Sebastián Alejandro Cea Larenas

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Ingeniería de Minas, Metalúrgica y de Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 26/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/08/2025

; Firma:

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

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, a mi padre, a mi madre, mi hermana y mi sobrina Josefa, quien fue un regalo que llenó de alegría y motivación para dar lo mejor de mí. Ellos han sido el motor y el pilar fundamental que me ha sostenido en todo este camino. Gracias por su apoyo incondicional, por sus sabios consejos, por inculcarme los valores que hoy me definen y por su constante sacrificio para que yo pudiera llegar hasta aquí.

Extiendo un agradecimiento especial a mis abuelos, Emperatriz y Oscar, quienes desde el cielo han sido mis segundos padres. Sé que su amor, cuidado y apoyo me han acompañado desde el primer día y que, de alguna forma, han estado presentes en cada paso que he dado.

A mi pareja, María José, quien ha sido, es y será un pilar esencial en mi vida. Gracias por tu amor incondicional, por tu compañía en los momentos más difíciles, por contenerme cuando más lo necesitaba y por motivarme a seguir adelante incluso en los días más duros. Has sido mi compañera de vida, mi apoyo constante y mi impulso para no rendirme.

A mis compañeros, quienes se convirtieron en grandes amigos y colegas. Gracias por su amistad sincera, por las risas compartidas, por el apoyo mutuo y por hacer que esta etapa universitaria sea inolvidable. Sin ustedes, este camino no habría sido igual.

A todos mis profesores, quienes contribuyeron a mi formación profesional y personal. Agradezco las enseñanzas, la confianza depositada en mí y las herramientas que me han entregado para desenvolverme como ingeniero y como persona. En especial, quiero destacar a mi profesor guía, Don Víctor Encina, por su constante disposición, por resolver mis dudas, orientarme en los momentos de incertidumbre y por brindarme oportunidades que han enriquecido este trabajo y mi formación.

Finalmente, este logro no es solo mío. Es de todos los que han estado a mi lado, de quienes me apoyaron y creyeron en mí cuando más lo necesitaba. A cada uno de ustedes, gracias por ser parte de este sueño hecho realidad.

SISTEMA DE GESTIÓN PARA ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN DESARROLLOS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA CON MÚLTIPLES FRENTE

Por: Sebastián Alejandro Cea Larenas

Resumen

Las labores de preparación mina son esenciales para garantizar la continuidad operativa y asegurar la futura extracción de mineral en los plazos y volúmenes planificados. La naturaleza secuencial y concurrente de las operaciones en múltiples frentes de trabajo exige una coordinación precisa de los recursos, ya que una planificación deficiente o asignaciones ineficientes pueden generar cuellos de botella, retrasos y costos.

En este trabajo se implementa una heurística para la asignación óptima de recursos en proyectos de preparación de mina subterránea con múltiples frentes, cuyo objetivo es mejorar los tiempos de ejecución y equilibrar la utilización de la flota disponible. La metodología se validó a través de 300 simulaciones sobre un caso base real, comparando el desempeño de la planificación tradicional con el modelo propuesto.

Los resultados muestran que el modelo heurístico reduce la duración total del proyecto, considerando solo tiempo efectivo de trabajo, de 81 días a 73 días, representando así una disminución del 9,9%. Asimismo, eleva los factores de utilización desde valores inferiores al 15% y superiores al 50%, hasta un rango óptimo del 30% al 50% para la mayoría de los recursos, evitando la sobrecarga de unidades críticas y asegurando un reparto equitativo de la carga operativa. Esta redistribución equilibrada contribuye a minimizar tiempos ociosos y a maximizar la productividad global del sistema.

El modelo desarrollado demuestra ser una herramienta robusta y adaptable para la planificación minera, ofreciendo una asignación eficiente y coherente con las restricciones operativas. Su aplicación puede aportar ventajas competitivas tanto para empresas mandantes como contratistas, al permitir simular distintos escenarios y optimizar el uso de recursos en condiciones reales de operación.

RESOURCE ALLOCATION MANAGEMENT SYSTEM FOR UNDERGROUND MINING DEVELOPMENTS WITH MULTIPLE FACES

By: Sebastián Alejandro Cea Larenas

Abstract

Mine preparation works are essential to ensure operational continuity and to guarantee future ore extraction within the planned timeframes and volumes. The sequential and concurrent nature of operations across multiple working faces demands precise resource coordination, as poor planning or inefficient assignments can generate bottlenecks, delays, and increased costs.

This work implements a heuristic for the optimal allocation of resources in underground mine preparation projects with multiple faces, aiming to improve execution times and balance the utilization of the available fleet. The methodology was validated through 300 simulations on a real baseline case, comparing the performance of traditional planning with that of the proposed model.

Results show that the heuristic model reduces the total project duration, considering only effective working time, from 81 days to 73 days, representing a 9.9 % decrease. Furthermore, it increases utilization factors from unbalanced values below 15 % and above 50 % to an optimal range of 30 % to 50 % for most resources, thus avoiding the overloading of critical units and ensuring an equitable distribution of operational workload. This balanced redistribution contributes to minimizing idle times and maximizing the system's overall productivity.

The developed model proves to be a robust and adaptable tool for mining planning, offering efficient allocation aligned with operational constraints. Its application can provide competitive advantages for both owners and contractors by enabling the simulation of different scenarios and optimizing resource use under real operating conditions.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Introducción General	9
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo general	11
1.2.2. Objetivos específicos	11
1.3. Alcances	11
2. Marco teórico	12
2.1. Métodos de explotación	12
2.1.1. Método de Hundimiento por Paneles	13
2.2. Preparación minera	15
2.2.1. Desarrollos horizontales	16
2.3. Planificación de la preparación minera	18
2.4. Metodología actual de asignación de recursos preparación mina	19
2.5. Indices operacionales	20
2.5.1. Normas ASARCO	20
2.5.2. Indicadores clave	21
3. Metodología	22
4. Desarrollo del modelo	23
4.1. Formulación	23
4.1.1. Parámetros de entrada	24
4.1.2. Sets	24
4.1.3. Variables de decisión	25
4.1.4. Función objetivo	26
4.1.5. Restricciones	26
4.2. Supuestos y simplificaciones	28
5. Implementación del modelo heurístico	29
5.1. Preparación de datos	29
5.2. Asignación dinámica de recursos	30
5.3. Evolución del sistema y control de restricciones	31
5.4. Registro de resultados y adaptabilidad del modelo	32

6. Antecedentes Caso de estudio	33
6.1. Introducción	33
6.2. Proyecto Mina Norte - Recursos Norte (MN-RRNN)	35
6.2.1. Frentes de trabajo consideradas	37
6.2.2. Recursos utilizados	39
6.3. Resultados generales del proyecto	40
7. Análisis y resultados	45
7.1. Caso de estudio: Aplicación modelo heurístico	45
7.1.1. Tiempo total de trabajo efectivo	46
7.1.2. Carga operativa por actividad	47
7.1.3. Utilización de recursos y desempeño de equipos	48
7.1.4. Distribución de la carga de trabajo acumulada por frente	54
7.1.5. Asignación de equipos	56
7.2. Análisis de sensibilidad	58
8. Conclusiones y recomendaciones	61
8.1. Conclusiones	61
8.2. Recomendaciones	62
A. Anexos	63
1. Archivos de entrada del algoritmo de simulación	63
2. Distribución normal según operación unitaria del ciclo minero	68

Índice de figuras

2.1. Clasificación para los métodos de explotación subterráneos por Brady & Brown (González 2018).	12
2.2. Esquema de explotación de hundimiento por paneles.	14
2.3. Actividades del ciclo de avance en desarrollos horizontales.	17
2.4. Definición gráfica de tiempos según la norma ASARCO.	20
6.1. Ubicación del Proyecto Recursos Norte en Mina El Teniente (Vista Isométrica).	33
6.2. Planta Nivel de Producción	36
6.3. Alcance específico Nivel de Producción - Proyecto Recursos Norte	36
6.4. Porcentaje de duración de cada actividad del ciclo de avance en desarrollos horizontales.	41
6.5. Comparación entre tiempo de trabajo y factor de utilización.	41
6.6. Factor de utilización para actividad de Shotcrete. Asignación manual.	42
6.7. Factor de utilización para actividad Carguío de Explosivos y Quema. Asignación manual.	42
6.8. Factor de utilización para actividad Instalación de Malla. Asignación manual.	42
6.9. Factor de utilización para actividad Perforación Pernos de Fortificación. Asignación manual.	42
6.10. Factor de utilización para actividad Retiro de Marinas. Asignación manual.	43
6.11. Factor de utilización para actividad Acuñadura. Asignación manual.	43
6.12. Factor de utilización para actividad Perforación de Disparo. Asignación manual.	43
6.13. Tiempo acumulado de trabajo por postura.	44
7.1. Porcentaje de duración de cada actividad del ciclo de avance en desarrollos horizontales (simulación modelo heurístico).	47
7.2. Comparación entre tiempo de trabajo y factor de utilización.	49
7.3. Factor de utilización para actividad de Shotcrete. Modelo heurístico.	49
7.4. Factor de utilización para actividad Carguío de Explosivos y Quema. Modelo heurístico.	49
7.5. Factor de utilización para actividad Instalación de Malla. Modelo heurístico.	50
7.6. Factor de utilización para actividad Perforación Pernos de Fortificación. Modelo heurístico.	50
7.7. Factor de utilización para actividad Retiro de Marinas. Modelo heurístico.	50
7.8. Factor de utilización para actividad Acuñadura. Modelo heurístico.	50
7.9. Factor de utilización para actividad Perforación de Disparo. Modelo heurístico.	50

7.10. Tiempo acumulado de trabajo por postura (simulación modelo heurístico). . .	54
7.11. Carta Gantt caso de estudio con aplicación modelo heurístico.	56
A.1. Función de Densidad de Probabilidad - Acuñadura	68
A.2. Función de Densidad de Probabilidad - Carguío de explosivos y Quema . . .	68
A.3. Función de Densidad de Probabilidad - Instalación de Malla	68
A.4. Función de Densidad de Probabilidad - Perforación de Disparo	69
A.5. Función de Densidad de Probabilidad - Perforación Pernos de Fortificación .	69
A.6. Función de Densidad de Probabilidad - Retiro de Marinas	69
A.7. Función de Densidad de Probabilidad - Shotcrete	69

Índice de Tablas

2.1. Clasificación de la preparación minera. (Camhi 2012)	15
6.1. Siglas de operaciones unitarias del ciclo de avance.	37
6.2. Condiciones iniciales de labores según realidad operacional.	37
6.3. Flota de equipos disponibles.	39
6.4. Resumen mensual de estadísticas principales del proyecto.	40
7.1. Estadísticas básicas sobre duración del proyecto.	46
7.2. Comparación porcentual del tiempo por operación unitaria entre los escenarios de estudio.	48
7.3. Comparación de utilización de equipos para ambos casos de estudio.	51
7.4. Comparación distribución porcentual promedio de utilización por operación unitaria	52
7.5. Frentes con mayor tiempo acumulado.	55
7.6. Ponderadores para análisis de sensibilidad.	58
7.7. Detalle variación de tiempos operaciones unitarias en análisis de sensibilidad.	59
7.8. Detalle variación de equipos en análisis de sensibilidad.	59
7.9. Detalle variación en tiempos de traslados en análisis de sensibilidad.	60
A.1. Parámetros de distribución de tiempos para operaciones unitarias.	63
A.2. Base de datos inicial de posturas, operaciones unitarias y cantidad de disparos.	63
A.3. Cantidad de cruces según calle del proyecto MN-RRNN.	65
A.4. Listado de equipos para aplicación del modelo.	65
A.5. Matriz de tiempos de traslado entre posturas en minutos.	66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción General

Las obras de preparación minera son fundamentales para garantizar la producción futura de una manera oportuna y en los volúmenes requeridos. Esta actividad establece la ruta crítica para el inicio y desarrollo operacional de un proyecto, así las actividades de desarrollo y construcción de infraestructuras como mecánicas, eléctricas, de instrumentación y civiles, se requieren para incorporar áreas que permitan la continuidad de la explotación, por otra parte, la gestión de recursos y el control riguroso de las actividades planificadas, aseguran la continuidad operacional para así alcanzar los resultados esperados del proyecto (Camhi [2012](#)).

Es así, como la preparación minera abarca tanto las obras de infraestructura y también obras de operación. En cuanto a la infraestructura, estas incluyen los accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación, los cuales son necesarios para la posterior producción en un sector determinado, por otro lado, las obras de operación engloban la construcción de los diferentes niveles que contempla el proyecto minero (Salgado [2009](#)).

El hundimiento por paneles es uno de los métodos de extracción de minerales que se utiliza en minería subterránea, el cual presenta la necesidad de construir desarrollos horizontales antes que el resto de la infraestructura. Estos desarrollos establecen las vías de acceso y transporte dentro de la mina. La ejecución de estas obras requiere la realización coordinada de numerosas actividades para completar cada ciclo de avance, además de gestionar de manera sincronizada la concurrencia de múltiples frentes de trabajo y la movilización de amplias flotas de equipos para llevar a cabo estas tareas (Toro [2017](#)).

En esta misma línea, el avance del desarrollo minero se logra a través de una secuencia crítica de actividades como perforación, tronadura, carguío, fortificación, etc. Estas actividades permiten la creación y optimización de las diferentes infraestructuras dentro de los yacimientos, repercutiendo en términos económicos, de seguridad y eficiencia temporal (Rabajille [2017](#)).

Por otro lado, las técnicas de simulación han sido usadas exitosamente en diversas industrias durante mucho tiempo y se ha demostrado que estas técnicas son ventajosas para el proceso de planificación minera, pronosticando el rendimiento de los sistemas modelados y probando distintas alternativas a bajo costo (Li [2012](#)).

En este sentido, y considerando que se debe optimizar la planificación de las operaciones mineras, el presente trabajo de memoria se centra en implementar una gestión de equipos utilizando una heurística de laboreo, que facilite la redistribución de la flota para mejorar los rendimientos, lo cual se traducirá en una administración eficiente del tiempo de trabajo. Esta herramienta apunta a la asignación óptima de las distintas cuadrillas encargadas de ejecutar las diversas operaciones unitarias que conforman el ciclo de excavación y refuerzo del laboreo minero para sistemas de hundimiento por paneles. Para lograr el cumplimiento de este sistema de gestión y lograr una reducción en los tiempos de desarrollo del ciclo y maximizar la productividad, se debe identificar áreas de oportunidad de mejora en proyectos ejecutados, para posteriormente diseñar y desarrollar un algoritmo que trabaje en base a una heurística de trabajo para el apoyo en la toma decisiones y evaluar su efectividad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Implementar una heurística para la asignación óptima de recursos y planificación de múltiples frentes de trabajo en proyectos de obras de preparación mina.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar áreas de oportunidad para mejorar y optimizar la gestión de recursos bajo un caso base.
- Diseñar y desarrollar una heurística específica que incorpore reglas y criterios para la asignación óptima de recursos y tiempos de trabajo.
- Elaborar un algoritmo que implemente la heurística desarrollada, permitiendo el análisis de su impacto en la eficiencia operativa.
- Comparar la efectividad del modelo propuesto mediante su implementación en el caso de estudio y analizar cómo influye su impacto en la toma de decisiones.

1.3. Alcances

- Se considera únicamente las operaciones unitarias del ciclo de avance en minería, excluyendo aquellas operaciones no secuenciales que se relacionen con obras civiles u otras áreas.
- El horizonte temporal de la ejecución de las actividades de excavaciones horizontales es de corto plazo.
- El trabajo se enfoca en aspectos técnicos, por lo tanto, no se contempla ningún análisis económico en este.
- Los datos empleados son reales y provienen de fuentes confiables, para así garantizar que los resultados obtenidos sean precisos, comparables con la realidad y válidos al ser comparados y verificados.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Métodos de explotación

La minería subterránea comprende diversos métodos de explotación, cada uno adaptado a las condiciones únicas de cada yacimiento. (Brady y Brown 2006) clasifican estos métodos en tres categorías principales según el tipo de soporte: soportados por pilares, artificialmente soportados y sin soporte o por hundimiento. Esta clasificación proporciona una estructura útil para entender los distintos enfoques en la minería subterránea.

A continuación, en la Figura 2.1 se visualizan las diferentes categorías propuestas:



Figura 2.1: Clasificación para los métodos de explotación subterráneos por Brady & Brown (González 2018).

La selección del método de explotación más adecuado es un proceso complejo que considera múltiples factores. Entre estos se incluyen las características geométricas y espaciales del depósito, la resistencia de la roca circundante y del cuerpo mineralizado, y el valor económico del mineral (Herrera 2020). Dada la singularidad de cada yacimiento y el constante avance tecnológico en la industria, cada mina requiere un método de explotación adaptado a sus condiciones específicas, aunque pueda clasificarse dentro de una familia de métodos más amplia.

2.1.1. Método de Hundimiento por Paneles

El método de hundimiento por paneles, una evolución del Block Caving, se ha convertido en una técnica de explotación subterránea fundamental para yacimientos masivos, especialmente en el contexto de la profundización de los depósitos minerales. Esta metodología se destaca por su capacidad para alcanzar ritmos de producción comparables a los de la minería a cielo abierto, ofreciendo una alternativa eficiente para la extracción de minerales en roca primaria.

El principio básico del método hundimiento por paneles consiste en realizar un corte basal horizontal en el macizo rocoso, aprovechando el efecto gravitacional para propagar el hundimiento en altura. A diferencia del hundimiento por bloques, donde se socava todo el bloque a extraer de una vez, el hundimiento por paneles se caracteriza por una socavación parcial y constante en el tiempo, generando un frente de hundimiento dinámico que avanza progresivamente. Este enfoque permite una mayor flexibilidad en la explotación y una mejor adaptación a las condiciones cambiantes del yacimiento. Además, el método requiere un mínimo de perforación y tronadura para la extracción del mineral, ya que la fragmentación se produce principalmente por las tensiones internas del macizo y la fuerza de la gravedad, lo que contribuye significativamente a su eficiencia económica y operativa.

La implementación exitosa del método de hundimiento por paneles requiere el desarrollo de una infraestructura subterránea compleja, compuesta por diversos niveles que proporcionan el soporte esencial para una extracción eficiente y segura. Cada uno de estos niveles cumple una función específica en el proceso de explotación, desde la preparación del macizo rocoso hasta la extracción y transporte del mineral. A continuación, se detallan los niveles principales (González 2018):

- **Nivel de Hundimiento (NH):** Nivel en el cual se produce la socavación del macizo rocoso. Dicha socavación se lleva a cabo mediante perforación y tronadura. Realizada la socavación, se realiza la conexión con el Nivel de Producción a través de las bateas, punto en el cual se extrae el mineral fragmentado.
- **Nivel de Producción (NP):** Nivel en donde se realiza la extracción del mineral fragmentado. Esta extracción se realiza utilizando equipos mecanizados (LHD) los cuales extraen el mineral desde los puntos de extracción para posteriormente depositarlo en piques de traspaso.
- **Nivel de Acarreo (NA):** En este nivel se recolecta y transporta el material proveniente del Nivel de Producción y que ha descendido a través de los sistemas de traspaso. El transporte usualmente se realiza mediante camiones o ferrocarril.
- **Subnivel de Ventilación (SNV) :** Subnivel mediante el cual se realiza la inyección y extracción de aire, hacia y desde la mina respectivamente. Su diseño estará dado según los requerimientos propios de la mina en términos de los caudales necesarios para la extracción efectiva del aire viciado que se genera por la ejecución de las diferentes actividades dentro de la mina.

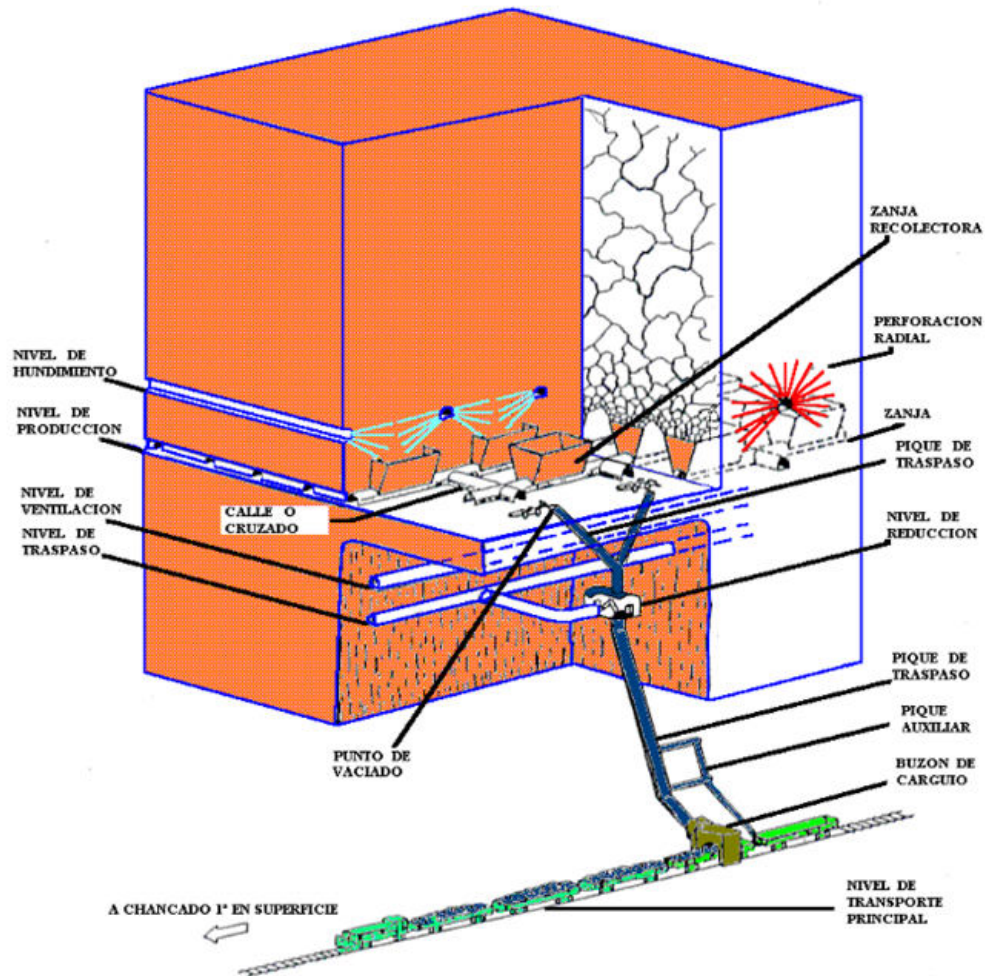


Figura 2.2: Esquema de explotación de hundimiento por paneles.

2.2. Preparación minera

La preparación minera constituye un pilar fundamental en la minería subterránea, especialmente en el método de explotación de hundimiento por paneles. Esta actividad abarca un conjunto de procesos y desarrollos previos a la extracción del mineral, cuya adecuada planificación y ejecución son cruciales para asegurar el acceso oportuno a las reservas del macizo y evitar pérdidas económicas significativas.

En esencia, la preparación minera se define como el conjunto de actividades de desarrollo de túneles y construcción de infraestructura en los diferentes niveles o sectores que serán utilizados para la incorporación de un área que permita el inicio o la continuidad de la explotación. Estas labores se realizan de manera continua y secuencial durante todo el ciclo de vida de la operación minera, siendo vital mantener su ritmo para no comprometer las metas productivas (Contreras [2016](#)).

Ahora bien, este conjunto de actividades y procesos se pueden dividir en dos etapas principales. La primera corresponde a la infraestructura de pre-producción, que comprende la habilitación de los elementos necesarios para la producción de un sector, incluyendo accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación. La segunda etapa abarca la infraestructura de explotación, que incorpora el resto de las actividades de preparación minera en todos los niveles involucrados en el proyecto, ejecutándose simultáneamente con la explotación de la mina, permitiendo la habilitación progresiva de nuevas áreas productivas y garantizando el cumplimiento de los planes de producción establecidos (González [2018](#)).

Por otro lado, estas actividades pueden ser divididas en tres grandes grupos:

Tabla 2.1: Clasificación de la preparación minera. (Camhi [2012](#))

Excavaciones Mineras	Obras Civiles	Montaje de Infraestructura
Corresponden a los desarrollos horizontales y verticales y todas las actividades asociadas a éstos, como la fortificación de galerías, el saneamiento de éstas y la estabilización de sectores.	Son las obras cuya materialización principal es el Hormigón Armado. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento, éstos últimos cumplen la función de fortificación definitiva de una zona en producción.	Esta actividad corresponde a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto. Con normalidad se ejecutan posteriormente a las obras civiles. Ejemplos de estas actividades son el montaje y la habilitación de buzones de carguío y plate feeders, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

2.2.1. Desarrollos horizontales

Los desarrollos horizontales son una parte fundamental y crítica en la construcción de minas subterráneas, especialmente en métodos como el hundimiento por paneles. Estas excavaciones, que incluyen accesos, rampas y galerías interiores del footprint, se realizan en todos los niveles de la mina y son cruciales para determinar si un proyecto minero se entregará en el plazo establecido. La importancia de estos desarrollos radica en que preceden a todas las demás obras necesarias para preparar el área de explotación.

Estos abarcan una variedad de obras, incluyendo la excavación de cruzados y conexiones en el nivel de hundimiento, calles y zanjas en el nivel de producción, galerías de ventilación, y cruzados en el nivel de acarreo (Contreras 2016). Estas obras no solo son esenciales para la estructura de la mina, sino que también permiten la posterior construcción de obras civiles y el montaje de infraestructura necesaria para el funcionamiento de la mina.

El método principal utilizado para estas excavaciones es el de perforación y tronadura, que aprovecha la fuerza de los explosivos para arrancar la roca y avanzar en la construcción del túnel. Este proceso sigue una secuencia de operaciones unitarias que permiten tanto la excavación como la fortificación de las galerías y túneles. Aunque existen métodos mecanizados, como el uso de máquinas tuneladoras (TBM), estos son menos comunes en la minería subterránea debido a las limitaciones en radios de curvatura y la necesidad de desarrollos más flexibles (Gacitúa 2012).

Si bien existen diferentes alternativas para realizar estos desarrollos, el uso de perforación y voladura está ampliamente extendido en la minería actual, y el mismo implica cumplir con las distintas etapas del ciclo minero ilustrado en la Figura 2.3:

1. **Perforación de frente:** se perfora el diagrama de disparo utilizando un jumbo. La duración depende de la sección de la frente, el número de tiros y la longitud de perforación.
2. **Carguío de explosivos:** se cargan los explosivos en los tiros perforados, ya sea manualmente o con equipos especializados, dependiendo del tipo de explosivo utilizado.
3. **Tronadura:** Detonación controlada de los explosivos para fragmentar la roca y avanzar en la excavación. Incluye el aislamiento del área de mínimo 300 metros y la posterior ventilación.
4. **Ventilación:** se realiza para evacuar los gases producidos por la tronadura. Dura aproximadamente 30 minutos y debe cumplir con los límites permisibles de contaminantes establecidos por la normativa.
5. **Extracción de marina:** se utiliza un equipo LHD o Scoop para remover y transportar la roca fragmentada (marina) desde el frente de avance hasta los puntos de vaciado o acopio designados. Este proceso se repite hasta dejar el frente libre de roca fragmentada.

6. **Levantamiento topográfico:** Este proceso permite verificar el avance real de la excavación, controlar la sobre excavación, actualizar los planos de la mina y guiar las actividades de fortificación subsiguientes.
7. **Acuñadura mecanizada:** consiste en eliminar las rocas sueltas producto de la tronadura. Se realiza de forma manual o con equipos especializados, utilizando barretillas de seguridad o acuñadores mecánicos.
8. **Perforación de pernos:** primera actividad de fortificación. Se realiza la perforación e instalación de pernos del tipo “Split Set”. El perno Split Set se utiliza principalmente como soporte temporal en excavaciones subterráneas. Para su instalación se utiliza un jumbo o equipo de perforación radial, en la frente de avance. Una vez fortificada la frente se procede a perforar las paredes y el techo para posteriormente instalar pernos helicoidales.
9. **Colocación de pernos y malla:** instalación de los pernos helicoidales perforados anteriormente, usando una mezcla de cemento especial para su fijación, conocida como lechada, y colocación de malla de refuerzo, la cual se fija o adosa al cerro mediante un proceso conocido como “hilteo” con el uso de un taladro percutor. Se utilizan equipos especializados como jumbos apernadores y grúas con jaula de protección.
10. **Proyección de shotcrete:** aplicación de hormigón proyectado sobre las paredes de la excavación para fortalecer la galería. Se realiza con un equipo Mixer el cual transporta la mezcla desde la planta hacia la frente, para que así se haga uso del equipo Roboshot, el cual aplica capas sucesivas hasta alcanzar el espesor requerido del shotcrete, que corresponde a la mezcla proyectada de forma ascendente y en avance.

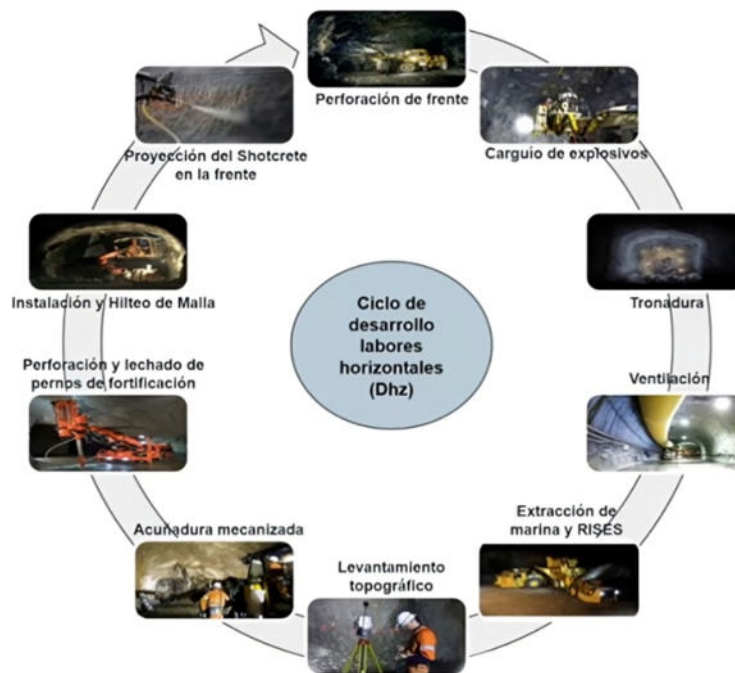


Figura 2.3: Actividades del ciclo de avance en desarrollos horizontales.

2.3. Planificación de la preparación minera

La planificación en obras de preparación minera es un proceso que se desarrolla en diferentes horizontes temporales para asegurar la continuidad y eficiencia de las operaciones mineras.

En el caso de la División El Teniente, específicamente la GRMD (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo), este proceso se estructura en siete diferentes planes relacionados a la planificación, cada uno con objetivos y alcances distintos, como se muestra a continuación (Salgado 2009):

- **Plan de Negocios Divisional (PND):** Plan de largo plazo que abarca un horizonte de 6 a 50 años. Este plan proporciona una visión global de las obras requeridas para cumplir con los planes de producción a largo plazo, estableciendo así las bases para la planificación estratégica de la mina.
- **Programa Quinquenal:** Este programa tiene una perspectiva de mediano plazo con un horizonte de 1 a 5 años, detalla los volúmenes anuales de obras necesarias para cumplir con los planes de producción. Incluye tanto los sectores en operación como aquellos que iniciarán su explotación en el período de cinco años, ofreciendo una visión más concreta de las necesidades de preparación minera a mediano plazo.
- **Programa de Preparación Minera Revisión A:** Se presenta con un horizonte de un año, establece los volúmenes de obras que se considerarán en el Presupuesto de Preparación y sirve como base para las Autorizaciones de Gastos Diferidos (AGD).
- **Programa de Preparación Minera Revisión B:** Este programa tiene un horizonte anual, ofreciendo un nivel de detalle mayor. Este programa, emitido por la GRMD, proporciona los lineamientos de crecimiento para cada sector y los requerimientos mensuales de incorporación de área. Además, incluye los hitos de preparación minera necesarios para sustentar y dar continuidad a la producción. La GOBM (Gerencia de Obras Mina) es la encargada de incorporar en detalle todas las actividades de preparación minera que se deberán desarrollar mes a mes para cumplir con estos hitos.
- **Programa Actualizado Mensual (PAM):** Este programa de corto plazo, con un horizonte de un mes, ajusta la programación realizada en el Rev. B según los avances de obras y rendimientos obtenidos el mes anterior, permitiendo una adaptación continua a las realidades operativas.

2.4. Metodología actual de asignación de recursos preparación mina

En la actualidad, la asignación de recursos en el proceso de despacho de la preparación minera subterránea se basa en una programación secuencial y manual, en la que los recursos disponibles —principalmente equipos de desarrollo como jumbos, LHDs, empernadores y shotcreteros— son asignados de acuerdo con la planificación diaria o programa PAM (Programa Actualizado Mensual), que ajusta las prioridades de avance turno a turno.

El ciclo de avance típico comprende una serie de operaciones unitarias: perforación, carguío de explosivos, tronadura, ventilación, limpieza (extracción de marina), acunadura, fortificación primaria (empernado y enmallado) y proyección de shotcrete. Cada una de estas actividades requiere un recurso especializado (un tipo de equipo o cuadrilla), y la gestión actual sigue una lógica de primera disponibilidad: una vez liberado un frente o finalizada una tarea, el recurso es asignado al siguiente frente disponible de manera secundada por prioridades de producción, sin una optimización global de los recursos.

La selección de los frentes a trabajar prioriza la apertura de nuevas áreas operativas mediante el desarrollo de las calles con mayor cantidad de intersecciones abiertas, es decir, se favorecen aquellas zonas cuya excavación habilita un mayor número de frentes de explotación futura, práctica conocida como priorización por generación de frentes.

Actualmente, el sistema de despacho se apoya en información de terreno y reportabilidad manual de avance de labores, con apoyo de los registros históricos de productividad de cada equipo, pero no incorpora una heurística automatizada ni una optimización dinámica de la asignación de recursos. Esto conlleva a que existan tiempos muertos asociados a la espera de equipos y desincronizaciones en el ciclo de avance, afectando los tiempos de ciclo y, en consecuencia, el ritmo de desarrollo de la mina (Saayman [2005](#)).

Asimismo, no se contempla un análisis multicriterio simultáneo; las decisiones son generalmente reactivas ante atrasos o contingencias operativas y no basadas en una simulación previa del mejor escenario de asignación. Esto limita la capacidad de maximizar el uso efectivo de flota (horas-equipos trabajadas), impactando negativamente en indicadores como la productividad de avance (metros/mes) y el cumplimiento de hitos de desarrollo (Lavado Abarzúa [2014](#)).

2.5. Índices operacionales

2.5.1. Normas ASARCO

La norma ASARCO es un marco de referencia utilizado para definir conceptos y categorizar los tiempos operativos de equipos, máquinas e instalaciones en minería. Además, constituye una herramienta estratégica para mejorar la eficiencia y gestión de recursos en la industria minera. En la Figura 2.4 se muestra la distribución de tiempos según la norma ASARCO.

Tiempo Nominal					
Tiempo disponible				Fuera de servicio (M/R)	
				Programadas	Imprevistos
Tiempo operativo				Reservas	
Tiempo efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras			
		Programadas	No Programadas		

Figura 2.4: Definición gráfica de tiempos según la norma ASARCO.

- **Tiempo Nominal:** Periodo total bajo el cual se realiza la medición de desempeño de los equipos, determinado por la duración programada de la faena productiva.
- **Fuera de Servicio (M/R):** Intervalo en el cual el equipo no está disponible debido a mantenimientos programados o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico.
- **Tiempo Disponible:** Tiempo en que el equipo está mecánicamente habilitado para operar, calculado como la diferencia entre el Tiempo Nominal y el Tiempo Fuera de Servicio.
- **Reservas:** Tiempo en que el equipo, estando en condiciones mecánicas aptas para operar, no puede ser utilizado debido a la falta de operador o a restricciones operacionales.
- **Tiempo Operativo:** Tiempo efectivo en el que el equipo, estando disponible y con operador asignado, se encuentra realizando actividades productivas asociadas a su función de diseño.
- **Tiempo Efectivo:** Periodo en el cual el equipo ejecuta directamente las actividades para las cuales fue diseñado, descontando pérdidas operacionales y demoras.
- **Pérdidas Operacionales:** Tiempo durante el cual el equipo, pese a estar disponible y operativo, permanece inactivo debido a esperas relacionadas con labores complementarias o interrupciones de la operación.
- **Demoras:** Intervalos de tiempo en que el equipo no realiza su actividad principal, clasificadas en demoras programadas (por cambios de turno, colaciones, entre otros) y no programadas (por fallas, condiciones climáticas u otros imprevistos).

2.5.2. Indicadores clave

- **Disponibilidad:** Proporción del Tiempo Nominal en que la flota, equipo, máquina o instalación estuvo mecánica y eléctricamente habilitado para operar. Este indicador mide la capacidad del sistema de mantenimiento para asegurar la operatividad de los equipos.

$$\text{Disponibilidad (\%)} = 100 \times \frac{T_{\text{disponible}}}{T_{\text{nominal}}} \quad (2.1)$$

- **Utilización:** Porcentaje del Tiempo Nominal en que el equipo ejecuta tareas efectivas. Este KPI refleja la eficiencia de la operación en cuanto al uso real de la flota o equipo respecto al tiempo total disponible para producción.

$$\text{Utilización (\%)} = 100 \times \frac{T_{\text{efectivo}}}{T_{\text{nominal}}} \quad (2.2)$$

- **Utilización efectiva:** Relación entre el Tiempo Efectivo y el Tiempo Disponible, indicando qué porcentaje del tiempo disponible se emplea efectivamente en las tareas productivas asignadas al equipo.

$$\text{Utilización Efectiva (\%)} = 100 \times \frac{T_{\text{efectivo}}}{T_{\text{disponible}}} \quad (2.3)$$

- **Utilización operativa:** Porcentaje del Tiempo Disponible en que el equipo se encuentra operativamente activo, es decir, mecánicamente apto, con operador y en funcionamiento. Proporciona información sobre la fracción de tiempo que puede ser utilizado o redistribuido en la operación.

$$\text{Utilización Operativa (\%)} = 100 \times \frac{T_{\text{operativo}}}{T_{\text{disponible}}} \quad (2.4)$$

- **Factor de utilización:** Indica el porcentaje del Tiempo Operativo en que el equipo realiza tareas efectivas. Es una medida de la productividad neta del tiempo en que el equipo está en operación.

$$\text{Factor de Utilización (\%)} = 100 \times \frac{T_{\text{efectivo}}}{T_{\text{operativo}}} \quad (2.5)$$

Capítulo 3

Metodología

Para llevar a cabo los objetivos de este estudio se elaboró la siguiente metodología, la cual se encuentra separada en cinco etapas:

- Análisis de manera retrospectiva un proyecto real, es decir, realizar un estudio previo de un proyecto de obras de preparación minera con el fin de identificar patrones, estrategias y áreas de mejora en la gestión y ejecución de operaciones mineras. Este análisis involucra la recolección y revisión de documentación del proyecto, descomposición de sus componentes, evaluación de la eficiencia en la utilización de recursos y tiempos.
- Definición de variables de decisión, criterios y parámetros de entrada, mediante la formulación de las reglas y restricciones que guiarán la asignación óptima de recursos, considerando aspectos como secuenciación de las actividades unitarias, tiempo de ejecución, precedencia y simultaneidad de actividades.
- Desarrollo del modelo heurístico, en base a los criterios seleccionados se elaborará una heurística de apoyo para implementarlo en la estructura del algoritmo en un lenguaje de programación adecuado.
- Validación de modelo con simulaciones no determinísticas, lo que implica someter a éste a diversas pruebas en el caso de estudio, mediante la introducción de variables aleatorias. Dando como resultado analizar la capacidad del modelo para adaptarse a distintos escenarios operativos.
- Evaluación de resultados e implementación del modelo, en base al desempeño de éste, se pondrá a prueba en diferentes casos de estudios, con el fin de verificar si no muestra un sesgo significativo hacia algún caso o escenario en particular.

Capítulo 4

Desarrollo del modelo

4.1. Formulación

La construcción del modelo propuesto requiere de fuentes confiables y representativas que reflejen la dinámica real de las operaciones mineras subterráneas. Para ello, se ha trabajado sobre una base de datos real correspondiente a un proyecto de desarrollos horizontales, garantizando así la pertinencia y precisión de los parámetros utilizados en el algoritmo de asignación de recursos.

En el ámbito de la preparación minera, la planificación a nivel operativo suele estar predefinida a partir de las directrices establecidas por el mandante, donde se prioriza el cumplimiento de metas mensuales de avance físico. Esto implica que, para efectos del modelo, las variables de control más relevantes son aquellas asociadas directamente a la secuencia de actividades de avance y el uso eficiente de los recursos disponibles. Variables como la ley mineralógica o capacidad de producción no son significativas en esta etapa, centrándose el análisis en parámetros de productividad y cumplimiento de los planes de desarrollo.

El modelo considera que la información necesaria para la toma de decisiones está completamente disponible y actualizada, tal como ocurre en la práctica con la programación semanal y diaria de labores. Esta información se estructura jerárquicamente desde el nivel de planificación general hasta la ejecución diaria, siguiendo el siguiente flujo:

- **Mandante / Jefatura de Proyecto:** Define metas y prioridades globales, determinando el volumen de obras a ejecutar.
- **Jefatura de Operaciones:** Traduce estas metas en tareas semanales, asignando frentes y recursos.
- **Jefes de Turno:** Ejecutan las asignaciones según dotaciones disponibles y condiciones operativas, priorizando actividades conforme a los objetivos planteados.

4.1.1. Parámetros de entrada

Para la implementación en el algoritmo, los parámetros de entrada principales son:

- **TiempoAct _{j,k}** : Duración estimada de ejecución de la actividad k por parte del equipo j , modelada como una variable aleatoria con distribución triangular caracterizada por los parámetros TiempoMin_{jk} , TiempoProm_{jk} , TiempoMax_{jk} .
- **Coord _{i}** : Coordenadas espaciales que definen la ubicación relativa del frente i , donde C_i representa la identificación de la calle y Z_i la de la zanja correspondiente.
- **Estado _{i}** : Estado de avance actual del frente i , codificado como una actividad dentro de la secuencia establecida.
- **EquipoDispo _{k}** : Número total de equipos disponibles para la actividad k .
- **Disp _{i}** : Número total de disparos requeridos en el frente i .
- **Cant_cruces**: Número de intersecciones proyectadas en cada calle, representando el potencial de apertura de nuevos frentes de trabajo.
- **Matriz T _{i,i'}** : Matriz de los tiempos de traslados entre cada una de las frentes.

La correcta definición y captura de estos parámetros garantiza que el modelo represente de forma fidedigna las condiciones operativas de la mina, permitiendo validar su aplicabilidad práctica en un contexto real y comparar los resultados con el desempeño histórico de la operación.

4.1.2. Sets

Se definen los siguientes conjuntos para estructurar el modelo de asignación de recursos:

- **I (Posturas)**: Conjunto de frentes de trabajo disponibles en el proyecto.
- **J (Equipos)**: Conjunto de equipos disponibles para asignación, clasificados por tipo de actividad.
- **J_k (Equipos por actividad)**: Subconjunto de equipos por estado.
- **K (Operaciones unitarias)**: Conjunto de actividades del ciclo de avance que deben ser completadas secuencialmente en cada frente.
- **D (Total de disparos)**: Conjunto de disparos requeridos por cada frente.

La estructura del modelo se fundamenta en el uso conjunto de sets y parámetros para representar de manera precisa los elementos críticos de la operación minera subterránea y sus interacciones. Los sets permiten organizar las entidades fundamentales —frentes de trabajo, equipos y actividades— mientras que los parámetros asignan atributos y valores que caracterizan el comportamiento y las condiciones de estos elementos. Durante la ejecución

del algoritmo, los sets definen el espacio de decisiones posibles, y los parámetros alimentan dinámicamente el sistema con información relevante como tiempos de operación, disponibilidades y restricciones logísticas. Esta integración garantiza que cada frente avance en su secuencia de actividades de acuerdo con las capacidades reales de la flota y las condiciones operativas consideradas.

En términos de implementación, los sets y parámetros son utilizados de forma coordinada para gestionar el estado dinámico de la simulación. A medida que se asignan equipos a los frentes y se completan actividades, el modelo actualiza en tiempo real las disponibilidades de recursos, los tiempos de operación acumulados y el avance de cada frente en su ciclo de desarrollo. La lógica del algoritmo permite capturar los efectos de la variabilidad estocástica en los tiempos de ejecución y los desplazamientos logísticos, impactando directamente en la duración total del proyecto. De esta forma, los sets y parámetros no solo estructuran la representación del problema, sino que actúan como la base operativa sobre la cual se sostiene toda la dinámica de asignación de recursos en el modelo.

4.1.3. Variables de decisión

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

I. Asignación de equipos a frentes en un instante de tiempo:

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{si el equipo } j \text{ está asignado al frente } i \text{ en el instante } t. \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

II. Tiempo total por actividad en un frente:

$$t_{ij} \geq 0, \text{ tiempo total del equipo } j \text{ en el frente } i, \text{ sin considerar traslados.}$$

III. Estado del frente:

$$S_i \in \{1, \dots, 7\}, \text{ estado actual del frente en el ciclo de avance.}$$

IV. Inicio de ciclo en un frente:

$$d_f = \begin{cases} 1, & \text{si en el frente } i \text{ se inicia un nuevo ciclo de avance.} \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

4.1.4. Función objetivo

La planificación eficiente de desarrollos subterráneos en minería requiere optimizar tanto la duración total del proyecto como el uso efectivo de los equipos disponibles, dados los altos costos asociados a su operación y la importancia estratégica de la habilitación oportuna de nuevas áreas productivas.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (U_{i,j,k} - T_{i,j}) \cdot x_{i,j,k}$$

Donde:

- $x_{i,j,k} \in \{0, 1\}$: Variable de decisión, toma valor 1 si el equipo i se asigna al frente j en el estado k , 0 en caso contrario.
- $U_{i,j,k}$: Utilidad de asignar el equipo i al frente j en el estado k , considerando el estado actual, el potencial de apertura y el avance del proyecto.
- $T_{i,j}$: Tiempo de traslado entre la ubicación del equipo i y el frente j .
- $J_k \subseteq J$: Subconjunto de frentes habilitados para realizar la actividad k .

Definición operacional de la utilidad:

$$U_{i,j,k} = \omega_1 \cdot \text{Disp}_i + \omega_2 \cdot \text{CantCruces}_i$$

Donde:

- Disp_i : Número de disparos pendientes en el frente i .
- CantCruces_i : Número de intersecciones proyectadas, asociadas al potencial de apertura de nuevas posturas.
- ω_1, ω_2 : Pesos que calibran la importancia relativa entre productividad inmediata y proyección futura.

4.1.5. Restricciones

Las restricciones del modelo son esenciales para garantizar que las soluciones obtenidas sean factibles y coherentes con las condiciones reales de operación en minería subterránea. Aseguran el cumplimiento de la secuencia lógica de actividades, el respeto por la disponibilidad limitada de equipos y la correcta contabilización de los tiempos operativos y logísticos. De esta forma, el modelo refleja de manera adecuada las restricciones propias de la planificación de desarrollos, asegurando asignaciones viables dentro del contexto operativo del proyecto. A continuación, se detallan las restricciones consideradas:

- **Disponibilidad de equipos:** Cada equipo de un tipo determinado solo puede ser asignado a una única frente activa por unidad de tiempo.

$$\sum_{i \in I} x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (4.1)$$

- **Precedencia secuencial entre estados de un frente:** Un estado de avance i en una frente no puede comenzar hasta que se haya completado el estado k anterior.

$$s_{i,k+1} \geq s_{i,k} + d_{i,k} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \setminus \{\text{máx } K\} \quad (4.2)$$

- **Exclusividad por frente y estado:** Cada estado k de cada frente i debe ser cubierto por exactamente un equipo del tipo correspondiente, si la actividad es programada.

$$\sum_{j \in J_k} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (4.3)$$

- **Traslados entre frentes:** Para respetar los tiempos logísticos entre frentes y evitar solapamientos, se incorpora una restricción de continuidad operacional considerando los tiempos de traslado $T_{i,i'}$ entre frentes.

$$s_{i',j} \geq f_{i,j} + T_{i,i'} \cdot x_{i',j,k'} \quad \forall i \neq i', \forall j \in J, \forall k, k' \in K \quad (4.4)$$

- **Capacidad máxima por tipo de equipos:** Se asegura que la suma de asignaciones simultáneas de equipos del tipo requerido por estado k no supere el número de equipos disponibles para dicha actividad.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_k} x_{i,j,k} \leq \text{EquipoDispo}_k \quad \forall k \in K \quad (4.5)$$

- **Disponibilidad operativa de frentes:** Solo pueden trabajarse frentes habilitados para el estado correspondiente, es decir, si están activos o disponibles en el calendario operacional.

$$x_{i,j,k} \leq a_{i,k} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_k, \forall k \in K \quad (4.6)$$

- **Asignación solo a frentes en estado activo:** Los equipos solo pueden ser asignados a frentes que se encuentren actualmente en el estado correspondiente del ciclo de avance.

$$x_{i,j,k} = 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J_k, \forall k \in K \text{ tal que estado}(i) \neq k \quad (4.7)$$

4.2. Supuestos y simplificaciones

Con el objetivo de implementar un modelo funcional, eficiente y representativo del proceso real de asignación de recursos en minería subterránea, se establecieron una serie de simplificaciones técnicas que permiten reducir la complejidad computacional y facilitar su ejecución práctica.

Las simplificaciones adoptadas son las siguientes: es y la realización de cada desarrollo.

- **Reducción del ciclo de avance a actividades operacionales críticas:** El modelo considera exclusivamente aquellas operaciones unitarias que constituyen el núcleo operativo del ciclo de avance para desarrollos horizontales.
 1. Perforación de disparo.
 2. Carguío de explosivos y quema.
 3. Retiro de marinas.
 4. Acuñadura.
 5. Perforación para pernos de fortificación.
 6. Instalación de malla.
 7. Shotcrete.
- **Planificación secuencial de corto plazo:** El modelo opera bajo una lógica de programación secuencial, no acumulativa, sin optimización sobre un horizonte extendido. Se evalúan las decisiones de asignación en función del estado actual del sistema y se aplican reglas de prioridad predefinidas. Esta estrategia está orientada a la planificación en ciclos cortos, como turnos diarios o ventanas de ejecución de bajo horizonte, descartando la construcción de escenarios multiperíodo o proyecciones anuales.
- **Progresión determinística de actividades:** Se considera que todas las actividades del ciclo de avance se ejecutan de forma continua y sin interrupciones. No se modelan fallas operacionales, retrasos por condiciones geomecánicas, interferencias entre frentes, congestión logística ni efectos meteorológicos. Cada actividad se inicia y concluye según su duración teórica preestablecida, permitiendo construir una línea de avance proyectada en función del cumplimiento secuencial de etapas.
- **Suposición de información completa y confiable:** El modelo opera bajo el supuesto de que la información de entrada está completamente actualizada y disponible al inicio de cada ciclo de planificación. No se incorporan incertidumbres en la disponibilidad de equipos ni retrasos en la actualización de datos, lo cual permite una toma de decisiones determinista en cada iteración.

Capítulo 5

Implementación del modelo heurístico

Con el objetivo de planificar de forma eficiente la asignación de equipos en proyectos de desarrollo horizontal con múltiples frentes activos, se diseñó un algoritmo heurístico implementado en Python. Esta herramienta permite simular, paso a paso, la ejecución operativa de un proyecto bajo condiciones similares a las de la planificación real, incorporando restricciones técnicas, disponibilidad de recursos y prioridades de avance.

El algoritmo se basa en una lógica determinista y secuencial. A través de ciclos iterativos, se toman decisiones de asignación de equipos a actividades específicas considerando criterios de prioridad, compatibilidad técnica, y restricciones operacionales. Durante la simulación, se registra el comportamiento dinámico del sistema, permitiendo analizar indicadores como la duración total del proyecto, el uso de recursos, la congestión en frentes y el comportamiento logístico en el tiempo.

5.1. Preparación de datos

Al inicio del proceso, el algoritmo organiza la información relevante para la simulación. Esta comprende:

- Lista de posturas o frentes de trabajo activos, junto con su estado inicial.
- Cantidad de disparos requeridos por cada postura.
- Secuencia de operaciones unitarias a ejecutar en cada ciclo (PD, CYQ, MAR, ACU, PF, M, SH).
- Tipos y cantidades de equipos disponibles, definidos por su especialidad.
- Tiempos de ejecución mínimos, promedios y máximos de cada actividad por equipo.
- Tiempos de traslado estimados entre posturas.

La información es ordenada y clasificada para permitir su uso en las decisiones de asignación, generando una estructura lógica que refleja la priorización de frentes según criterios definidos.

5.2. Asignación dinámica de recursos

El núcleo operativo del algoritmo se encuentra en su ciclo de simulación iterativa, en el cual se modela el avance de los frentes de trabajo en función del tiempo y la disponibilidad de recursos. En cada iteración, el sistema evalúa qué frentes se encuentran habilitados para continuar con la siguiente actividad del ciclo, es decir, aquellos que han completado su tarea anterior, no están bloqueados por restricciones de precedencia y se encuentran a la espera de un equipo disponible.

Simultáneamente, se determina el conjunto de equipos que están libres en ese instante de tiempo y cuya especialidad permite ejecutar la actividad requerida. Para cada combinación posible frente–equipo, el modelo calcula el tiempo total estimado (incluyendo traslado y ejecución) y evalúa una función de utilidad que integra los siguientes criterios:

- La cantidad de cruces que puede generar la postura.
- La cantidad de disparos restantes en el frente.
- El tiempo de traslado necesario desde la ubicación actual del equipo al nuevo frente.

Esta función de utilidad considera ponderadores ajustables, permitiendo priorizar la continuidad operativa, la cobertura espacial del avance y la eficiencia logística del sistema.

El equipo que maximiza esta utilidad es asignado al frente correspondiente, bloqueándolo durante el tiempo necesario para completar la actividad. Este tiempo se selecciona aleatoriamente a partir de una distribución triangular definida para cada equipo, con el objetivo de reflejar la variabilidad operativa real observada en terreno.

Una vez finalizada la tarea, el equipo es liberado y vuelve a estar disponible para futuras asignaciones. Paralelamente, el frente avanza al siguiente estado de su secuencia, quedando nuevamente en espera de un recurso adecuado. Este mecanismo se repite en forma secuencial, permitiendo construir una simulación completa del ciclo productivo, en la que se respeta tanto la lógica operacional como las restricciones impuestas por la disponibilidad y especialidad de los equipos.

5.3. Evolución del sistema y control de restricciones

Una vez completada la asignación y ejecutada la actividad correspondiente, el algoritmo actualiza el estado global del sistema, lo que implica avanzar el frente de trabajo a su siguiente operación unitaria del ciclo y liberar el equipo que acaba de terminar su tarea. Este equipo pasa a estar nuevamente disponible para futuras asignaciones, y se registra el tiempo exacto en que finaliza su actividad para respetar la disponibilidad dinámica en iteraciones posteriores.

De forma paralela, el sistema actualiza otras variables críticas, tales como el reloj del proyecto, la bitácora de actividades realizadas, la cantidad de disparos restantes por frente y el historial de utilización de equipos. Esta estructura de actualización garantiza que, en todo momento, el sistema mantenga una visión coherente del estado operativo, permitiendo que las decisiones de asignación se tomen con información precisa y actualizada.

Durante cada iteración, el algoritmo controla rigurosamente el cumplimiento de una serie de restricciones operacionales, diseñadas para replicar las condiciones reales del proceso de desarrollo horizontal. Estas restricciones son:

- **Secuencia lógica del ciclo de avance:** Las actividades deben ejecutarse en el orden establecido ($PD \rightarrow CYQ \rightarrow MAR \rightarrow ACU \rightarrow PF \rightarrow M \rightarrow SH$). Un frente no puede avanzar a una etapa posterior si no ha completado la anterior.
- **Exclusividad operativa de los equipos:** Cada equipo solo puede estar asignado a una actividad a la vez. No existe superposición entre frentes o tareas.
- **Consideración explícita de los tiempos de traslado:** Antes de ejecutar una actividad, el algoritmo incorpora el tiempo de traslado necesario para que el equipo se desplace desde su ubicación anterior hasta el nuevo frente.
- **Disponibilidad dinámica de recursos:** Un equipo solo puede ser asignado si ha terminado completamente su actividad anterior y ha cumplido su tiempo de traslado.

Cuando ninguna asignación puede realizarse, ya sea por falta de equipos disponibles o porque ningún frente cumple con las condiciones de avance, el sistema entra en un estado de espera. En este caso, el reloj del proyecto avanza hasta el próximo evento relevante, como la liberación de un equipo o la habilitación de un frente, permitiendo que la simulación continúe sin violar las condiciones impuestas por el modelo.

Este mecanismo garantiza que la ejecución del proyecto simulado se mantenga siempre dentro de los márgenes operativos definidos, lo cual otorga validez técnica a los resultados obtenidos y los hace comparables con el comportamiento real observado en la operación minera.

5.4. Registro de resultados y adaptabilidad del modelo

A lo largo de la simulación, el algoritmo registra con precisión todos los eventos relevantes del proceso, tales como:

- Duración total del proyecto.
- Tiempo acumulado de trabajo por equipo y actividad.
- Porcentaje de utilización de cada recurso.
- Tiempo acumulado de trabajo por frente o postura.
- Cantidad de disparos completados por postura.
- Tiempo de espera acumulado por falta de equipos.

Esta información se estructura en cartas Gantt y gráficos comparativos que permiten analizar el comportamiento del sistema y contrastarlo con los resultados del caso real.

Una de las ventajas destacadas del modelo es su flexibilidad para adaptarse a distintos escenarios operacionales. Gracias a su estructura parametrizable, es posible modificar aspectos como la cantidad de equipos disponibles, los rangos de tiempos de ejecución, los tiempos de traslado entre posturas o la lógica de priorización de frentes.

Esto permite al modelo no solo funcionar como una herramienta de diagnóstico retrospectivo, sino también como una plataforma de simulación prospectiva, útil para evaluar decisiones operativas antes de su implementación en terreno. En consecuencia, se transforma en un instrumento estratégico que aporta valor tanto en la planificación como en la mejora continua de la operación.

Capítulo 6

Antecedentes Caso de estudio

6.1. Introducción

La División El Teniente de CODELCO está ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes, entre los 2.200 y los 3.200 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra a 54 kilómetros de la ciudad de Rancagua, capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Dentro de la División, la Gerencia de Obras Mina (GOBM) es la organización responsable de la gestión de la preparación minera en todos los sectores del yacimiento, siguiendo los lineamientos definidos por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD). En este contexto, una de las áreas más dinámicas y estratégicas es el sector Recursos Norte, parte del Área Norte de la mina, como se muestra en la Figura 6.1, donde se concentran importantes obras de preparación vinculadas directamente al crecimiento y sostenimiento futuro de la capacidad productiva.

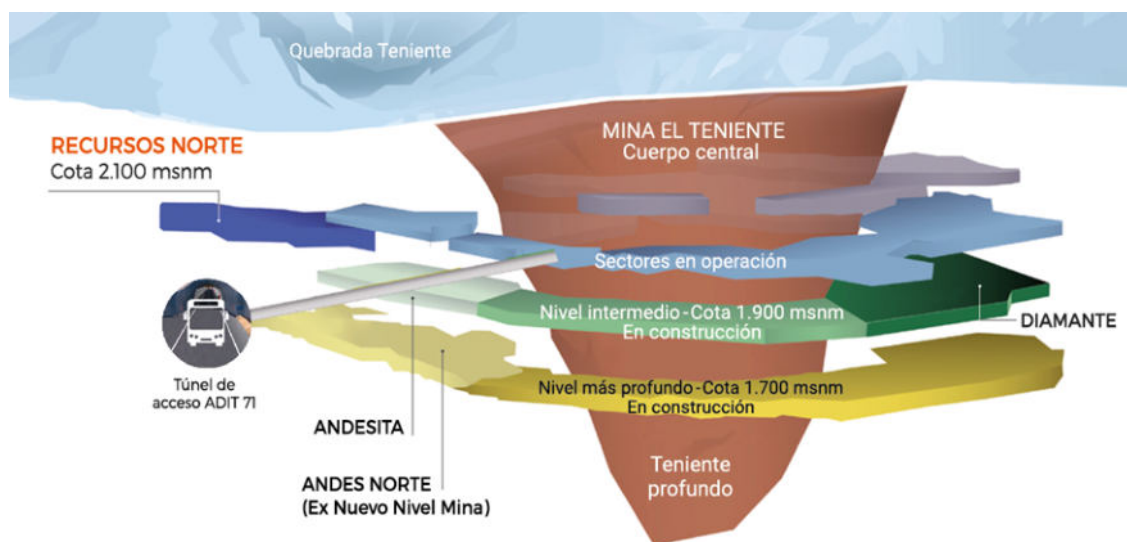


Figura 6.1: Ubicación del Proyecto Recursos Norte en Mina El Teniente (Vista Isométrica).

Recursos Norte forma parte del Plan de Desarrollo El Teniente, que busca extender la vida útil del yacimiento en al menos 50 años. Su construcción comenzó en 2018, y entró en fase productiva en 2020, con 15 meses de adelanto respecto al cronograma original. Este sector incorpora una combinación de desarrollos horizontales y verticales, un nuevo acceso de doble vía de 3,5 km y cerca de 18 kilómetros de túneles construidos, integrando además soluciones tecnológicas modernas para el control y gestión operativa.

Durante el año 2023, Recursos Norte alcanzó un hito interno al superar los 950 metros mensuales de avance horizontal, demostrando su madurez operativa y el alto grado de exigencia sobre el uso eficiente de recursos. En régimen, se espera que este sector aporte alrededor del 20 % del mineral procesado diariamente por la división, con una estimación de 157 millones de toneladas de reservas con leyes cercanas al 0,75 % de cobre.

Estas características posicionan a Recursos Norte no solo como un componente esencial del plan de expansión de El Teniente, sino también como un entorno altamente representativo para el estudio de modelos de asignación de recursos y optimización de procesos en minería subterránea.

Dado que la presente memoria busca proponer y aplicar un modelo de optimización para la asignación de recursos en desarrollos horizontales en minería subterránea, resulta fundamental acotar con precisión el alcance técnico del caso base. Para ello, se seleccionó un conjunto representativo de labores reales ejecutadas en el sector Recursos Norte de la División El Teniente, en el marco de un proyecto operativo desarrollado por una empresa contratista especializada en obras de preparación mina.

El estudio se basa íntegramente en datos reales obtenidos de la ejecución del proyecto, lo que confiere validez y aplicabilidad práctica al modelo propuesto. Las posturas, estados iniciales, tiempos de operación y características de equipos reflejan condiciones auténticas de terreno, registradas durante los meses de marzo, abril y mayo. Este enfoque asegura que la solución planteada responda a una realidad operativa concreta, con todas las restricciones y particularidades propias del entorno minero subterráneo.

El modelo se centra exclusivamente en desarrollos horizontales, dejando fuera unidades operativas como desarrollos verticales o labores de infraestructura secundaria. Esta decisión responde a que los desarrollos horizontales constituyen la unidad operativa fundamental para el avance de la mina y presentan una alta recurrencia secuencial que permite evaluar estrategias de asignación repetitivas y escalables.

Para efectos de modelado, se excluyen las actividades auxiliares (como carpetas de rodado o drenajes), así como detenciones por fallas o mantenimientos imprevistos, con el objetivo de enfocarse exclusivamente en la ventana operativa efectiva y en el análisis de asignación dinámica de recursos. Este enfoque permite construir un caso robusto y representativo, ideal para evaluar la eficiencia del modelo bajo condiciones equivalentes a las de la operación real.

6.2. Proyecto Mina Norte - Recursos Norte (MN-RRNN)

El Proyecto Mina Norte – Recursos Norte (MN-RRNN) constituye una iniciativa estratégica ejecutada bajo contrato por una empresa externa, con el objetivo de habilitar sectores clave del yacimiento mediante obras de preparación minera de alta complejidad.

Esta operación contempla una combinación de desarrollos horizontales y verticales distribuidos en distintos niveles funcionales del yacimiento: Nivel de Hundimiento (UCL), Nivel de Producción (NP), Nivel de Acarreo (NA) y Subnivel de Ventilación (SNV), integrando además trabajos de fortificación, construcción de buzones, sistemas de ventilación y servicios asociados.

La planificación integral del proyecto considera una duración total de 3 meses, y se estructura bajo una modalidad contractual por precios unitarios, lo que exige una gestión rigurosa de recursos, secuencia de actividades y desempeño por frente. En este contexto, el modelo de asignación desarrollado en esta memoria se aplicará exclusivamente sobre los desarrollos horizontales del Nivel de Producción, los cuales representan la base operativa más directa para el sostenimiento de la extracción minera.

Esta focalización permite analizar la dinámica real de ejecución bajo condiciones controladas, considerando exclusivamente la secuencia técnica del ciclo de avance y la disponibilidad efectiva de recursos críticos como equipos y frentes.

Con el objetivo de contextualizar gráficamente el área de estudio y delimitar el alcance del modelo propuesto, se incluyen a continuación en la Figura 6.2 y Figura 6.3, que son representativas del sector:

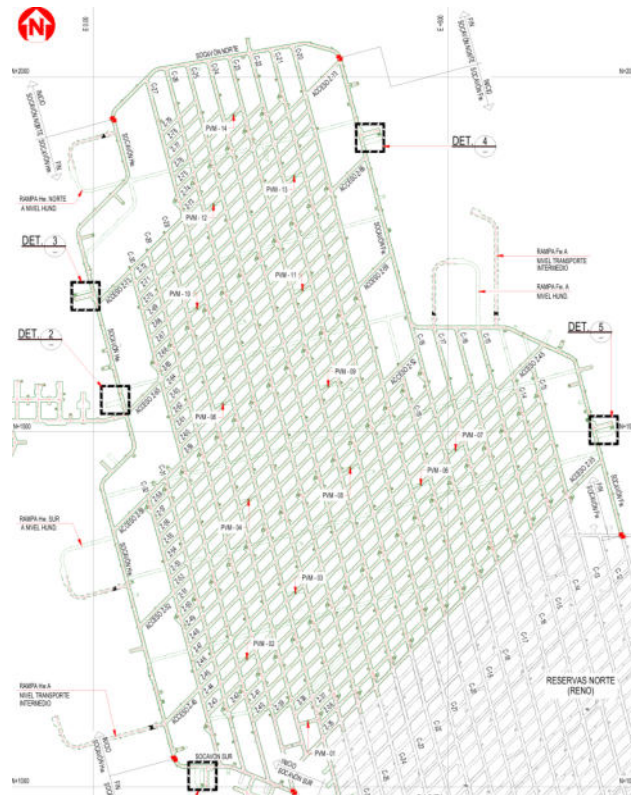


Figura 6.2: Planta Nivel de Producción

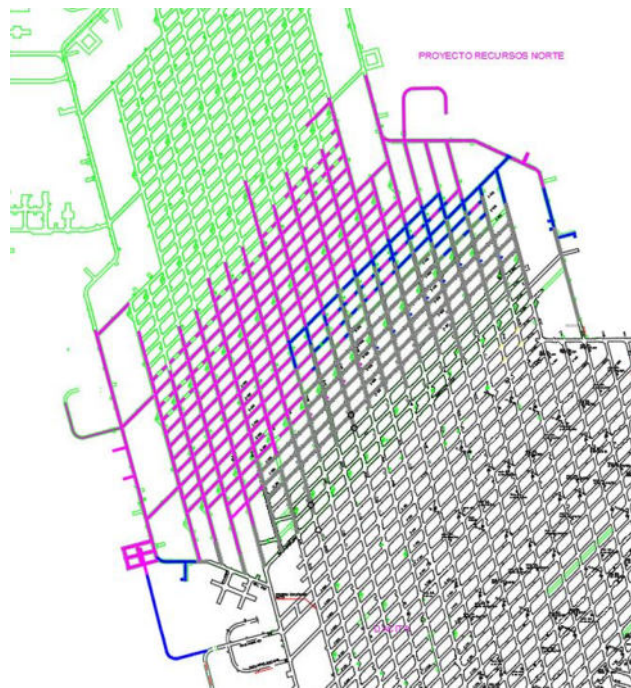


Figura 6.3: Alcance específico Nivel de Producción - Proyecto Recursos Norte

Estas representaciones permiten visualizar claramente el área de estudio restringido al Nivel de Producción, donde se concentran los desarrollos horizontales del proyecto en cuestión.

En el contexto del presente caso de estudio, un disparo se define como un ciclo completo de desarrollo horizontal en minería subterránea. Este ciclo está compuesto por siete operaciones unitarias que se ejecutan de manera secuencial, representando el flujo operativo típico en las labores de preparación minera.

A continuación, en la Tabla 6.1 se detallan dichas actividades junto con las siglas técnicas que se utilizarán a lo largo del documento:

Tabla 6.1: Siglas de operaciones unitarias del ciclo de avance.

Sigla	Actividad
PD	Perforación de Disparo
CYQ	Carguío de Explosivos y Quema
MAR	Retiro de Marinas
ACU	Acuñadura
PF	Perforación Pernos de Fortificación
M	Instalación de Malla
SH	Shotcrete

6.2.1. Frentes de trabajo consideradas

El presente caso de estudio considera un total de 36 posturas activas, las cuales representan la totalidad de los frentes de trabajo abordados durante los tres meses de ejecución analizados.

Cada postura fue identificada a partir de registros reales del proyecto y se encuentra en un estado de avance inicial específico, correspondiente a una de las operaciones del ciclo de desarrollo. Este conjunto constituye una muestra completa y representativa de la operación durante el periodo, abarcando tanto posturas con inicio de ciclo como aquellas en fases intermedias o finales.

A continuación en la Tabla 6.2, se presentan las posturas consideradas, junto a la actividad inicial registrada para cada una, la cual determina el punto de partida del modelo de asignación:

Tabla 6.2: Condiciones iniciales de labores según realidad operacional.

N°	Postura	Actividad Inicial
1	C20 N Z47	Retiro de Marinas
2	C20 N Z49	Shotcrete

3	C22 N Z49	Retiro de Marinas
4	C24 N Z50	Perforación Pernos de Fortificación
5	C25 N Z48	Perforación Pernos de Fortificación
6	C25 N Z50	Perforación de Disparo
7	C25 Z45/46	Instalación de Malla
8	C30 N Z47	Perforación de Disparo
9	C30 N Z48	Perforación de Disparo
10	C30 S Z48	Shotcrete
11	C31 N Z46	Acuñadura
12	C32 N SOC SUR	Perforación de Disparo
13	C32 S Z44	Shotcrete
14	Z39 HW C28	Carguío de Explosivos y Quema
15	Z43 HW C30	Carguío de Explosivos y Quema
16	Z43 HW C31	Retiro de Marinas
17	Z45 FW C29	Retiro de Marinas
18	Z45 HW C31	Perforación Pernos de Fortificación
19	Z46 HW C30	Retiro de Marinas
20	Z47 HW C30	Acuñadura
21	Z48 FW C20	Perforación de Disparo
22	Z48 FW C22	Perforación de Disparo
23	Z48 FW C25	Acuñadura
24	Z48 HW C22	Carguío de Explosivos y Quema
25	Z48 HW C23	Acuñadura
26	Z48 HW C25	Perforación de Disparo
27	Z48 HW C30	Carguío de Explosivos y Quema
28	Z49 FW C20	Carguío de Explosivos y Quema
29	Z49 FW C22	Perforación Pernos de Fortificación
30	Z49 FW C24	Carguío de Explosivos y Quema
31	Z49 FW C25	Perforación de Disparo
32	Z49 FW C27	Acuñadura
33	Z49 HW C22	Carguío de Explosivos y Quema
34	Z49 HW C24	Perforación de Disparo
35	Z49 HW C28	Perforación Pernos de Fortificación
36	Z50 HW C24	Carguío de Explosivos y Quema

6.2.2. Recursos utilizados

Para la ejecución del proyecto, la empresa contratista dispone de una flota especializada de equipos de desarrollo subterráneo, los cuales han sido utilizados en su totalidad durante el periodo analizado. Esta flota está compuesta por maquinaria distribuida según su función en el ciclo de avance.

Cada equipo está debidamente identificado con su modelo, sigla y asociado a una o más actividades dentro del ciclo, como se muestra a continuación:

Tabla 6.3: Flota de equipos disponibles.

Equipo	Modelo	Actividad	Sigla
Acuñador	M-737	ACU	ACU1
Grúa Telescópica	MA-795	CYQ, M	GT1
Grúa Telescópica	MA-863	CYQ, M	GT2
Grúa Telescópica	MA-864	CYQ, M	GT3
Grúa Telescópica	MA-888	CYQ, M	GT4
Grúa Telescópica	MA-893	CYQ, M	GT5
Grúa Telescópica	MA-895	CYQ, M	GT6
Jumbo 1 brazo	M-910	PF	J1B1
Jumbo 2 brazos	M-926	PD, PF	J2B1
Jumbo 2 brazos	M-947	PD, PF	J2B2
Jumbo 2 brazos	M-670	PD, PF	J2B3
Jumbo 2 brazos	M-983	PD, PF	J2B4
Jumbo Empernador	M-694	PF	JE1
Roboshot	M-675	SH	SH1
Roboshot	MA-526	SH	SH2
Roboshot	MA-730	SH	SH3
Roboshot	M-834	SH	SH4
Roboshot	M-836	SH	SH5
Roboshot	M-677	SH	SH6
Scoop	M-660	MAR	MAR1
Scoop	M-672	MAR	MAR2
Scoop	M-948	MAR	MAR3
Scoop	M-892	MAR	MAR4
Scoop	M-945	MAR	MAR5

6.3. Resultados generales del proyecto

Este apartado presenta el análisis del comportamiento real de la operación durante el periodo de estudio, correspondiente al nivel de producción del sector MN-RRNN. El desarrollo del proyecto se llevó a cabo mediante una asignación manual de recursos, en la que las decisiones de distribución de equipos se realizaron de forma operativa por el personal en terreno, sin apoyo de herramientas de optimización computacional.

El objetivo es establecer una línea base cuantitativa y operativa, que permita evaluar el nivel de eficiencia alcanzado bajo condiciones reales, y contrastarla posteriormente con los resultados obtenidos mediante el modelo heurístico propuesto en esta memoria.

La duración efectiva total del proyecto fue de 81 días, considerando jornadas operativas de 18 horas diarias. Este valor representa el tiempo acumulado en que los equipos estuvieron realmente en operación, y servirá como base de comparación para los escenarios simulados con el modelo heurístico.

La Tabla 6.4 presenta un resumen consolidado del proyecto, detallando la cantidad de disparos ejecutados y los metros lineales desarrollados en el Nivel de Producción (NP), distribuidos por mes. Esta información permite dimensionar el volumen de trabajo abordado durante el periodo de estudio.

Tabla 6.4: Resumen mensual de estadísticas principales del proyecto.

	Marzo	Abril	Mayo	Total
Disparos [unidad]	44	47	38	129
Desarrollos Horizontales NP [ml]	143,00	152,75	123,50	419,25

Junto con esta información general, se presentan también tres estadísticas operacionales clave que permiten caracterizar con mayor profundidad el desempeño del sistema.

En primer lugar, se tienen las actividades que se ejecutan para el desarrollo de las excavaciones horizontales del nivel de producción corresponden a un ciclo típico de perforación y tronadura mecanizada, con fortificación mediante pernos, malla y shotcrete. Este ciclo se compone de una secuencia de operaciones unitarias (PD, CYQ, MAR, ACU, PF, M, SH), cuya duración está determinada por los tiempos operacionales entregados por la empresa contratista encargada de ejecutar las obras.

Estos tiempos dependen directamente del diseño geométrico de las calles y zanjas, de las condiciones operativas particulares del sector MN-RRNN, y de los lineamientos técnicos definidos por la División El Teniente.

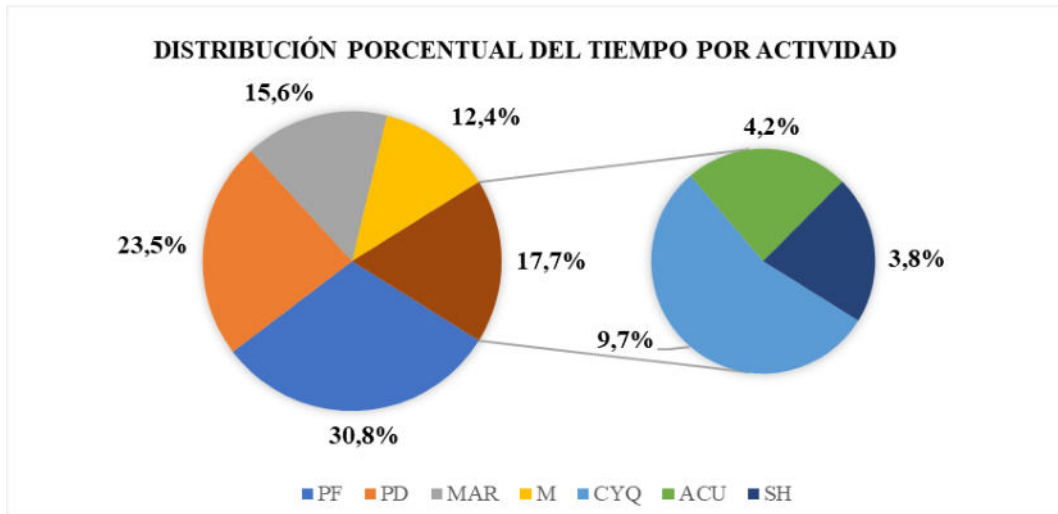


Figura 6.4: Porcentaje de duración de cada actividad del ciclo de avance en desarrollos horizontales.

La Figura 6.4 muestra el tiempo total invertido en cada actividad durante la ejecución real del proyecto. Se observa una alta demanda en las etapas de perforación de pernos de fortificación y perforación de disparo, así como una menor proporción relativa en las actividades de instalación de malla, shotcrete y acuñadura.

Complementando el análisis anterior, se presenta a continuación la eficiencia operativa de los equipos utilizados durante el desarrollo del nivel de producción la cual puede evaluarse a través del tiempo efectivo que cada uno estuvo en operación, en relación con el tiempo total del proyecto y considerando una jornada de 18 horas diarias durante los 81 días efectivo que dura el proyecto.

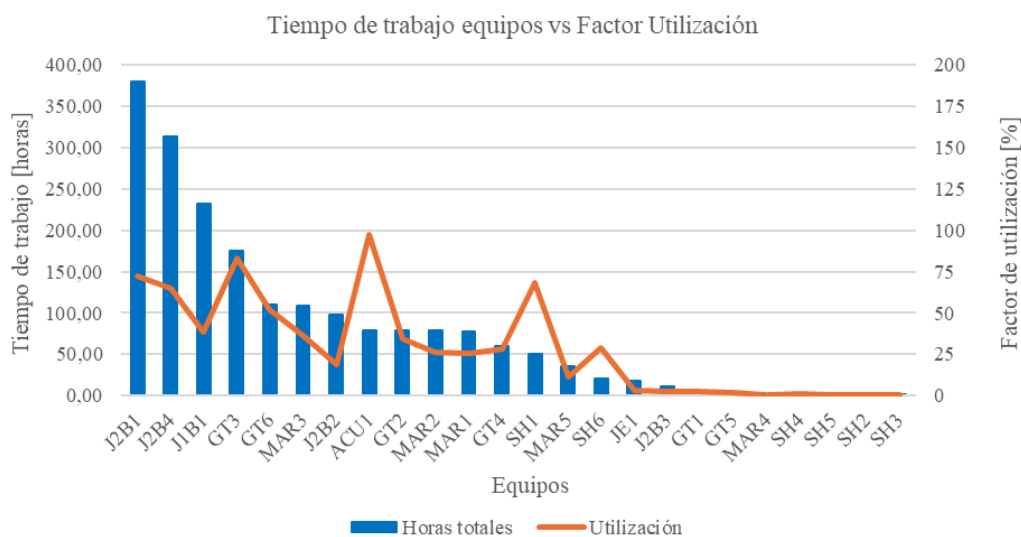


Figura 6.5: Comparación entre tiempo de trabajo y factor de utilización.

Se puede observar de la Figura 6.5 la relación entre las horas totales promedio trabajadas por equipo y su factor de utilización global. Los equipos J2B1 (PD, PF), J2B4 (PD, PF) y J1B1 (PF) destacan por registrar las mayores cargas operativas, con tiempos cercanos a las 300–400 horas acumuladas. A medida que avanza la serie, se observa una caída progresiva en la cantidad de horas trabajadas y en los niveles de utilización, existiendo una fracción de la flota que se mantuvo con baja actividad durante el periodo evaluado.

Por último, los gráficos presentados a continuación muestran el factor de utilización [%] por equipo para cada una de las operaciones unitarias del ciclo de desarrollo en minería subterránea. Cada gráfico indica el porcentaje de tiempo en que los equipos estuvieron operativos respecto al total disponible. La información obtenida permite analizar la distribución temporal de la asignación de trabajo entre los distintos equipos utilizados en la operación.

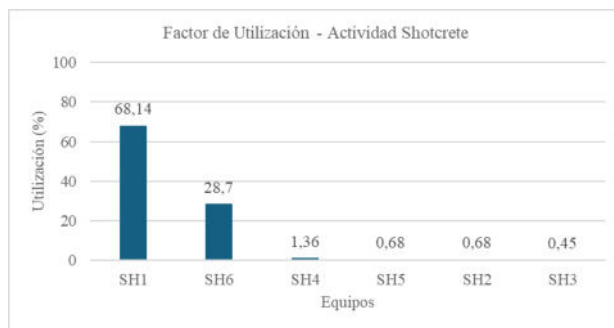


Figura 6.6: Factor de utilización para actividad de Shotcrete. Asignación manual.

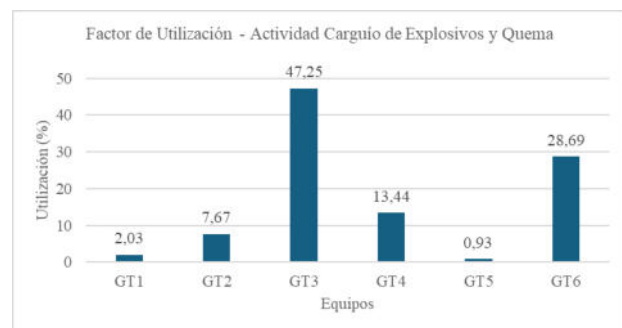


Figura 6.7: Factor de utilización para actividad Carguo de Explosivos y Quema. Asignación manual.

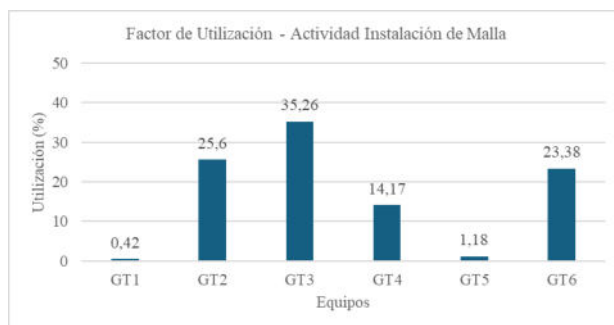


Figura 6.8: Factor de utilización para actividad Instalación de Malla. Asignación manual.

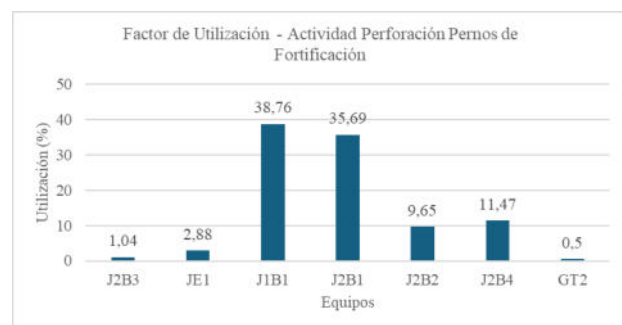


Figura 6.9: Factor de utilización para actividad Perforación Pernos de Fortificación. Asignación manual.

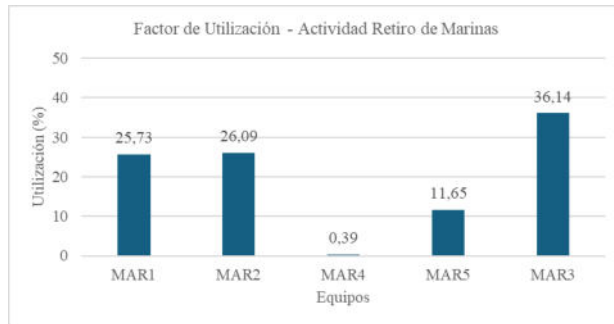


Figura 6.10: Factor de utilización para actividad Retiro de Marinas. Asignación manual.

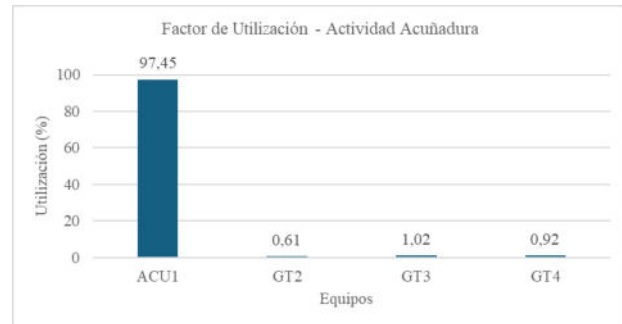


Figura 6.11: Factor de utilización para actividad Acuñadura. Asignación manual.

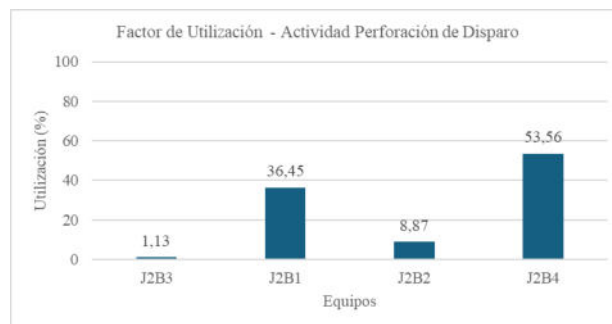


Figura 6.12: Factor de utilización para actividad Perforación de Disparo. Asignación manual.

Finalmente, se presenta la distribución del tiempo acumulado en los distintos frentes de trabajo que permite evaluar cómo se concentró el esfuerzo operativo a lo largo del proyecto, revelando posibles zonas de mayor carga y de congestión o prioridad estratégica dentro del nivel de producción.



Figura 6.13: Tiempo acumulado de trabajo por postura.

La Figura 6.13 muestra el tiempo total acumulado por frente de trabajo. Se identifican frentes con una alta concentración de actividad, destacando Z45 HW C31, C20 N Z47 y C32 N SOC SUR como las posturas con mayor número de horas trabajadas. A partir de estos, la carga tiende a disminuir de forma gradual hacia el resto de los frentes operativos.

Capítulo 7

Análisis y resultados

7.1. Caso de estudio: Aplicación modelo heurístico

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo de simulación desarrollado, comparándolos con los datos reales observados durante la ejecución manual del proyecto. La finalidad es evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas realistas, identificar patrones operacionales, cuantificar la eficiencia en la utilización de recursos, y analizar las mejoras potenciales al incorporar la metodología propuesta.

Con el fin de obtener resultados representativos y estadísticamente robustos, se realizaron 300 simulaciones del caso base, manteniendo la misma configuración de flota utilizada en el proyecto, es decir, 24 equipos. Esta cantidad de réplicas permite capturar adecuadamente la variabilidad inherente al sistema, producto de los tiempos estocásticos de ejecución y traslado modelados mediante distribuciones triangulares, y proporciona un marco confiable para el análisis de comportamiento promedio, desviaciones y posibles escenarios extremos.

El análisis se estructura en dos etapas principales: primero, se estudia el desempeño del sistema bajo la lógica de asignación manual observada en el caso real; luego, se contrastan dichos resultados con los obtenidos mediante la ejecución del modelo heurístico, evaluando su impacto sobre la planificación operativa y el uso de recursos. Por último, se incorporan escenarios de sensibilidad para observar la respuesta del sistema ante variaciones en parámetros críticos.

7.1.1. Tiempo total de trabajo efectivo

Uno de los principales indicadores de desempeño operativo corresponde a la duración total del proyecto, es decir, el tiempo acumulado en que los equipos estuvieron en operación ejecutando las distintas etapas del ciclo de avance. Este parámetro permite establecer una línea base para comparar el comportamiento del sistema bajo diferentes esquemas de asignación de recursos.

En el caso base presentado, la duración del proyecto alcanzó los 81 días, considerando jornadas de trabajo de 18 horas diarias. Este valor corresponde al desempeño observado bajo condiciones reales, sin aplicación de herramientas de optimización.

Posteriormente, se aplicó el modelo heurístico propuesto manteniendo las mismas condiciones iniciales del proyecto, obteniendo una duración promedio del proyecto de 74 días, con una desviación estándar de 0,54, lo que refleja un comportamiento altamente estable y controlado del sistema bajo la lógica del modelo, como se presenta en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Estadísticas básicas sobre duración del proyecto.

Media	73,95
Desv. estándar	0,54
Varianza	0,29
Coef. variacion [%]	0,73

El análisis comparativo revela una reducción de 7,05 días respecto al caso base, equivalente a una mejora temporal del 8,6 % en la duración total del proyecto. Además, el bajo coeficiente de variación de 0,73 %, indica que las simulaciones entregan resultados altamente consistentes, sin fluctuaciones significativas entre réplicas. Esto implica que el modelo no solo optimiza el rendimiento promedio, sino que también reduce la incertidumbre operativa, ofreciendo una base confiable para la toma de decisiones estratégicas, programación de recursos y control del avance en contextos reales de planificación minera.

Cabe señalar que estos resultados consideran únicamente tiempos efectivos de trabajo, sin contemplar detenciones por mantenimiento, fallas mecánicas, restricciones externas ni pérdidas operacionales típicas en terreno.

7.1.2. Carga operativa por actividad

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la carga operativa por actividad, permitiendo identificar las operaciones más demandantes dentro del ciclo productivo y evaluar la eficiencia en la asignación de recursos.

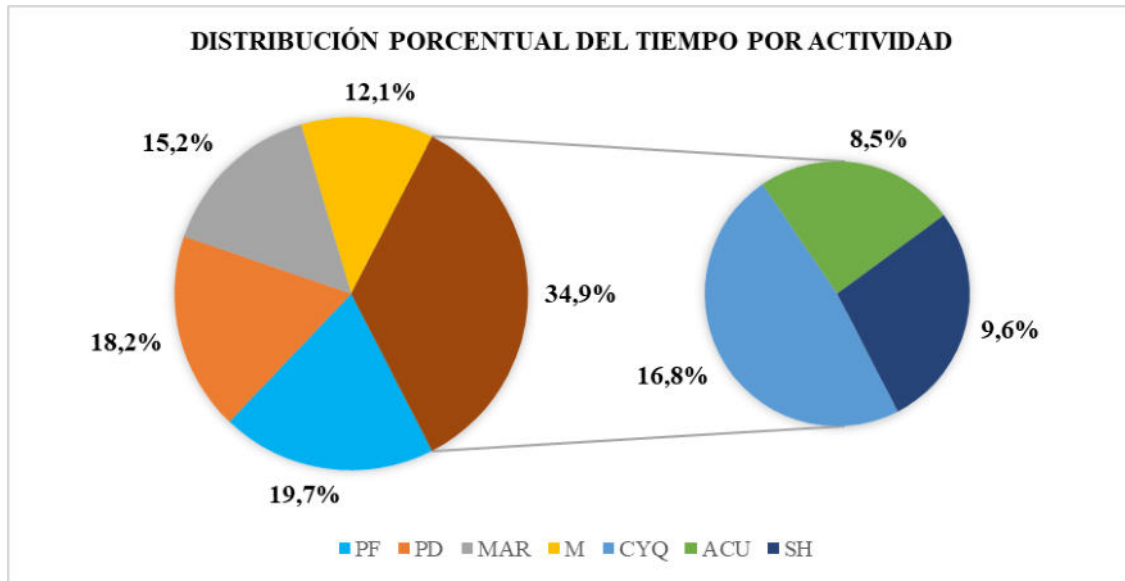


Figura 7.1: Porcentaje de duración de cada actividad del ciclo de avance en desarrollos horizontales (simulación modelo heurístico).

En la Figura 7.1 se observa que la actividad PF representa el mayor porcentaje con 19,7 %, seguida por PD con 18,2 %, y MAR con 15,2 %. El gráfico muestra claramente la carga relativa que cada etapa operativa aporta al ciclo completo, revelando las etapas críticas del ciclo de avance.

A partir de estos resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo heurístico, es posible establecer un punto de comparación con el caso base de asignación manual, como se muestra en la Figura 6.4. Se puede observar, que en ambas configuraciones presentan una concentración significativa del tiempo en actividades de perforación, sin embargo, existen diferencias que reflejan la eficiencia en la reorganización operativa.

Tabla 7.2: Comparación porcentual del tiempo por operación unitaria entre los escenarios de estudio.

Actividad	Asignación Manual [%]	Modelo Heurístico [%]	Diferencia [%]
PF	30,8	19,7	11,1
PD	23,5	18,2	5,3
MAR	15,6	15,2	0,4
M	12,4	12,1	0,3
CYQ	9,7	19,7	10,0
ACU	4,2	8,5	4,3
SH	3,8	9,6	5,8

La tabla 7.2 revela una redistribución significativa en la carga operativa entre actividades, donde algunas etapas disminuyen su participación relativa, mientras otras la incrementan de forma sustancial. Estas diferencias porcentuales permiten inferir cómo el modelo propuesto ajusta el peso de cada operación dentro del ciclo, con el objetivo de mejorar la sincronización, utilización y el flujo continuo entre frentes.

El análisis de la redistribución del tiempo por actividad revela que el modelo heurístico corrige los desbalances operacionales presentes en la asignación manual. Las mayores diferencias porcentuales negativas se observan en Perforación de Pernos (PF) y Perforación de Disparo (PD), con reducciones de 11,1 % y 5,3 %, respectivamente. Esto sugiere que en el caso base estas actividades estaban sobredemandadas, probablemente por una planificación desbalanceada o una sobreasignación de recursos. El modelo, en cambio, logra una asignación más homogénea del tiempo operativo, evitando que las etapas iniciales del ciclo absorban una proporción excesiva del esfuerzo total.

En contrapartida, el modelo heurístico incrementa significativamente la participación relativa de actividades logísticamente críticas que anteriormente estaban subutilizadas. El Carguío de Explosivos y Quema (CYQ), Shotcrete (SH) y Acuñadura (ACU) presentan aumentos de 10,0 %, 5,8 % y 4,3 %, respectivamente, lo cual indica una mejora en la cobertura operativa de estas etapas. Este patrón general, reducción en los extremos de sobreuso y fortalecimiento en actividades tradicionalmente relegadas, confirma que el modelo tiende a balancear la demanda entre especialidades, reduciendo cuellos de botella, mejorando la continuidad del ciclo y promoviendo un uso más eficiente y sincronizado de la flota disponible.

7.1.3. Utilización de recursos y desempeño de equipos

A continuación, se presenta la evaluación de la utilización de los equipos disponibles durante la ejecución del proyecto, bajo la lógica de asignación del modelo heurístico. Este análisis permite identificar cómo se distribuyó el tiempo efectivo de trabajo entre los distintos recursos.

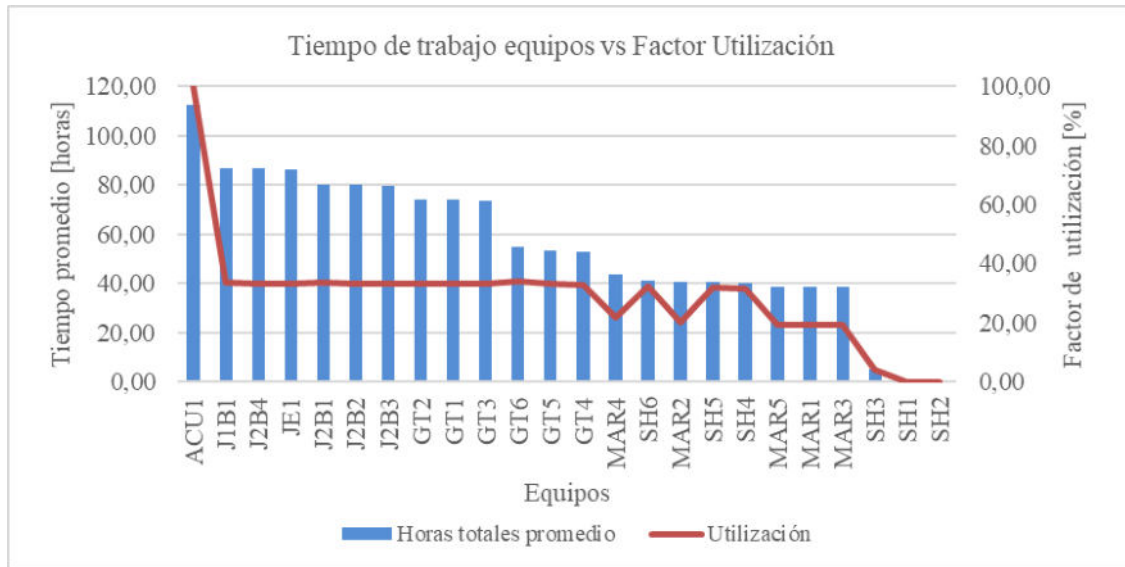


Figura 7.2: Comparación entre tiempo de trabajo y factor de utilización.

En la Figura 7.2 se representa el tiempo promedio trabajado por cada recurso junto con su factor de utilización en base al tiempo total del proyecto. Los primeros tres equipos destacan con valores entre 80 - 100 horas promedio, mientras que su utilización alcanza porcentajes significativos, con una tendencia decreciente en el resto de la flota. Los últimos equipos muestran niveles bajos de actividad y utilización.

Con el objetivo de observar con mayor detalle el comportamiento de los recursos operativos en cada etapa del ciclo de avance, a continuación se presentan gráficos individuales que muestran el factor de utilización por equipo en cada una de las siete operaciones unitarias que conforman el ciclo.

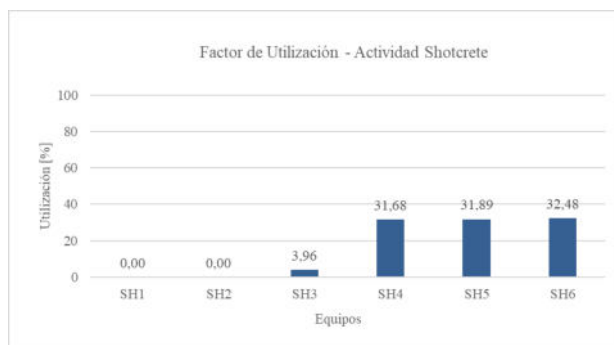


Figura 7.3: Factor de utilización para actividad de Shotcrete. Modelo heurístico.

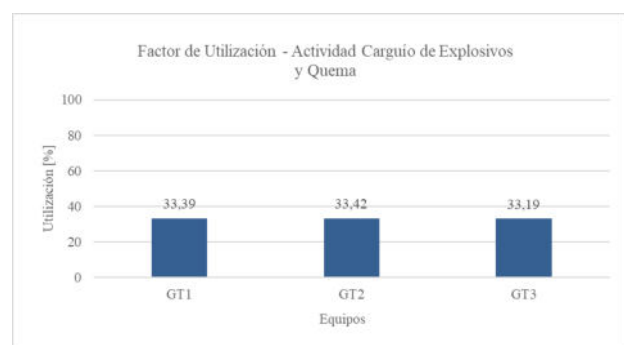


Figura 7.4: Factor de utilización para actividad Carguío de Explosivos y Quema. Modelo heurístico.

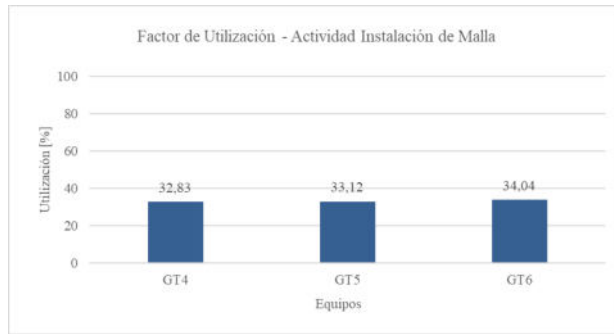


Figura 7.5: Factor de utilización para actividad Instalación de Malla. Modelo heurístico.

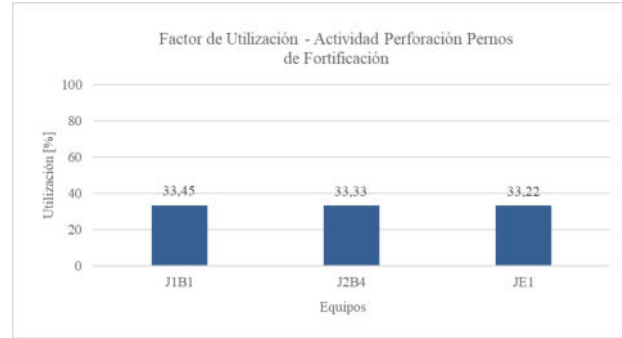


Figura 7.6: Factor de utilización para actividad Perforación Pernos de Fortificación. Modelo heurístico.

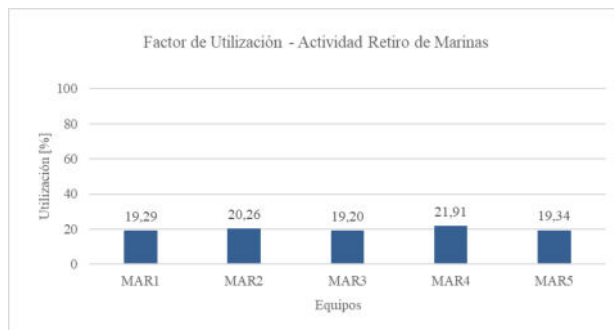


Figura 7.7: Factor de utilización para actividad Retiro de Marinas. Modelo heurístico.

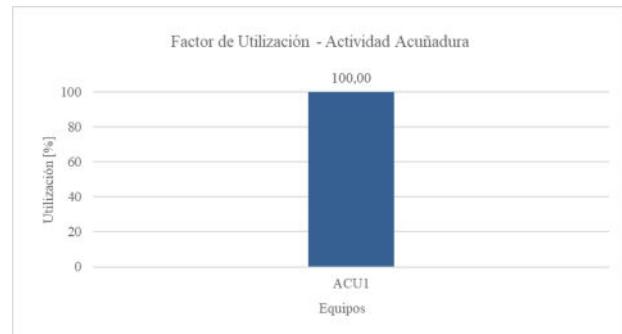


Figura 7.8: Factor de utilización para actividad Acuñadura. Modelo heurístico.

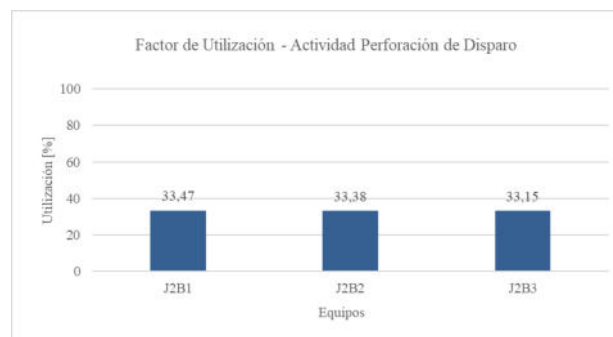


Figura 7.9: Factor de utilización para actividad Perforación de Disparo. Modelo heurístico.

Concluida la presentación de los resultados obtenidos mediante el modelo heurístico, es pertinente avanzar hacia un análisis comparativo que permita dimensionar sus beneficios frente al escenario tradicional de asignación manual. A continuación, se examinan los principales indicadores de desempeño asociados al uso de equipos, destacando diferencias clave en la distribución de carga operativa.

El primer aspecto analizado fue la distribución de horas operativas acumuladas por equipo. La planificación manual evidenció una concentración excesiva en ciertos equipos, principalmente jumbos de perforación como J2B1 y J1B1, como se muestra en la Figura 6.5, los cuales superaron ampliamente el 15 % de utilización individual respecto del total del proyecto. En contraste, otros equipos del mismo tipo presentaron rangos de utilización marginales. Esta desigualdad operativa representa un riesgo de fatiga mecánica, menor disponibilidad futura y potenciales desviaciones del plan de mantenimiento. El modelo heurístico corrigió esta desigualdad, distribuyendo la carga de manera uniforme entre equipos equivalentes, respetando las capacidades técnicas de cada uno.

Tabla 7.3: Comparación de utilización de equipos para ambos casos de estudio.

Indicador	Asignación Manual	Modelo Heurístico
Sobre 30 %	9	16
Sobre 50 %	6	1

El análisis de la utilización de los equipos en ambos escenarios muestra diferencias significativas en la distribución de carga operativa. Según la Tabla 7.3, en la asignación manual solo 9 de los 24 equipos superaron el umbral del 30 % de utilización durante el proyecto, mientras que bajo el modelo heurístico esta cifra aumentó a 16 equipos. Esta diferencia absoluta de 7 equipos representa un aumento del 77,8 % en la cantidad de recursos empleados de forma significativa, reflejando una mayor cobertura operacional por parte del algoritmo. Este indicador es clave, ya que busca evitar la concentración del esfuerzo en una fracción reducida de la flota.

Por otro lado, al analizar el grupo de equipos con una utilización superior al 50 %, se observa un comportamiento opuesto: en la planificación manual, 6 equipos fueron utilizados, mientras que en el modelo heurístico solo 1 equipo superó este umbral. Esto confirma que la heurística no solo aumenta la participación global, sino que también evita sobrecargar equipos, distribuyendo esta carga de manera equitativa entre aquellos. El objetivo es que todos los equipos de una misma actividad compartan de forma balanceada la ejecución de las tareas, evitando concentraciones que puedan afectar la disponibilidad mecánica o anticipar mantenimientos correctivos no programados.

Tabla 7.4: Comparación distribución porcentual promedio de utilización por operación unitaria

Actividad	Asig. Manual [%]	Modelo heurístico [%]	Variación [%]
ACU	100,00	100,00	0,0
MAR	20,00	21,91	9,6
SH	16,67	16,67	0,0
PD	25,00	33,33	33,3
PF	14,28	33,33	133,4
CYQ	16,67	33,33	99,9
M	16,67	33,33	99,9

Complementariamente, la Tabla 7.4 permite visualizar la variación en la distribución porcentual promedio de utilización por actividad. Este enfoque cuantitativo muestra con claridad cómo el modelo heurístico redistribuye eficientemente la carga operativa entre los equipos disponibles para cada operación unitaria. A continuación, se destacan los puntos más relevantes:

- **Perforación de Pernos (PF):** aumenta de un 14,3 % a 33,3 %, lo que representa un incremento del 133,4 %. Esto indica que el modelo logra integrar de forma completa a todos los equipos disponibles para esta actividad, evitando que uno o dos equipos concentren la totalidad de la operación.
- **Carguío y Quema de Explosivos (CYQ):** su participación promedio por equipo se duplica prácticamente, pasando de 16,7 % a 33,3 %, 99,9 %. Esta redistribución favorece el avance equilibrado del ciclo minero, evitando tiempos de espera entre frentes por falta de recursos asignados.
- **Perforación de Disparo (PD):** presenta un incremento del 33,3 %, lo que refuerza la idea de una planificación más balanceada dentro de una de las actividades más críticas del proceso productivo.
- **Instalación de Malla (M):** experimenta también un alza relevante de 16,7 % a 33,3 %, reflejando un uso pleno de la dotación disponible en esta etapa.
- **Acuñadura (ACU) y Shotcrete (SH):** mantienen su participación inalterada debido a condiciones particulares. En el caso de ACU, sólo existe un equipo disponible; en SH, el número de equipos utilizados es constante, sin diferencias entre escenarios.

Este tipo de redistribución demuestra que el modelo no sólo busca aumentar la participación global de la flota, sino también **reducir la concentración operativa y promover una utilización homogénea** dentro de cada tipo de tarea. En términos operativos, esto se traduce en:

- Menor riesgo de sobrecarga en equipos críticos.

- Mejor estabilidad en la planificación del mantenimiento.
- Mayor continuidad operativa y reducción de tiempos muertos.
- Aumento en la productividad efectiva del sistema.

Adicionalmente, al observar las distribuciones normales de densidad para cada operación unitaria, se aprecia una clara tendencia general hacia la simetría en la mayoría de las actividades, ver Anexos [A.1](#) al [A.7](#). Las curvas presentan formas bien definidas, sin sesgos extremos ni presencia de valores atípicos dominantes, lo que respalda la coherencia del modelo heurístico en la asignación temporal de los equipos.

Las actividades de perforación, tanto de disparo como de pernos de fortificación, destacan particularmente al presentar distribuciones concentradas en torno a sus promedios, con una media general en torno a las 80 y 86 horas respectivamente, evidenciando una carga operativa sostenida y bien distribuida entre los equipos asignados. Estas dos operaciones representan las etapas más demandantes del ciclo, por lo que lograr una asignación equitativa y estable en estas fases es clave para el éxito del proyecto. En general, estas distribuciones permiten confirmar gráficamente que el modelo no sólo optimiza la utilización total de equipos, sino que también homogeniza los tiempos de operación entre recursos equivalentes, minimizando diferencias internas y reduciendo la probabilidad de cuellos de botella por sobreactuación de algún equipo específico.

7.1.4. Distribución de la carga de trabajo acumulada por frente

En esta sección se analiza cómo se distribuye espacialmente la carga de trabajo acumulada por los distintos frentes activos del proyecto.



Figura 7.10: Tiempo acumulado de trabajo por postura (simulación modelo heurístico).

La Figura 7.10 muestra el tiempo acumulado en horas por frente de trabajo. El frente Z45 HW C31 concentra la mayor cantidad de horas, superando las 110 horas acumuladas, seguido por otros frentes como C32 S Z44, C20 N Z47 y Z48 HW C22, que también registran altos niveles de intervención operativa. A partir de estos valores, la carga decrece gradualmente entre el resto de las posturas activas

Comparando los resultados entre asignación manual, ver Figura 6.13 y modelo heurístico, ver Figura 7.10, se aprecia una mejora sustancial en la distribución territorial de la carga de trabajo. Mientras que en el caso base se acumulan hasta 200 horas en la postura más utilizada Z45 HW C31, el modelo reduce esa cifra a 109,5 horas, logrando una disminución del 45,3 %. Este patrón se repite para varias de las posturas coincidentes, como Z48 FW C22 con 42,4 % de disminución y la postura Z32 N SOC SUR con una disminución del 48,1 %, lo que implica una menor concentración de recursos en puntos específicos en períodos extensos, permitiendo una utilización más distribuida y estratégica de los frentes disponibles.

Tabla 7.5: Frentes con mayor tiempo acumulado.

Asignación Manual			Modelo Heurístico	
	Postura	Horas acum.	Postura	Horas acum.
1	Z45 HW C31	200,17	Z45 HW C31	109,54
2	Z48 FW C22	142,17	Z48 FW C22	81,90
3	C20 N Z47	134,83	C32 S Z44	66,08
4	C32 S Z44	128,25	Z48 HW C25	65,71
5	C32 N SOC SUR	126,08	C30 N Z47	65,54
6	Z48 HW C25	119,25	C32 N SOC SUR	65,44
7	Z49 FW C24	87,17	Z48 HW C22	63,83
8	C30 N Z47	85,33	C20 N Z47	62,49
9	Z48 HW C22	84,02	Z49 FW C24	55,82

La Tabla 7.5 sintetiza este comportamiento, mostrando cómo el modelo redistribuye el esfuerzo hacia otras posturas de manera más equilibrada. Estas variaciones responden directamente a los criterios de selección del modelo, que prioriza frentes con mayor cantidad de cruces estructurales, ver Anexo A.3, considera las frentes con mayor cantidad de disparos acumulados, ver Anexo A.2 y tiene en cuenta el menor tiempo de traslado que le toma a un equipo ir de una frente a otra, ver Anexo A.5. Esta lógica permite una asignación estratégica y balanceada, que evita la sobreutilización de posturas críticas y reduce la ociosidad operacional.

Además del descenso en las horas acumuladas, se observa un cambio en el orden de prioridad operativa, donde posturas como C32 S Z44 y Z48 HW C25 ascienden, mientras otras como C20 N Z47 descienden, reflejando la capacidad adaptativa del modelo frente a condiciones logísticas y de producción, además de demostrar coherencia en la lógica aplicada sobre los criterios mencionados anteriormente.

7.1.5. Asignación de equipos

Finalmente, una de las evidencias clave del correcto funcionamiento del modelo propuesto se refleja en la forma en que los recursos fueron asignados temporalmente a lo largo del ciclo operacional. La Figura 7.11 muestra la Carta Gantt consolidada de tareas por frente durante los primeros 15 días, resultado de ejecutar 300 simulaciones independientes del caso base utilizando el algoritmo desarrollado.

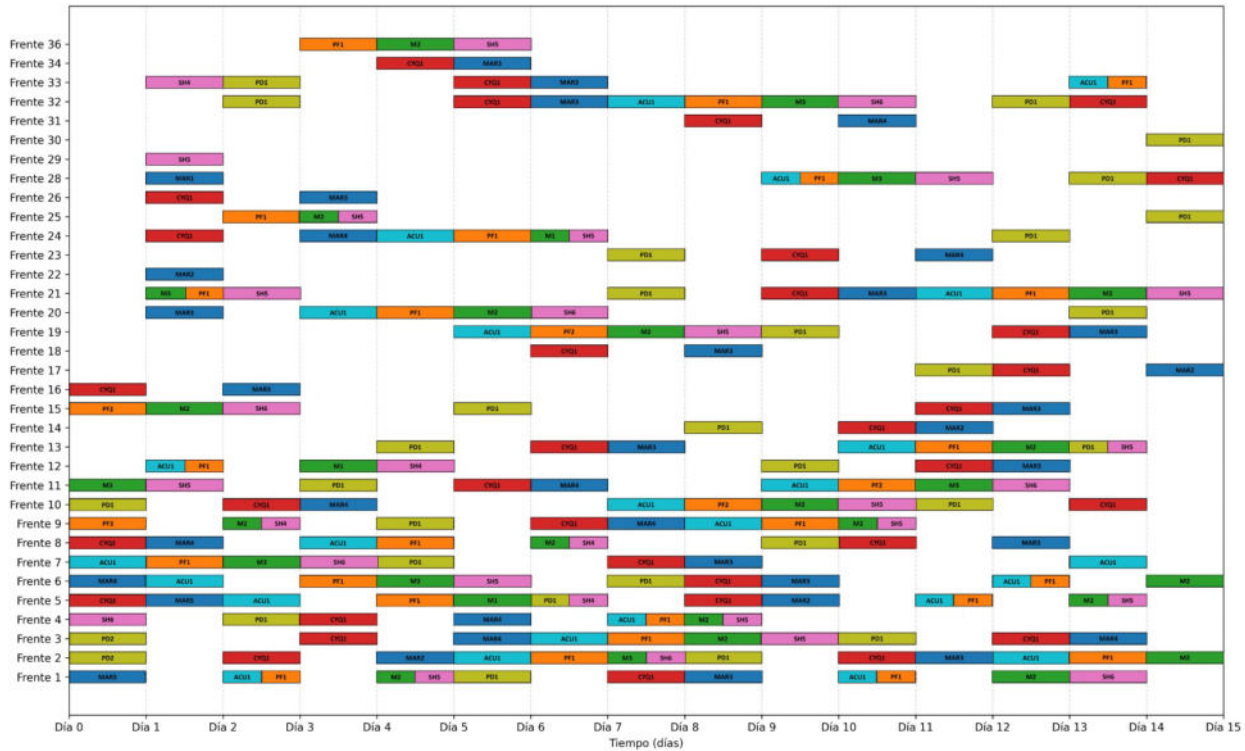


Figura 7.11: Carta Gantt caso de estudio con aplicación modelo heurístico.

En esta visualización, cada bloque representa una actividad específica (por ejemplo, perforación, acuñadura, shotcrete, etc.) realizada en un determinado frente de trabajo durante un intervalo de tiempo determinado. Se puede observar que existe una distribución secuencial y lógica de las operaciones unitarias, lo cual confirma que el algoritmo respeta el orden cronológico de los procesos definidos en el flujo de producción típico de una obra de preparación minera subterránea.

Este comportamiento operacional validado visualmente permite afirmar que el modelo no solo busca eficiencia en la utilización de recursos, sino que además incorpora restricciones técnicas reales, garantizando que no se asignen actividades incompatibles en simultáneo sobre el mismo frente. De esta forma, se evita cualquier solapamiento entre tareas, respetando completamente la lógica constructiva del ciclo minero.

Adicionalmente, se observa una asignación coherente y progresiva de actividades en el tiempo, donde las tareas no se encuentran concentradas en ciertos días ni agrupadas sobre

frentes específicos, sino distribuidas de forma escalonada. Esto favorece una mayor fluidez operativa, reduce interferencias logísticas, y permite que el uso de la flota sea continuo y balanceado a lo largo del horizonte temporal simulado.

Por último, si bien los tiempos representados corresponden únicamente a tiempos efectivos de trabajo, sin considerar detenciones por mantención, reubicaciones ni pérdidas operativas habituales en faena, el modelo es capaz de construir una asignación temporalmente robusta, alineada con la lógica operativa de la obra. Esta consistencia, incluso bajo un escenario simplificado, respalda la solidez del algoritmo propuesto y su potencial aplicabilidad en contextos reales de planificación minera.

7.2. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de evaluar la robustez del modelo heurístico frente a perturbaciones en sus parámetros principales, se realizó un análisis de sensibilidad sobre tres factores operacionales clave:

- Tiempo de ejecución de operaciones unitarias
- Cantidad de equipos disponibles
- Ponderador de penalización logística por traslado (Tiempo Traslado)

Cabe destacar que, para los análisis de sensibilidad presentados en esta sección, se ha utilizado una definición ampliada de duración del proyecto, que contempla tanto los tiempos efectivos de trabajo como los tiempos de espera asociados a la falta de disponibilidad de equipos en los distintos frentes. Esta elección se justifica en el interés de reflejar el impacto total de las decisiones operativas sobre el desempeño global del sistema, considerando no solo el avance de las actividades asignadas, sino también las ineficiencias derivadas de la descoordinación en la asignación de recursos.

En contraste, en el resto del trabajo se ha optado por utilizar la duración efectiva, definida como la suma total del tiempo en que los equipos estuvieron operando, ya que esta métrica se alinea mejor con el análisis de productividad y eficiencia operativa. Sin embargo, para evaluar cómo los cambios en las condiciones de borde o restricciones afectan la ejecución global del proyecto, se considera útil incorporar los tiempos de espera como parte del análisis.

Es importante señalar que esta aproximación no implica que el proyecto, en términos calendario, haya durado más días, sino que busca mostrar cuánto tiempo adicional acumulan los frentes al verse imposibilitados de avanzar por falta de recursos, lo que en escenarios reales puede traducirse en impactos sobre la planificación, utilización de equipos y cumplimiento de metas productivas.

Tabla 7.6: Ponderadores para análisis de sensibilidad.

Escenario	Tiempo Op. Unitarias	Equipos	Tiempo Traslados
S1	x 0,5	-9	x 0
S2	x 1,0	0	x 0,1
S3	x 1,5	+12	x 0,5

Para cada parámetro se definieron tres escenarios: S1 y S3 representan condiciones extremas del sistema, siendo el primero un límite inferior, con tiempos operativos mínimos, menor dotación de equipos y sin considerar penalización por traslados; y el segundo, un límite superior, con mayores tiempos de operación, mayor disponibilidad de equipos y alta penalización logística. El escenario S2 corresponde al caso base del estudio.

En cada análisis, se modificó únicamente un parámetro, manteniendo constantes los demás. Cada escenario fue simulado 30 veces, registrando la duración real del proyecto, su desviación estándar y la utilización promedio de los equipos, como se resume en la Tabla 7.6.

Tabla 7.7: Detalle variación de tiempos operaciones unitarias en análisis de sensibilidad.

Escenario	Duración Real [días]	Desv. Estándar	Utilización Prom. [%]
S1	72	0,47	29,7
S2	139	0,48	29,0
S3	198	0,68	29,2

Se puede observar, en la Tabla 7.7, que al reducir los tiempos de cada una de las operaciones unitarias del ciclo en un 50 % (S1), la duración efectiva del proyecto disminuye a 72 días, mientras que al aumentarlos en un 50 % (S3), esta se eleva a 198 días, lo que representa una diferencia del 175 %. Esta variación se debe a que el algoritmo utiliza una distribución triangular para generar tiempos aleatorios por actividad; al disminuir estos valores, los equipos completan más ciclos en menos tiempo, liberando recursos más rápidamente y reduciendo las esperas acumuladas. A pesar de estos cambios, la utilización promedio de los equipos se mantiene relativamente estable con un 29 % aprox. indicando que el modelo distribuye eficientemente los recursos según disponibilidad. Sin embargo, el aumento en la desviación estándar en S3 (0,68) refleja una mayor variabilidad bajo condiciones operativas lentas.

Tabla 7.8: Detalle variación de equipos en análisis de sensibilidad.

Escenario	Duración Real [días]	Desv. Estándar	Utilización Prom. [%]
S1	160	0,43	46,7
S2	139	0,48	29,2
S3	78	0,66	19,4

En la Tabla 7.8 se puede ver que en el escenario S1, donde se reduce la flota en 9 equipos, la duración real del proyecto se extiende a 160 días, mientras que en S3, con 12 equipos adicionales, esta disminuye a 78 días. La diferencia de 82 días entre ambos extremos demuestra que la dotación de recursos tiene un impacto directo en el ritmo de avance.

Respecto a la utilización promedio, se observa una relación inversa: con menos equipos (S1), la utilización alcanza un 46,2 %, mientras que con mayor flota de equipos (S3), baja a 19,4 %. Esto se debe porque, al mantenerse constantes los tiempos de operación unitaria, una menor cantidad de equipos obliga a que cada uno trabaje durante más tiempo para cubrir la misma carga total, lo que incrementa su porcentaje de utilización. En cambio, al aumentar la cantidad de equipos, el trabajo se distribuye entre más unidades, reduciendo el tiempo operativo individual y, por ende, su nivel de utilización. La desviación estándar se incrementa en S3 a 0,66, lo que sugiere mayor variabilidad en la asignación de equipos cuando hay mayor flota disponible.

Tabla 7.9: Detalle variación en tiempos de traslados en análisis de sensibilidad.

Escenario	Duración Real [días]	Desv. Estándar	Utilización Prom. [%]
S1	130	0,44	29,2
S2	139	0,48	29,2
S3	155	0,47	29,2

De la Tabla 7.9 se observa que a medida en la que se aumenta el valor del ponderador asociado a los tiempos de traslados (de 0 en S1 a 0,5 en S3), la duración real del proyecto también se incrementa, pasando de 130 días en S1 a 155 días en S3. Esta diferencia de 25 días se explica porque el modelo, al enfrentar penalizaciones más altas por distancia, prioriza asignaciones más cercanas, lo que limita la flexibilidad operativa y puede generar tiempos de espera más prolongados antes de asignar un equipo. No obstante, la utilización promedio de los equipos se mantiene prácticamente constante en 29,2 %, en los tres escenarios, lo que sugiere que, pese a los cambios en la estrategia de asignación, el modelo logra mantener un uso balanceado de los recursos. La desviación estándar no presenta variaciones significativas, indicando una respuesta estable del sistema ante este tipo de perturbación.

El análisis de sensibilidad mostró que el modelo responde de forma lógica ante cambios en sus parámetros clave. Al reducir los tiempos de operación unitaria, el proyecto se ejecuta más rápido, mientras que al aumentarlos, la duración total crece significativamente. Del mismo modo, al disminuir la cantidad de equipos disponibles, se extiende el proyecto y aumenta la utilización promedio, ya que cada equipo debe asumir más trabajo. Por el contrario, con más equipos, la ejecución es más rápida, pero con una eficiencia individual menor.

En cuanto a los traslados, penalizarlos en mayor medida limita la movilidad de los equipos y tiende a ralentizar el avance general del proyecto, aunque no afecta de forma relevante su utilización. En conjunto, estos resultados confirman que el modelo se comporta de manera consistente con lo esperado y que es capaz de adaptarse correctamente a distintos escenarios de planificación.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo y aplicación de un modelo heurístico para la asignación de recursos en proyectos de obras de preparación mina, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa en escenarios reales de planificación. A partir de una base de datos obtenida de un proyecto real que fue el caso base con asignación manual de recursos, se generaron más de 300 simulaciones que permitieron contrastar de manera objetiva el desempeño del modelo propuesto frente a la metodología tradicional.

Los resultados evidenciaron mejoras sustanciales en dos indicadores clave: la reducción del tiempo total del proyecto y el incremento en el factor de utilización de los equipos. En cuanto a la duración total del proyecto, el modelo propuesto logró disminuir el plazo estimado de ejecución desde 81 días, según el escenario de asignación manual, a 74 días, lo que representa una reducción del 8,6 % aproximadamente, del tiempo total requerido. Este logro es reflejo de una asignación más estratégica de los equipos, orientada a mantener la continuidad operativa y minimizar los tiempos entre actividades. Respecto a la distribución de la carga de trabajo por frente, el modelo aplicó una lógica de planificación orientada a priorizar frentes con mayor potencial de apertura futura, según criterios de cruce, cantidad de disparos y tiempos de traslado, lo que permite mantener las unidades operativas en actividad constante, evitando períodos prolongados sin tareas asignadas. Esta heurística favorece una programación dinámica, flexible y alineada con el desarrollo progresivo de la obra. Por otro lado, los factores de utilización por equipo se mantuvieron en rangos óptimos, mayoritariamente entre un 30 % y 50 %, lo que permitió distribuir de forma equitativa la carga operativa y evitar la sobre carga de unidades críticas. Este equilibrio no solo mejora la eficiencia global del sistema, sino que también reduce riesgos asociados a desgaste o saturación operativa, marcando una mejora sustantiva frente a la planificación tradicional.

Más allá de los resultados numéricos, el modelo representa una herramienta estratégica de apoyo a la toma de decisiones. Permite explorar múltiples escenarios, simular asignaciones bajo distintas condiciones y adaptar la estrategia según criterios logísticos definidos por el usuario, como cantidad de disparos por frente, tiempos de traslado o cantidad de cruces estructurales. Esta flexibilidad entrega un alto valor práctico para empresas, especialmente

en contextos donde la eficiencia y la continuidad operativa son factores determinantes para la rentabilidad de los proyectos.

En síntesis, el algoritmo desarrollado no solo mejora métricas operacionales, sino que también representa un cambio de paradigma en la forma de planificar la asignación de recursos en minería subterránea. Su implementación contribuye a una operación más predecible y eficiente, posicionándose como una solución con alto potencial de escalamiento y aplicación en diversos contextos productivos del sector.

8.2. Recomendaciones

A partir del desarrollo y resultados de esta memoria, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en el modelo:

- Se recomienda ampliar el modelo incorporando tiempos no productivos, tales como demoras por mantención, fallas mecánicas, tiempos de espera, o interrupciones por disponibilidad de servicios auxiliares. Esto permitiría aproximar aún más la simulación a las condiciones reales de operación subterránea, entregando resultados más robustos para la toma de decisiones en planificación minera.
- El modelo actual busca una solución funcional y factible, pero no necesariamente óptima en términos matemáticos. Se sugiere reestructurarlo mediante técnicas de optimización combinatoria o heurísticas avanzadas que permitan explorar un espacio más amplio de soluciones, maximizando el rendimiento global del sistema según criterios estratégicos definidos por el usuario.
- Dada la flexibilidad del algoritmo desarrollado, es recomendable utilizarlo para evaluar escenarios alternativos de dotación de recursos. Esto permitiría identificar combinaciones mínimas de equipos que aseguren el cumplimiento de plazos, reducir costos operacionales y explorar la flota ideal de acuerdo con las condiciones y restricciones reales de cada contrato o proyecto.
- Finalmente, se sugiere validar en campo los resultados del modelo, ya sea mediante pruebas piloto o implementaciones parciales. Esta validación empírica permitiría ajustar parámetros, corregir supuestos y generar retroalimentación valiosa para mejorar la aplicabilidad práctica del algoritmo, facilitando su adopción en ambientes reales de planificación y control de operaciones.

Apéndice A

Anexos

1. Archivos de entrada del algoritmo de simulación

Tabla A.1: Parámetros de distribución de tiempos para operaciones unitarias.

Actividad	Tiempo Media [min]	Tiempo Máximo [min]	Tiempo Mínimo [min]
MAR	85	100	40
ACU	35	60	25
CYQ	80	120	60
M	65	70	30
PD	110	150	40
PF	100	140	40
SH	35	60	30

Tabla A.2: Base de datos inicial de posturas, operaciones unitarias y cantidad de disparos.

Posturas	Operación Unitaria	Disparos Totales
C20 N Z47	Retiro de marinas	7
C20 N Z49	Shotcrete	4
C22 N Z49	Retiro de marinas	2
C24 N Z50	Perforación para pernos de fortificación	1
C25 N Z48	Perforación para pernos de fortificación	1
C25 N Z50	Perforación de disparo	2
C25 Z45/46	Instalación de malla	1
C30 N Z47	Perforación de disparo	7

C30 N Z48	Perforación de disparo	1
C30 S Z48	Shotcrete	1
C31 N Z46	Acuñadura	1
C32 N SOC SUR	Perforación de disparo	7
C32 S Z44	Shotcrete	8
Z39 HW C28	Carguío de explosivos y quema	3
Z43 HW C30	Carguío de explosivos y quema	3
Z43 HW C31	Retiro de marinas	2
Z45 FW C29	Retiro de marinas	1
Z45 HW C31	Perforación para pernos de fortificación	13
Z46 HW C30	Retiro de marinas	1
Z47 HW C30	Acuñadura	2
Z48 FW C20	Perforación de disparo	4
Z48 FW C22	Perforación de disparo	9
Z48 FW C25	Acuñadura	2
Z48 HW C22	Carguío de explosivos y quema	7
Z48 HW C23	Acuñadura	1
Z48 HW C25	Perforación de disparo	7
Z48 HW C30	Carguío de explosivos y quema	2
Z49 FW C20	Carguío de explosivos y quema	1
Z49 FW C22	Perforación para pernos de fortificación	5
Z49 FW C24	Carguío de explosivos y quema	6
Z49 FW C25	Perforación de disparo	6
Z49 FW C27	Acuñadura	2
Z49 HW C22	Carguío de explosivos y quema	4
Z49 HW C24	Perforación de disparo	3
Z49 HW C28	Perforación para pernos de fortificación	1
Z50 HW C24	Carguío de explosivos y quema	1

Tabla A.3: Cantidad de cruces según calle del proyecto MN-RRNN.

Calle	Cantidad Cruces
19	2
20	4
21	2
22	6
23	5
24	8
25	8
26	9
27	2
28	2
29	12
30	11
31	6
32	3

Tabla A.4: Listado de equipos para aplicación del modelo.

Actividad	Equipo
Retiro de Marinas	MAR1-MAR2-MAR3-MAR4-MAR5
Acuñadura	ACU1
Carguío de Explosivos y Quema	CYQ1-CYQ2-CYQ3
Instalación de Malla	M1-M2-M3
Perforación de Disparo	PD1-PD2-PD3
Perforación Pernos de Fortificación	PF1-PF2-PF3
Shotcrete	SH1-SH2-SH3-SH4-SH5-SH6

Tabla A.5: Matriz de tiempos de traslado entre posturas en minutos.

	C20 N Z47	C20 N Z49	C22 N Z49	C24 N Z50	C25 N Z48	C25 N Z50	C25 Z45/46	C30 N Z47	C30 N Z48	C30 S Z48	C31 N Z46	C32 N SOC SUR	C32 S Z44	Z39 HW C28	Z43 HW C30	Z43 HW C31	Z45 FW C29	Z45 HW C31
C20 N Z47	0	3	9	16,5	16,5	19,5	18	30	31,5	31,5	34,5	40,5	40,5	85,5	94,5	93	102	99
C20 N Z49	3	0	6	13,5	16,5	16,5	21	33	31,5	31,5	37,5	43,5	43,5	88,5	97,5	96	105	102
C22 N Z49	9	6	0	7,5	10,5	10,5	15	27	25,5	25,5	31,5	37,5	37,5	82,5	91,5	90	99	96
C24 N Z50	16,5	13,5	7,5	0	6	3	10,5	22,5	21	21	27	33	33	78	87	85,5	94,5	91,5
C25 N Z48	16,5	16,5	10,5	6	0	3	4,5	16,5	15	15	21	27	27	72	81	79,5	88,5	85,5
C25 N Z50	19,5	16,5	10,5	3	3	0	7,5	19,5	18	18	24	30	30	75	84	82,5	91,5	88,5
C25 Z45/46	18	21	15	10,5	4,5	7,5	0	18	19,5	19,5	19,5	22,5	22,5	67,5	76,5	75	84	81
C30 N Z47	30	33	27	22,5	16,5	19,5	18	0	1,5	1,5	4,5	10,5	10,5	55,5	64,5	63	72	69
C30 N Z48	31,5	31,5	25,5	21	15	18	19,5	1,5	0	0	6	12	12	57	66	64,5	73,5	70,5
C30 S Z48	31,5	31,5	25,5	21	15	18	19,5	1,5	0	0	6	12	12	57	66	64,5	73,5	70,5
C31 N Z46	34,5	37,5	31,5	27	21	24	19,5	4,5	6	6	0	6	6	51	60	58,5	67,5	64,5
C32 N SOC SUR	40,5	43,5	37,5	33	27	30	22,5	10,5	12	12	6	0	0	45	54	52,5	61,5	58,5
C32 S Z44	40,5	43,5	37,5	33	27	30	22,5	10,5	12	12	6	0	0	45	54	52,5	61,5	58,5
Z39 HW C28	85,5	88,5	82,5	78	72	75	67,5	55,5	57	57	51	45	45	0	15	16,5	19,5	22,5
Z43 HW C30	94,5	97,5	91,5	87	81	84	76,5	64,5	66	66	60	54	54	15	0	1,5	7,5	7,5
Z43 HW C31	93	96	90	85,5	79,5	82,5	75	63	64,5	64,5	58,5	52,5	52,5	16,5	1,5	0	9	6
Z45 FW C29	102	105	99	94,5	88,5	91,5	84	72	73,5	73,5	67,5	61,5	61,5	19,5	7,5	9	0	3
Z45 HW C31	99	102	96	91,5	85,5	88,5	81	69	70,5	70,5	64,5	58,5	58,5	22,5	7,5	6	3	0
Z46 HW C30	103,5	106,5	100,5	96	90	93	85,5	73,5	75	75	69	63	63	24	9	10,5	4,5	4,5
Z47 HW C30	106,5	109,5	103,5	99	93	96	88,5	76,5	78	78	72	66	66	27	12	13,5	7,5	7,5
Z48 FW C20	124,5	127,5	121,5	117	111	114	106,5	94,5	96	96	90	84	84	39	30	31,5	22,5	25,5
Z48 FW C22	121,5	124,5	118,5	114	108	111	103,5	91,5	93	93	87	81	81	36	27	28,5	19,5	22,5
Z48 FW C25	117	120	114	109,5	103,5	106,5	99	87	88,5	88,5	82,5	76,5	76,5	31,5	22,5	24	15	18
Z48 HW C22	121,5	124,5	118,5	114	108	111	103,5	91,5	93	93	87	81	81	36	27	28,5	19,5	22,5
Z48 HW C23	120	123	117	112,5	106,5	109,5	102	90	91,5	91,5	85,5	79,5	79,5	34,5	25,5	27	18	21
Z48 HW C25	117	120	114	109,5	103,5	106,5	99	87	88,5	88,5	82,5	76,5	76,5	31,5	22,5	24	15	18
Z48 HW C30	109,5	112,5	106,5	102	96	99	91,5	79,5	81	81	75	69	69	30	15	16,5	10,5	10,5
Z49 FW C20	127,5	130,5	124,5	120	114	117	109,5	97,5	99	99	93	87	87	42	33	34,5	25,5	28,5
Z49 FW C22	124,5	127,5	121,5	117	111	114	106,5	94,5	96	96	90	84	84	39	30	31,5	22,5	25,5
Z49 FW C24	121,5	124,5	118,5	114	108	111	103,5	91,5	93	93	87	81	81	36	27	28,5	19,5	22,5
Z49 FW C25	120	123	117	112,5	106,5	109,5	102	90	91,5	91,5	85,5	79,5	79,5	34,5	25,5	27	18	21
Z49 FW C27	117	120	114	109,5	103,5	106,5	99	87	88,5	88,5	82,5	76,5	76,5	31,5	22,5	24	15	18
Z49 HW C22	124,5	127,5	121,5	117	111	114	106,5	94,5	96	96	90	84	84	39	30	31,5	22,5	25,5
Z49 HW C24	121,5	124,5	118,5	114	108	111	103,5	91,5	93	93	87	81	81	36	27	28,5	19,5	22,5
Z49 HW C28	115,5	118,5	112,5	108	102	105	97,5	85,5	87	87	81	75	75	30	21	22,5	13,5	16,5
Z50 HW C24	124,5	127,5	121,5	117	111	114	106,5	94,5	96	96	90	84	84	39	30	31,5	22,5	25,5

	Z46 HW C30	Z47 HW C30	Z48 FW C20	Z48 FW C22	Z48 FW C25	Z48 HW C22	Z48 HW C23	Z48 HW C25	Z48 HW C30	Z49 FW C20	Z49 FW C22	Z49 FW C24	Z49 FW C25	Z49 FW C27	Z49 HW C22	Z49 HW C24	Z49 HW C28	Z50 HW C24
C20 N Z47	103,5	106,5	124,5	121,5	117	121,5	120	117	109,5	127,5	124,5	121,5	120	117	124,5	121,5	115,5	124,5
C20 N Z49	106,5	109,5	127,5	124,5	120	124,5	123	120	112,5	130,5	127,5	124,5	123	120	127,5	124,5	118,5	127,5
C22 N Z49	100,5	103,5	121,5	118,5	114	118,5	117	114	106,5	124,5	121,5	118,5	117	114	121,5	118,5	112,5	121,5
C24 N Z50	96	99	117	114	109,5	114	112,5	109,5	102	120	117	114	112,5	109,5	117	114	108	117
C25 N Z48	90	93	111	108	103,5	108	106,5	103,5	96	114	111	108	106,5	103,5	111	108	102	111
C25 N Z50	93	96	114	111	106,5	111	109,5	106,5	99	117	114	111	109,5	106,5	114	111	105	114
C25 Z45/46	85,5	88,5	106,5	103,5	99	103,5	102	99	91,5	109,5	106,5	103,5	102	99	106,5	103,5	97,5	106,5
C30 N Z47	73,5	76,5	94,5	91,5	87	91,5	90	87	79,5	97,5	94,5	91,5	90	87	94,5	91,5	85,5	94,5
C30 N Z48	75	78	96	93	88,5	93	91,5	88,5	81	99	96	93	91,5	88,5	96	93	87	96
C30 S Z48	75	78	96	93	88,5	93	91,5	88,5	81	99	96	93	91,5	88,5	96	93	87	96
C31 N Z46	69	72	90	87	82,5	87	85,5	82,5	75	93	90	87	85,5	82,5	90	87	81	90
C32 N SOC SUR	63	66	84	81	76,5	81	79,5	76,5	69	87	84	81	79,5	76,5	84	81	75	84
C32 S Z44	63	66	84	81	76,5	81	79,5	76,5	69	87	84	81	79,5	76,5	84	81	75	84
Z39 HW C28	24	27	39	36	31,5	36	34,5	31,5	30	42	39	36	34,5	31,5	39	36	30	39
Z43 HW C30	9	12	30	27	22,5	27	25,5	22,5	15	33	30	27	25,5	22,5	30	27	21	30
Z43 HW C31	10,5	13,5	31,5	28,5	24	28,5	27	24	16,5	34,5	31,5	28,5	27	24	31,5	28,5	22,5	31,5
Z45 FW C29	4,5	7,5	22,5	19,5	15	19,5	18	15	10,5	25,5	22,5	19,5	18	15	22,5	19,5	13,5	22,5
Z45 HW C31	4,5	7,5	25,5	22,5	18	22,5	21	18	10,5	28,5	25,5	22,5	21	18	25,5	22,5	16,5	25,5
Z46 HW C30	0	3	21	18	13,5	18	16,5	13,5	6	24	21	18	16,5	13,5	21	18	12	21
Z47 HW C30	3	0	18	15	10,5	15	13,5	10,5	3	21	18	15	13,5	10,5	18	15	9	18
Z48 FW C20	21	18	0	3	7,5	3	4,5	7,5	15	3	6	9	10,5	13,5	6	9	15	12
Z48 FW C22	18	15	3	0	4,5	0	1,5	4,5	12	6	3	6	7,5	10,5	3	6	12	9
Z48 FW C25	13,5	10,5	7,5	4,5	0	4,5	3	0	7,5	10,5	7,5	4,5	3	6	7,5	4,5	7,5	7,5
Z48 HW C22	18	15	3	0	4,5	0	1,5	4,5	12	6	3	6	7,5	10,5	3	6	12	9
Z48 HW C23	16,5	13,5	4,5	1,5	3	1,5	0	3	10,5	7,5	4,5	4,5	6	9	4,5	4,5	10,5	7,5
Z48 HW C25	13,5	10,5	7,5	4,5	0	4,5	3	0	7,5	10,5	7,5	4,5	3	6	7,5	4,5	7,5	7,5
Z48 HW C30	6	3	15	12	7,5	12	10,5	7,5	0	18	15	12	10,5	7,5	15	12	6	15
Z49 FW C20	24	21	3	6	10,5	6	7,5	10,5	18	0	3	6	7,5	10,5	3	6	12	9
Z49 FW C22	21	18	6	3	7,5	3	4,5	7,5	15	3	0	3	4,5	7,5	0	3	9	6
Z49 FW C24	18	15	9	6	4,5	6	4,5	4,5	12	6	3	0	1,5	4,5	3	0	6	3
Z49 FW C25	16,5	13,5	10,5	7,5	3	7,5	6	3	10,5	7,5	4,5	1,5	0	3	4,5	1,5	4,5	4,5
Z49 FW C27	13,5	10,5	13,5	10,5	6	10,5	9	6	7,5	10,5	7,5	4,5	3	0	7,5	4,5	1,5	7,5
Z49 HW C22	21	18	6	3	7,5	3	4,5	7,5	15	3	0	3	4,5	7,5	0	3	9	6
Z49 HW C24	18	15	9	6	4,5	6	4,5	4,5	12	6	3	0	1,5	4,5	3	0	6	3
Z49 HW C28	12	9	15	12	7,5	12	10,5	7,5	6	12	9	6	4,5	1,5	9	6	0	9
Z50 HW C24	21	18	12	9	7,5	9	7,5	7,5	15	9	6	3	4,5	7,5	6	3	9	0

2. Distribución normal según operación unitaria del ciclo minero

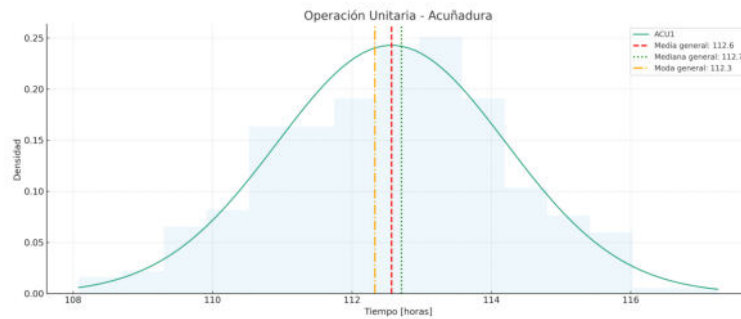


Figura A.1: Función de Densidad de Probabilidad - Acuñaadura

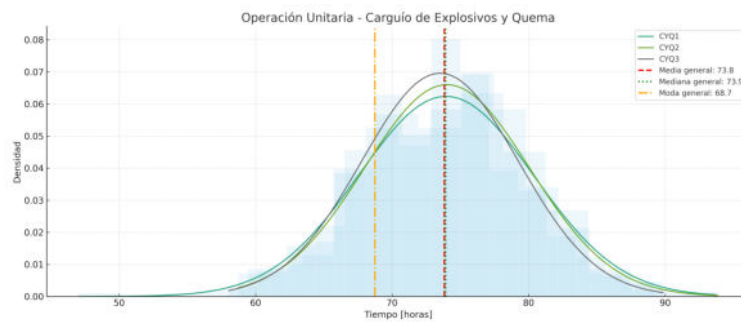


Figura A.2: Función de Densidad de Probabilidad - Carguío de explosivos y Quema

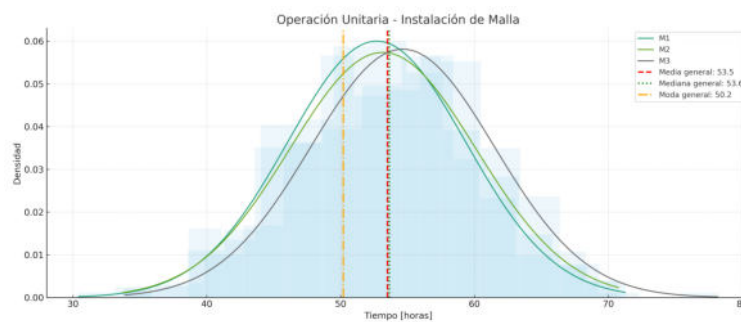


Figura A.3: Función de Densidad de Probabilidad - Instalación de Malla

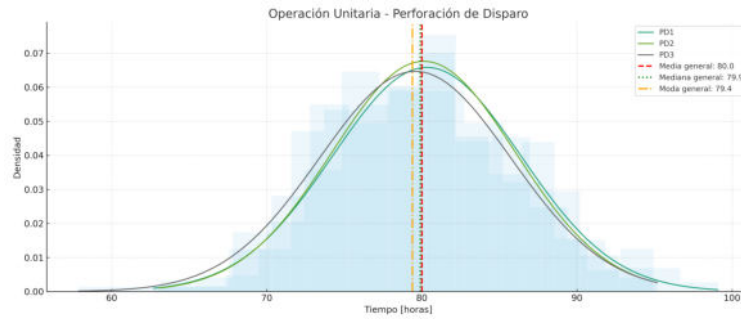


Figura A.4: Función de Densidad de Probabilidad - Perforación de Disparo

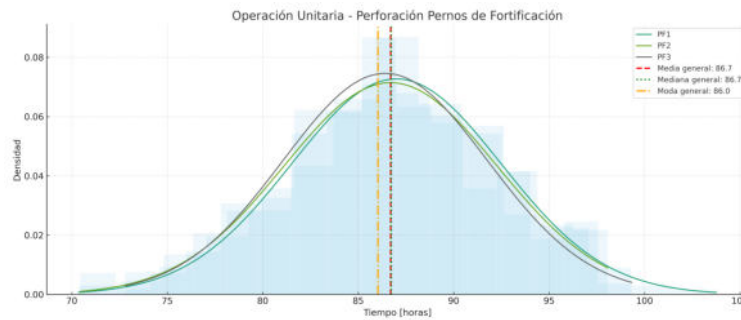


Figura A.5: Función de Densidad de Probabilidad - Perforación Pernos de Fortificación

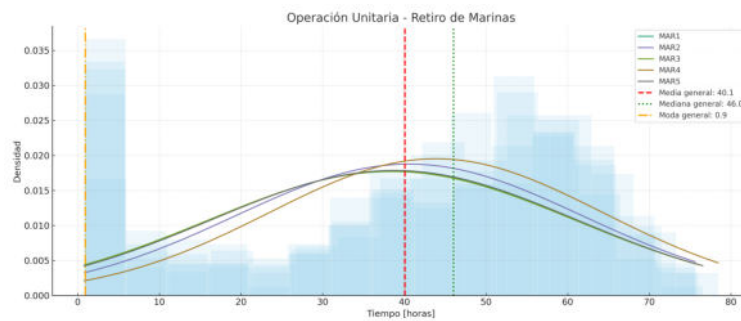


Figura A.6: Función de Densidad de Probabilidad - Retiro de Marinas

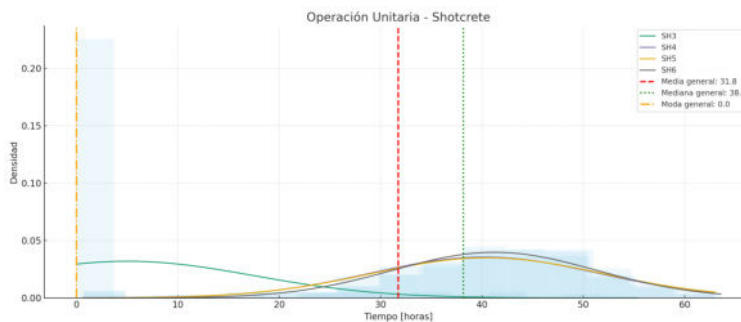


Figura A.7: Función de Densidad de Probabilidad - Shotcrete

Bibliografía

- Brady, B.H.G. y E. Brown (2006). «Rock Mechanics For Underground Mining». En: *Springer*.
- Camhi, J. (2012). «Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de Block Caving caso estudio mina El Teniente CODELCO Chile.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- Contreras, C. (2016). «Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- Gacitúa, J. (2012). «Análisis cualitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- González, T. (2018). «Modelamiento del plan anual de preparación minera de la división El Teniente utilizando el modelo de optimización UDESS.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- Herrera, J. (2020). «Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior.» En: *Madrid: Grupo de Investigación de Recursos Minerales de la Universidad Politécnica de Madrid*.
- Lavado Abarzúa, D. S. (2014). «Metodología de asignación de recursos en desarrollos de minería subterránea.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- Li, Z (2012). «Application of simulation techniques in development planning for caving methods.» En: *Vancouver: The University of British Columbia*.
- Rabajille, A. (2017). «Preparación minera con equipos autónomos y semiautónomos.» En: *Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- Saayman, P. (2005). «Optimization of an Autonomous Vehicle Dispatch System in an Underground Mine.» En: *Facultad de Ingeniería, University of Pretoria*.
- Salgado, J. (2009). «Secuenciamento genérico de obras para la planificación de preparación minera mina El Teniente.» En: *Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería*.
- Toro, H. (2017). *Programación multicriterio de excavaciones horizontales en el corto plazo*. Repositorio académico de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.