



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

# ESTIMACIÓN DE LA TASA DE INCORPORACIÓN DE ÁREA SOCAVADA EN BLOCK CAVING MEDIANTE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

BRUNO ANTONIO GALILEA GIORDANO

PROFESOR GUÍA:

TOMÁS LEAÑO CHLEBNICEK

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAÚL CASTRO RUIZ

PABLO PAREDES MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2017

## Resumen

El plan de negocio asociado a la División Chuquicamata de CODELCO considera una transición desde la explotación por rajo abierto a una explotación subterránea utilizando el método de block caving, cuya tasa productiva en régimen alcanzará las 140 ktpd. Para sustentar el ramp-up de 7 años y la consecutiva extracción en régimen de la mina, se ha estimado incorporar área socavada a 4.000 m<sup>2</sup> al mes en los macro bloques (MB) centrales, valor que resulta desafiante según comparación con valores típicos de la industria.

El objetivo general de este estudio es cuantificar la tasa de incorporación de área socavada para el sector productivo de los 2 MB centrales de la configuración de block caving PMCHS. Como objetivos específicos se espera determinar si se satisfacen los requerimientos del proyecto y evaluar el comportamiento de la tasa en distintos escenarios.

Siguiendo una metodología de simulación se construye un modelo computacional en el software ProModel<sup>®</sup>, que permite estimar la tasa de incorporación de área para un sistema que integra las operaciones de socavación, apertura de bateas, debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) y extracción de mineral de producción.

De acuerdo a 6 escenarios simulados (que consideran diferentes condiciones de simultaneidad de las actividades de incorporación de área), se observa que las operaciones de desarrollo de chimeneas piloto y perforación de tiros para el DDE limitan la capacidad de incorporación de área del sistema. Al adelantar estas operaciones en el escenario base con emulsión, se pueden alcanzar 4.203 m<sup>2</sup>/mes, cumpliendo el requerimiento de la operación. La capacidad máxima del sistema se observa al evaluar el caso anterior pero con una altura de socavación de 10 m en vez de 20 m, alcanzando 5.560 m<sup>2</sup>/mes. Para el escenario con ANFO, no es posible cumplir el requerimiento a menos que se disminuya la altura de socavación a 10 m, llegando a los 4.417 m<sup>2</sup>/mes.

Cabe destacar que, a pesar de que la implementación de una altura de socavación de 10 m parece ser beneficiosa para la tasa de incorporación de área, no se han cuantificado los efectos en el tiraje. Una altura de socavación más baja podría producir mayores colgaduras y una granulometría mayor en las primeras extracciones de mineral. Se recomienda estudiar estos factores antes de considerar esta opción como viable para el mejoramiento de la tasa.

Según los resultados de sensibilidad, no se puede mantener una producción mayor a las 15 ktpd y cumplir con el requerimiento de incorporación de área. Se recomienda, adelantar apertura de área en meses donde es posible extraer a una tasa mayor a 4.000 m<sup>2</sup>/mes para poder compensar la falta de capacidad en el futuro. También se recomienda tener cuidado con la pérdida de horas operativas, y la baja de rendimientos de los jumbos radiales, ya que ambos han demostrado estar fuertemente relacionados a la tasa de incorporación de área.

Por último, se recomienda fuertemente realizar una campaña de recolección de datos cuando comience el hundimiento de los MB centrales del proyecto el año 2019 para poder calibrar este modelo. Otra opción viable es realizar algunos ajustes al modelo para poder calibrarse con alguna mina en operación actualmente. Si se validan sus resultados podría ser de gran ayuda en la implementación de casos de estudio y futuros proyectos.

## Abstract

The business plan associated with Chuquicamata considers a change from an open pit operation to an underground operation. This new operation has been designed in a block caving modality and it is expected, to reach a productive regime of 140 ktpd. To sustain the 7 year ramp up, and the consecutive extraction in regime of the mine, it has been estimated to open 4,000 m<sup>2</sup> per month on the central macro blocks (MB), value that is challenging in comparison to the typical mining industry values.

The general objective of this study is to quantify, the rate of undercut area incorporation for the productive sector of the 2 central MB of the block caving configuration with conventional undercutting strategy designed by PMCHS. As specific objectives, it is expected to determine if the project requirements are met and to evaluate the behavior of the rate under different scenarios.

Following a simulation methodology, a computational model is constructed in the ProModel<sup>®</sup> discrete event simulation software, which allows the estimation of the area incorporation rate for a system that integrates the operations of undercutting, drawbell opening, dynamic weakening with explosives (DDE) and ore extraction.

According to the 6 simulated scenarios (that consider different conditions of simultaneity of the area incorporation activities), it is observed that the development of chimneys and drilling of DDE blastholes limit the capacity of the system area incorporation. By anticipating these operations in the slurry - base scenario, 4,203 m<sup>2</sup>/month can be achieved, accomplishing the operation requirement. The system maximum capacity is observed when evaluating the previous case but with a 10 m undercutting instead of 20 m, reaching 5,560 m<sup>2</sup>/month. For the ANFO scenario, it is not possible to comply with the requirement unless the undercutting height is reduced to 10 m, reaching 4,417 m<sup>2</sup>/month.

It should be noted that although the implementation of a 10 m undercutting seems to be beneficial for the area incorporation rate, the effects on the ore extraction have not been quantified. A lower undercutting height could result in higher drawbell interruptions and coarser particle size in the first ore withdrawals. It is recommended to study these factors before considering this option as viable for the rate optimization.

According to the sensitization results, it is not possible to maintain a production higher than 15 ktpd and to comply with the area incorporation requirement. It is recommended, to anticipate area incorporation on months that is possible to extract higher than 4,000 m<sup>2</sup>/month. It is also recommended to have special attention with operative hours loss and the drilling equipment yield decline, because both have shown to be strongly bonded with the area incorporation rate.

Finally, it is strongly recommended to carry out a data collection campaign for the calibration of this model when the undercutting phase of the project begins. Another viable option is to make some adjustments to the model for it to be calibrated with some other mine operation that is currently operating. When validated, this model can be of great help in the implementation of case studies and even future projects.

## Agradecimientos

Hacia el final de mi formación universitaria, quiero expresar mi agradecimiento personal a quienes me acompañaron durante este tiempo. Debo reconocer que ha sido etapa inolvidable, llena de buenas experiencias y satisfacciones, pero también de desafíos, que ayudaron a forjar mi carácter. En esos momentos, muchas veces llenos de dificultad he sentido el apoyo de mis cercanos, a quienes quiero reconocer particularmente.

En primer lugar, agradecer a quienes tienen mi máxima importancia: mi familia. A mi hermano Giacomo por todos los días brindarme esa alegría que solo los niños pueden ofrecer. Y a mi madre, a quien le debo todo. A ella, quien siempre ha sido mi apoyo incondicional, el pilar trascendental en mi desarrollo como persona y quien me ha alentado a superarme a mí mismo, es a ella a quien definitivamente le dedico completamente este logro.

Reconozco también a mis amigos de la vida, ellos han sido parte de lo que muy personalmente distingo como algo que va más allá de mi formación universitaria: mi desarrollo como persona. De ellos, quisiera destacar a Lucas, cuya amistad y enseñanzas valoro muchísimo, de igual forma a mi gran amigo Vega quien ha sido mi compañero desde poco antes de la educación media hasta el día de hoy, ambos han aportado significativamente a mi forma de ver y vivir la vida. También quisiera reconocer a otros grandes amigos: Juan Carlos, Shankar, Alejandro, Alonso, Derpich y Pía, gracias por estos años de compañía.

Quiero reconocer además, a mis compañeros de universidad y futuros colegas por hacer mi estadía en estos años amena, específicamente me gustaría destacar a mi grupo de amigos de los últimos dos años de la carrera: Raúl, Pedro, Manuel, Fernando, Marcos, Eduardo, Héctor y Sergio, que sin dudas fueron fundamentales para superarme académicamente. Su contribución a mi formación ha sido valiosa y tengo en ellos la más alta estima.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi comisión de profesores por brindarme su apoyo y dedicación por entregarme herramientas invaluable para mi desarrollo profesional. Expreso la misma gratitud por la Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO y a sus miembros, por permitirme formar parte del equipo y de la enriquecedora experiencia que es el Proyecto "Mina Chuquicamata Subterráneo".

En general, gracias a todas las personas que de alguna u otra forma han sido parte importante de mi vida profesional y personal. Un gran abrazo.

## Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Motivación del trabajo .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Alcances.....	2
1.4 Límite de batería .....	4
1.5 Metodología de trabajo .....	6
1.6 Contenidos por capítulo.....	6
1.7 Términos y definiciones .....	7
Capítulo 2: Antecedentes de la faena .....	8
2.1 Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea .....	8
2.1.1 Reformulación .....	8
2.2 Tasa de incorporación de área socavada.....	11
Capítulo 3: Antecedentes bibliográficos.....	12
3.1 Block caving.....	12
3.1.1 Socavación.....	12
3.1.2 Tasa de incorporación de área socavada .....	14
3.2 Pre acondicionamiento (PA) .....	15
3.2.1 Fracturamiento hidráulico (FH).....	15
3.2.2 Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) .....	16
3.2.3 Preacondicionamiento mixto o intensivo.....	17
3.3 Modelado de sistemas mediante simulación .....	18
3.3.1 La simulación computacional como herramienta de análisis de modelos .....	19
3.3.2 Simulación en minas de block/panel caving.....	21
3.4 Conclusión estado del arte.....	22
Capítulo 4: Metodología simulación.....	23
4.1 Etapa 1: Formulación del problema .....	23
4.2 Etapa 2: Generación de Modelo Conceptual.....	23
4.2.1 Layout .....	23
4.2.2 Elementos principales .....	24

4.2.3	Parámetros de Entrada .....	24
4.2.4	Variables de Salida.....	24
4.2.5	Criterios de decisión y de movimiento .....	24
4.2.6	Modelos Paralelos .....	25
4.3	Etapa 3: Recolección y Análisis de Datos .....	25
4.4	Etapa 4: Generación del Modelo Computacional .....	26
4.4.1	Entidades.....	26
4.4.2	Locaciones .....	26
4.4.3	Rutas.....	26
4.4.4	Recursos .....	26
4.4.5	Llegadas .....	27
4.4.6	Procesamiento.....	27
4.4.7	Asignación de Turnos .....	27
4.4.8	Variables .....	27
4.4.9	Otros Elementos .....	27
4.5	Etapa 5: Verificación del Modelo .....	28
4.6	Etapa 6: Validación del Modelo.....	28
4.7	Etapa 7: Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad.....	29
4.8	Etapa 8: Documentación.....	29
Capítulo 5: Modelo Conceptual .....		30
5.1	Layout .....	30
5.1.1	Layout subnivel de producción .....	30
5.1.2	Layout subnivel de hundimiento .....	31
5.2	Elementos principales .....	33
5.2.1	Lugares principales .....	33
5.2.2	Actividades del programa de socavación y preacondicionamiento .....	38
5.2.3	Equipos principales y sus características .....	44
5.2.4	Estrategia de socavación y apertura de bateas.....	45
5.2.5	Estrategia de preacondicionamiento .....	46
5.2.6	Estrategia de incorporación de área en conjunto.....	47
5.2.7	Estrategia de traslado de material tronado .....	49
5.3	Parámetros de Entrada .....	50
5.4	Variables de Salida .....	52

5.5	Criterios de decisión y de movimiento .....	52
5.6	Modelos Paralelos .....	53
Capítulo 6: Modelo Computacional .....		54
6.1	Entidades .....	54
6.2	Locaciones .....	55
6.3	Rutas .....	57
6.4	Recursos.....	59
6.5	Llegadas .....	59
6.6	Procesamiento .....	60
6.7	Asignación de Turnos .....	63
6.8	Variables .....	65
6.8.1	Variables de entrada .....	65
6.8.2	Variables de salida .....	67
6.9	Otros Elementos .....	68
6.9.1	Tiempo .....	68
6.9.2	Número de réplicas.....	68
6.10	Verificación del Modelo .....	68
Capítulo 7: Resultados .....		69
7.1	Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad .....	69
7.1.1	Escenarios .....	69
7.1.2	Análisis de sensibilidad.....	70
7.2	Resultados simulación determinística.....	70
7.3	Resultados simulación estocástica .....	71
7.4	Resultados sensibilización.....	72
7.4.1	Altura de socavación .....	72
7.4.2	Horas operativas .....	73
7.4.3	Rendimiento jumbos .....	73
7.4.4	Producción .....	74
7.5	Análisis de resultados .....	75
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones .....		78
Capítulo 9: Bibliografía .....		80
Anexos .....		83

## Índice de tablas

Tabla 1-1 Condiciones Propuestas .....	3
Tabla 1-2 Términos utilizados .....	7
Tabla 2-1 Tasa de Incorporación de Área .....	11
Tabla 3-1 Benchmark tasas de socavación (Rivero Abarca, 2008) .....	15
Tabla 5-1 Simbología de esquema de secuencia de incorporación de área, bateas y DDE..	35
Tabla 5-2 Distancia desde punto de extracción al chancador .....	37
Tabla 5-3 Resumen actividades .....	43
Tabla 5-4 Equipos según actividad .....	44
Tabla 5-5 Leyenda secuencia de incorporación de área y bateas general .....	45
Tabla 5-6 Leyenda figuras secuencia de incorporación de área, bateas y DDE .....	48
Tabla 5-7 Programa de obras del mes .....	49
Tabla 5-8 Rendimientos promedio actividades (CODELCO, 2017) .....	50
Tabla 5-9 Rendimientos promedio LHD (Hatch, 2017) .....	51
Tabla 5-10 Parámetros tiros socavación emulsión (Codelco Chile V. C., 2017) .....	51
Tabla 5-11 Parámetros bateas emulsión (Codelco Chile V. C., 2017) .....	51
Tabla 5-12 Normalización de diseño de tronadura de socavación para ANFO .....	51
Tabla 5-13 Normalización de diseño de tronadura de bateas para ANFO .....	51
Tabla 5-14 Parámetros chimeneas (Codelco Chile V. C., 2017) .....	52
Tabla 5-15 Características del material tronado .....	52
Tabla 6-1 Simbología locaciones con capacidad 1 modelo de simulación .....	55
Tabla 6-2 Simbología locaciones con capacidad infinita modelo de simulación .....	56
Tabla 6-3 Recursos definidos para modelo computacional .....	59
Tabla 6-4 Relación entre entidades y recursos .....	61
Tabla 6-5 Rendimientos actividades .....	66
Tabla 6-6 Rendimientos LHD .....	66
Tabla 7-1 Escenarios definidos para simulación .....	69
Tabla 7-2 Escenarios sensibilización .....	70
Tabla 7-3 Últimas actividades por calle .....	70
Tabla 7-4 Resultados escenarios principales .....	71
Tabla 7-5 Resultados sensibilización altura de socavación .....	72
Tabla 7-6 Resultados sensibilización horas operativas .....	73
Tabla 7-7 Resultados sensibilización rendimiento jumbos .....	73
Tabla 7-8 Nuevos escenarios de producción para sensibilización .....	75
Tabla 7-9 Resultados sensibilización programa de producción .....	75
Tabla 10-1 Cubicación tonelaje chimeneas .....	85
Tabla 10-2 Factores de corrección emulsión - ANFO .....	86
Tabla 10-3 Tiempos operativos y pérdidas operacionales .....	86
Tabla 10-4 Desglose instalación guirnalda y tacos .....	86
Tabla 10-5 Nombres abreviados de actividades cartas Gantt .....	88



## Índice de figuras

Figura 1-1 Vista en planta subnivel de hundimiento MB centrales .....	5
Figura 1-2 Vista en planta subnivel de producción MB centrales .....	5
Figura 2-1 Macro bloques Chuquicamata Subterráneo .....	8
Figura 2-2 Configuración de MB para reformulación de PMCHS.....	9
Figura 2-3 Diseño de 2 MB según reformulación.....	10
Figura 2-4 Vista isométrica cámara de chancado.....	11
Figura 2-5 Vista isométrica continuación sistema de chancado.....	11
Figura 3-1 Vista 3D de explotación por block caving con sistema LHD .....	12
Figura 3-2 Diagrama de estabilidad (Laubscher, 1994) .....	13
Figura 3-3 Secuencia constructiva en el método de hundimiento convencional (Rivero Abarca, 2008) .....	14
Figura 3-4 Proceso de preacondicionamiento (Gottreux Vollet, 2016).....	15
Figura 3-5 Pasos para llevar a cabo el fracturamiento hidráulico.....	16
Figura 3-6 Metodología DDE en métodos por Hundimiento.....	17
Figura 3-7 Esquema de la utilización de PA mixto (Catalan, Onederra, & Chitombo, 2012) .....	18
Figura 3-8 Esquema general de proceso de modelado.....	18
Figura 5-1 Vista en planta superposición NH con NP para MB N01 y S01 .....	30
Figura 5-2 Vista en planta de subnivel de producción MB N01 y S01 .....	31
Figura 5-3 Vista en planta de subnivel de hundimiento MB N01 y S01 .....	32
Figura 5-4 Vista en planta de diseño original de subnivel de hundimiento .....	32
Figura 5-5 Disposición de bateas en subnivel de producción y hundimiento, vista en planta .....	33
Figura 5-6 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento.....	34
Figura 5-7 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción .....	34
Figura 5-8 Accesos al subnivel de producción.....	36
Figura 5-9 Accesos al subnivel de hundimiento .....	36
Figura 5-10 Entradas al chancador.....	37
Figura 5-11 Procesamiento de actividades de socavación.....	41
Figura 5-12 Procesamiento de actividades de apertura de bateas .....	42
Figura 5-13 Procesamiento de actividades de preacondicionamiento con DDE .....	42
Figura 5-14 Secuencia de incorporación de área y bateas general.....	45
Figura 5-15 Esquema de diseño de PA por DDE.....	46
Figura 5-16 Ejemplo diseño de DDE (Marín, 2012) .....	47
Figura 5-17 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento.....	48
Figura 5-18 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción .....	49
Figura 5-19 Ejemplo movimiento por etapas.....	52
Figura 5-20 Sectores de subnivel de hundimiento (NH) .....	53

Figura 6-1 Locaciones subnivel de hundimiento .....	56
Figura 6-2 Locaciones subnivel de producción.....	57
Figura 6-3 Rutas subnivel de hundimiento.....	58
Figura 6-4 Rutas subnivel de producción .....	58
Figura 6-5 Procesamiento de actividades de socavación.....	62
Figura 6-6 Procesamiento de actividades de apertura de bateas .....	62
Figura 6-7 Procesamiento de actividades de preacondicionamiento con DDE.....	63
Figura 6-8 Calendario equipos .....	64
Figura 6-9 Calendario recursos tronadura .....	65
Figura 7-1 Gráfico de resultados escenarios principales .....	71
Figura 7-2 Gráfico de resultados sensibilización altura de socavación .....	72
Figura 7-3 Gráfico de resultados sensibilización horas operativas .....	73
Figura 7-4 Gráfico de resultados sensibilización rendimiento jumbos.....	74
Figura 7-5 Gráfico incremental tasas de incorporación de área .....	74
Figura 7-6 Gráfico de resultados sensibilización programa de producción .....	75
Figura 10-1 Diseño batea.....	84
Figura 10-2 Diseño socavación 10 m.....	85
Figura 10-3 Sectores de subnivel de hundimiento (NH) .....	87
Figura 10-4 Nomenclatura calles subnivel de producción (NP) .....	87
Figura 10-5 Carta Gantt de calle 1 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-6 Carta Gantt de calle 2 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-7 Carta Gantt de calle 3 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-8 Carta Gantt de calle 4 Oeste, subnivel de hundimiento .....	90
Figura 10-9 Carta Gantt de calle 5 Oeste, subnivel de hundimiento .....	90
Figura 10-10 Carta Gantt de calle 6 Oeste, subnivel de hundimiento .....	91
Figura 10-11 Carta Gantt de calle 8 Oeste, subnivel de hundimiento .....	91
Figura 10-12 Carta Gantt de calle 1 Este, subnivel de hundimiento.....	91
Figura 10-13 Carta Gantt de calle 2 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-14 Carta Gantt de calle 3 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-15 Carta Gantt de calle 4 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-16 Carta Gantt de calle 5 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-17 Carta Gantt de calle 6 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-18 Carta Gantt de calle 7 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-19 Carta Gantt de calle 8 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-20 Carta Gantt de calle 1, subnivel de producción .....	94
Figura 10-21 Carta Gantt de calle 2, subnivel de producción .....	95
Figura 10-22 Carta Gantt de calle 3, subnivel de producción .....	96
Figura 10-23 Carta Gantt de calle 4, subnivel de producción .....	96
Figura 10-24 Carta Gantt de calle 5, subnivel de producción .....	97
Figura 10-25 Carta Gantt de calle 6, subnivel de producción .....	97
Figura 10-26 Carta Gantt de calle 7, subnivel de producción .....	97
Figura 10-27 Carta Gantt de calle 8, subnivel de producción .....	98

# Capítulo 1: Introducción

---

Los métodos de explotación por hundimiento son aquellas operaciones mineras subterráneas en que el cuerpo mineralizado se derrumba naturalmente por efecto de la gravedad, después de haber sido socavado en su base y de que el material hundido haya sido extraído a través de puntos de extracción. Los principales métodos de hundimiento son block y panel caving.

Cuando se aplica el método de block caving, el área basal del cuerpo mineralizado se subdivide en bloques, y el área socavada se incrementa de manera discreta, en función de las necesidades de incorporar nuevos bloques en producción.

En la actualidad, muchas de las minas que utilizan estos métodos de explotación se encuentran en períodos de profundización o expansión. En este contexto, los principales desafíos a resolver están asociados a una mayor complejidad en el manejo de materiales, y a enfrentar ambientes geotécnicos cada vez peores. Por estos motivos, resulta fundamental comprender una serie de variables operacionales críticas, dentro de las cuales, tal vez la más importante corresponde una eficiente socavación del bloque a extraer, de tal modo que pueda inducirse adecuadamente el hundimiento (Rivero Abarca, 2008).

La socavación, o incorporación de área socavada consta de múltiples actividades que se ejecutan a una tasa que depende de factores intrínsecos de la mina y factores operativos. En cuanto a factores operativos, hay métodos de simulación que permitirían replicar las operaciones en la mina, pudiendo estimar el valor final de la tasa o velocidad de incorporación de área socavada.

## 1.1 Motivación del trabajo

En general, cuando se planifica, el parámetro de velocidad de incorporación de área en la socavación queda determinado por valores asociados a experiencia previa en minas similares. No obstante, la dispersión de la industria es amplia, pues el resultado se encuentra fuertemente condicionado por factores geomecánicos, operacionales y, en último caso, por la real exigencia del plan minero.

Para panel caving se ha logrado determinar un ángulo que proviene de una relación geométrica entre la velocidad de apertura de un frente y la velocidad de extracción en quiebre de la columna que da un margen de seguridad en cuánto a la tasa máxima de apertura de área para que no se produzcan siniestralidades geomecánicas (Contreras, Cornejo, & Caviedes, 2016). Pero en un block caving el objetivo es abrir el área lo más rápido posible antes de iniciar la extracción por hundimiento, por lo tanto, la determinación de la tasa de socavación no utiliza esta misma metodología, sino que va estar en función de los rendimientos y coordinación de las actividades asociadas.

Otro aspecto importante que motiva este estudio es que el Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS) ha hecho una promesa económica al determinar que para la primera pareja de Macro Bloques se incorporará área a una tasa de 4.000 m<sup>2</sup>/mes. Esta tasa se ve como un desafío ya que se encuentra sobre valores promedios de la industria, como se

puede ver en la Tabla 3-1. Un no cumplimiento de esta promesa, puede afectar negativamente al valor del proyecto.

Dados los argumentos recién expuestos, se torna imperativo acumular un nivel de conocimiento mayor en el ámbito de la de la tasa de incorporación de área socavada y su determinación o estimación.

## **1.2 Objetivos**

En esta sección se presenta el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo.

### **1.2.1 Objetivo General**

Cuantificar de manera estocástica, con técnicas de simulación, la tasa de incorporación de área socavada para el sector productivo correspondiente a los 2 MB centrales de la configuración de block caving con estrategia de socavación convencional diseñada por PMCHS sujeto a distintas condiciones y escenarios de simultaneidad de actividades del programa de incorporación de área.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- En cuanto a la tasa de incorporación de área en socavación se espera:
  - Determinar si se satisfacen los requerimientos del proyecto.
  - Evaluar su comportamiento bajo distintos escenarios de operación y diseño.

## **1.3 Alcances**

Los alcances que delimitan y definen el trabajo a realizar durante el desarrollo son:

- La construcción del modelo de simulación será realizada en el software de eventos discretos ProModel<sup>®</sup>.
- El horizonte de las simulaciones será tal de completar las actividades planificadas para 1 mes del programa de incorporación de área, equivalentes a la incorporación de 4.000 m<sup>2</sup>. Esto quiere decir que se simula hasta el término de todas las actividades programadas, independiente de si esto tome 1 mes cronológico o no.
- Para la configuración de las simulaciones, los MB estudiados estarán sujetos a las condiciones descritas en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1 Condiciones Propuestas

Escenario (Código)	Condición
1. E-B	Emulsión – Caso Base: Todas las actividades del programa mensual de incorporación de área, considerando emulsión como explosivo.
2. E-AD	Emulsión – Adelanto de perforación de DDE: Se considera que la perforación de los tiros de DDE se finalizan en un mes anterior al simulado.
3. E-ADC	Emulsión – Adelantando perforación de tiros para DDE y perforación de chimeneas piloto.
4. E-SD	Emulsión – Sin realización de DDE: Se considera que no se realiza ni perforación de tiros ni las actividades del ciclo para tronadura confinada.
5. A-B	ANFO – Caso Base: Mismos parámetros del caso base pero considerando ANFO como explosivo.
6. A-ADC	ANFO – Adelantando perforación de DDE y de chimeneas piloto.

Todos estos casos consideran socavación de 20 m y ritmo de producción de 2 ktpd

- El estudio tendrá un enfoque meramente operativo, se excluyen consideraciones de estabilidad producto de la tasa de incorporación de área.
- Las simulaciones serán configuradas a partir de los siguientes parámetros de diseño de reformulación del proyecto:
  - Diseño de la mina: Subniveles, diagramas de disparos, etc.
  - Sistema de manejo de minerales (SMM)
  - Pre-acondicionamiento
  - Programa mensual de socavación: Se toma un mes representativo como base para simulación.
- Con respecto a la ubicación temporal de la simulación, se considera que:
  - Se tienen desarrollados completamente todos los subniveles diseñados correspondientes al correcto y completo funcionamiento de la socavación, apertura de bateas y carguío de mineral de producción en los MB.
  - El SMM está funcionando a su capacidad de diseño.
- Este es un modelo de simulación conceptual y computacional para PMCHS, que comenzará su etapa de socavación de MB centrales hacia el año 2019, por lo que se sugiere para estudios futuros validar estos resultados con datos que estarán disponibles a esa fecha o con datos de alguna faena similar. A falta de calibración formal se realizan sensibilizaciones.

## **1.4 Límite de batería**

Considera los subniveles de hundimiento y producción de los 2 MB centrales (Figura 1-1 y Figura 1-2 respectivamente), y las siguientes actividades y subactividades en cada subnivel:

- I. **Socavación (subnivel de hundimiento)**
  1. Perforación radial
  2. Tronadura de socavación:
    - a. Descargue y reposición de malla y preparación de tapado en área de carguío
    - b. Medición y soplado de tiros
    - c. Repaso de tiros
    - d. Carguío de explosivo
    - e. Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación
    - f. Carguío de material
- II. **Apertura de bateas (subnivel de producción)**
  1. Desarrollo chimenea piloto bateas
  2. Perforación tiros bateas
  3. Tronadura de batea en una fase:
    - a. Medición y soplado de tiros
    - b. Repaso de tiros batea
    - c. Carguío explosivo batea
    - d. Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación
    - e. Carguío de material
- III. **Preacondicionamiento (ambos subniveles)**
  1. Perforación tiros DDE e instalación de anclaje
  2. Tronadura confinada:
    - a. Operación de instalación de guirnalda y tacos
    - b. Carguío explosivo pozos DDE
    - c. Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación
- IV. **Extracción de mineral de producción (subnivel de producción)**

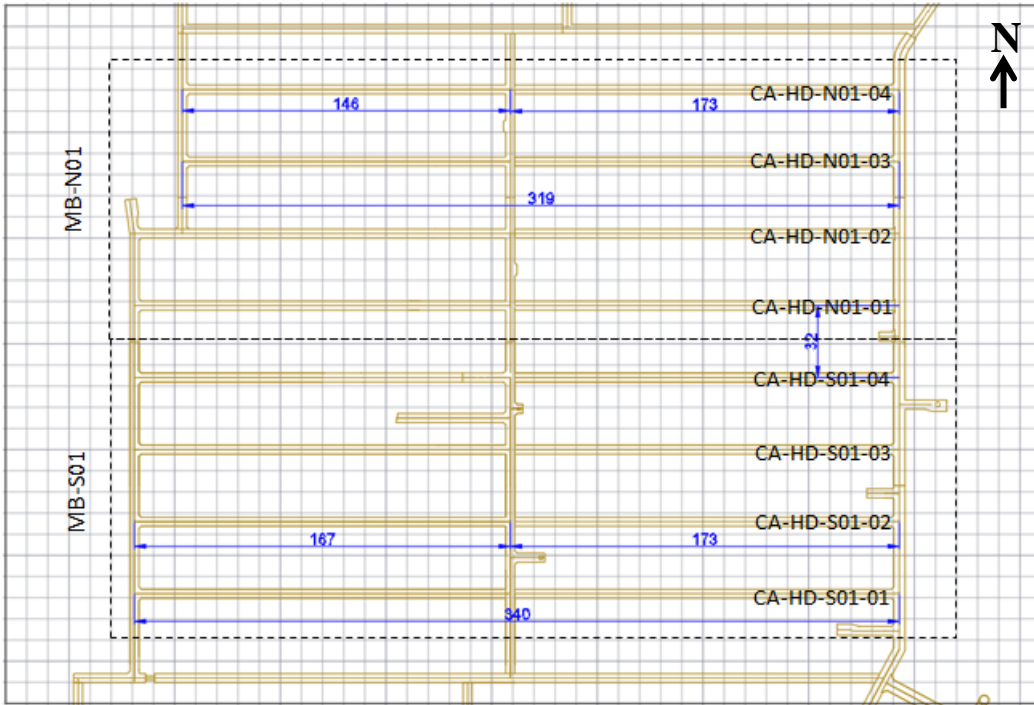


Figura 1-1 Vista en planta subnivel de hundimiento MB centrales

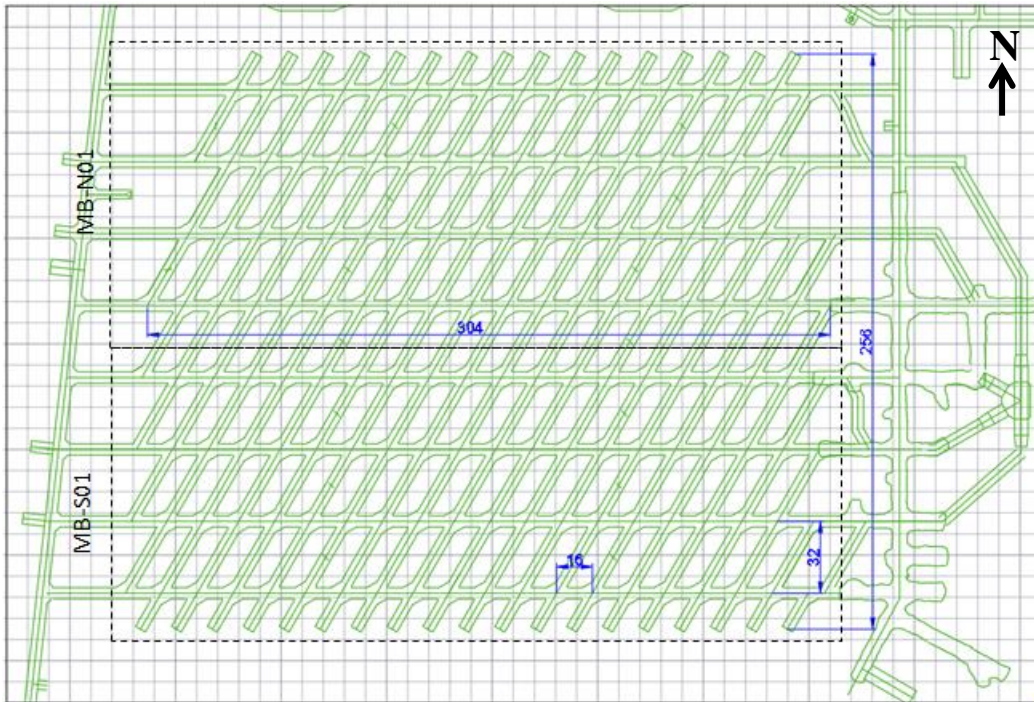


Figura 1-2 Vista en planta subnivel de producción MB centrales

## 1.5 Metodología de trabajo

Se define la siguiente metodología para el correcto desarrollo del trabajo y el cumplimiento de los objetivos planteados:

- En primer lugar, se entregan los antecedentes de la faena que son de importancia para la comprensión y contextualización del problema.
- Luego, se realiza una revisión del estado del arte de simulación para procesos de incorporación de área en minería por block caving, de modo de seguirle el rastro al proceso hasta identificar su estado de desarrollo más avanzado y poder hacer un aporte mayor o desde otro enfoque para el tema solicitado.
- Para cumplir el objetivo de estimar la tasa de incorporación de área socavada por medio de simulación, se determina que se debe crear un modelo enfocado en las actividades de incorporación de área, es decir, socavación, apertura de bateas, pre-acondicionamiento y extracción de producción, con múltiples frentes en minería tipo block caving con hundimiento convencional.
- Para lo anterior, se presenta una metodología de simulación de 8 etapas, siendo las principales la elaboración de un modelo conceptual y uno computacional. Para poder modelar computacionalmente el problema y simularlo se debe seleccionar un software, que es indicado en esta misma sección.
- Se elabora el modelo conceptual con los parámetros conocidos de la mina y recopilación de rendimientos de los distintos equipos, del cual posteriormente se desprende un modelo computacional que es codificado en ProModel®.
- Se definen escenarios de simulación, entre ellos, una simulación determinística para poder verificar los resultados y el resto contempla distintas configuraciones de simulación estocástica para obtener resultados con determinados rangos de variabilidad. Dentro de los escenarios de simulación se definen sensibilizaciones para poder evaluar el efecto de las variaciones de ciertos parámetros en la tasa de incorporación de área.
- Finalmente se analizan los resultados de los distintos escenarios de simulación y de las sensibilizaciones, y se concluye con respecto a ellos.

## 1.6 Contenidos por capítulo

**Capítulo 1:** Introducción del trabajo, junto con la motivación, los objetivos, alcances y límite de batería del trabajo.

**Capítulo 2:** Menciona aspectos relevantes del proyecto Chuquicamata Subterráneo que van a ser importantes para el desarrollo del documento.

**Capítulo 3:** Detalla antecedentes que sustentan este documento, mostrando principalmente información del tipo de explotación del yacimiento en el que se va a hacer el estudio y el estado del arte de la estimación de la tasa de apertura de área en socavación. También trata el tema de la aplicación de la simulación a procesos.



**Capítulo 4:** Describe la metodología seleccionada para la creación de proyectos de simulación, enfocada en el proceso de socavación y apertura de bateas en los subniveles de hundimiento y producción respectivamente.

**Capítulo 5:** Se construye y define un modelo conceptual que va a servir para la construcción del modelo computacional.

**Capítulo 6:** A partir del modelo conceptual se detallan los pasos que se siguieron para construir el modelo computacional en el software seleccionado.

**Capítulo 7:** Se presentan los escenarios a simular y los resultados de las simulaciones junto con un análisis de los datos obtenidos.

**Capítulo 8:** Entrega conclusiones en base a resultados obtenidos y análisis realizados, incluyendo también recomendaciones para el estudio.

**Capítulo 9:** Referencias bibliográficas que respaldan este documento.

## 1.7 Términos y definiciones

Se han utilizado los términos y definiciones presentadas en la Tabla 1-2 durante el desarrollo del documento.

Tabla 1-2 Términos utilizados

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
PMCHS	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea
MB	Macro Bloque
SMM	Sistema de manejo de minerales
PA	Pre-acondicionamiento
FH	Fracturamiento hidráulico
DDE	Debilitamiento dinámico con explosivos
NP	Subnivel de producción
NH	Subnivel de hundimiento

## Capítulo 2: Antecedentes de la faena

### 2.1 Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

El plan de negocio asociado a Chuquicamata considera un cambio desde una explotación a rajo abierto a una explotación subterránea, debido al término de la vida económica del primer método hacia fines de esta década. La exploración geológica que la corporación ha realizado, muestra que existe una gran cantidad de recursos remanentes bajo el pit final del rajo y en profundidad, los que no pueden ser explotados de manera económica vía Rajo Abierto.

Esta nueva explotación se ha diseñado en una modalidad de block caving dividido en 4 niveles, y cada nivel dividido por unidades de explotación llamadas Macro Bloques (MB) separadas por pilares, con una producción en régimen de 140 ktpd. En la Figura 2-1 se muestra de forma muy general cómo se planea explotar este yacimiento mediante los MB. Mientras unos bloques estén en preparación, otros van a estar en socavación y los adyacentes en producción. El foco de este trabajo se centra en la etapa de socavación.

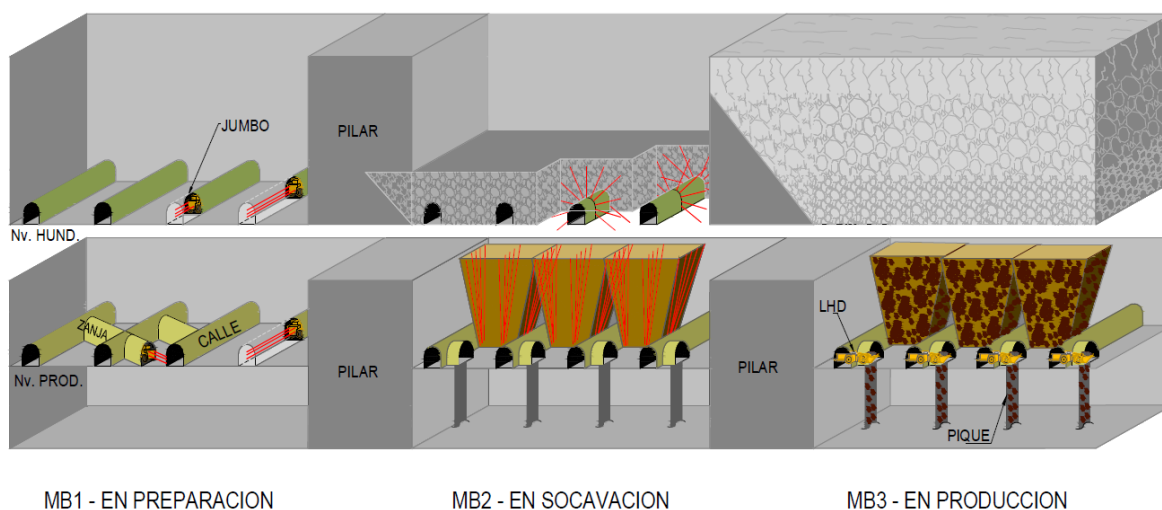


Figura 2-1 Macro bloques Chuquicamata Subterráneo

#### 2.1.1 Reformulación

En el contexto de la Reformulación 2.0 del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), un equipo compuesto por profesionales de la Vicepresidencia de Proyectos (VP) y la División Chuquicamata (DCH) de CODELCO explora oportunidades de optimización del diseño y plan minero del proyecto con el objetivo de mejorar sus indicadores económicos y, consecuentemente, el aporte al negocio de la corporación. En particular, se evalúa la implementación de un diseño minero más simple tanto en términos operacionales como constructivos, con el fin de establecer una solución con una menor densidad de excavaciones y equipos, que sea capaz de soportar los requerimientos de un plan minero que apunta a un régimen productivo de 140 ktpd.

El Área de Planificación de la División Chuquicamata elaboró un Plan de Minero que permitiera integrar las oportunidades de mejora a los parámetros de planificación minera que se espera como resultado de la aplicación del Pre-acondicionamiento Intensivo y considere la explotación de las reservas del proyecto en 3 niveles principales de extracción en lugar de los 4 niveles del caso base.

Para este trabajo será importante el diseño del nivel 1, que está dividido en 20 Macro Bloques (MB) de aproximadamente 35.000 m<sup>2</sup> de área productiva cada uno, como se ve en la Figura 2-2. En la Figura 2-3 se muestra el diseño actual de 2 Macro Bloques “tipo” de la explotación, que serán la unidad básica de estudio. Cada MB tiene 6 subniveles; Hundimiento, Producción, Inyección, Extracción, Chancado y Transporte Intermedio.

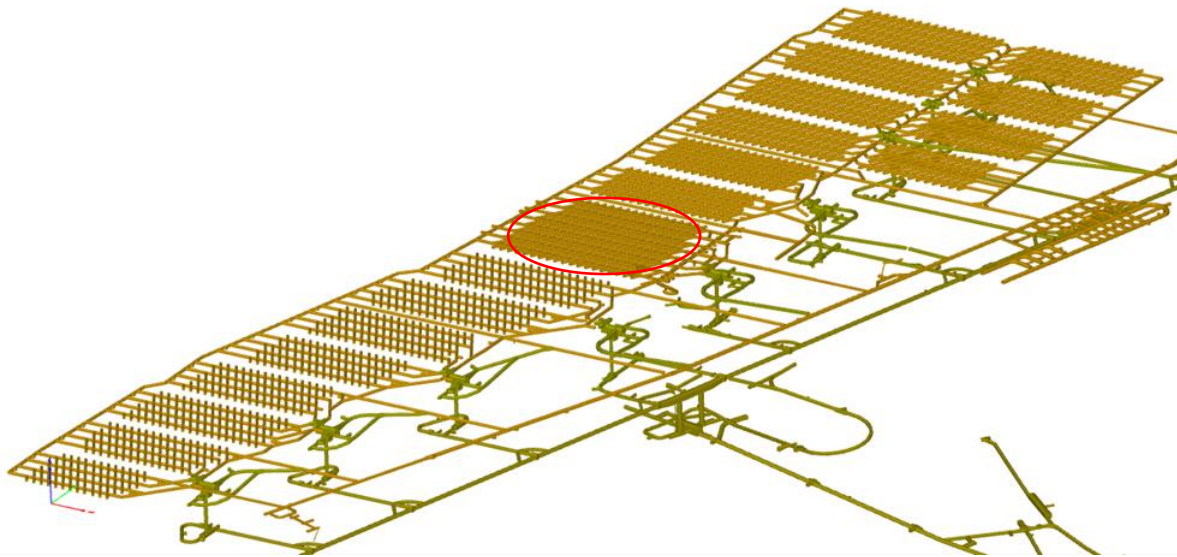
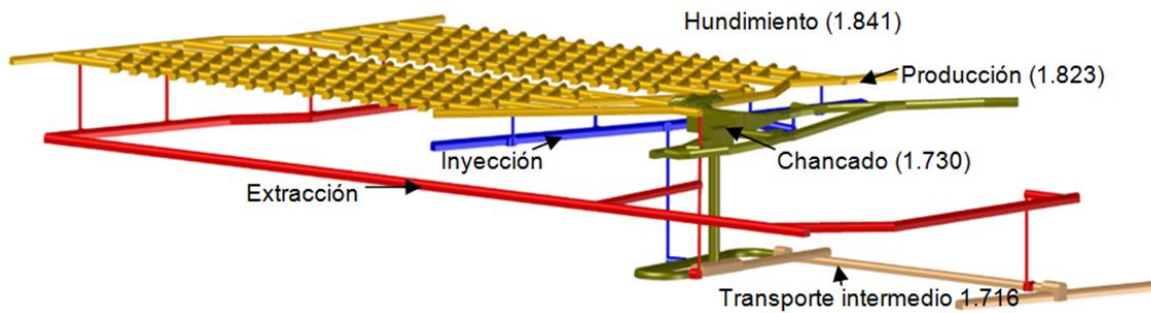


Figura 2-2 Configuración de MB para reformulación de PMCHS.



### + Preacondicionamiento Intensivo

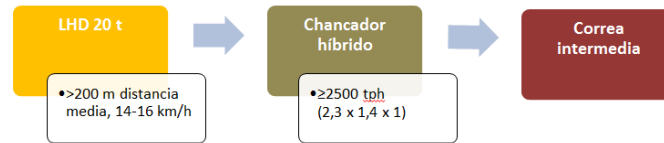


Figura 2-3 Diseño de 2 MB según reformulación

El sistema de manejo de minerales está configurado para una pareja de 2 MB, cuyo funcionamiento se ilustra en la Figura 2-3. Consta de una flota de LHD de 18,5 ton de capacidad efectiva para las 8 calles que transportan el mineral desde los puntos de extracción, hasta la tolva del sistema de chancado, que se encuentra en la misma cota del subnivel de producción.

El diseño del sistema de chancado consiste de una sala de chancado conectada al subnivel de producción a través de la tolva de 400 m<sup>3</sup> de capacidad viva, que puede recibir la descarga simultánea e independiente de hasta 4 LHD. El mineral de la tolva es alimentado al Chancador Giratorio de 2500 tph a través de un Apron Feeder, el cual incorpora una correa de finos en la parte inferior. El mineral chancado es descargado a un pique de traspaso de 6 m de diámetro y 70 m de largo. En la base del pique otro Apron Feeder alimenta una Correa de Sacrificio, esta correa descarga a la Correa Intermedia mediante una transferencia a 90° (Ver Figura 2-4 y Figura 2-5) que lo descarga finalmente a una de las dos Correas Colectoras, que coleccion el mineral desde cada uno de los sistemas de chancado del Nivel 1. Desde este punto el mineral es transportado a la concentradora en superficie por un sistema de correas principales en serie.

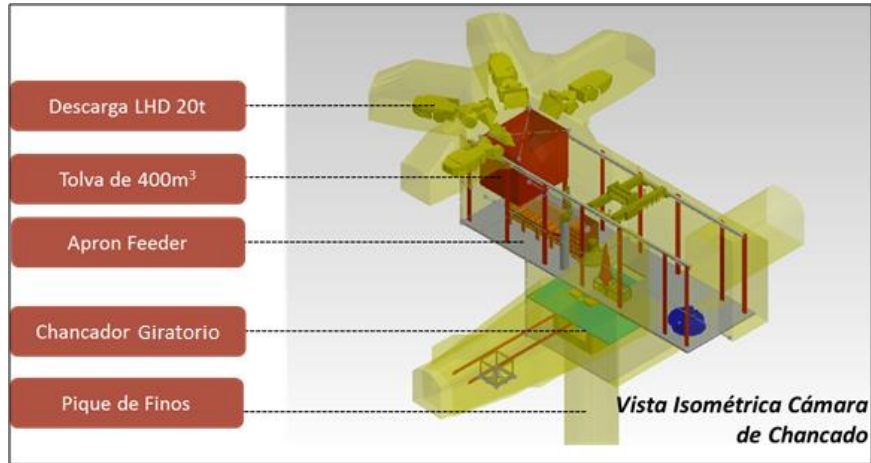


Figura 2-4 Vista isométrica cámara de chancado

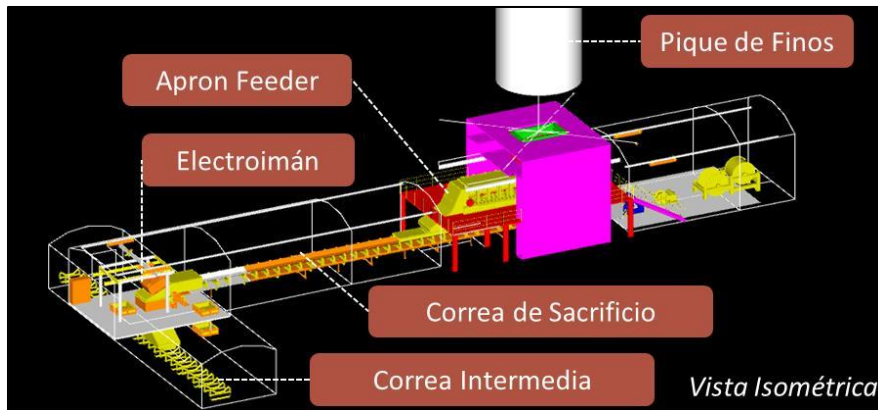


Figura 2-5 Vista isométrica continuación sistema de chancado

## 2.2 Tasa de incorporación de área socavada

Uno de los parámetros clave de planificación, que es de importancia para este trabajo es la tasa de incorporación de área socavada, pues permite asegurar la disponibilidad de área de extracción, para sustentar el ramp up de producción y, luego, sostener el régimen de 140 ktpd. El equipo de reformulación ha realizado una estimación que se muestra a continuación en la Tabla 2-1. La zona con mayor tasa de incorporación de área son los MB centrales, destacados con un círculo en la Figura 2-3.

Tabla 2-1 Tasa de Incorporación de Área

Concepto	Valor	Unidad	Observación
Tasa de Incorporación de Área MB N01 y MB S01	4.000	m <sup>2</sup> /mes	Considera socavación de ambos MB's en conjunto (8 calles).
Tasa Inc. Área Sigüientes MB	3.000	m <sup>2</sup> /mes	Considera socavación de un MB individual (4 calles)

## Capítulo 3: Antecedentes bibliográficos

### 3.1 Block caving

El método de explotación subterráneo block caving consiste en socavar completamente la base de un cuerpo mineralizado o de un bloque aproximadamente equidimensional de mineral para iniciar un proceso de hundimiento. El subnivel de socavación es progresivamente minado y el mineral quebrado es extraído para generar una cavidad que permita el desplazamiento del material desprendido producto del hundimiento. A medida que el mineral es extraído desde el subnivel de producción, el hundimiento se propaga verticalmente a través del cuerpo mineralizado (o bloque) hasta que la roca superior también se quiebra dando lugar a un cráter de subsidencia en superficie (Brown, 2002).

Este método presenta ligeras variaciones en su diseño dependiendo del sistema del manejo de minerales utilizado, a continuación en la Figura 3-1 se muestra el método por extracción con equipos LHD.

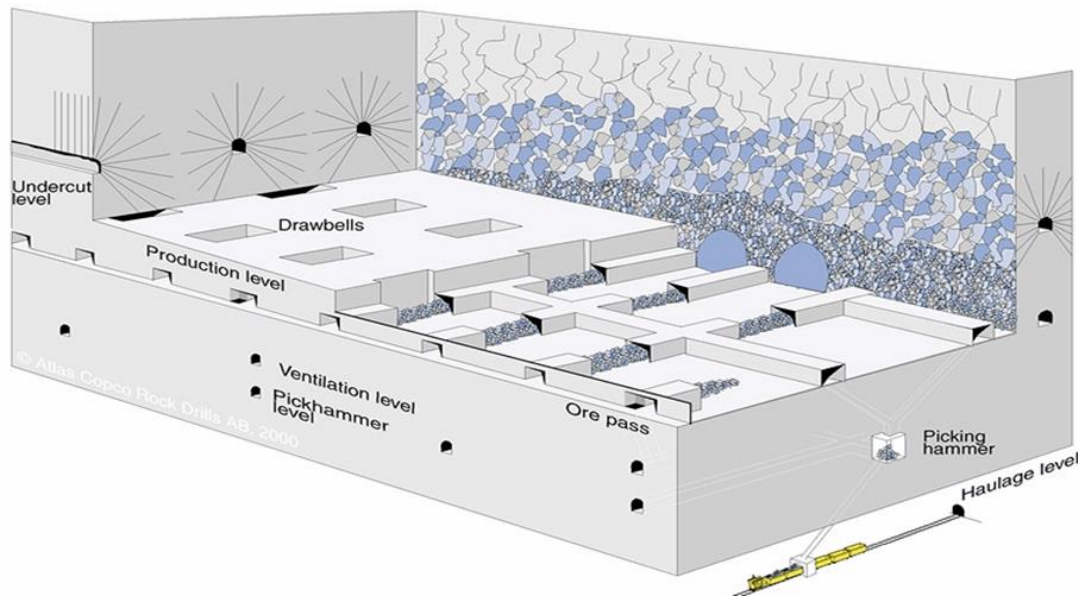


Figura 3-1 Vista 3D de explotación por block caving con sistema LHD

#### 3.1.1 Socavación

La socavación consiste en cortar la base del bloque que se desea hundir. El objetivo principal es generar una excavación de suficientes dimensiones para permitir la ocurrencia del hundimiento, pero al hacer esto se genera daño por incremento de los esfuerzos. Es por lo anterior, que el segundo objetivo principal de la socavación es lograr estas dimensiones de área socavada con un mínimo daño al macizo rocoso en las cercanías. (Butcher, 2000)

El tamaño de la socavación necesaria para iniciar el hundimiento está en función de la relación que hay entre la calidad del macizo rocoso y su hundibilidad. Esto comúnmente se cuantifica con la relación entre el MRMR (Mining Rock Mass Rating) y la extensión del

área de socavación (Radio hidráulico) en la cual el hundimiento se desea propagar (Laubscher, 1994).

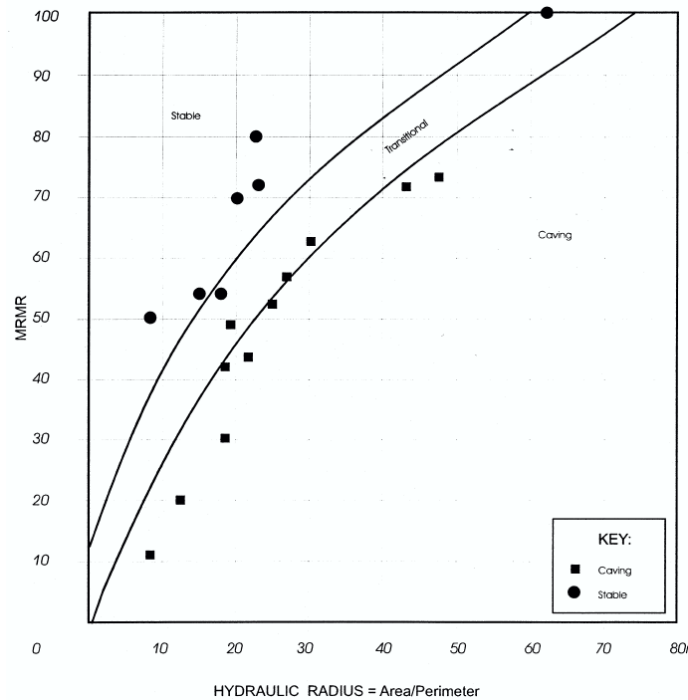


Figura 3-2 Diagrama de estabilidad (Laubscher, 1994)

Como tercer principio de la socavación, se busca alcanzar tan rápido como sea posible el radio hidráulico requerido para generar el hundimiento, propagarlo y consecuentemente reducir la concentración de esfuerzos producido por esta operación. Una socavación incompleta es un factor causante de colapso y por consiguiente, pérdida económica por temas de reparación, re-perforación y abandono del área productiva. Es por esto que su trabajo de diseño debe ser impulsado por la confianza técnica y evaluación de riesgos más que por los costos. (Butcher, 2000)

### 3.1.1.1 Estrategias de socavación: Hundimiento Convencional

En esta estrategia la perforación y tronadura de la socavación toma lugar después de la finalización del desarrollo completo del subnivel de producción. Las bateas se preparan delante de la socavación y están listas para recibir el mineral tronado desde el subnivel de hundimiento (NH).

Las ventajas de este sistema son que los bloques pueden ser traídos a producción más rápido que con otros métodos, no se requiere un sistema de manejo de minerales aparte del principal para el subnivel de hundimiento, y la probabilidad de que el mineral se compacte en el subnivel de hundimiento es muy baja. La principal desventaja es que, a excepción de zonas con bajos esfuerzos, el macizo rocoso entre el subnivel de producción y de hundimiento estará sujeto a altos y variables niveles de esfuerzos, por lo que se debe instalar fortificación y realizar reparaciones. Se ha registrado que a medida que se avanza

en la socavación los túneles son sometidos a esfuerzos de hasta 3 veces mayores que con estrategia de socavación de hundimiento previo (Butcher, 2000).

La secuencia constructiva de labores utilizada en esta metodología se muestra en la Figura 3-3, y se detalla a continuación (Rivero Abarca, 2008):

- 1) Desarrollo labores Subniveles de producción y de Hundimiento.
- 2) Apertura de Bateas de extracción.
- 3) Tronadura de socavación en el subnivel de hundimiento, avanzando con el frente de hundimiento hacia las bateas abiertas.
- 4) Inicio de la extracción.

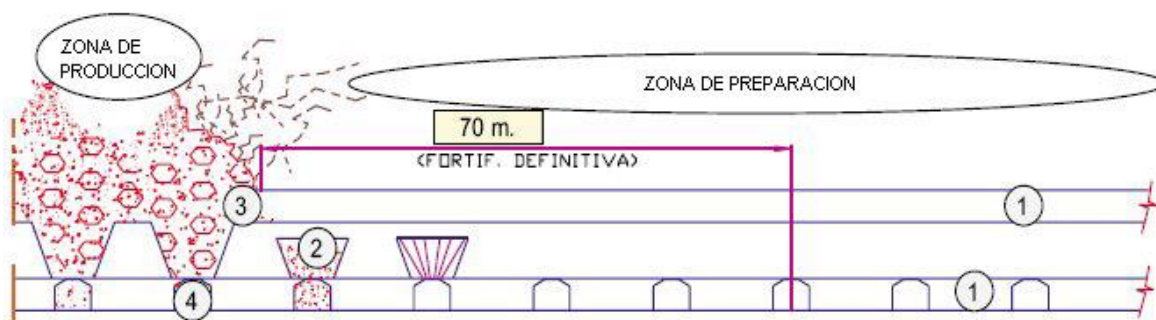


Figura 3-3 Secuencia constructiva en el método de hundimiento convencional (Rivero Abarca, 2008)

### 3.1.2 Tasa de incorporación de área socavada

Es la tasa con que se comienza a generar el corte basal en el macizo que se desea hundir. Datos recolectados por Flores y Karzulovic muestran que las tasas de socavación en minas de block y panel caving pueden variar desde 500 a 5.000 m<sup>2</sup>/mes con el promedio estando en el rango de 2.000 a 2.500 m<sup>2</sup>/mes (Brady & Brown, 2006).

Tasas lentas de avance pueden llevar a daño por esfuerzos inducidos y pérdida de tiros de tronadura, lo que ralentiza más la tasa. La tasa de avance para prevenir que suceda esto está determinada por la posición de la frente de socavación en relación al radio hidráulico requerido para el hundimiento. En esencia la tasa debe ser tan rápida como sea posible para alcanzar el radio hidráulico requerido para iniciar el hundimiento, pero luego de alcanzarlo el avance debe ser tal que el tonelaje de la socavación nunca exceda el tonelaje extraído de la excavación (Butcher, 2000).

A continuación, en la Tabla 3-1 se presenta un benchmark de las tasas de socavación de distintas minas. Cabe destacar que además de los parámetros presentados (altura de socavación y tipo de corte) cada mina tiene condiciones especiales particulares que también afectan en la tasa de incorporación de área, como presencia de agua, sismicidad, esfuerzos muy altos debido a la profundidad, entre otros.



Tabla 3-1 Benchmark tasas de socavación (Rivero Abarca, 2008)

Mina	Tasa de socavación [m <sup>2</sup> /mes]	Altura de socavación [m]	Tipo de corte
Esmeralda	3.000	3,6	Horizontal angosto
Panel III Andina	2.000-2.500	10,0	Alto
Northparkes lift 2	3.000	4,0	Angosto inclinado
DOZ	2.500	6,5	Alto
Palabora	4.200	4,0	Angosto inclinado
Premier Diamond	800	4,0	Alto

### 3.2 Pre acondicionamiento (PA)

La idea de pre acondicionamiento es esencialmente tratar este material rocoso en forma previa a su explotación minera y bajo las condiciones naturales de confinamiento, mediante algún proceso apropiado, con el fin de crear nuevas fracturas, provocar la movilización de su arquetipo estructural preexistente que está sellado y favorecer la propagación de sus rasgos menores o micro-cavidades, o bien, crear en forma explícita un conjunto de fracturas que le dé las características deseadas para su explotación y manejo posterior. En definitiva inducir un debilitamiento masivo de todo el material primario de interés. Este concepto se muestra en la Figura 3-4. (Gottreux Vollet, 2016)

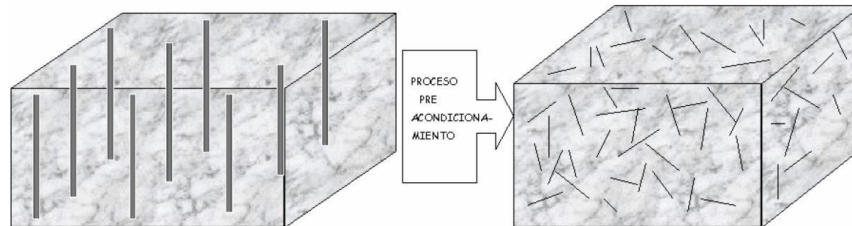


Figura 3-4 Proceso de preacondicionamiento (Gottreux Vollet, 2016)

Hay 3 tipos principales de preacondicionamiento (Castro, Báez, Arancibia, & Barrera, 2014):

- 1) Pre acondicionamiento mediante fracturamiento hidráulico (FH)
- 2) Pre acondicionamiento mediante fracturamiento por perforación y tronadura (DDE)
- 3) Combinación de los 2 anteriores

#### 3.2.1 Fracturamiento hidráulico (FH)

Se basa en creación de fracturas que son normales al esfuerzo principal menor mediante el ingreso de agua a presión que vence la resistencia a la tracción del macizo. El método de FH se basa en la creación de estructuras artificiales en el macizo, lo que disminuye el RQD

aumenta la porosidad, aumenta la presión de poros y el deslizamiento de estructuras existentes disminuyendo su resistencia al corte.

Las etapas necesarias para generar artificialmente una fractura hidráulica son:

- 1) Hacer una perforación en el macizo rocoso,
- 2) Aislar una sección de la perforación por medio de *packers* inflables presurizados,
- 3) En el tramo entre los *packers*, se inyecta un fluido a presión hasta provocar la fractura por tracción,
- 4) Se continúa inyectando fluido para extender la fractura al interior del macizo rocoso hasta finalizar el tratamiento.

El procedimiento se presenta esquemáticamente en la Figura 3-5. (Valderrama Llantén, 2011)

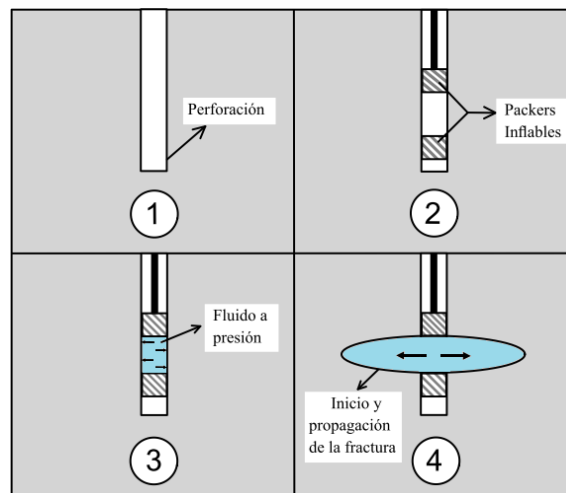


Figura 3-5 Pasos para llevar a cabo el fracturamiento hidráulico.

### 3.2.2 Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE)

El pre acondicionar una roca competente en un ambiente subterráneo, implica dimensionar los parámetros críticos de tronadura para un entorno confinado ausente de caras libres, y en el que se supone la utilización de cargas cilíndricas de una determinada longitud, cuyo principal objetivo es promover la generación de nuevas fracturas en el macizo rocoso y su posterior fragmentación. En este caso, la fragmentación de roca resulta del efecto combinado de la onda de choque y de la presión de los gases generados por la explosión. Como factor principal debe considerarse la interacción de las ondas creadas por la detonación casi simultánea (principio de superposición), que permite una administración más eficiente de la energía disponible, y mayor grado de fragmentación de la roca (Gottreux Vollet, 2016).

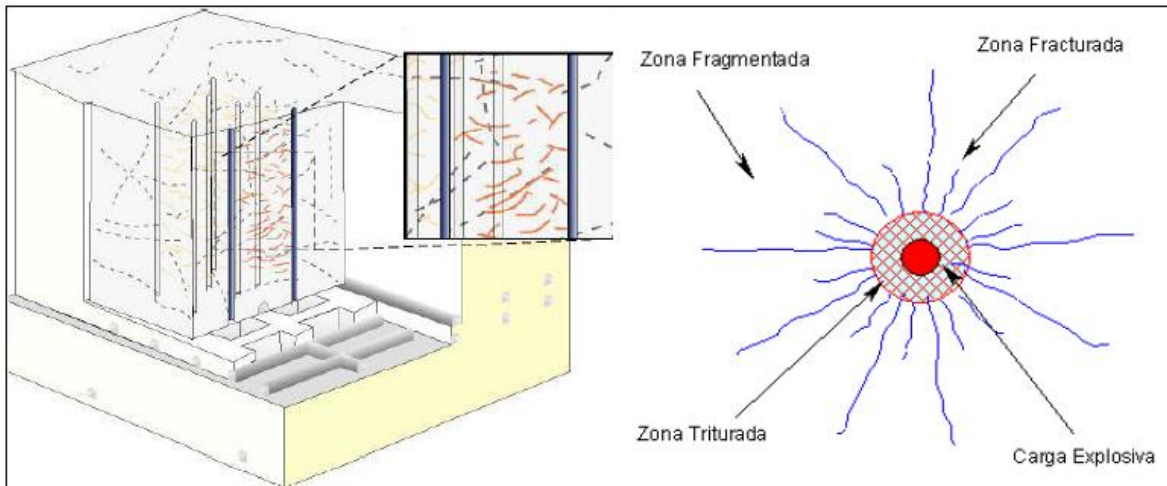


Figura 3-6 Metodología DDE en métodos por Hundimiento

El objetivo del método es:

- Aumentar el grado de homogeneidad en el macizo rocoso a través de la creación de micro estructuras reduciendo la rigidez del macizo y disminuyendo su capacidad de acumular energía, mejorando la condición de estallidos de roca
- Mejorar la fragmentación en mineral masivo
- Promover deformaciones de corte en estructuras existentes

### 3.2.3 Preacondicionamiento mixto o intensivo

Uso combinado de las tecnologías anteriores, esto es, producir primero fracturas mediante FH y luego aplicar DDE. La hipótesis de esta opción es que las discontinuidades generadas mediante el primer método servirían de superficies reflectoras para el campo de ondas de la posterior tronadura, concentrando el mayor efecto entre las fracturas hidráulicas, y minimizando la posibilidad de acoplamiento desfavorable de ondas fuera de la zona de interés. Adicionalmente, las fracturas de DDE se disponen en forma perpendicular al FH, aportando a la reducción de bloques mayores en el macizo rocoso. (Gottreux Vollet, 2016)

La combinación de los métodos se describe con el ejemplo del diseño de la mina Cadia East en la Figura 3-7, con pozos de pre acondicionamiento perforado desde el NH para tener mejor manejo de la iniciación del caving, velocidad de extracción y su propagación en el macizo, así como garantizar una determinada fragmentación primaria para lograr altas tasas de producción y rápida productividad. Claramente, la parte pre acondicionada del macizo rocoso va por delante de la zona de producción, lo cual implica que esta roca será extraída posteriormente. En este caso, los beneficios percibidos se cuantificaron como aumento del 30% en la velocidad de propagación del caving, fragmentación 20% más fina, mayor cantidad de eventos sísmicos pero de magnitud inferior, menor abutment stress, tasas de extracción hasta un 30% mayores y mejores en tasas de ramp up (Catalan, Onederra, & Chitombo, 2012).

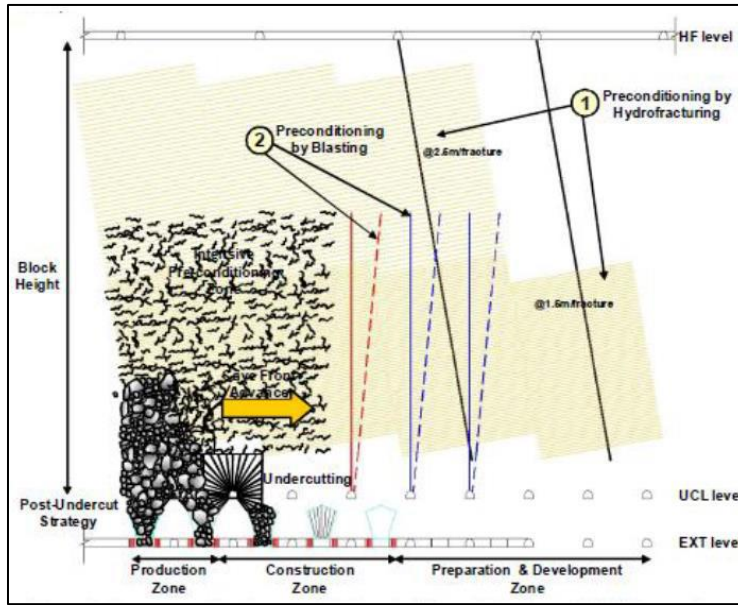


Figura 3-7 Esquema de la utilización de PA mixto (Catalan, Onederra, & Chitombo, 2012)

### 3.3 Modelado de sistemas mediante simulación

Con respecto al modelado de sistemas mediante simulación, la metodología científica tradicional ha propuesto en general el mismo esquema del proceso de creación y uso, que se muestra en la Figura 3-8. Según varios autores, los modelos científicos se construyen para desarrollar procesos de inferencia sobre ciertos aspectos de sistemas reales previamente observados. Es mediante estos procesos de inferencia, mediante la construcción y el uso de modelos científicos, como se mejora el entendimiento de los sistemas reales observados. (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008)

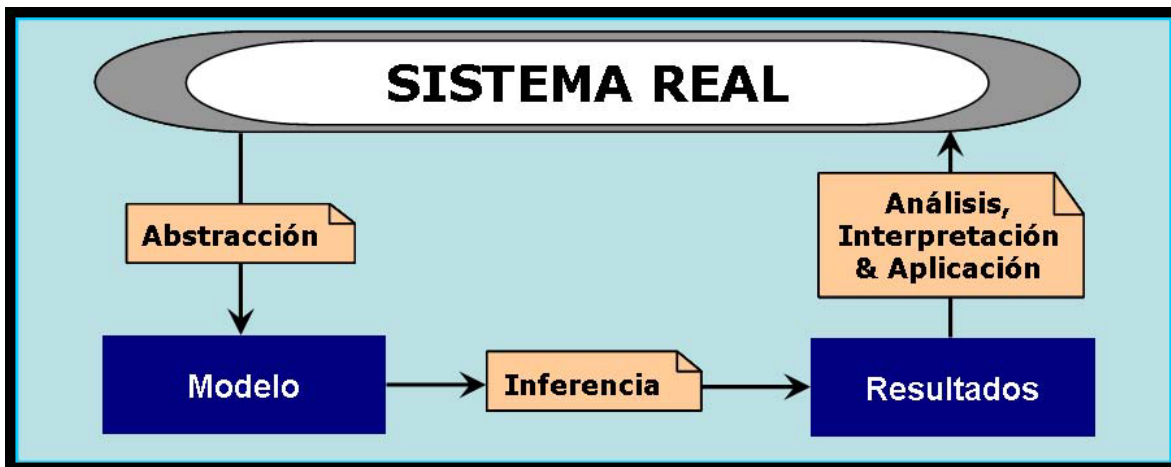


Figura 3-8 Esquema general de proceso de modelado

Los modelos se construyen mediante procesos de abstracción con el objetivo de facilitar la comprensión de ciertos aspectos de un determinado sistema real. De este modo, parte de la complejidad del sistema real se pierde—de forma intencionada—en el proceso de creación

de un modelo. El proceso de abstracción para crear un modelo comienza con la observación del sistema real (incluyendo, a menudo, la recogida de datos), y termina con el diseño del modelo prescindiendo de aquellos aspectos que no se consideran fundamentales para los propósitos.

En general, las conclusiones a las que se puede llegar usando un modelo no describirán con rigurosa exactitud lo que ocurre en el sistema real (especialmente en sistemas con un alto grado de incertidumbre) pero, cuando menos, aportarán un conocimiento significativamente mejor que el que se obtendría sin aplicar modelo alguno.

El proceso de modelado es en realidad raramente unidireccional. En la práctica, el proceso de modelado es en general muy dinámico y no lineal. A menudo el modelador diseña un primer modelo con el cual obtiene unos resultados iniciales. A la luz de los resultados obtenidos, el modelador suele volver a las etapas iniciales del proceso de modelado para perfeccionar el modelo mediante la revisión de algunas de sus premisas. Es posible que los resultados obtenidos inicialmente se consideren insatisfactorios porque no parecieran derivarse lógicamente de las premisas del modelo (proceso de verificación) o porque —aun siendo lógicamente correctos— difirieran excesivamente de los resultados observados en el sistema real que se está modelando (proceso de validación). A continuación, se explican brevemente estos dos procesos:

- **Verificación:** Consiste en comprobar que el modelo desarrollado cumple con los requisitos de diseño auto-impuestos por el modelador (Kleijnen, 1995) (Sargent, 2003), o en otras palabras, asegurarse de que el modelo es lo que su diseñador piensa que es.
- **Validación:** En contraste con la verificación, la validación científica sí que hace referencia explícita al sistema real que se está modelando. Validar un modelo consiste en valorar su utilidad dentro del contexto de aplicación, de acuerdo con los criterios para los cuales el modelo fue diseñado (Kleijnen, 1995) (Sargent, 2003).

### **3.3.1 La simulación computacional como herramienta de análisis de modelos**

Un modelo computacional es un modelo formal (que por lo tanto puede expresarse en lenguaje matemático como un conjunto de ecuaciones) y la simulación computacional es una herramienta que permite estudiarlo más allá de los límites actuales de las matemáticas. De este modo, el resultado final es un modelo potencialmente más realista, y que todavía conserva el rigor formal de los modelos matemáticos más tradicionales. (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008)

Sin embargo, es necesario destacar que, como todas las demás opciones disponibles, la simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas que son precisas tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado. (García, García, & Cárdenas, 2006)

Dentro de las ventajas más comunes que ofrece la simulación se pueden citar las siguientes:

- Buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, ya que puede ser riesgoso y/o costoso.

- Mejora el conocimiento del proceso actual ya que le permite ver cómo se comporta el sistema bajo distintos escenarios.
- Puede utilizarse como medio de captación para toma de decisiones.
- Es más económico realizar un estudio de simulación que hacer cambios en los procesos reales.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución.
- En la actualidad, softwares de simulación tienden a ser más sencillos, lo que facilita su aplicación.
- Gracias a las herramientas de animación que forman parte de muchos softwares de simulación es posible ver cómo se comportará un proceso una vez que se haya cambiado o mejorado.

Entre las desventajas que puede presentar la simulación están:

- Aunque muchos softwares permiten obtener el mejor escenario a partir de una combinación de variaciones posibles, la simulación no es una herramienta de optimización.
- La simulación puede ser costosa cuando se quiere implementar en problemas relativamente sencillos de resolver, en lugar de utilizar soluciones analíticas que se han desarrollado de manera específica para ese tipo de casos.
- Se requiere bastante tiempo para realizar un buen estudio de simulación; no siempre se tiene la disposición o la oportunidad de esperar ese tiempo para obtener respuesta.
- Es necesario que el analista domine el uso del software y que tenga sólidos conocimientos de estadística para el análisis de resultados.

Independientemente de los beneficios que conlleva la simulación, es imposible garantizar que un modelo tendrá éxito. Existen ciertas condiciones clave que pueden traer problemas si no se les pone atención al momento de usar la simulación para la toma de decisiones. A continuación, se destacan algunas de las causas por las que un modelo de simulación podría no tener los resultados que se desean:

- **Tamaño de la corrida:** Para poder llegar a conclusiones estadísticas válidas es necesario que las variables aleatorias de respuesta estén en estado estable.
- **Variables de respuesta mal definidas:** Aun cuando el modelo de simulación sea eficiente y represente la realidad en gran medida, si la variable de respuesta seleccionada no es la apropiada será imposible tomar decisiones que tengan impacto en la operación del sistema bajo estudio.
- **Errores al establecer las relaciones entre las variables:** Un error común de programación es olvidar las relaciones lógicas que existen entre las variables aleatorias del modelo, o minimizar su impacto.
- **Errores al determinar el tipo de distribución asociado a las variables aleatorias del modelo:** Se utilizan distribuciones que no son las más adecuadas o que responden únicamente a un intento de simplificar los estudios estadísticos.
- **Uso incorrecto de la información:** Muchas veces esta información se recolecta, analiza y administra de acuerdo con las necesidades propias de la empresa, lo que

implica que no siempre está en el formato y la presentación que se requiere para la simulación. Si esta información se utiliza para determinar los parámetros del modelo sin ser depurada y reorganizada, es muy probable que la precisión de los resultados del estudio se vea afectada.

- **Falta o exceso de detalle en el modelo:** En muchas ocasiones algún proceso se simplifica tanto que tiende a verse como una “caja negra” que impide ver qué ocurre en el interior, aunque sí haya entrada y salida de datos que interactúan con otras partes del modelo. Por otra parte, si el modelo se hace demasiado detallado, tanto el tiempo dedicado al estudio como el costo de llevarlo a cabo podrían incrementarse sustancialmente. Es labor del encargado de la simulación sugerir y clarificar los niveles de detalle que se requieren en el modelo, resaltando los alcances y limitaciones de cada uno.

### **3.3.2 Simulación en minas de block/panel caving**

En minería las técnicas de simulación son aplicadas frecuentemente a aspectos relacionados a la producción. En particular, en minas explotadas por block/panel caving las técnicas de simulación han sido utilizadas generalmente para aspectos relacionados a la planificación de la producción, rendimientos de producción, disponibilidad de los puntos de extracción y fragmentación (Li, 2012).

Un gran número de herramientas están disponibles para realizar simulaciones y éstas se pueden dividir en cuatro categorías:

- Lenguajes de programación para fines generales.
- Lenguajes de simulación para fines generales.
- Paquetes de software de simulación para fines generales.
- Paquetes de software específicos para minería.

Los lenguajes de programación para fines generales, como Java o C++, ofrecen un alto grado de flexibilidad a un bajo costo, pero requieren habilidades altas de programación. Los lenguajes de simulación para fines generales, como SIMAN, GPSS y SLAM, son lenguajes de simulación orientados a objetos de sistemas discretos con gran flexibilidad, también requieren buenas habilidades de programación del usuario.

Los paquetes de software de simulación para fines generales, como por ejemplo Automod, ProModel, SIMUL8, Arena, Flexsim y Extend, requieren menos conocimientos de programación del usuario, pero ofrecen menor flexibilidad. Varios de los paquetes de software mencionados anteriormente han sido utilizados para simulación de las operaciones mineras:

Finalmente, dentro de los softwares orientados específicamente a la minería para la simulación de los desarrollos se puede destacar el software SimMine, el cual tiene la capacidad de importar directamente los diseños de la mina y no se requiere ninguna codificación.

Dentro de los paquetes de simulación para fines generales, se destaca el trabajo de Contreras realizado en ProModel (Contreras Carrasco, 2016), que tiene por objetivo

proponer una metodología para crear un modelo de simulación que incorpore interferencias operacionales y que complemente a la planificación de la preparación minera de los desarrollos horizontales con múltiples frentes en minería de Block/Panel Caving.

### **3.4 Conclusión estado del arte**

Hoy en día la estimación de la tasa de incorporación de área en block caving se basa principalmente en experiencia de minas similares. En la industria se observan valores que van desde los 800 a los 4200 m<sup>2</sup>/mes (Tabla 3-1), que dependen de parámetros de diseño como la forma y la altura de socavación, así como también del rendimiento y coordinación de las actividades involucradas. También cabe destacar que hay parámetros específicos y especiales de cada mina, como sismicidad, infiltraciones de agua, esfuerzos, etc. que también afectan la tasa. Es por lo anterior que esta forma de estimación no siempre es la más adecuada y se pueden presentar grandes variaciones.

Debido a la complejidad y las numerosas variables involucradas en el proceso, se concluye que la mejor forma de estimar la tasa de incorporación de área es con la elaboración de un modelo de simulación. Si no se llega a estimar correctamente la tasa, ya sea por sesgos en las variables de entrada o falta de incorporación de condiciones especiales de la mina, de todas formas se logra una mejora en el conocimiento del proceso y cómo se comporta bajo distintos escenarios, lo que permitirá también poder tomar mejores decisiones para el futuro.

La revisión del estado del arte no ha dado con mayor información acerca de modelos de simulación aplicados a la predicción de la tasa de incorporación de área socavada en block caving por lo que se justifica la elaboración de este trabajo. Cabe destacar que si se ha encontrado información acerca de trabajos simulación de procesos mineros de complejidad similar, como es la preparación minera de desarrollos horizontales con múltiples frentes en minería block caving. Específicamente se destaca el trabajo de Contreras (Contreras Carrasco, 2016) que fue modelado en ProModel<sup>®</sup>, del cual se asume que siguiendo una metodología análoga se podrían lograr los objetivos del trabajo.



# Capítulo 4: Metodología simulación

---

Dentro de la etapa de simulación se define una metodología para modelar el problema. La metodología se compone de 8 etapas y está basada en la metodología elaborada por Banks (Banks, 1999) para proyectos de simulación con fines de generales, pero en este documento se le ha orientado al proceso de incorporación de área en minería tipo block caving.

## 4.1 Etapa 1: Formulación del problema

La formulación del problema define los elementos básicos del proceso a simular, es decir, los objetivos del modelo de simulación, los alcances y el límite de batería. Esta etapa ha sido desarrollada en Capítulo 1: Introducción.

- **Objetivos:** Relacionados a lo que se espera del estudio de simulación.
- **Alcances:** Hacen mención al nivel de detalle del modelo. Es importante definir bien los alcances del modelo debido a que éstos están directamente relacionados con los supuestos, limitaciones y restricciones.
- **Límite de Batería:** El límite de batería indica desde donde comienza hasta donde termina el sistema modelado. Lo anterior condiciona los parámetros de entrada y las variables de salida del modelo. Es recomendable generar un esquema visual para representar cual es el límite de batería de un modelo.

## 4.2 Etapa 2: Generación de Modelo Conceptual

Antes de comenzar a codificar un modelo de simulación se debe confeccionar un modelo conceptual. El modelo conceptual tiene como objetivo servir como guía para la construcción del modelo computacional, definirlo es útil para identificar las interacciones que existirán en el sistema. El modelo conceptual debe ser sometido a la revisión de algún analista o experto del tema para validarlo antes de su codificación. Esta etapa es desarrollada en Capítulo 5: Modelo Conceptual.

Los aspectos que se ha considerado más relevantes en un modelo conceptual para el proceso de socavación en una mina explotada mediante block caving son:

### 4.2.1 Layout

El layout determina el movimiento de los equipos, las distancias, y por ende, los tiempos de traslado. Cuando se modelan excavaciones mineras el sistema es dinámico, es decir, cambia con el tiempo. En el caso particular de la socavación y apertura de bateas existirán distancias fijas y distancias variables en el layout del subnivel de hundimiento y de producción.

En este caso tienen que ver con el diseño de los Macro Bloques específicos a estudiar. Cada Macro Bloque tiene un diseño particular, por lo tanto, se debe definir un MB que represente en gran medida el diseño general de cada uno, el cual se utilizará hasta el final del trabajo.

## **4.2.2 Elementos principales**

En esta sección se presentan los elementos que se consideran más importantes según la formulación del problema. Por elementos se entiende:

- Lugares principales
- Recursos
- Actividades
- Funcionamiento del modelo

### **4.2.2.1 Lugares principales**

Los lugares principales son aquellos que pudieran repercutir en los rendimientos de las operaciones unitarias.

### **4.2.2.2 Actividades del programa de socavación y preacondicionamiento**

Para la socavación y el preacondicionamiento la lista de actividades por ciclo es relevante junto con su duración debido a la repetición de ellas en cada ciclo. Una vez realizada la lista de actividades principales por ciclo, se les asociará uno o varios equipos o recursos.

### **4.2.2.3 Equipos principales y sus características**

Primero es necesario definir cómo está compuesta una cuadrilla de trabajo y cuántas cuadrillas disponibles se dispondrán para trabajar. Se debe recopilar información de los equipos a utilizar, como por ejemplo capacidades y velocidades.

### **4.2.2.4 Estrategia de socavación, apertura de bateas y preacondicionamiento**

Otro aspecto relevante cuando se socava un área es la secuencia en que se tronará, es necesario definir en el modelo cuál es el programa de incorporación de área en conjunto con el programa de preacondicionamiento que se seguirá debido a que los resultados pueden variar dependiendo de la estrategia.

## **4.2.3 Parámetros de Entrada**

Los parámetros de entrada son los valores o distribuciones de probabilidad relevantes para el sistema en general. Los parámetros de entrada más relevantes, se definen fuera del código con el objetivo de sustituirlos con facilidad en la etapa de generación de escenarios.

## **4.2.4 Variables de Salida**

Las variables de salida se utilizan normalmente para medir el desempeño general del sistema, medir el desempeño de los equipos y/o para entregar indicadores para validar. Se pueden exportar las variables más importantes y así hacer uso de esta información más adelante.

## **4.2.5 Criterios de decisión y de movimiento**

Los criterios de decisión son aquellos con los que se toman decisiones dentro de un sistema y normalmente son decisiones humanas, mientras que los criterios de movimiento son más bien criterios de asignación o de gestión del tráfico en el layout, como, por ejemplo: el uso de semáforos.

#### 4.2.6 Modelos Paralelos

Los modelos paralelos son aquellos que acompañan al modelo base. Se utilizan para tomar decisiones o para cambiar estados que influyen en el modelo base y no tienen una ubicación física en el layout. Modelos paralelos que se deben considerar en la socavación son:

1. **Sistema de turnos:** Elaborar un calendario considerando las actividades de cambio de turno y colaciones, el cual definirá las horas disponibles para trabajar por turno.
2. **Horario para tronaduras:** Debido a la evacuación pre tronadura y a la ventilación post tronadura, para asegurar menor interferencia en el sistema, usualmente se trona a horarios definidos.
3. **Restricciones y otras consideraciones**

a) **Traslados de personal:** Si en el modelo de simulación estos tiempos de traslado se consideran como un número fijo, entonces es posible considerarlo dentro del calendario del turno y restarlo a las horas disponibles del turno.

Sin embargo, aunque se resguarda que estos tiempos sean relativamente constantes, en la realidad estos tiempos siguen una distribución de probabilidad, debido a que son tiempos que dependen fuertemente del personal.

b) **Interferencias:** Básicamente la interferencia que existe entre las distintas operaciones unitarias impacta en rutas que comparten los equipos.

c) **Aislaciones:** En el caso de tener que realizar aislaciones de zonas por algún motivo, que puede afectar en el tiempo operativo de los equipos.

#### 4.3 Etapa 3: Recolección y Análisis de Datos

De manera paralela a la generación del modelo conceptual es posible comenzar la recopilación de la información estadística de las variables del modelo. Para analizar los parámetros de entrada primero se debe conocer la proveniencia de los datos, los cuales pueden provenir de:

- Toma de datos empíricos
- Opinión de expertos
- Bases de datos

Todos los casos son igual de válidos y los parámetros de entrada pueden provenir de uno o de varios de estos.

En el caso de ser valores estáticos entonces se pueden utilizar valores determinísticos y se insertan directamente en el modelo de simulación. Si el comportamiento se mueve dentro de un rango de valores entonces se define como una variable estocástica, se busca el comportamiento del dato y se intenta acotar su variación.

Al finalizar la recolección y análisis de datos para todas las variables del modelo, se tendrán las condiciones necesarias para generar una versión preliminar del problema que se está simulando.

## **4.4 Etapa 4: Generación del Modelo Computacional**

En esta etapa se integra la información obtenida a partir del análisis de los datos, los supuestos del modelo y todos los datos que se requieran para tener un modelo lo más cercano posible a la realidad del problema bajo estudio. La metodología a seguir en esta etapa depende fuertemente del software de simulación.

La codificación del modelo se puede realizar en diversos tipos de software o lenguajes. En este caso se presenta una metodología para la creación de un modelo de simulación orientado para el proceso de socavación mediante el software de simulación de eventos discretos con fines generales, ProModel<sup>®</sup>.

Los elementos básicos que utiliza el software, y que permitirán definir la metodología son los siguientes:

- Entidades
- Locaciones
- Rutas
- Recursos
- Llegadas
- Procesos
- Asignación de Turnos
- Variables

### **4.4.1 Entidades**

Una entidad es cualquier elemento que el modelo procese. En este caso se definirán como entidades ciertos elementos de las actividades principales de la socavación.

Estas actividades se desencadenarán en las frentes de manera secuencial, donde cada una de ellas estará en la frente por un tiempo que será definida por el usuario (número o distribución) y se verá afectada por sucesos paralelos en el sistema (cambios de turno, disponibilidad de equipos, etc.).

### **4.4.2 Locaciones**

Las locaciones corresponden a los lugares en el sistema en el que las entidades son procesadas, almacenadas o alguna otra actividad de toma de decisiones.

Para cada locación se define:

- Capacidad (capacidad de entidades por locación).
- Cantidad (número de locaciones con las mismas características).
- Disponibilidad (puede ser definida por horario, por uso, por cantidad de entidades procesadas, entre otras).

### **4.4.3 Rutas**

La definición de las rutas es equivalente a construir el layout que se va a modelar considerando la ubicación y las distancias de los elementos más relevantes. El layout a desarrollar se debe construir manualmente, nodo por nodo.

### **4.4.4 Recursos**

Un recurso es una persona, equipo o cualquier otro mecanismo que transporte entidades o asista operaciones de entidades en locaciones. Los recursos pueden ser dinámicos, lo que

significa que se mueven a lo largo de una ruta definida, o estáticos, en la que no se produce ningún movimiento.

Los recursos entonces serán los equipos que componen las cuadrillas de trabajo, para los proyectos de este tipo se sugiere utilizar recursos dinámicos de modo que estos estén influenciados por sus velocidades y a la ruta que van recorriendo.

A los recursos se les puede agregar “tiempos de espera” agendados o no agendados. Por lo tanto, aquí se asignarán elementos como por ejemplo los cambios de turno. Además, se le asignará a cada equipo sus especificaciones relativas a la velocidad.

#### **4.4.5 Llegadas**

En ProModel<sup>®</sup> esta función define la llegada de las entidades al sistema por primera vez. Aquí se ingresa la primera actividad del ciclo. Una vez que el modelo de simulación comienza a correr, llegan estas entidades al modelo de simulación y comienza el ciclo de procesos. Además se define el momento y la locación a la que llegan, la cantidad, el número de ocurrencias y su frecuencia.

#### **4.4.6 Procesamiento**

El procesamiento define el enrutamiento de las entidades a través del sistema y las operaciones que tienen lugar en cada locación que entran. Una vez que las entidades han entrado en el sistema, tal como se define en la tabla de llegadas, el proceso especifica todo lo que les sucede hasta que salen del sistema.

En esta etapa se realiza la codificación de acuerdo a los requerimientos del usuario. En general se define la precedencia de las actividades, tiempos de espera (tiempos de las actividades en la frente) y condiciones de control.

#### **4.4.7 Asignación de Turnos**

ProModel<sup>®</sup> tiene la opción de insertar un calendario en el modelo de simulación que determina las horas disponibles por día para trabajar de ciertos recursos, lo que será la asignación de turnos. Aquí se pueden agregar los horarios de colación y cambios de turno, se pueden agregar tiempos de traslado e incluso los horarios para la tronadura o cualquier actividad que se desee establecer en momentos definidos del día.

#### **4.4.8 Variables**

Cada calle a socavar, tendrá una serie de variables que indican las características principales de éstas. Como se mencionó en el capítulo anterior, estas variables pueden tener los mismos valores para cada frente o ser distintas.

#### **4.4.9 Otros Elementos**

##### **4.4.9.1 Tiempo**

Hace alusión al tiempo que durará la simulación en unidad de horas, días, meses, dependiendo del caso.

#### **4.4.9.2 Número de réplicas**

El número de corridas o réplicas es relevante cuando se consideran variables aleatorias en el modelo de simulación.

#### **4.4.9.3 Modelos Paralelos**

Existen diversas formas de incorporar eventos paralelos en el modelo de simulación utilizando ProModel<sup>®</sup>. Algunos son:

- Subrutinas: las subrutinas permiten desencadenar eventos paralelos.
- Tiempos de Espera (Downtimes): este ítem, como fue mencionado anteriormente, permite agregar directamente en los recursos (equipos) o en las locaciones eventos como fallas, mantenciones, petróleo, etc.
- Procesamiento (Processing): aquí la codificación es libre y se puede adaptar a los requerimientos del usuario.

### **4.5 Etapa 5: Verificación del Modelo**

Una vez que se han identificado las distribuciones de probabilidad de las variables del modelo y se han implantado los supuestos, es necesario realizar un proceso de verificación y comprobar que todos los parámetros y algoritmos utilizados en la simulación funcionen correctamente. Se trata de un proceso iterativo y se realiza hasta que se termina la construcción del modelo computacional y se pasa a la siguiente etapa de validación del modelo.

En términos simples, la verificación del modelo consiste en determinar si el modelo está haciendo lo que debería estar haciendo. Esto puede ser analizando el comportamiento de algunas variables de salida, de los resultados finales de la simulación o también observando la animación del sistema modelado.

### **4.6 Etapa 6: Validación del Modelo**

La validación es el proceso que sirve para determinar el grado de semejanza entre el modelo de simulación y la realidad. En el caso de que se requiera validar un modelo que no existe en la realidad éste se debe validar de manera conceptual. Una forma de realizarlo es validar el modelo por partes y otra forma es mediante datos históricos de sistemas similares.

Validar por partes es aplicable cuando el sistema a simular es el conjunto de varios sub sistemas, algunos de ellos existen ya en la actualidad. De esta manera se puede validar su comportamiento de manera separada.

Validar mediante datos históricos tiene relación con que los resultados estén dentro de rangos previamente estudiados mediante un benchmarking de proyectos con condiciones similares u otros estudios similares.

#### **4.7 Etapa 7: Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad**

Tras validar el modelo es necesario establecer los escenarios que se quieren analizar. Una manera sencilla de determinarlos consiste en utilizar un escenario pesimista, uno optimista y uno intermedio para la variable de respuesta más importante. Sin embargo, no todas las variables se comportan igual ante los cambios en los distintos escenarios, por lo que es necesario que más de una variable de respuesta se analice.

#### **4.8 Etapa 8: Documentación**

Finalmente, se debe realizar el reporte de los resultados juntos con los análisis y conclusión de los mismos en base a los objetivos del proyecto. Posteriormente, si el modelo de simulación base está validado se puede implementar a distintos casos estudio.

# Capítulo 5: Modelo Conceptual

## 5.1 Layout

El sector a estudiar serán los MB centrales (MB-N01 y MB-S01), señalados en la Figura 2-2. Para el estudio serán relevantes sólo el subnivel de producción y el subnivel de hundimiento. Se muestra una superposición del subnivel de producción con el subnivel de hundimiento de estos MB en la Figura 5-1.

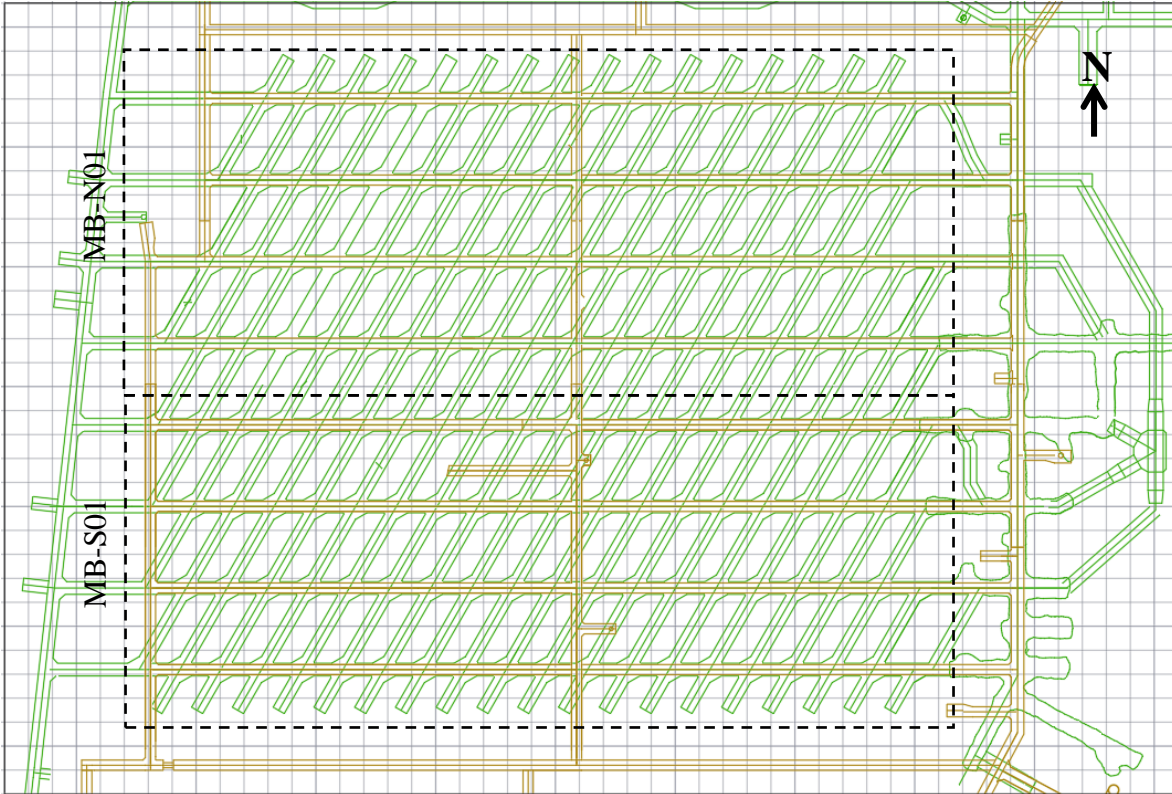


Figura 5-1 Vista en planta superposición NH con NP para MB N01 y S01

### 5.1.1 Layout subnivel de producción

A continuación, se muestra el diseño del subnivel de producción de los Macro Bloques seleccionados para la configuración de las simulaciones en la Figura 5-2. Este consta de una malla Teniente de 16x16 m, con 8 calles de aproximadamente 300 m de largo, separadas por 32 m. Para efectos del modelo, se enumeran las calles de Sur a Norte desde el 1 al 8.



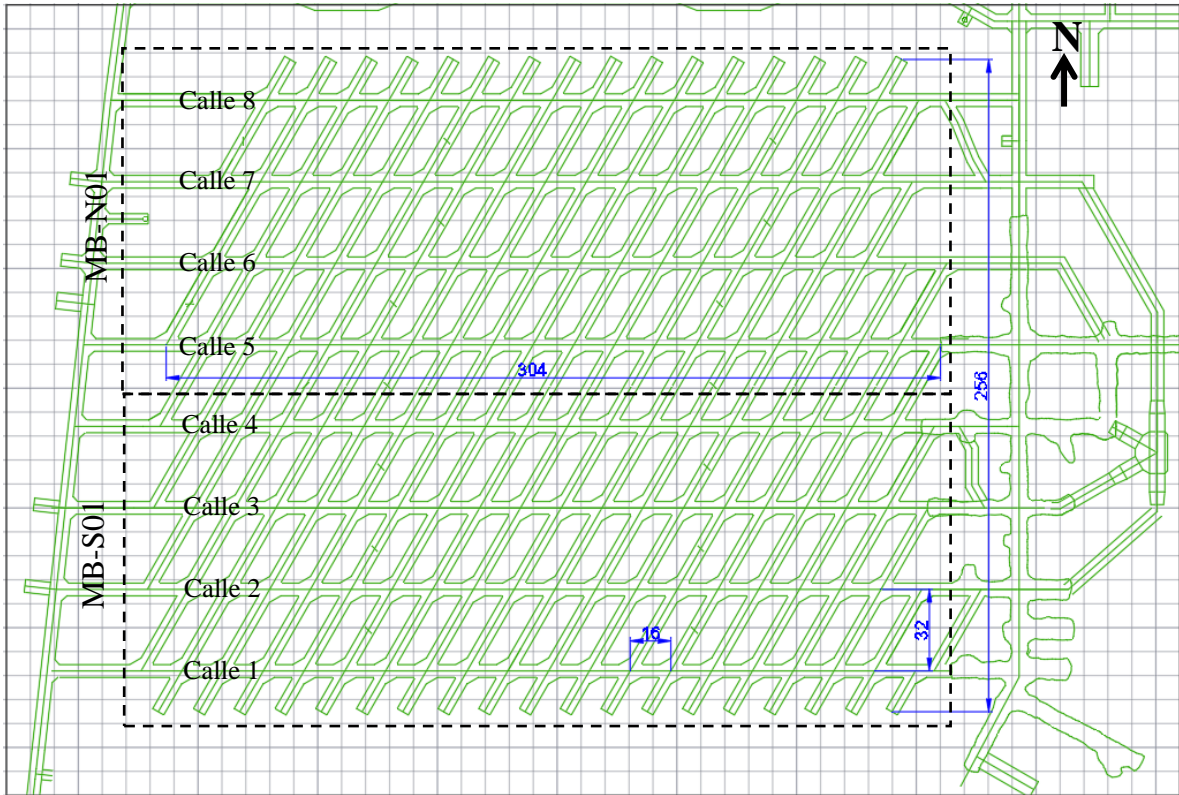


Figura 5-2 Vista en planta de subnivel de producción MB N01 y S01

### 5.1.2 Layout subnivel de hundimiento

A continuación, se muestra el diseño del subnivel de hundimiento del MB seleccionado para la configuración de las simulaciones en la Figura 5-3. Consta de 8 calles de entre aproximadamente 330 m de largo separadas por 32 m, al igual que el subnivel de producción.

Cabe destacar que en la calle 4 del MB-S01 se encuentra una irregularidad que se muestra en la Figura 5-4, pero para efectos de este trabajo se va a asumir una calle continua como se aprecia en la Figura 5-3.

Para efectos del modelo conceptual, las calles son enumeradas del 1 al 8 desde el Sur al Norte para el subnivel de producción y el de hundimiento.

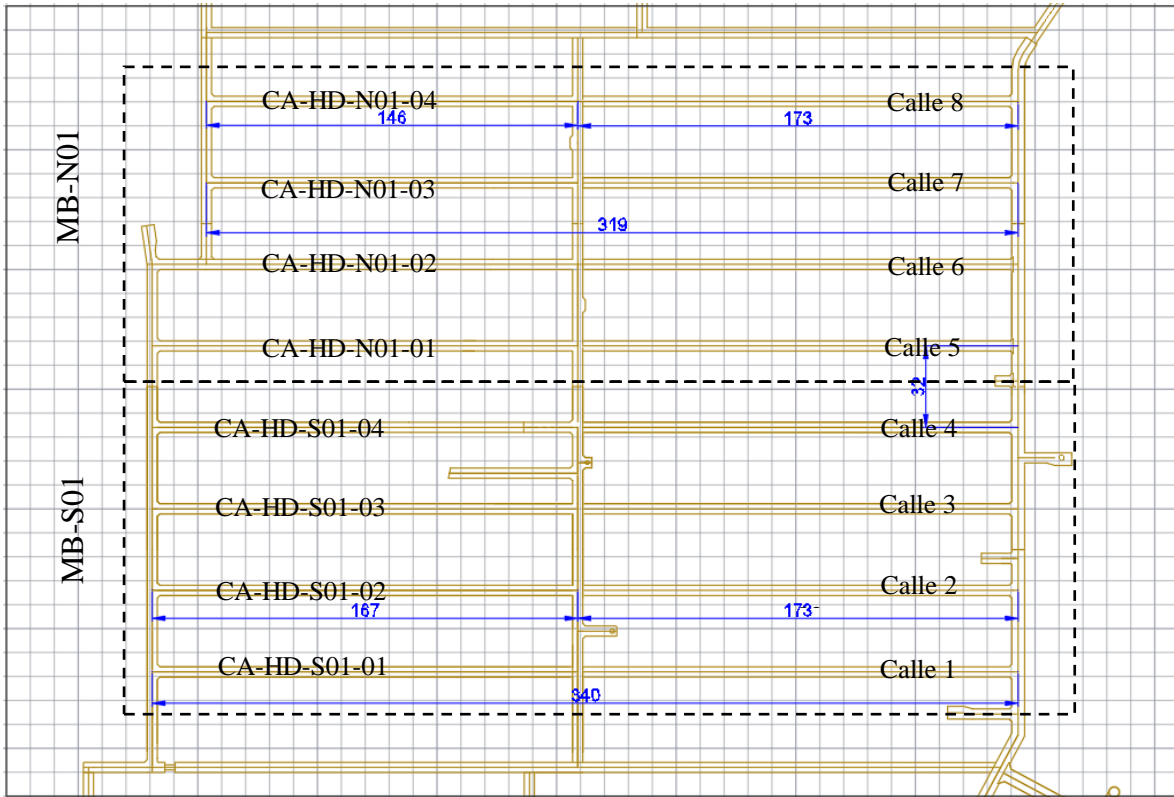


Figura 5-3 Vista en planta de subnivel de hundimiento MB N01 y S01

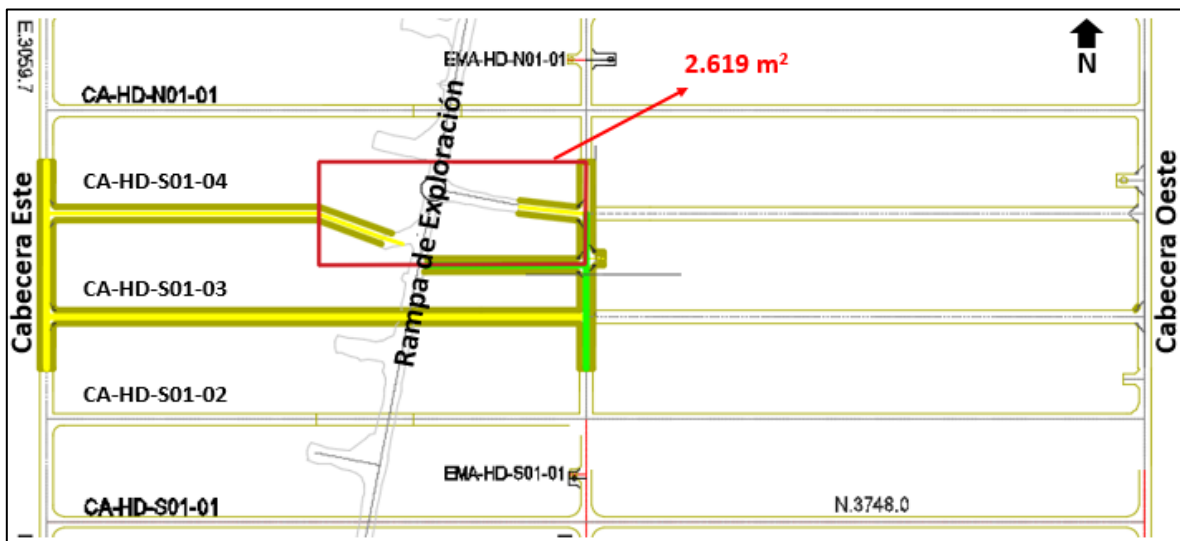


Figura 5-4 Vista en planta de diseño original de subnivel de hundimiento

## 5.2 Elementos principales

### 5.2.1 Lugares principales

#### 5.2.1.1 Bateas y puntos de extracción

A continuación, se muestra la disposición de las bateas y medias bateas, que condicionan la disposición de los puntos de extracción en el layout del subnivel de producción en la Figura 5-5. Se muestra el diseño de las bateas habilitadas, no obstante, serán abiertas con un rendimiento de 8 a 10 bateas por mes.

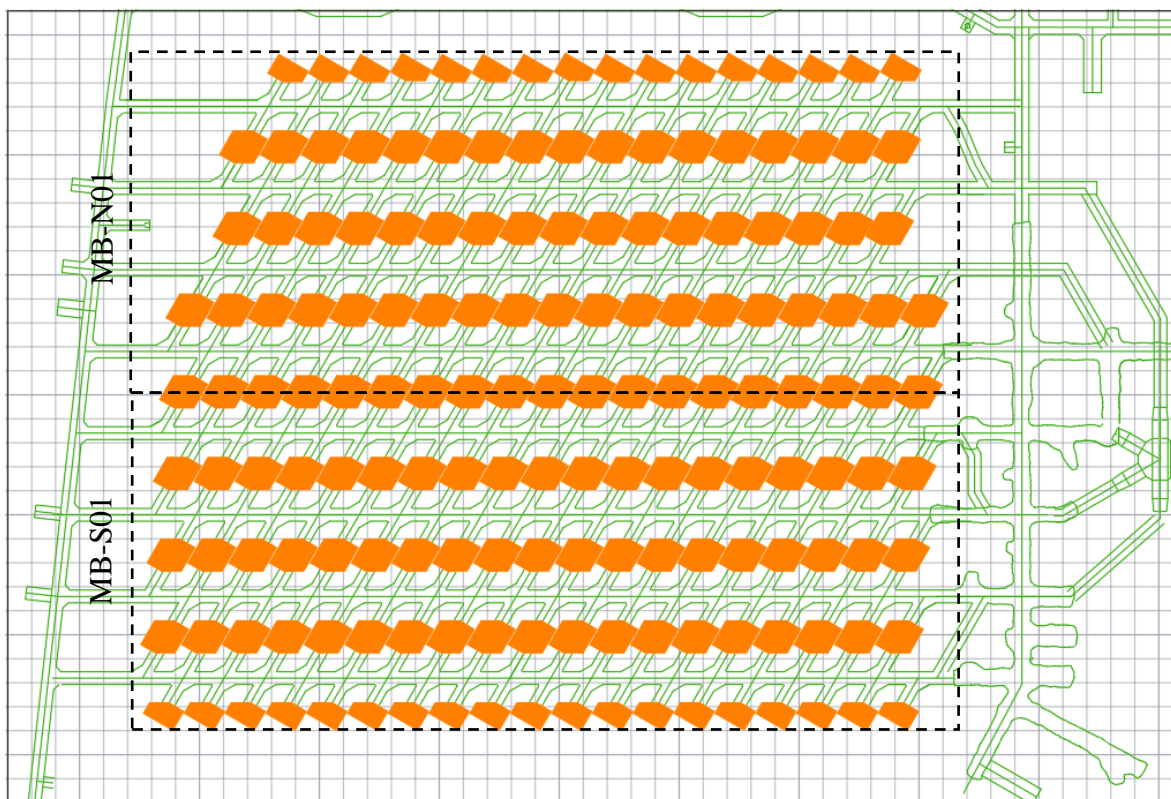


Figura 5-5 Disposición de bateas en subnivel de producción y hundimiento, vista en planta

#### 5.2.1.2 Puntos de tronadura y perforación

De acuerdo con el programa de socavación escogido (detallado en sección 5.2.6), se definen puntos en los que se van a realizar actividades de tronadura o de perforación, para bateas, socavación y tiros DDE. En la Figura 5-6 y Figura 5-7 se muestran los puntos mencionados para el subnivel de hundimiento y producción respectivamente, y en la Tabla 5-1 se detalla la simbología de cada punto.

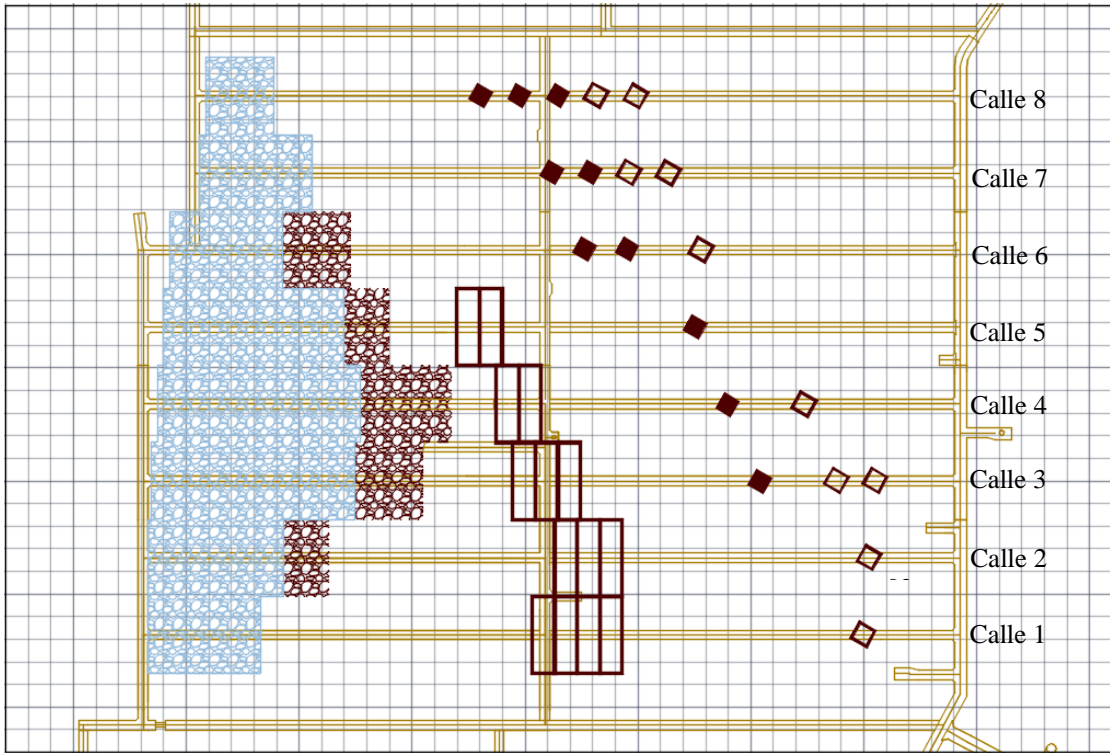


Figura 5-6 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento

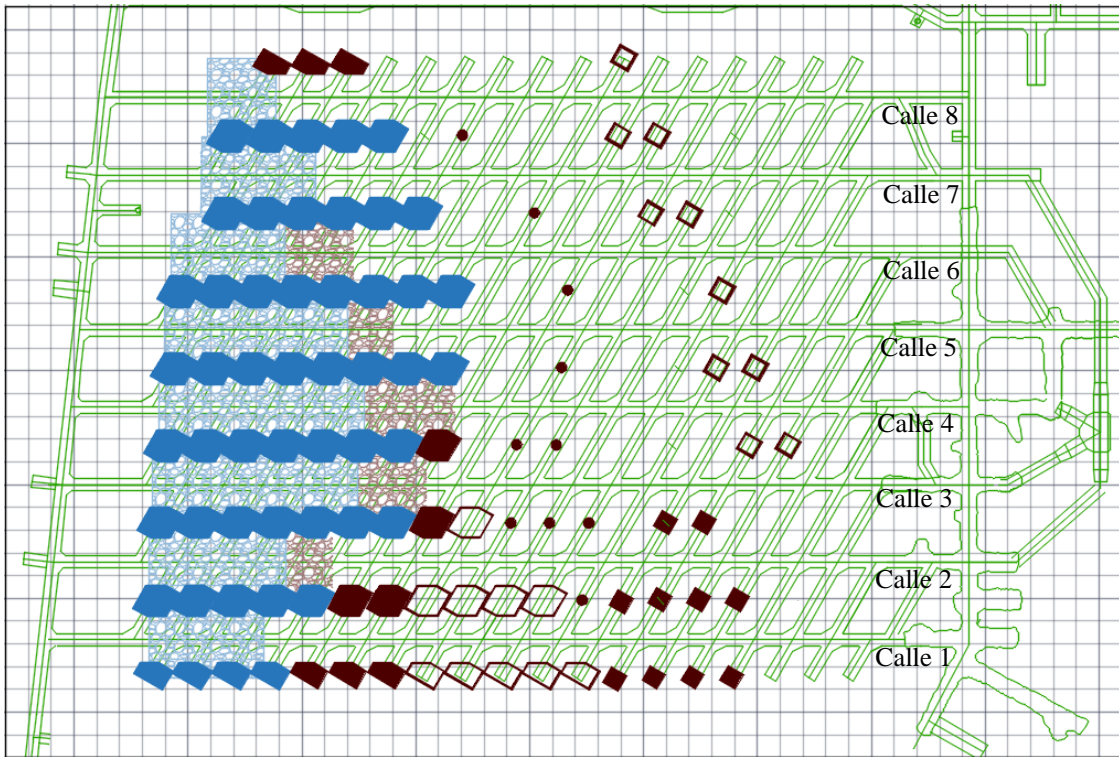











Figura 5-7 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción

Tabla 5-1 Simbología de esquema de secuencia de incorporación de área, bateas y DDE

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Actividad</b>	<b>Sub-actividad</b>	<b>Nivel</b>
	Área socavada en periodos anteriores	Extracción de producción	Extracción con LHD	NP
	Tiros socavación perforados mes actual	Socavación	Perforación radial	NH
	Área socavada el mes actual	Socavación	Tronadura de socavación	NH y NP
	Tiro DDE perforado el mes actual	Preacondicionamiento	Perforación tiros DDE e instalación anclaje	NH y NP
	Tiro DDE tronado en el mes actual	Preacondicionamiento	Tronadura confinada	NH y NP
	Bateas abiertas en periodos anteriores	Extracción de producción / Socavación	Extracción con LHD de producción y esponjamiento	NP
	Chimenea piloto construida el mes actual	Apertura de bateas	Desarrollo chimenea piloto	NP
	Tiros bateas perforados mes actual	Apertura de bateas	Perforación tiros bateas	NP
	Bateas que se abren el mes actual	Apertura de bateas	Tronadura bateas	NP

### 5.2.1.3 Accesos Principales

Se muestran los accesos principales para el subnivel de producción en la Figura 5-8 y para el subnivel de hundimiento en la Figura 5-9. Para el subnivel de producción, hay un acceso norte, uno central y uno al sur. Para el subnivel de hundimiento, hay un acceso al sureste y al noreste del layout. Para efectos del modelo se consideran estos puntos, además de ser accesos como estacionamientos de equipos inactivos.

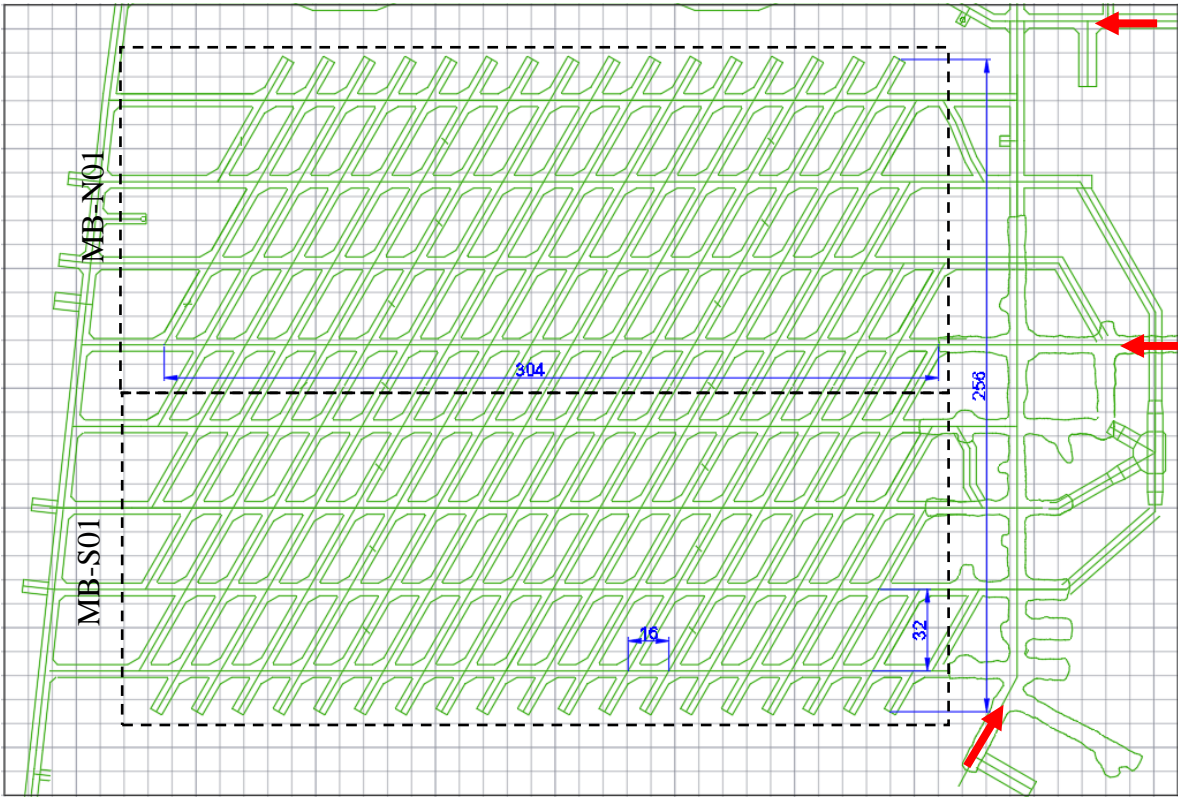


Figura 5-8 Accesos al subnivel de producción

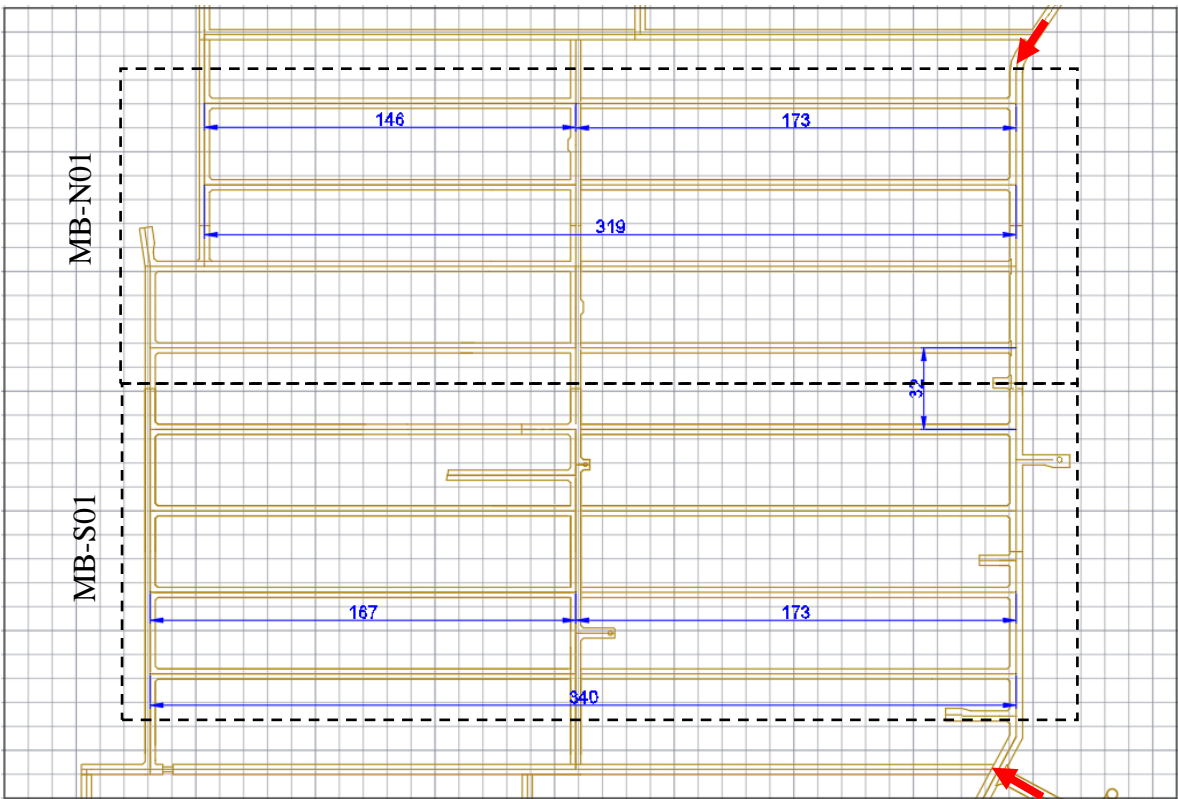


Figura 5-9 Accesos al subnivel de hundimiento

#### 5.2.1.4 Vaciaderos al chancador

En el lado Este del subnivel de producción, las 8 calles del subnivel de producción confluyen hasta formar 4 calles que se conectan con la tolva para descargar mineral en el chancador (destacada con un círculo rojo en Figura 5-10). En la Tabla 5-2 se muestran las distancias promedio desde el punto medio de los puntos de extracción (puntos rojos en Figura 5-10) por donde se extrae el mineral en el nivel de producción al chancador. Se ha utilizado el punto medio de los puntos de extracción como una simplificación del problema.

Tabla 5-2 Distancia desde punto de extracción al chancador

Calle	Distancia [m]
1	473
2	457
3	408
4	398
5	375
6	379
7	422
8	450

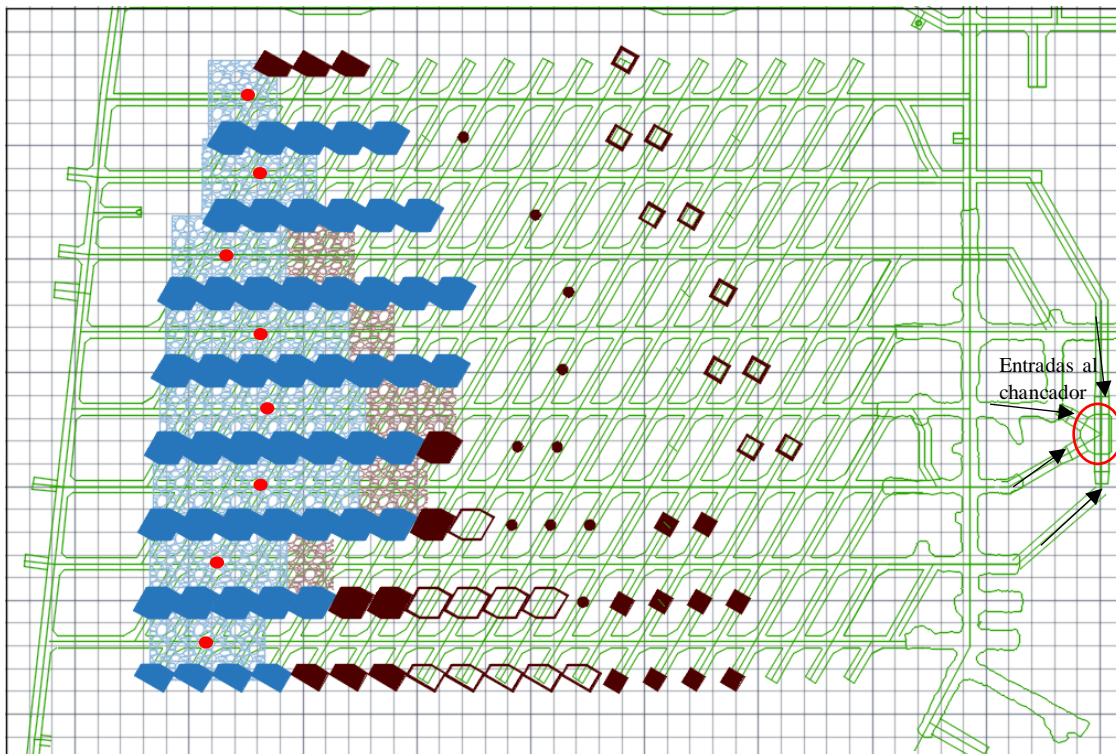


Figura 5-10 Entradas al chancador

### 5.2.2 Actividades del programa de socavación y preacondicionamiento

Los procesos que resultan en la incorporación de área a producción, son agrupados en 4 actividades principales, cada una de características cíclicas y que se ejecutan con diferentes condiciones de simultaneidad entre ellas, compartiendo accesos y áreas de tránsito. No comparten las áreas de trabajo, por lo tanto, generan interferencias entre sí, que limitan el grado de simultaneidad. Las actividades principales son las siguientes:

- I. Socavación: Extender área que se encuentra en proceso de hundimiento
- II. Apertura de bateas: Recibir material tronado y mineral de producción
- III. Preacondicionamiento: Debilitar el macizo rocoso para facilitar el manejo del mineral
- IV. Extracción de mineral de producción: Primer paso manejo de minerales

La lista de sub-actividades de cada una de estas actividades es relevante junto con su rendimiento y duración debido a la repetición de ellas en cada ciclo. Una vez realizada la lista de actividades principales por ciclo, se le asociará uno o varios equipos.

#### I. Socavación (Figura 5-11)

1. **Perforación radial:** Se perforan tiros alrededor de la galería de hundimiento, en un diagrama tipo abanico, incluyendo tiros negativos. Esto se hace en el sector de perforación de paradas, adelantado al frente de socavación, al menos 2 meses, según el programa de obras del PMCHS. Se muestra un ejemplo del diseño de los tiros de socavación de 10 m en anexos (10.2 Diseños, Figura 10-2).
2. **Tronadura de socavación:** Adyacente al frente de socavación, hay una zona que se debe tronar para avanzar el frente de socavación. Para esto se deben realizar las siguientes actividades:
  - a. **Descargue y reposición de malla y preparación de tapado en área de carguío:** Consiste en descargar la malla de las rocas que se desprendieron de las paredes del túnel con la tronadura de socavación anterior y reponer con nueva malla. Junto a esto se debe preparar un tapado de seguridad que funcione como barrera dura para separar el área recién tronada del área de trabajo.
  - b. **Medición y soplado de tiros:** Luego de preparada el área para trabajar se deben soplar y medir los tiros, para verificar el desvío o corte de tiros que fueron afectados por las anteriores tronaduras de socavación. Se agrupan estas 2 actividades como una sola por simplificación.
  - c. **Repaso de tiros:** En caso de ser necesario se debe hacer un repaso de los tiros desviados o cortados y en ese momento se está listo para comenzar con el carguío de explosivo. Esta actividad consiste en la re-perforación de los tiros que se identificaron como cortados o afectados en la subactividad anterior.
  - d. **Carguío de explosivo:** Se realiza el carguío con explosivos de los tiros de socavación. Se agrupan a esta etapa todas las actividades asociadas al primado, es decir, la instalación de detonadores y sistemas de iniciación.
  - e. **Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación:** Se retiran los equipos a un lugar seguro, se evacúa al personal y se procede a efectuar la tronadura. Con los equipos aún detenidos se procede a ventilar la zona tronada por una



cierta cantidad de tiempo antes de reanudar las actividades. El tiempo de ventilación depende del tipo y cantidad de explosivo utilizado.

- f. **Carguío de material:** El material tronado en el subnivel de hundimiento se divide en dos porciones, una que queda en las calles de hundimiento y que luego debe ser retirada y otra que cae por las bateas a los puntos de extracción del subnivel de producción, previamente abiertas. Para el caso del subnivel de hundimiento, un LHD de 9 yd<sup>3</sup> realiza una limpieza y carguío de este material esparcido y lo descarga en chimeneas de marina que conectan al subnivel de producción. Para el caso del subnivel de producción el equipo LHD se posiciona en el punto de extracción, carga el mineral y lo transporta a la tolva del chancador donde lo descarga.

## II. **Apertura de bateas (Figura 5-12)**

1. **Desarrollo chimenea piloto bateas:** Desde el subnivel de producción se desarrolla la chimenea piloto, con método mecanizado tipo blind hole, que servirá como cara libre para la posterior tronadura. El diámetro y largo de una chimenea piloto es de 1,5 m y 10 m, respectivamente, (ver cubicación de marina en Tabla 10-1 y diseño en Figura 10-1, ambos en anexos). Se considera el uso de un equipo LHD para remover el detritus. El desarrollo de las chimeneas piloto para las bateas se realiza por lo menos 2 meses antes de la tronadura de estas.
2. **Perforación tiros bateas:** Desde la galería zanja en el subnivel de producción, se perforan los tiros del diseño para la tronadura de las bateas o medias bateas (ver en anexos Figura 10-1). Esto se hace por lo menos 1 mes adelantado a la tronadura de bateas.
3. **Tronadura de batea en una fase:** Con el objetivo de tronar la batea en una sola fase, se deben realizar las siguientes actividades previas:
  - a. **Medición y soplado de tiros:** Se miden y soplan los tiros, antes del carguío de explosivo de los pozos para verificar desviaciones y cortes.
  - b. **Repaso de tiros:** Se repasan o re perforan los tiros desviados o cortados.
  - c. **Carguío explosivo batea:** Se cargan con explosivos los tiros para la tronadura de la batea. Se agrupa a este paso todas las etapas del primado.
  - d. **Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación:** Se retiran los equipos de los lugares de trabajo a un lugar seguro y se procede a efectuar la o las tronaduras. Con los equipos aún detenidos se procede a ventilar la zona tronada por una cierta cantidad de tiempo, que depende del explosivo utilizado, antes de reanudar las actividades.
  - e. **Carguío de material:** En caso de la tronadura de bateas, el material tronado también cae al subnivel de producción y los LHD lo llevan a la tolva del chancador siguiendo el mismo procedimiento del carguío de material de socavación.

- III. **Preacondicionamiento (Figura 5-13):** El fracturamiento hidráulico (FH) se ejecuta de manera descendente, desde un subnivel independiente ubicado 180 m sobre la cota del UCL, por lo que no se considera en el modelo. En el caso del DDE, se consideran las siguientes actividades para el proceso:
1. **Perforación tiros DDE e instalación de anclaje:** Se realizan perforaciones ascendentes de pozos verticales de 5 ¾ pulgadas de diámetro, desde el subnivel de hundimiento y desde el subnivel de producción. La operación de instalación de anclaje consiste en subir a través del pozo, con el equipo de perforación, un anclaje metálico tipo cono que transporta una piola de acero hasta la altura máxima perforada. Este anclaje permite luego el izaje de los elementos de tronadura del pozo.
  2. **Tronadura confinada:**
    - a. **Operación de instalación de guirnalda y tacos:** La instalación de guirnalda y tacos consiste en ir adosando al cable tractor una manguera plástica para la aireación, y los cebos para la iniciación de la emulsión. Estos cebos se colocan equiespaciados a una distancia definida por diseño y consiste en un APD junto a un detonador electrónico, cada uno con su línea de detonación independiente. Finalmente se construye el taco de retención que permite el paso de la manguera y cables de detonación hacia el exterior del pozo y el carguío de la emulsión hacia el interior.
    - b. **Carguío explosivo pozos DDE:** Se completa la operación inyectando la emulsión a través de los cables instalados hacia el interior del pozo con un camión de explosivos.
    - c. **Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación:** Se retiran los equipos de los lugares de trabajo a un lugar seguro y se procede a efectuar la tronadura. En este caso la ventilación es más bien una medida preventiva, pues no se generan gases fugitivos hacia los subniveles de hundimiento y producción.

IV. **Extracción de mineral de producción:**

Se debe cumplir un plan de producción mensual, por lo que se distribuye la extracción del mineral desde distintas bateas a lo largo del mes y con una cartilla de tiraje definida. Se extrae el mineral desde los puntos de extracción y se transporta y descarga a la tolva del chancador por medio de equipos LHD de 15 yd<sup>3</sup>. Se permite efectuar la tronadura de los tiros de socavación al mismo tiempo que la tronadura de los pozos de DDE y/o al mismo tiempo que la tronadura de las bateas en el caso de que sea posible.

A continuación, se muestran 3 esquemas que representan el orden de ejecución de las actividades y subactividades (Figura 5-11, Figura 5-12 y Figura 5-13) en el contexto de una calle del nivel de producción o una semi calle del nivel de hundimiento. Los números entre paréntesis indican el orden de las actividades o subactividades.

La línea punteada indica que la actividad o actividades son parte del mismo ciclo, pero no se realizan en el mismo sector para el periodo de estudio. Por ejemplo, “perforación radial” se realiza primero en un sector, dejando una cierta cantidad de paradas perforadas y 2 meses después se realizan las actividades de “tronadura de socavación” de esas paradas. Pero como el modelo representa solo un mes de ejecución de actividades, se va a ver un

sector en que se están realizando las actividades de “tronadura de socavación” de los tiros radiales perforados hace 2 meses y otro sector en que se está realizando “perforación radial” de nuevos tiros radiales que se van a cargar y tronar en 2 meses más.

Todas estas sub-actividades se pueden clasificar por las que se realizan en el subnivel de hundimiento y en las que se hacen en el subnivel de producción como se ve en la Tabla 5-3.

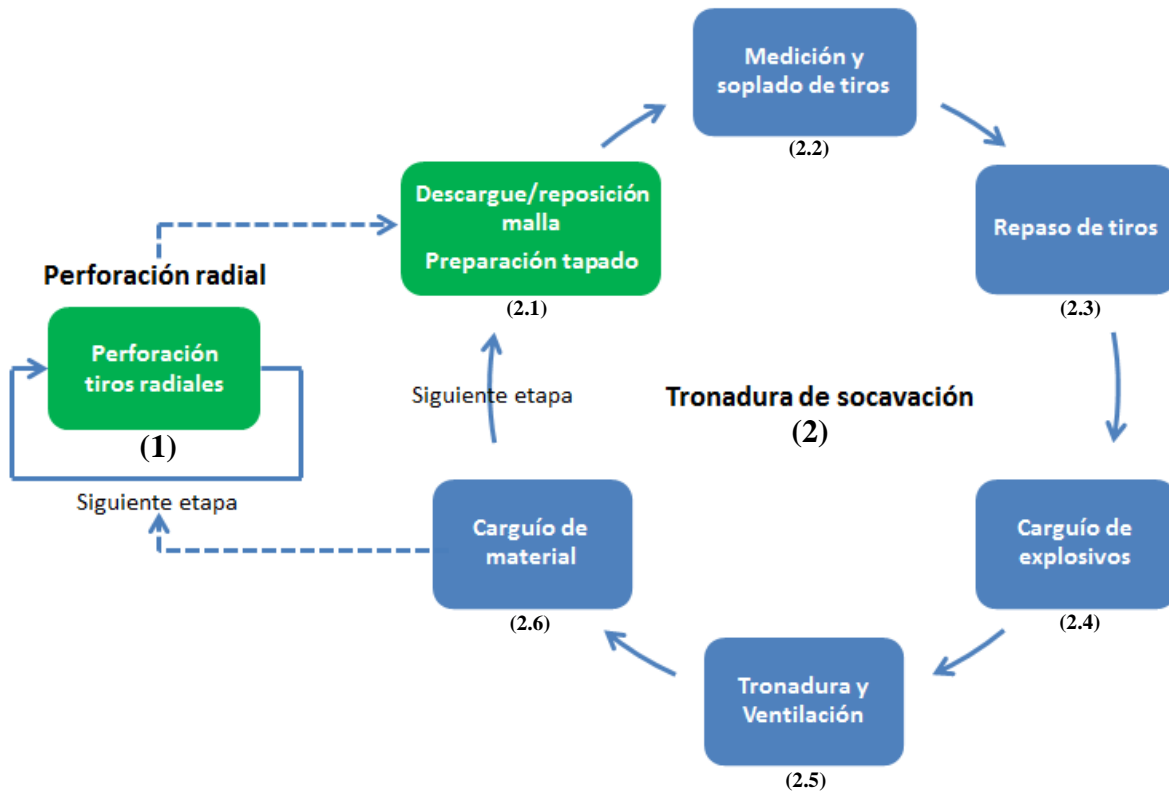


Figura 5-11 Procesamiento de actividades de socavación

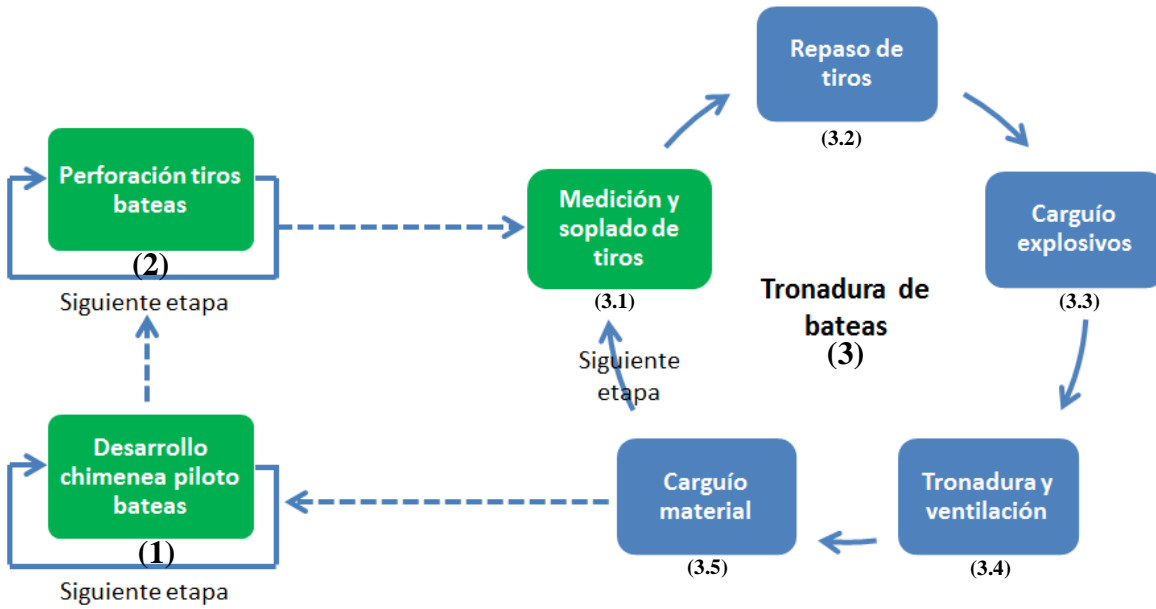


Figura 5-12 Procesamiento de actividades de apertura de bateas

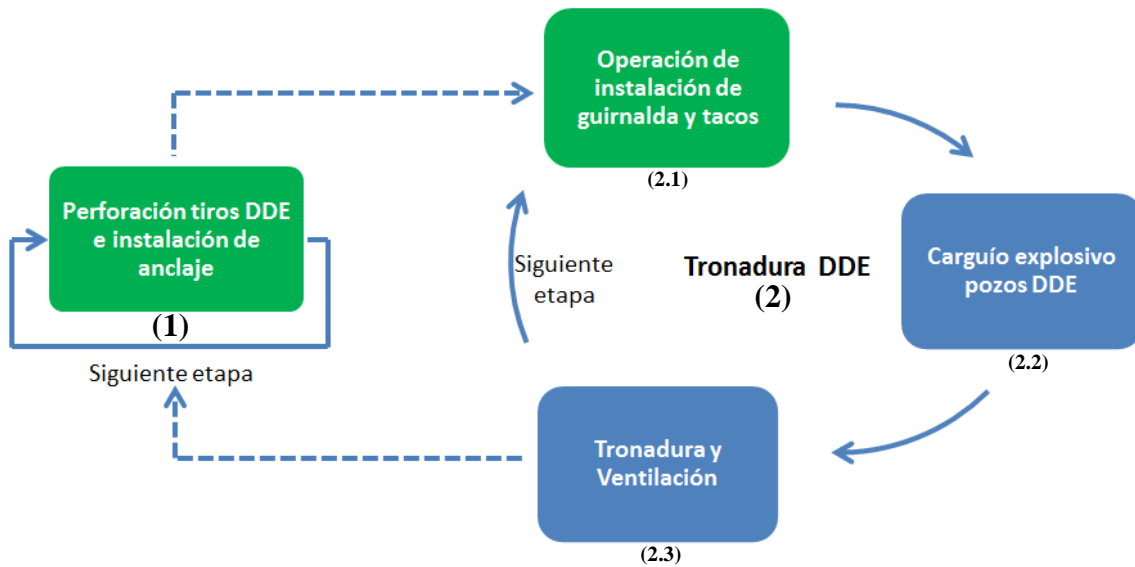


Figura 5-13 Procesamiento de actividades de preconditionamiento con DDE

Tabla 5-3 Resumen actividades

<b>Actividad principal</b>	<b>Subactividad</b>	<b>Subnivel</b>
<b>Socavación</b>	Perforación radial	Hundimiento
	Descargue y reposición de malla, y preparación de tapado	Hundimiento
	Medición y soplado de tiros	Hundimiento
	Repaso de tiros	Hundimiento
	Carguío explosivo	Hundimiento
	Tronadura	Hundimiento
	Carguío material	Hundimiento y Producción
<b>Apertura bateas</b>	Apertura chimenea piloto	Producción
	Perforación tiros bateas	Producción
	Medición y soplado de tiros	Producción
	Repaso de tiros	Producción
	Carguío explosivo	Producción
	Tronadura	Producción
	Carguío material	Producción
<b>Preacondicionamiento</b>	Perforación e instalación anclaje	Hundimiento y Producción
	Instalación de guirnalda y tacos	Hundimiento y Producción
	Carguío explosivo	Hundimiento y Producción
	Tronadura	Hundimiento y Producción
<b>Extracción de mineral de producción</b>	-	Producción

Para efectos del modelamiento, se asume que al principio de la simulación todas las calles comienzan con la etapa siguiente a una tronadura de socavación, es decir, todas las calles del NH comienzan con descargue y reposición de malla en el sector de carguío de explosivo y perforación de tiros en el sector de perforación de tiros. En el NP se comienza con medición y soplado de tiros de bateas y perforación de tiros para bateas o desarrollo de chimenea piloto. En cuanto a actividades de preacondicionamiento, en ambos subniveles se comienza con perforación e instalación de anclaje en el área de perforación de tiros del DDE e instalación de guirnalda y tacos en el sector de carguío de explosivos del DDE. Se define la primera extracción de mineral por medio de LHD dependiendo del tonelaje a extraer en el mes en cada una de las calles.

### 5.2.3 Equipos principales y sus características

Para cada actividad presentada en la sección anterior se tiene un equipo asociado, esto se presenta en la Tabla 5-4.









Tabla 5-4 Equipos según actividad

<b>Actividad</b>	<b>Subactividad</b>	<b>Equipo</b>
<b>Socavación</b>	Descargue y reposición malla y preparación tapado	Cuadrilla con manipulador telescópico
	Medición y soplado de tiros	Máquina aire comprimido
	Repaso de tiros	Jumbo Radial
	Carguío de explosivos	Camión explosivos
	Carguío de material	LHD
	Perforación radial	Jumbo Radial
<b>Apertura de bateas</b>	Apertura chimenea piloto	Blindhole
	Carguío material	LHD
	Perforación tiros bateas	Jumbo Radial
	Medición y soplado de tiros	Máquina aire comprimido
	Repaso de tiros	Jumbo Radial
	Carguío explosivo	Camión explosivos
	Carguío material tronado	LHD
<b>Preacondicionamiento</b>	Perforación e instalación de anclaje	ITH
	Instalación de guirnalda y tacos	Cuadrilla con manipulador telescópico
	Carguío explosivo DDE	Camión explosivos
<b>Extracción de mineral de producción</b>	-	LHD

### 5.2.4 Estrategia de socavación y apertura de bateas

Para la estrategia de socavación y apertura de bateas se parte de una base, que es la secuencia que se muestra a continuación en la Figura 5-14, para la cuál se explica su simbología en la Tabla 5-5. Cabe destacar que esta secuencia completa el MB en 16 meses, pero se realiza una redistribución de áreas abiertas por mes para completar el MB en 18 meses.

Tabla 5-5 Leyenda secuencia de incorporación de área y bateas general

Área de incorporación	Bateas	Meses	
Primera		abr-19	may-19
Segunda		jun-19	jul-19
Tercera		ago-19	sep-19
Cuarta		oct-19	nov-19
Quinta		dic-19	ene-20
Sexta		feb-20	mar-20
Séptima		abr-20	may-20
Octava		jun-20	jul-20

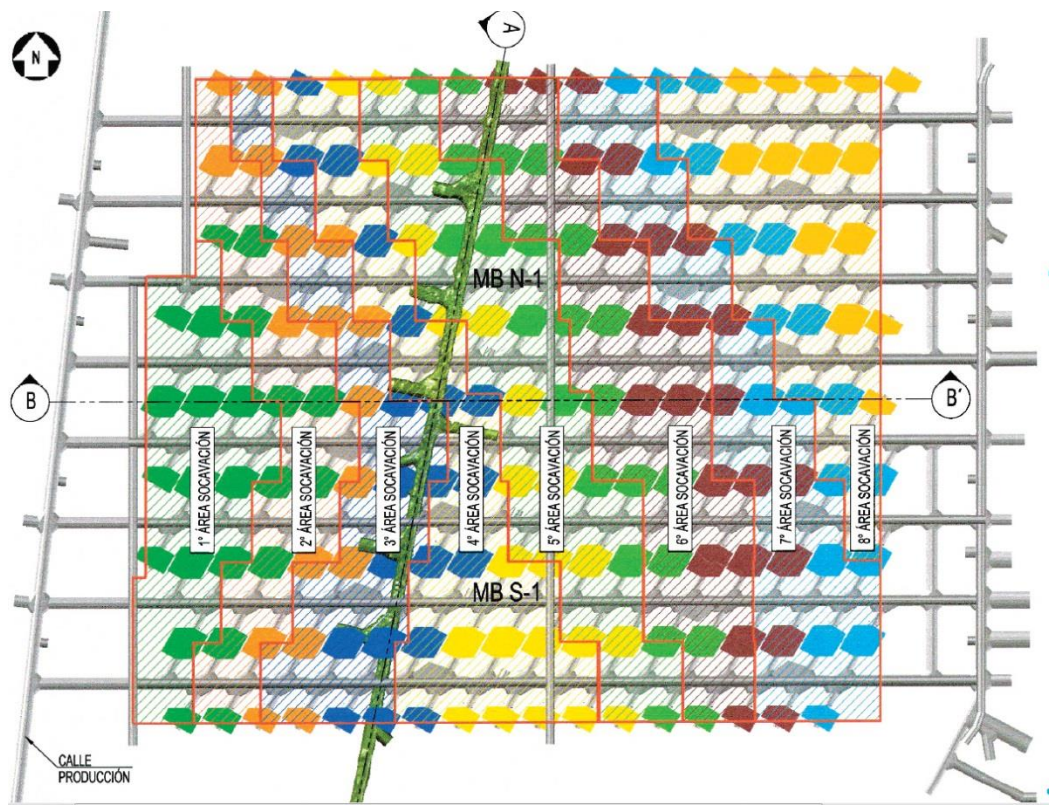


Figura 5-14 Secuencia de incorporación de área y bateas general

### 5.2.5 Estrategia de preconditionamiento

Con respecto al preconditionamiento con DDE, en la Figura 5-15 se muestra el diseño de la malla de tiros de DDE. Hay tiros que van desde el NH que están representados como círculos de color azul y tiros que salen desde el subnivel de producción, que están representados con círculos de color rojo.

Los tiros se hacen ascendentes, con un largo de 150 m y un diámetro de 5 ¾ “, mediante un equipo de perforación de tiros largos llamado “ITH” (in the hole). La configuración del carguío de explosivos de estos tiros considera dejar un pilar de protección de 20 m sobre el subnivel de hundimiento, dejando esta zona descargada. Se presenta un esquema en 3D de ejemplo que clarifica el diseño explicado en la Figura 5-16. Estos tiros se perforan y tronan adelantados de la apertura de bateas y la socavación.

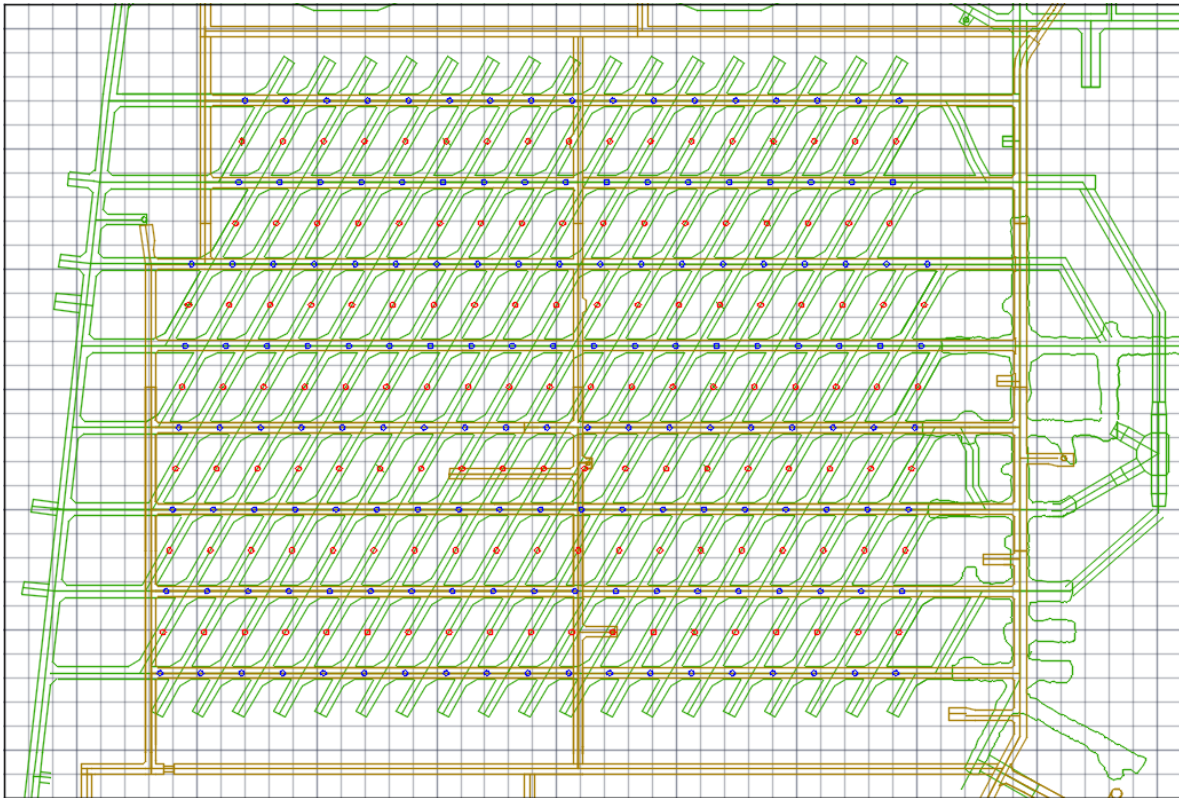


Figura 5-15 Esquema de diseño de PA por DDE



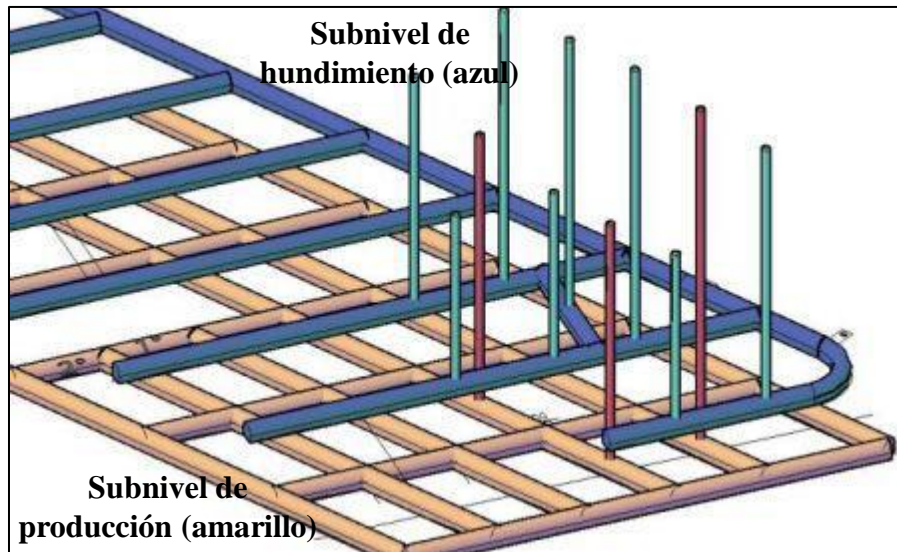


Figura 5-16 Ejemplo diseño de DDE (Marín, 2012)

### 5.2.6 Estrategia de incorporación de área en conjunto










A partir de la macro secuencia de incorporación de área socavada y bateas, y agregando la perforación y tronadura de tiros DDE, el proyecto ha desarrollado el programa de obras a escala mensual.

De este plan se ha seleccionado un mes representativo como caso base de la simulación. Como criterio de representatividad se consideró lo siguiente:

- Presencia de todas las actividades.
- Distribución espacialmente homogénea de las actividades (deseable).
- Similitud geométrica con respecto a la distribución de las actividades con todos los demás meses.

Finalmente, según estos criterios, el mes más representativo ha sido considerado el mes de Julio del 2019, equivalente al cuarto mes de socavación. Se presenta la secuencia en detalle para el subnivel de hundimiento y de producción en la Figura 5-17 y la Figura 5-18 respectivamente. Se muestra el programa de obras en la Tabla 5-7.

Tabla 5-6 Leyenda figuras secuencia de incorporación de área, bateas y DDE

Símbolo	Significado
	Área socavada en periodos anteriores
	Área perforada el mes actual
	Área socavada el mes actual
	Tiro DDE perforado el mes actual
	Tiro DDE tronado en el mes actual
	Bateas abiertas en periodos anteriores
	Chimenea piloto construida el mes actual
	Tiros bateas perforados mes actual
	Bateas que se abren el mes actual

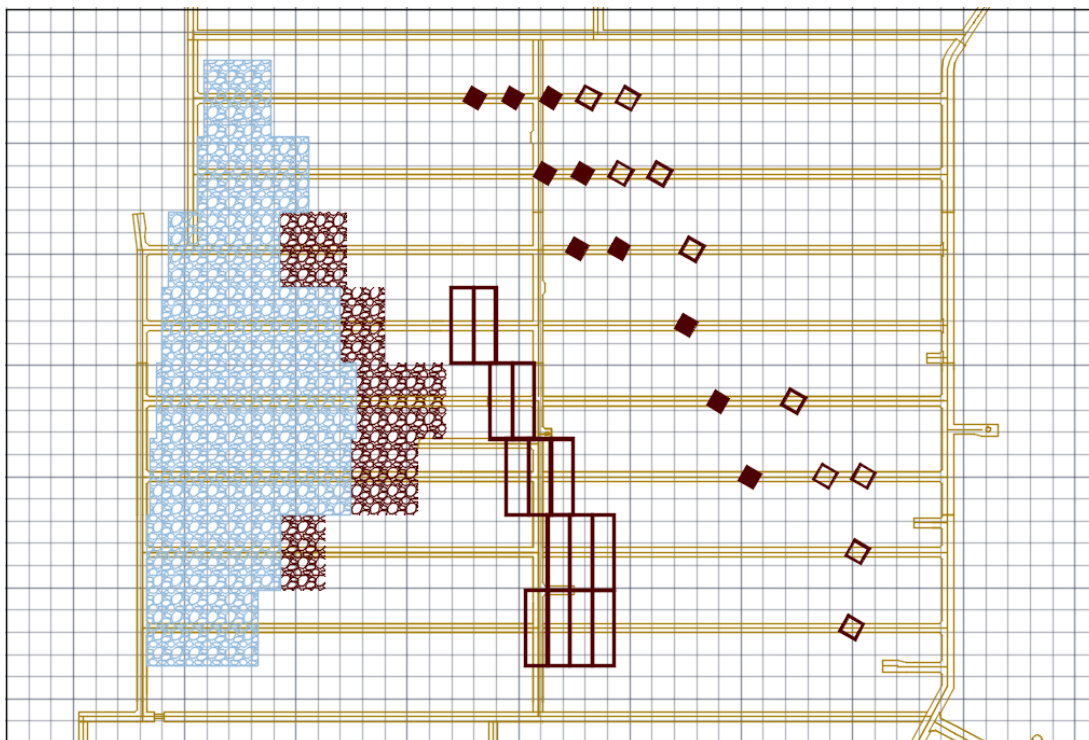


Figura 5-17 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento

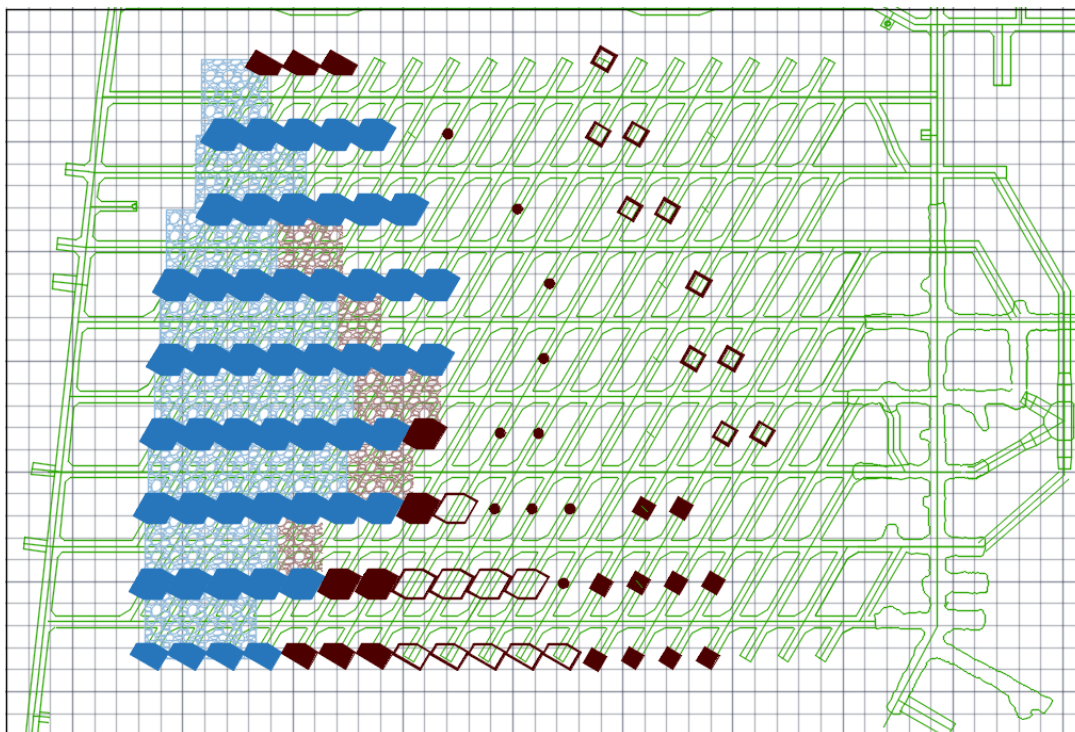


Figura 5-18 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción

Tabla 5-7 Programa de obras del mes

	Subnivel Hundimiento	Subnivel Producción
<b>Polvorazos</b>	14	-
<b>Paradas perforadas</b>	56	-
<b>Tronaduras DDE</b>	10	10
<b>Pozos DDE perforados</b>	10	10
<b>Bateas tronadas</b>	-	4
<b>Medias bateas tronadas</b>	-	6
<b>Bateas perforadas</b>	-	5
<b>Medias bateas perforadas</b>	-	5
<b>Chimeneas desarrolladas</b>	-	10

Cada polvorazo es la tronadura de 4 paradas de socavación

### 5.2.7 Estrategia de traslado de material tronado

Se considera sólo la utilización de LHD's para el carguío y traslado de material tronado descargando directamente en la tolva de vaciado. Para remover el esponjamiento de socavación y el volumen tronado de las bateas se prioriza el punto de extracción que esté esperando hace más tiempo.

En el caso de la extracción de mineral de producción, a partir de un plan de producción mensual por calle, se designan los ciclos de extracción, considerando la extracción continua

en períodos de 1 turno. Estas extracciones se distribuyen de una manera homogénea a lo largo del mes.

### 5.3 Parámetros de Entrada

Se realizó una recolección de datos históricos de faenas similares a la diseñada por el PMCHS y se muestran a continuación. Se consideran los rendimientos de equipos presentados en la Tabla 5-8 y parámetros de entrada de LHD's en la Tabla 5-9.

Se muestran las cubicaciones de los diseños de socavación y bateas en la Tabla 5-9 y la Tabla 5-10 respectivamente. El modelo está configurado para la configuración con emulsión como explosivo, el cual considera un burden de 2,35 m para las paradas de socavación. En el caso de ANFO, se tiene un burden y un espaciamiento distintos, por lo que se calcula una cantidad de metros barrenados equivalentes mediante un ajuste de estos factores. Se presentan los metros barrenados equivalentes para la tronadura de socavación en la Tabla 5-12 y para bateas en la Tabla 5-13.

Finalmente, se muestran las cubicaciones de las chimeneas para bateas y características generales del material tronado en la Tabla 5-14 y la Tabla 5-15.

Tabla 5-8 Rendimientos promedio actividades (CODELCO, 2017)

Actividad	Subactividad	Rendimiento promedio*	Unidad
<b>Socavación</b>	Descargue y reposición malla y preparación tapado	8	h/frente
	Medición y soplado de tiros	8	h/polvorazo
	Repaso tiros	300	mb/día/jumbo
	Carguío de explosivos	8	h/polvorazo
	Perforación radial	300	mb/día/jumbo
<b>Apertura de bateas</b>	Desarrollo chimenea piloto	6	días/chim/equipo
	Perforación tiros bateas	300	mb/día/jumbo
	Medición y soplado de tiros	12	h/batea
	Repaso tiros	300	mb/día/jumbo
	Carguío explosivo	12	h/batea
<b>Preacondicionamiento</b>	Perforación e instalación de anclaje	50	mb/día/equipo
	Instalación de guirnalda y tacos**	12	h/pozo
	Carguío explosivo DDE	2	h/pozo

\*: Para socavación de 10 m

\*\* : Ver desglose de este tiempo en anexos (Tabla 10-4)

Tabla 5-9 Rendimientos promedio LHD (Hatch, 2017)

Parámetros	Rendimiento promedio	Unidad
Tiempo carga y maniobras	30	segundos
Tiempo de descarga	12	segundos
Velocidad en NH	8	km/h
Velocidad en NP	13	km/h

Tabla 5-10 Parámetros tiros socavación emulsión (Codelco Chile V. C., 2017)

	Socavación 20 m	Socavación 10 m	Unidad
Cantidad paradas por polvorazo	4	4	un
Cantidad de tiros por parada	28	28	un
Metros barrenados por parada	463	340	mb
Burden	2,35	2,35	m
Volumen tronado	6.016	3.008	m <sup>3</sup>
Tonelaje tronado	15,94	7,97	kton
Tonelaje esponjamiento	4,87	2,39	kton

Densidad y factor de esponjamiento en Tabla 5-15

Tabla 5-11 Parámetros bateas emulsión (Codelco Chile V. C., 2017)

	Batea completa	Media batea	Unidad
Cantidad de perforaciones	48	36	un
Metros barrenados por batea	467	359	m
Volumen	772	649	m <sup>3</sup>
Tonelaje	2.080	1.750	ton

Tabla 5-12 Normalización de diseño de tronadura de socavación para ANFO

	Socavación	Unidad
Diseño 10m	446	mb
Diseño 20m	608	mb

Tabla 5-13 Normalización de diseño de tronadura de bateas para ANFO

	Bateas	Unidad
Completa	613	mb
Media	471	mb

Tabla 5-14 Parámetros chimeneas (Codelco Chile V. C., 2017)

	Valor	Unidad
<b>Diámetro perforación</b>	1,5	m
<b>Altura</b>	10,0	m
<b>Volumen</b>	63,6	m <sup>3</sup>
<b>Tonelaje</b>	171,8	ton

Tabla 5-15 Características del material tronado

	Valor	Unidad
<b>Densidad de la roca</b>	2,65	t/m <sup>3</sup>
<b>Esponjamiento</b>	30	%

## 5.4 Variables de Salida

Se establece la siguiente variable de salida como relevante para medir el desempeño del sistema:

- Cantidad de días en cumplir todas las actividades del plan.

Esta variable de salida está en unidad de días, a partir de la cual se determinará la cantidad de m<sup>2</sup> abiertos al mes.

## 5.5 Criterios de decisión y de movimiento

**Movimiento por etapas:** Actividades se realizan en dirección Oeste-Este. Por ejemplo, si el plan contempla la perforación de 2 sets de 4 paradas como se aprecia en la Figura 5-19, que podrían clasificarse como set Oeste y set Este, no se puede empezar con la perforación del Este sin haber terminado la del Oeste, debe seguir una lógica por etapas de Oeste a Este.

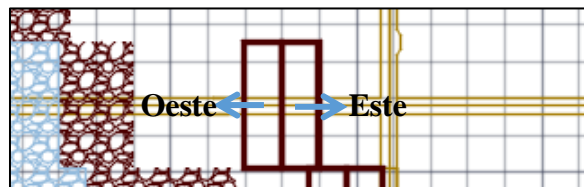


Figura 5-19 Ejemplo movimiento por etapas.

**Secuencia de actividades:** Hay ciertas actividades que se deben realizar siguiendo una secuencia lógica para llegar a un resultado final. Por ejemplo, la tronadura de bateas requiere de las actividades de medición y soplado de tiros, repaso de tiros, carguío de explosivo, tronadura, ventilación y carguío de material tronado, por lo tanto, no se puede realizar el carguío de explosivo sin antes realizar el repaso de tiros. Esto es explicado con mayor detalle en el desarrollo de la etapa 4.

**Capacidad de actividades por calle:** Se ha determinado que se puede tener máximo 1 actividad por calle, por disponibilidad de espacios y accesos. En el caso del subnivel de hundimiento como el diseño considera una cabecera central es posible ejecutar una actividad al Oeste y otra al Este de la cabecera central (ver Figura 5-20), es decir, una actividad máximo por “semi calle”. Entiéndase “semi calle” como la mitad de una calle del subnivel de hundimiento, ya sea la mitad Oeste o la mitad Este.

**Uso de equipos:** Cada actividad requiere de un equipo, para esto el equipo debe estar libre esperando en el estacionamiento. Al terminar cada actividad, el equipo correspondiente vuelve a ser liberado y enviado al estacionamiento.

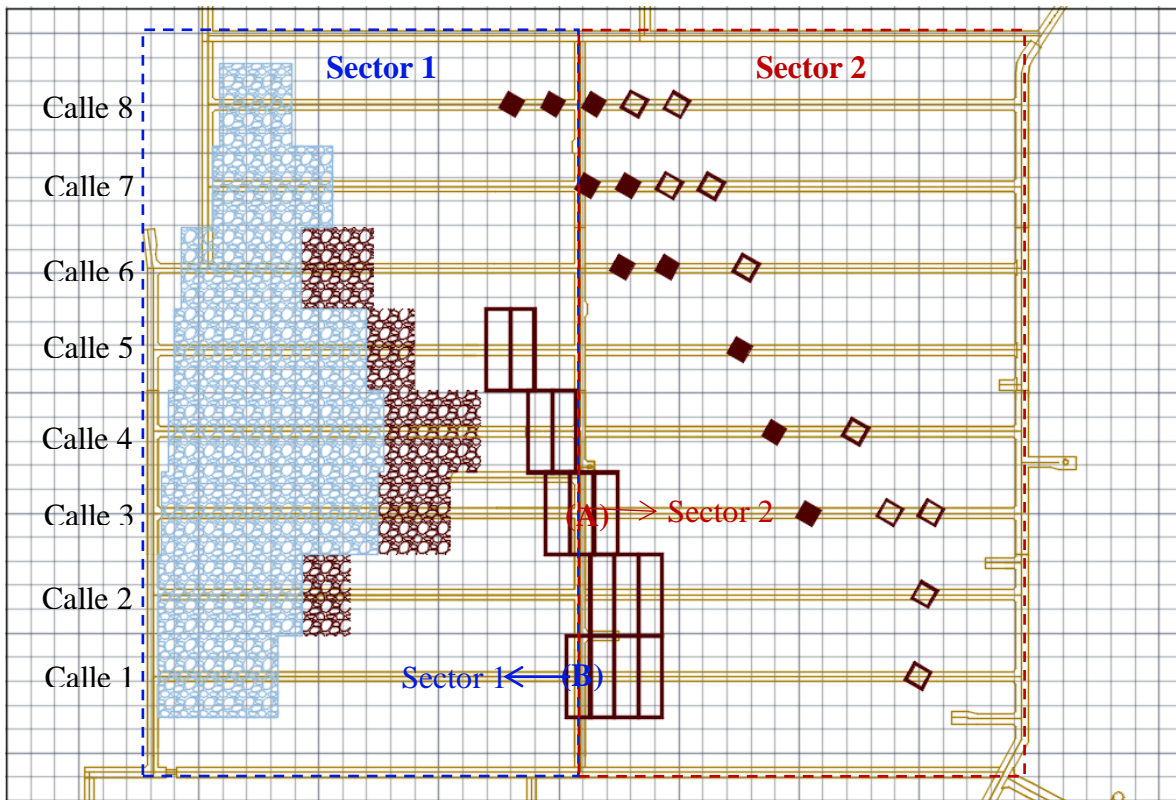


Figura 5-20 Sectores de subnivel de hundimiento (NH)

## 5.6 Modelos Paralelos

1. **Sistema de turnos:** Se consideran turnos de 12 horas de 7 am a 7 pm, con colaciones de 1 hora a las 12 am y 12 pm. Se considera que el personal debe comenzar a salir de la mina alrededor de 30 minutos antes del cambio de turno, el cambio de turno en si dura aproximadamente 1 hora y el tiempo que se demora el personal a volver a las frentes con los equipos es de 15 minutos (1 hora 45 minutos en total). Se puede ver un respaldo de estos valores en anexos (10.4 Tiempos Operativos y Pérdidas Operacionales).
2. **Horario para tronaduras:** Se considera que la tronadura y la ventilación se realiza en la ventana de 1 hora de cualquiera de los 2 cambios de turno del día. El DDE no genera gases al sector, pero también se considera hacerlo en un cambio de turno por seguridad.
3. **Restricciones y otras consideraciones**
  - a) **Traslados de personal:** Se considera un tiempo fijo en las entradas y salidas de turnos.
  - b) **Aislaciones:** A partir de la fecha de interés, la fase 42 del rajo, que genera interferencias con el nivel 1, ya habrá sido completamente explotada, por lo que no es necesario incluir aislaciones en el modelo.

# Capítulo 6: Modelo Computacional

---

A continuación, se desarrolla la metodología de ProModel<sup>®</sup> presentada en Capítulo 4:

## 6.1 Entidades

Se definen las entidades como las actividades a realizar en el programa de socavación. Se destacan con un asterisco las actividades iniciadoras, que son las actividades que inician los ciclos y tienen llegadas agendadas al sistema, las demás son llamadas seguidoras que son invocadas al sistema por actividades precursoras. Se explican las entidades iniciadoras y las entidades seguidoras con más detalle en la sección 6.6.

Para socavación:

- Entidad 1: Perforación de tiros radiales de socavación\*
- Entidad 2: Descargue y reposición malla, preparación tapado\*
- Entidad 3: Medición y soplado tiros radiales
- Entidad 4: Repaso de tiros radiales
- Entidad 5: Carguío de explosivo en pozos radiales de socavación
- Entidad 6: Tronadura socavación
- Entidad 7: Carguío de esponjamiento de material tronado desde NH
- Entidad 8: Carguío de esponjamiento de material tronado desde NP

Para apertura de bateas:

- Entidad 9: Perforación chimenea piloto\*
- Entidad 10: Perforación tiros radiales batea\*
- Entidad 11: Medición y soplado de tiros batea\*
- Entidad 12: Repaso de tiros batea
- Entidad 13: Carguío de explosivo en pozos batea
- Entidad 14: Tronadura batea
- Entidad 15: Carguío material tronado

Para preacondicionamiento:

- Entidad 16: Perforación y anclaje tiro DDE NH\*
- Entidad 17: Operación de instalación de guirnalda y tacos NH\*
- Entidad 18: Carguío explosivo tiro DDE NH
- Entidad 19: Tronadura DDE NH
- Entidad 20: Perforación y anclaje tiro DDE NP\*
- Entidad 21: Operación de instalación de guirnalda y tacos NP\*
- Entidad 22: Carguío explosivo tiro DDE NP
- Entidad 23: Tronadura DDE NP

Para Producción:

- Entidad 24: Carguío de material de producción \*



## 6.2 Locaciones

A continuación, se definen las locaciones ilustradas en la Figura 6-1. No se nombra cada una de las locaciones, sino el nombre del grupo de locaciones y se indica la figura por la cual es representada en el modelo. Las locaciones con capacidad finita igual a 1 se muestran en la Tabla 6-1 y las con capacidad infinita se muestran en la Tabla 6-2.

Tabla 6-1 Simbología locaciones con capacidad 1 modelo de simulación


















Nombre	Símbolo ProModel®	Símbolo CAD
Puntos donde se realiza perforación de tiros: 1 locación cada 4 paradas		
Puntos donde se realiza carguío de explosivo de tiros: 1 locación cada 4 paradas		
Puntos en que se perforan los tiros de DDE desde el subnivel hundimiento.		
Puntos en que se tronan los tiros de DDE desde el subnivel hundimiento.		
Puntos de extracción de roca tronada: Se modelan como locación en el centro de la batea.		
Bateas por tronar: Locación en el centro de la batea.		
Bateas por perforar: Locación en el centro de la batea.		
Punto donde se perfora chimenea piloto.		
Punto donde se perforan los tiros de DDE desde el subnivel de producción.		
Punto donde se tronan los tiros de DDE desde el subnivel de producción.		
Puntos en que se tronan los tiros de DDE desde el subnivel hundimiento.		
Puntos de extracción de roca tronada: Se modelan como locación en el centro de la batea.		
Puntos de extracción de mineral de producción: Se modelan como punto al centro de las bateas habilitadas para extraer mineral de producción		
Intersecciones entre calles de producción y galería Este		-

Tabla 6-2 Simbología locaciones con capacidad infinita modelo de simulación

Nombre	Símbolo ProModel®	Símbolo CAD
Estacionamiento/acceso NH	No visible	-
Estacionamiento/acceso NP	No visible	-

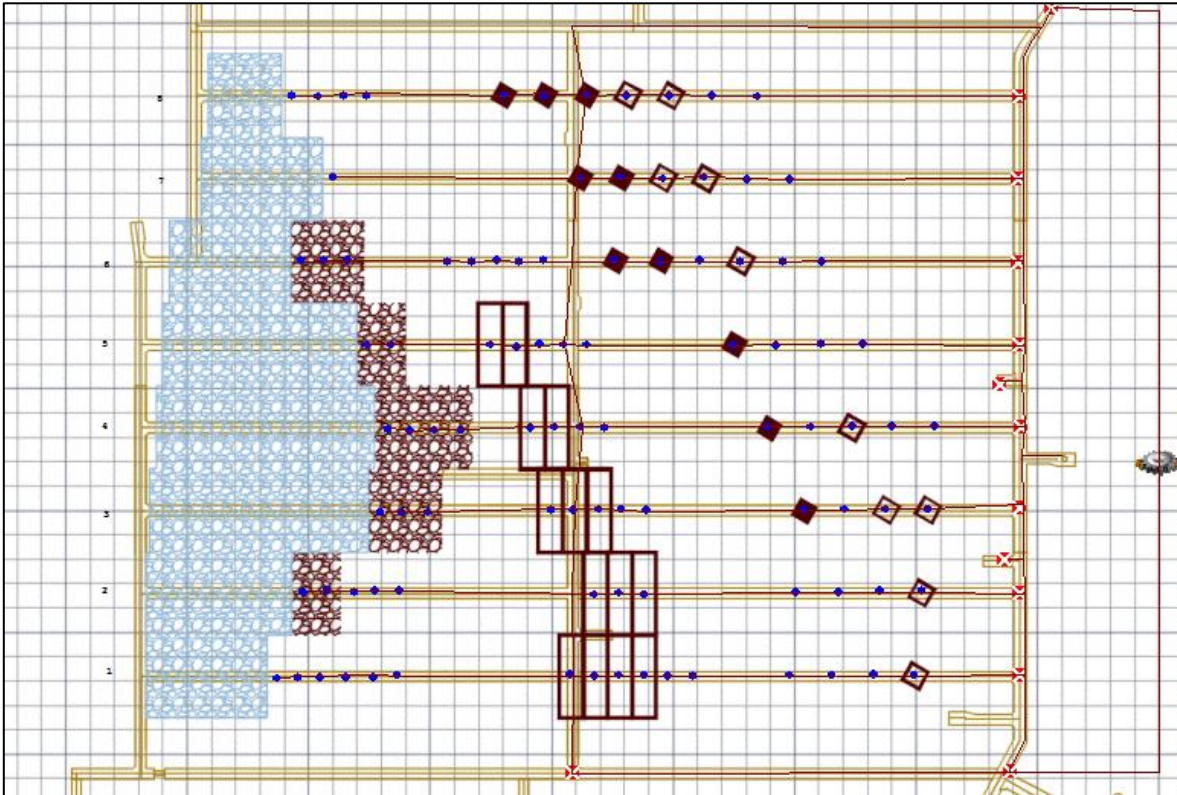


Figura 6-1 Locaciones subnivel de hundimiento

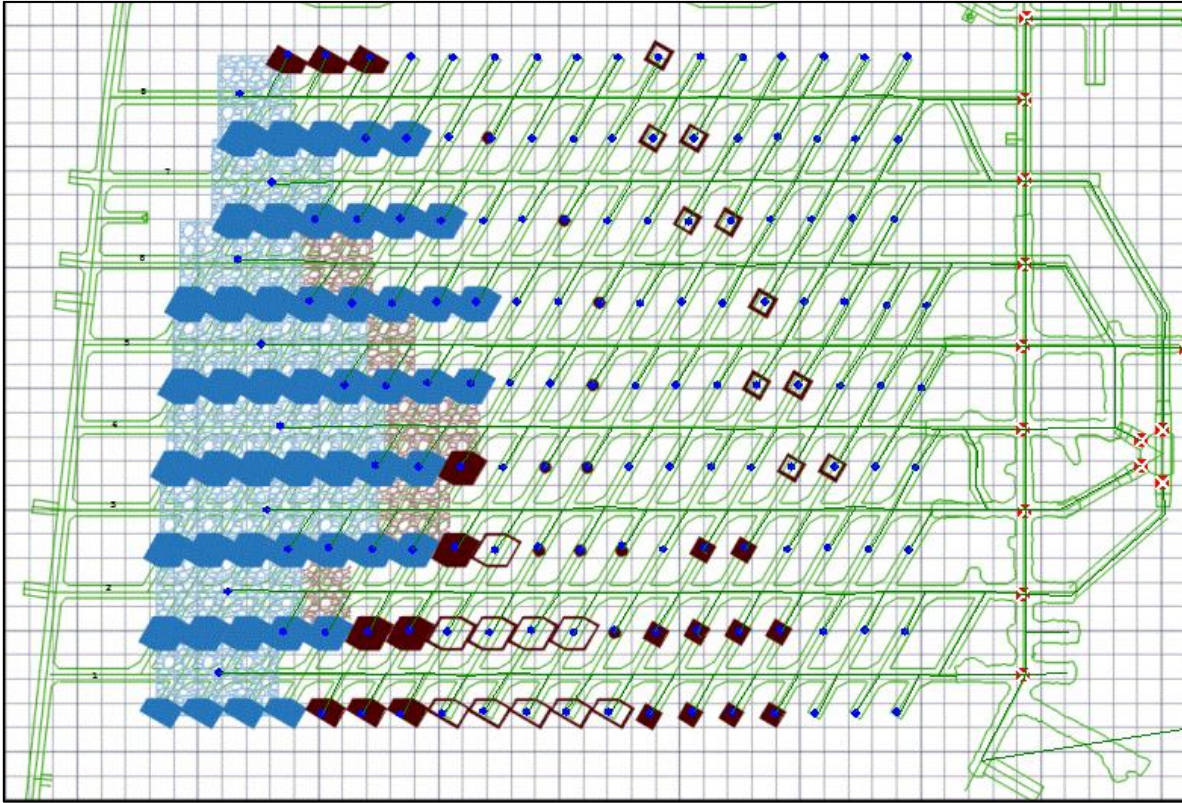


Figura 6-2 Locaciones subnivel de producción

### 6.3 Rutas

La definición de las rutas es equivalente a construir el layout que se va a modelar considerando la ubicación y las distancias de los elementos más relevantes. El layout a desarrollar se debe construir manualmente nodo por nodo, dejando todas las locaciones a usar dentro de este.

Se construye una red de rutas para el subnivel de hundimiento (Figura 6-3) y otra para el subnivel de producción (Figura 6-4).

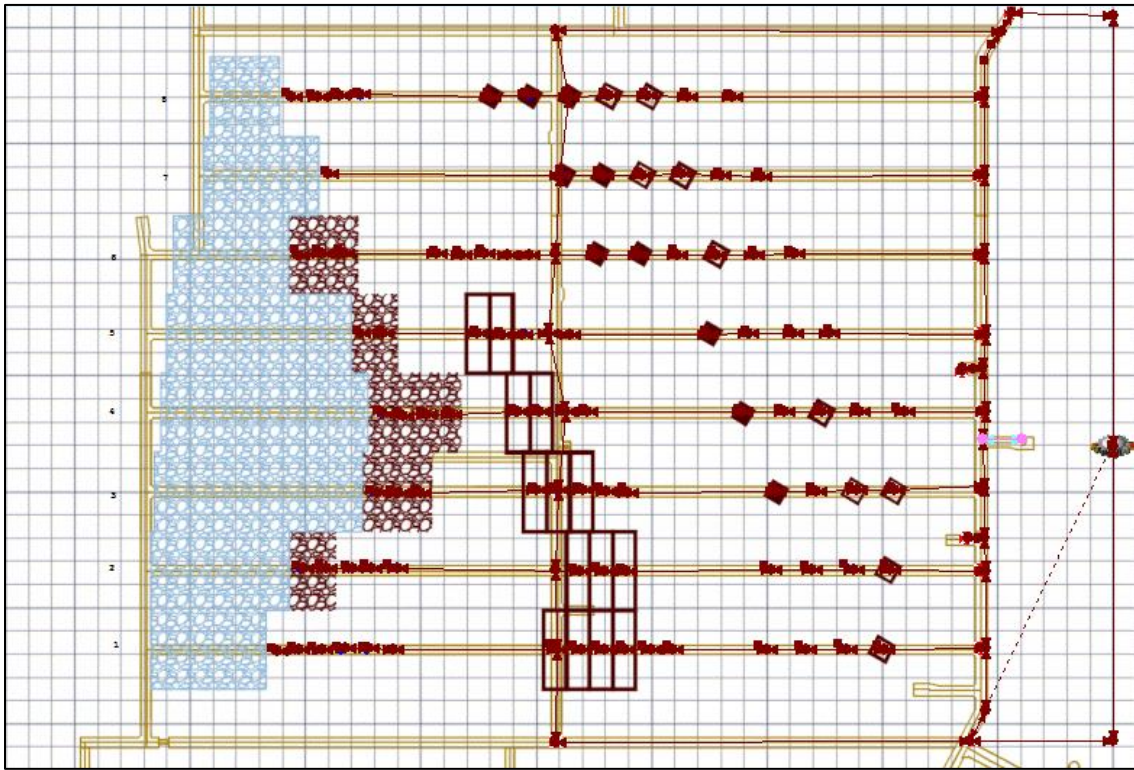


Figura 6-3 Rutas subnivel de hundimiento

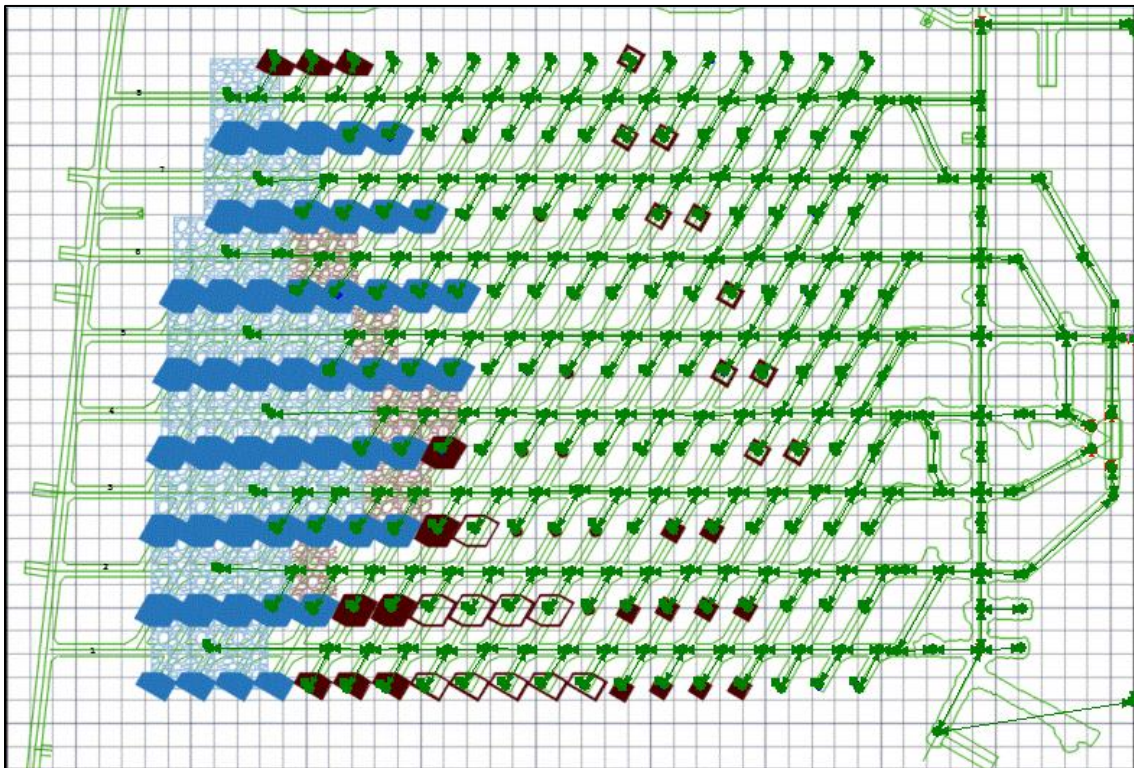


Figura 6-4 Rutas subnivel de producción

## 6.4 Recursos

Se presentan los recursos definidos para la realización de los procesos simulados en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Recursos definidos para modelo computacional

Recurso	Detalle	Cantidad
<b>LHD</b>	Para NH: Capacidad de 10 ton efectivas.	1
	Para NP: Capacidad de 18 ton efectivas.	4
<b>Jumbo radial</b>	Para NH: Perforación de tiros de socavación	4
	Para NP: Perforación de tiros de bateas	2
<b>Cuadrilla / equipo levante</b>	Para NH	1
	Para NP	1
<b>Máquina de aire</b>	Para NH	1
	Para NP	1
<b>Camión de explosivos</b>	Para NH	1
	Para NP	1
<b>Perforadora DDE (ITH)</b>	Para NH	1
	Para NP	1
<b>Blindhole</b>	Para NP	2
<b>Tronadura</b>	De socavación	1
	De bateas	1
	De DDE en NH	1
	De DDE en NP	1

## 6.5 Llegadas

Todas las entidades llegan a las locaciones “estacionamiento/acceso”, ya sea del NH o NP, según corresponda. Las entidades iniciadoras llegan al inicio de la simulación y las seguidoras van siendo invocadas a medida que son requeridas.

Se definen las llegadas de entidades en grupos para poder configurar los distintos escenarios. Sólo se define la llegada de entidades iniciadoras, ya que las demás van a ser llamadas a medida que se desarrolle la simulación y las actividades precursoras se vayan completando. Las entidades iniciadoras se agrupan en los siguientes conjuntos:

- 1) Construcción de chimeneas piloto
- 2) Perforación y anclaje tiro DDE
- 3) Operación de instalación de guirnalda y tacos tiros DDE
- 4) Carguío de material de producción
- 5) Resto de las actividades:
  - Perforación de tiros radiales de socavación
  - Descargue y reposición malla, preparación tapado
  - Perforación tiros radiales batea
  - Medición y soplado de tiros batea

## 6.6 Procesamiento

La lógica que sigue el procesamiento es la de seguir el programa de incorporación de área, en orden, pero sin estar restringido a ciertas fechas. De esta forma, no se van a generar restricciones en caso de que la secuencia simulada pueda ir a un ritmo mayor o menor que la del programa.

Luego de definir las llegadas, las entidades iniciadoras se procesan de manera de ir completando las actividades e invocando entidades seguidoras. Por ejemplo, para socavación:

- Entidad “perforación de tiros radiales de socavación” termina una etapa y se llama a sí misma para continuar con la siguiente etapa de perforación hasta que se terminen las etapas definidas en el programa de socavación.
- Entidad “descargue y reposición malla, preparación tapado” completa su tiempo de procesamiento y luego llama a “medición y soplado tiros radiales“, luego esta llama a “repasso de tiros radiales” y así sucesivamente hasta completar 1 etapa de socavación, luego sigue completando este ciclo hasta terminar todas sus etapas, como se muestra en el esquema de la Figura 6-5.

Se sigue la misma lógica para las demás actividades (Figura 6-6 y Figura 6-7). Se ha definido en los esquemas las entidades iniciadoras de color verde y las seguidoras de color azul. Cada entidad tiene un recurso asociado que llama cada vez que debe ser ejecutada su actividad en una locación, como se muestra en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Relación entre entidades y recursos

Número	Entidad	Recurso
1	Perforación de tiros radiales de socavación *	Jumbo radial NH
2	Descargue y reposición malla, preparación tapado *	Cuadrilla preparadora
3	Medición y soplado tiros radiales	Máquina de aire NH
4	Repaso de tiros radiales	Jumbo radial NH
5	Carguío de explosivo en pozos radiales de socavación	Camión explosivos NH
6	Tronadura socavación	Tronadura socavación
7	Carguío esponjamiento material tronado desde NH	LHD NH
8	Carguío esponjamiento material tronado desde NP	LHD NP
9	Perforación chimenea piloto *	Blindhole
10	Perforación tiros radiales batea *	Jumbo radial NP
11	Medición y soplado de tiros batea *	Máquina de aire NP
12	Repaso tiros batea	Jumbo radial NP
13	Carguío de explosivo en pozos batea	Camión explosivos NP
14	Tronadura batea	Tronadura batea
15	Carguío material tronado	LHD NP
16	Perforación y anclaje tiro DDE NH*	ITH NH
17	Operación de instalación de guirnalda y tacos NH*	Cuadrilla preparadora DDE NH
18	Carguío explosivo tiro DDE NH	Camión explosivo NH
19	Tronadura DDE NH	Tronadura DDE NH
20	Perforación y anclaje tiro DDE NP*	ITH NP
21	Operación de instalación de guirnalda y tacos NP*	Cuadrilla preparadora DDE NP
22	Carguío explosivo tiro DDE NP	Camión explosivo NP
23	Tronadura DDE NP	Tronadura DDE NP
24	Carguío de material de producción *	LHD NP

Actividades con \* corresponden a actividades iniciadoras.

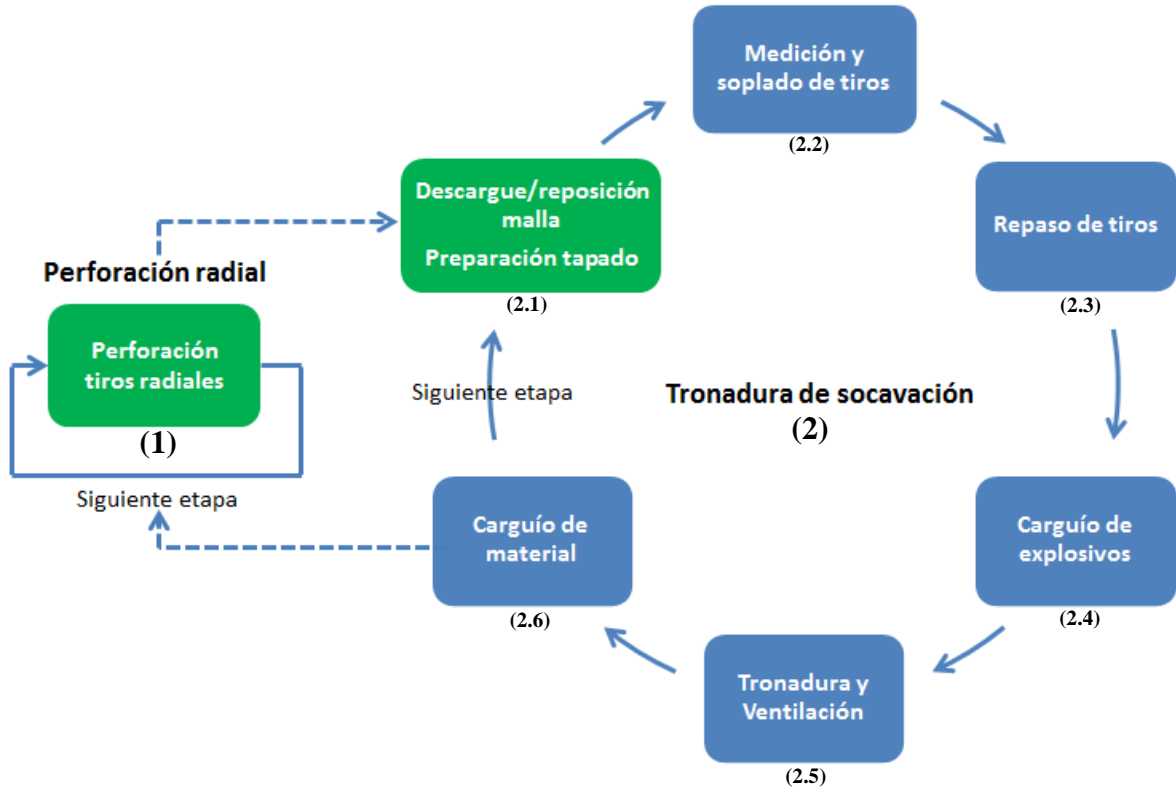


Figura 6-5 Procesamiento de actividades de socavación

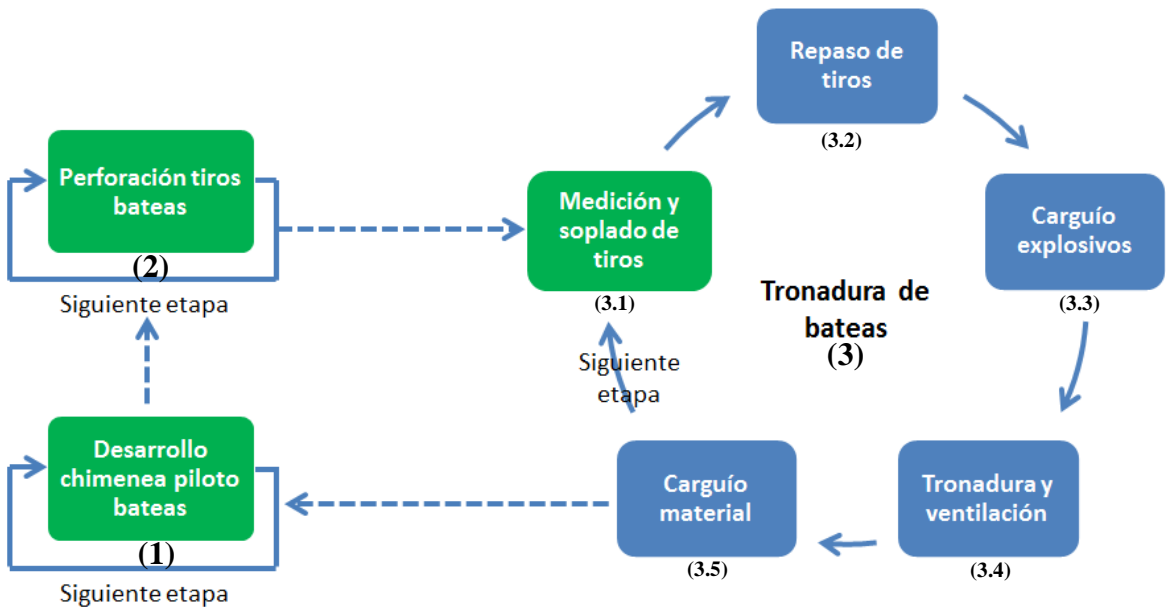


Figura 6-6 Procesamiento de actividades de apertura de bateas



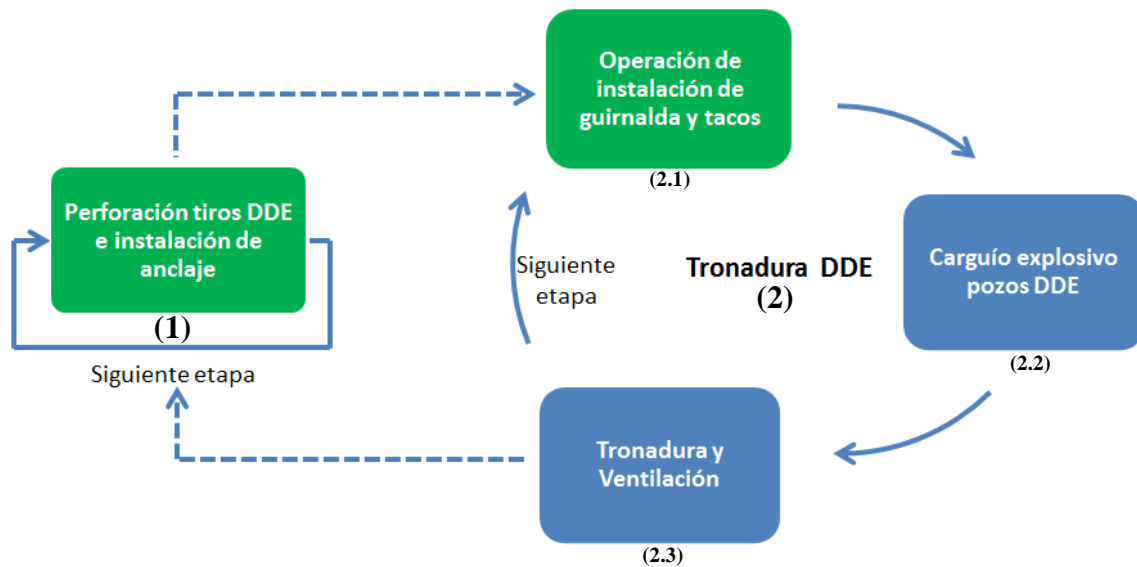


Figura 6-7 Procesamiento de actividades de precondicionamiento con DDE

Las entidades que no son de tronadura requieren que se cumplan ciertas condiciones antes de moverse desde el estacionamiento/acceso a la frente de trabajo:

- Corresponda su ejecución en el ciclo: Es decir, es actividad iniciadora y tiene etapas pendientes de realizar o una actividad precursora la llamó para completar el ciclo.
- Su recurso asociado está libre: Esto implica que debe estar en horario de trabajo (ver 6.7 Asignación de Turnos)
- Calle del frente de trabajo esté libre: Se considera como condición del modelo que solo se puede realizar una actividad por calle (subnivel de producción) o semi-calle (subnivel de hundimiento).

Las entidades de tronadura requieren que se cumplan estas condiciones antes de moverse a su frente de trabajo:

- Corresponda su turno
- Reloj de simulación en horario de cambio de turno
- Recurso “tronadura” correspondiente debe estar disponible

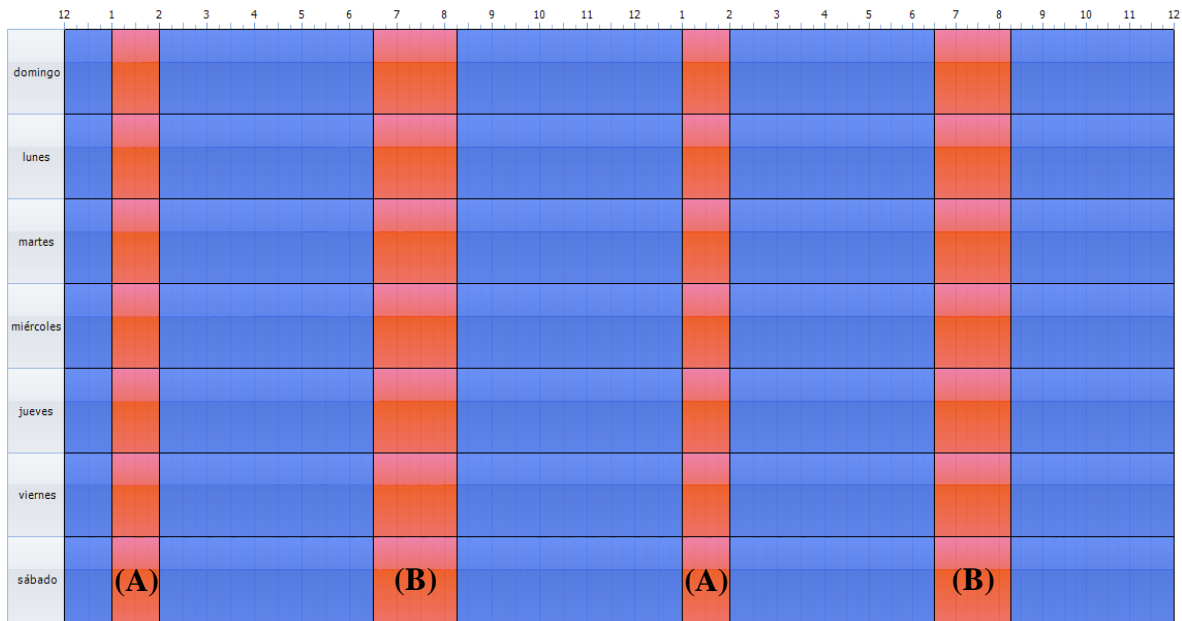
Se omite la condición de que la calle de frente de trabajo correspondiente debe estar libre porque en el cambio de turno se tienen todas las calles libres.

## 6.7 Asignación de Turnos

Como se mencionó en Capítulo 5: Modelo Conceptual, se asignan turnos de 12 horas, de 7 am a 7 pm y de 7 pm a 7 am, con una colación a las 12 am y 12 pm. Esto se hace con un calendario, en el que se asocian los equipos a los turnos.

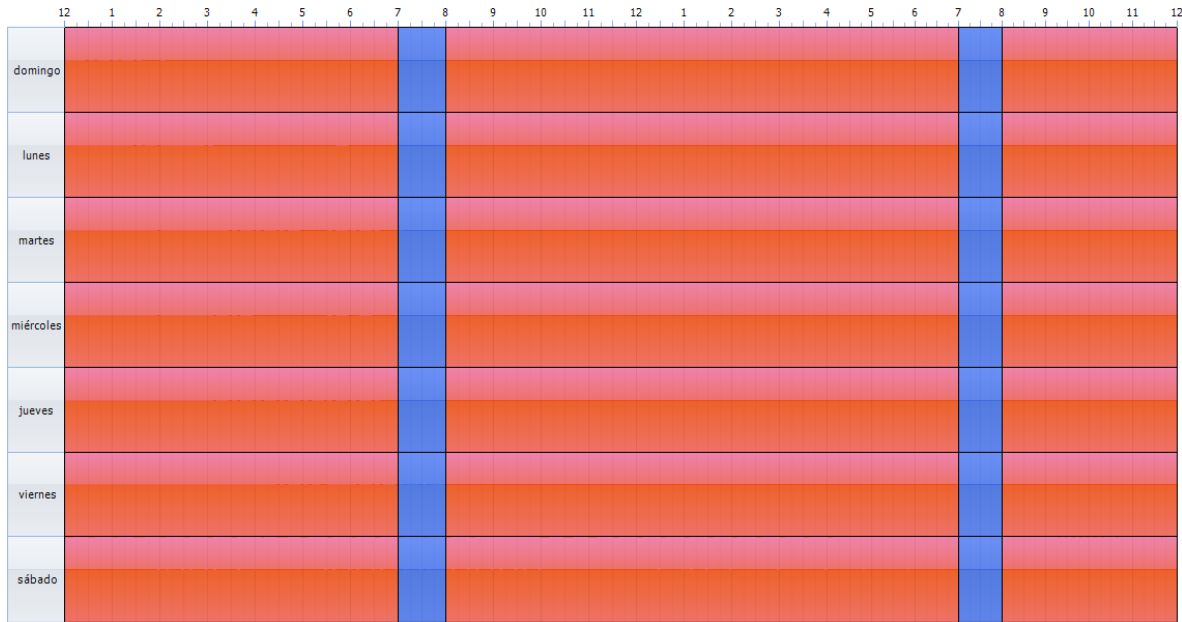
Cabe destacar que se considera una ventana de tiempo entre los cambios de turno de 1 hora y 45 minutos, valor que considera 30 minutos antes del cambio de turno para comenzar a salir de las frentes de trabajo, 1 hora de cambio de turno en sí y 15 minutos para que los equipos vuelvan a posicionarse en su respectiva frente de trabajo (Figura 6-8). En total se tienen 18,5 horas operativas por día.

Se asigna otro calendario de turnos para los recursos de tronadura, para que sea el único horario en que cualquiera de las entidades de tronadura pueda ejecutar (Figura 6-9).



Color rojo significa horario de descanso y color azul significa horario de trabajo. Descansos marcados con una (A) corresponden a colaciones y con una (B) a cambios de turno

Figura 6-8 Calendario equipos



Color rojo significa horario de descanso y color azul significa horario de trabajo

Figura 6-9 Calendario recursos tronadura

## 6.8 Variables

### 6.8.1 Variables de entrada

Para las variables de entrada se parte de la base de las variables definidas en la sección “5.3 Parámetros de Entrada” pero se les asigna una distribución triangular, dándole un rango optimista y uno pesimista, determinado con ayuda de criterio experto VP. Además las variables se cambian de unidad para poder ser trabajadas de una manera más dinámica por parte del modelo computacional, quedando como se muestra en la Tabla 6-5 para los rendimientos de los equipos y la Tabla 6-6 para los LHD.

Las variables fijas definidas de la Tabla 5-10 a la Tabla 5-15, se ingresan como variables fijas al programa. En cuanto a los rendimientos presentados en la Tabla 6-5 y la Tabla 6-6, que siguen una distribución triangular, son definidos como variables fijas en el modelo y luego convertidas a su distribución respectiva al inicio de la simulación.

Tabla 6-5 Rendimientos actividades

Actividad	Subactividad	Rendimiento			Unidad rendimiento
		Pesimista	Promedio	Optimista	
<b>Socavación</b>	Descargue y reposición malla y preparación tapado	9,00	8,00	7,00	h/frente
	Medición y soplado de tiros	0,53	0,35	0,18	min/mb
	Repaso de tiros	7,50	5,00	2,50	% de mb/parada
	Carguío de explosivos	0,44	0,35	0,26	min/mb
	Perforación radial	13,89	16,67	19,44	mb/h/equipo
<b>Apertura de bateas</b>	Desarrollo chimenea piloto	144,00	108,00	72,00	h/chim/equipo
	Perforación tiros bateas	13,89	16,67	19,44	mb/h/equipo
	Medición y soplado de tiros	2,31	1,54	1,03	min/mb
	Repaso tiros	4,50	3,00	1,50	% de mb/parada
	Carguío explosivo	2,31	1,54	1,03	min/mb
<b>Preacondicionamiento</b>	Perforación e instalación de anclaje	2,22	2,78	3,33	mb/h/equipo
	Instalación de guirnalda y tacos	15,00	12,00	9,00	h/pozo
	Carguío explosivo DDE	3,00	2,00	1,00	h/pozo

Carguío de explosivo por bombeo de emulsión.

Tabla 6-6 Rendimientos LHD

Parámetros	Rendimiento			Unidad
	Pesimista	Promedio	Optimista	
<b>Tiempo carga y maniobras</b>	40	30	20	segundos
<b>Tiempo descarga</b>	15	12	10	segundos
<b>Velocidad en NH</b>	6	8	10	km/h
<b>Velocidad en NP</b>	10	13	15	km/h

### 6.8.2 Variables de salida

En cuanto a variables de salida, se definen las siguientes matrices (o vectores) para cada actividad:

- Etapas actividad [X]: Número de etapa completada para cierta actividad en calle X.
- Tiempo completado actividad [X,Y]: Tiempo (minutos) completado de cierta actividad para etapa Y en calle X.
- Hora de inicio y fin de actividad en calle X [T,OP]: Una matriz para el tiempo de reloj T en el que inicia y finaliza una actividad OP para una calle o semi-calle X. Con esta matriz de variables de salida se construyen las cartas Gantt.

Siendo X el número de calles, que en este caso siempre tomará un valor entre 1 y 8 e Y el número de etapas, que va a depender de las actividades presentes en cada calle. Estas variables de salida sirven para verificar los resultados de la simulación.

La variable de salida más importante es la siguiente:

- Tiempo final (T,OP): Registra el tiempo de reloj de la simulación T, en que se termina la actividad con código OP. Esta variable de salida registra el tiempo del sistema (en minutos) en que se realizó la última actividad, por lo tanto, el tiempo en que se completa el programa mensual de socavación base. Este tiempo luego es transformado a formato de días y con una relación se obtiene la tasa de incorporación de área en m<sup>2</sup>/mes.

El programa está definido para incorporar 4.211 m<sup>2</sup> de área en 30 días. Por lo tanto, la relación que permite obtener la tasa de incorporación de área mensual según los resultados de la simulación es la Ecuación 6-1.

Ecuación 6-1 Relación tasa de incorporación de área

$$T = 4.211 \times \frac{30}{D}$$

Dónde:

T: Tasa de incorporación de área simulación [m<sup>2</sup>/mes]

D: Días en que se completa simulación

## **6.9 Otros Elementos**

### **6.9.1 Tiempo**

La simulación no va a estar limitada por un tiempo, el hecho que determina el final de la simulación es la salida del sistema de todas las entidades.

### **6.9.2 Número de réplicas**

Se ha utilizado la metodología presentada en el anexo (Numero de réplicas) para encontrar el número de corridas a realizar a partir del escenario base. Considerando un intervalo de confianza del 95% y un error del 5%, se aplica la metodología a todos los escenarios, y considerando el escenario que necesita mayor número de iteraciones se determina que el mínimo de iteraciones a realizar es 20.

## **6.10 Verificación del Modelo**

La verificación del modelo se hace a medida que se va construyendo el modelo computacional. Se definen 2 etapas principales:

- 1) Al incorporar nuevas funciones: Cada vez que se incorpora una nueva actividad, un nuevo algoritmo, un nuevo recurso, u otro, se realiza una minuciosa verificación de que se está cumpliendo con lo esperado por medio de las variables de salida definidas anteriormente y revisión de la animación.
- 2) Una vez que se tuvieron todos los parámetros, funciones y actividades incorporados al modelo se realiza una verificación general del sistema. Esto se hace por medio de la visualización de la animación de una iteración del problema y luego la inspección de una serie de cartas Gantt que fueron exportadas para cada una de las calles.

## Capítulo 7: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones, pero en primer lugar se definen los escenarios a simular y cuáles van a ser las variables a sensibilizar.

### 7.1 Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad

#### 7.1.1 Escenarios

En primer lugar, se realiza una corrida de simulación con datos de entrada fijos iguales al valor promedio de sus distribuciones triangulares, del cual se desprenderán una serie de cartas Gantt por calle con el propósito de realizar una verificación del modelo. Se le llama a esta corrida simulación determinística.

Luego se definen 6 escenarios para la simulación estocástica (Tabla 7-1), es decir, con 20 iteraciones y variables aleatorias con distribución triangular como datos de entrada.

Tabla 7-1 Escenarios definidos para simulación

Escenario (Código)	Condición
1. E-B	Emulsión – Caso Base: Todas las actividades del programa mensual de incorporación de área, considerando emulsión como explosivo.
2. E-AD	Emulsión – Adelanto de perforación de DDE: Se considera que la perforación de los tiros de DDE se finalizan en un mes anterior al simulado.
3. E-ADC	Emulsión – Adelantando perforación de tiros para DDE y perforación de chimeneas piloto.
4. E-SD	Emulsión – Sin realización de DDE: Se considera que no se realiza ni perforación de tiros ni las actividades del ciclo para tronadura confinada.
5. A-B	ANFO – Caso Base: Mismo parámetros del caso base pero considerando ANFO como explosivo.
6. A-ADC	ANFO – Adelantando perforación de DDE y de chimeneas piloto.

### 7.1.2 Análisis de sensibilidad

Se toman los escenarios 1, 3 y 6 y se les aplican las sensibilizaciones de la Tabla 7-2.

Tabla 7-2 Escenarios sensibilización

Parámetro	Objetivo	Detalle
<b>Altura de socavación</b>	Evaluar si efectivamente hay un aumento en la tasa al disminuir la altura de socavación.	Cambios en los metros barrenados y volúmenes de tronadura de socavación (Tabla 5-10).
<b>Horas operativas por día</b>	Evaluar el efecto de pérdidas operacionales mayores a las esperadas.	18,5; 17,5; 16,5 y 15,5 horas/día.
<b>Rendimiento Jumbos</b>	Evaluar el impacto en la variación de los rendimientos de los equipos de una de las actividades que consumen más tiempo.	Variación de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ de los mb/h/equipo.
<b>Producción</b>	A medida que se incorpora más área se aumenta el tonelaje en producción, por lo que se desea evaluar si causa efectos en la tasa.	Variación de toneladas mensuales de mineral a extraer por calle.

## 7.2 Resultados simulación determinística

En esta sección se presentan los resultados de una corrida de la simulación para el caso base y con los datos de entrada como valores fijos iguales al promedio. El detalle de las actividades por calle en formato de cartas Gantt se puede ver en anexos (10.5 Cartas Gantt).

Como resultado final, se completan todas las actividades en 36,12 días, es decir, que es posible abrir aproximadamente 3.500 m<sup>2</sup> al mes. Con una revisión de las actividades que dan término a las actividades de cada calle (Tabla 7-3) se puede ver que la última actividad es el desarrollo de chimenea piloto en la tercera calle del nivel de producción (en amarillo). Por lo tanto se infiere que adelantar el desarrollo de las chimeneas piloto podría aumentar la tasa de incorporación de área, siendo un caso de interés para evaluar.

Tabla 7-3 Últimas actividades por calle

Subnivel	Calle	1	2	3	4	5	6	7	8
NP	<b>Fecha y hora</b>	22-07-2019 3:34	25-07-2019 23:30	06-08-2019 10:51	05-08-2019 16:48	29-07-2019 8:56	25-07-2019 14:13	19-07-2019 2:18	01-08-2019 16:46
	<b>Actividad</b>	cargmat bat	chim piloto	chim piloto	cargmat soc	perf dde	cargmat soc	perf dde	perf dde
NH 1	<b>Fecha y hora</b>	07-07-2019 9:31	19-07-2019 16:07	31-07-2019 12:26	02-08-2019 4:04	24-07-2019 5:30	25-07-2019 8:27	01-07-2019 8:00	06-07-2019 6:08
	<b>Actividad</b>	perfo soc	cargmat	cargmat	cargmat	cargmat	cargmat	No hay actividades	cargexp dde
NH 2	<b>Fecha y hora</b>	26-07-2019 0:02	23-07-2019 21:54	31-07-2019 12:26	02-08-2019 4:04	24-07-2019 5:30	25-07-2019 8:27	25-07-2019 3:43	28-07-2019 3:23
	<b>Actividad</b>	perfo soc	perfo soc	cargmat	cargmat	cargmat	cargmat	perfo dde	perfo dde



### 7.3 Resultados simulación estocástica

En esta sección se presentan los resultados de los 6 escenarios de simulación definidos en la etapa 7, que fueron obtenidos a partir de 20 iteraciones de simulaciones con los datos de entrada de distribución triangular definidos en la etapa 2.

A continuación, en la Tabla 7-4 y la Figura 7-1 se muestran los resultados promedio de cada escenario con sus desviaciones estándar correspondientes.

Tabla 7-4 Resultados escenarios principales

Número (código)		Tasa [m <sup>2</sup> /mes]	Desv. Est. [m <sup>2</sup> /mes]
1. E-B	Emulsión – Base	3.382	244
2. E-AD	Emulsión - Adelantando perforación de DDE	3.574	390
3. E-ADC	Emulsión - Adelanto perforación de DDE y desarrollo de chimeneas piloto	4.203	200
4. E-SD	Emulsión - Sin perforación ni tronadura de DDE	3.645	371
5. A-B	ANFO – Base	3.085	213
6. A-ADC	ANFO - Adelanto perforación de DDE y desarrollo de chimeneas piloto	3.304	177

Para todos estos escenarios se consideró una extracción de tonelaje de producción de 2 ktpd

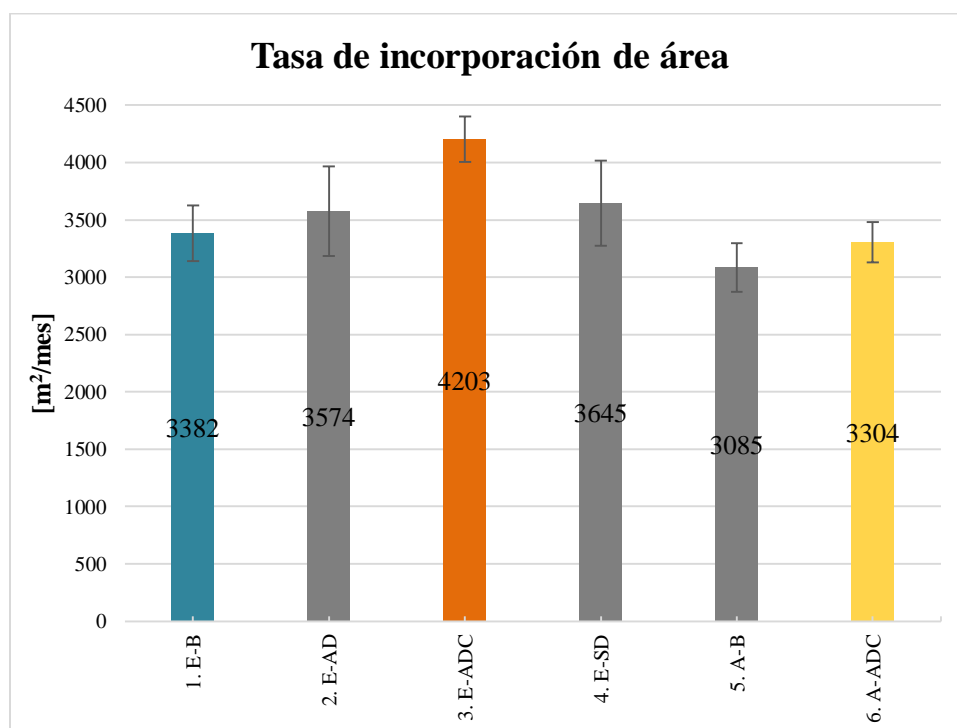


Figura 7-1 Gráfico de resultados escenarios principales

## 7.4 Resultados sensibilización

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de sensibilidad de distintas variables. Cabe destacar que en esta sección solo se presentan los resultados promedio de la tasa para cada escenario.

Se introduce un factor de sensibilidad (F) que representa la pendiente de la curva. Esta cuantifica la variación de la tasa de incorporación de área (T) a partir de la variación de la variable a sensibilizar (V). Se puede definir matemáticamente como Ecuación 7-1.

Ecuación 7-1 Factor de sensibilidad

$$F = \frac{\Delta T/T}{\Delta V/V}$$

Dónde:

- F: Factor de sensibilidad
- $\Delta T$ : Variación de la tasa a partir de valor base T
- T: Valor base de tasa
- $\Delta V$ : Variación de la variable sensibilizada a partir de valor base V
- V: Valor base de la variable sensibilizada

### 7.4.1 Altura de socavación

Se presentan los resultados promedio de la sensibilización de la altura de socavación en la Tabla 7-5 y la Figura 7-2.

Tabla 7-5 Resultados sensibilización altura de socavación

	20 m	10 m	Unidad
<b>E-B</b>	3.382	3.522	m <sup>2</sup> /mes
<b>E-ADC</b>	4.203	5.560	m <sup>2</sup> /mes
<b>A-ADC</b>	3.304	4.417	m <sup>2</sup> /mes

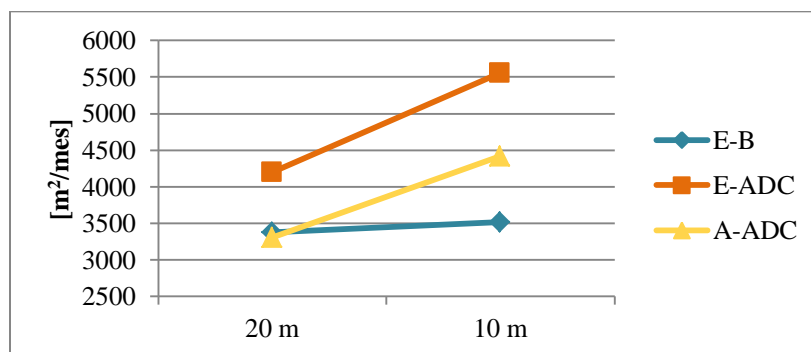


Figura 7-2 Gráfico de resultados sensibilización altura de socavación

### 7.4.2 Horas operativas

Se presentan los resultados promedio de la sensibilización de las horas operativas en la Tabla 7-6 y la Figura 7-3.

Tabla 7-6 Resultados sensibilización horas operativas

	18	17	16	15	Unidad
<b>E-B</b>	3.382	3.221	3.050	2.830	m <sup>2</sup> /mes
<b>E-ADC</b>	4.203	3.977	3.757	3.541	m <sup>2</sup> /mes
<b>A-ADC</b>	3.304	3.141	2.957	2.775	m <sup>2</sup> /mes

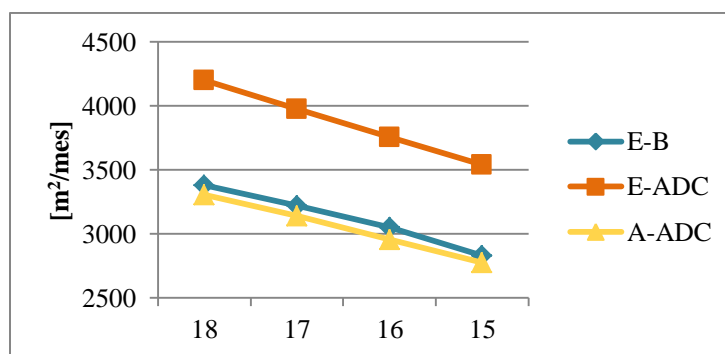


Figura 7-3 Gráfico de resultados sensibilización horas operativas

### 7.4.3 Rendimiento jumbos

Se presentan los resultados promedio de la sensibilización del rendimiento de los equipos de perforación en la Tabla 7-7 y la Figura 7-4.

Tabla 7-7 Resultados sensibilización rendimiento jumbos

	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	Unidad
<b>E-B</b>	3.228	3.351	3.382	3.475	3.501	m <sup>2</sup> /mes
<b>E-ADC</b>	3.620	3.934	4.203	4.467	4.729	m <sup>2</sup> /mes
<b>A-ADC</b>	2.820	3.071	3.304	3.523	3.689	m <sup>2</sup> /mes

Rendimientos: 270, 285, 300, 315 y 330 mb/día promedio respectivamente

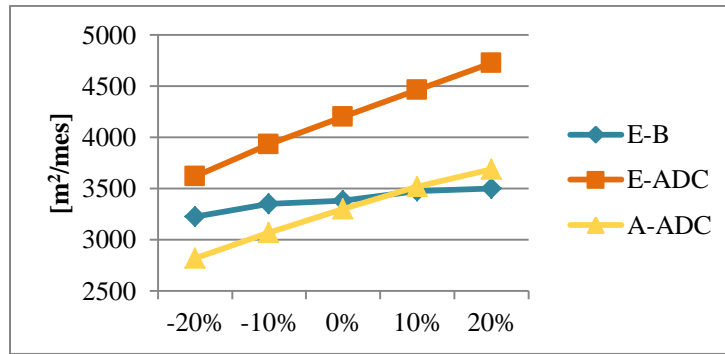


Figura 7-4 Gráfico de resultados sensibilización rendimiento jumbos

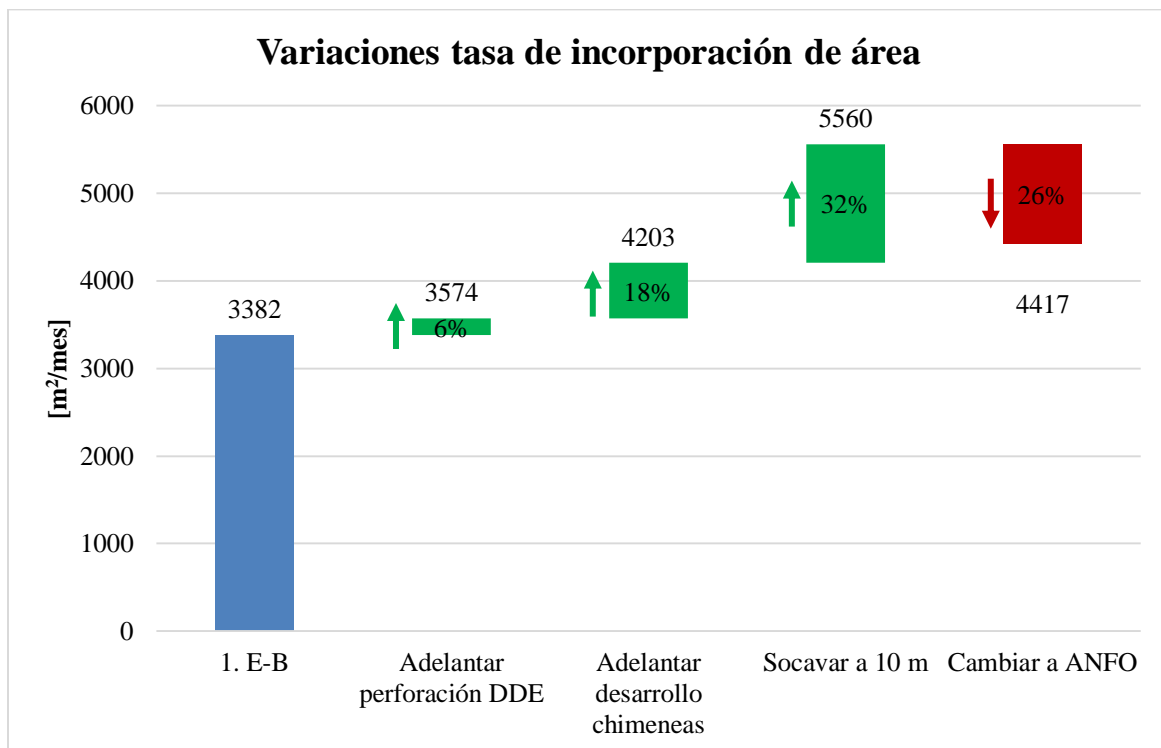


Figura 7-5 Gráfico incremental tasas de incorporación de área

#### 7.4.4 Producción

Se definen 3 nuevos programas de producción, detallados en la Tabla 7-8. Estos se obtuvieron multiplicando los tonelajes por calle del caso base por los factores que se presentan entre paréntesis en el título de cada caso de la Tabla 7-9. Con estos nuevos programas de producción se obtienen los resultados promedio presentados en la Tabla 7-9 y la Figura 7-6.

Tabla 7-8 Nuevos escenarios de producción para sensibilización

Calle	Caso Base	Caso 1 (4)	Caso 2 (7)	Caso 3 (10)	Caso 4 (14)	Unidad
8	4,32	17,28	30,24	43,20	56,16	kton
7	6,48	25,92	45,36	64,80	84,24	kton
6	9,28	37,13	64,98	92,82	120,67	kton
5	11,87	47,46	83,06	118,66	154,25	kton
4	11,68	46,72	81,75	116,79	151,82	kton
3	8,27	33,07	57,87	82,67	107,47	kton
2	6,48	25,92	45,36	64,80	84,24	kton
1	6,48	25,92	45,36	64,80	84,24	kton
<b>Total</b>	<b>64,85</b>	<b>259,41</b>	<b>453,98</b>	<b>648,54</b>	<b>843,10</b>	kton
<b>ktpd</b>	<b>2,16</b>	<b>8,65</b>	<b>15,13</b>	<b>21,62</b>	<b>28,10</b>	ktpd

Números entre paréntesis corresponden a factor de multiplicación

Tabla 7-9 Resultados sensibilización programa de producción

	CB	C1	C2	C3	C4	Unidad
<b>E-B</b>	3382	3377	3057	2590	2243	m <sup>2</sup> /mes
<b>E-ADC</b>	4203	4136	4077	3738	3261	m <sup>2</sup> /mes
<b>A-ADC</b>	3304	3249	3259	3217	2933	m <sup>2</sup> /mes

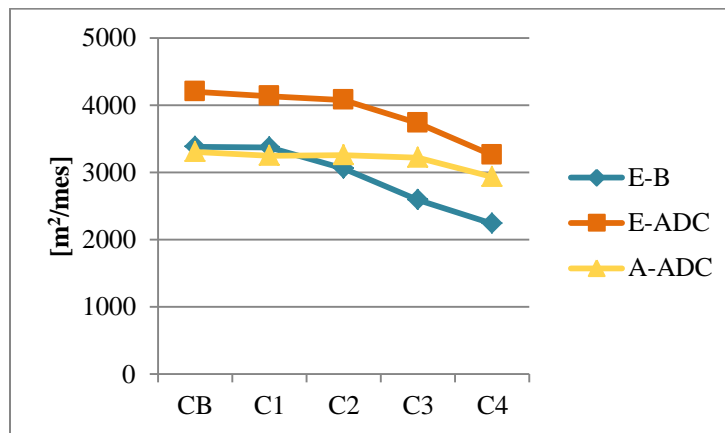


Figura 7-6 Gráfico de resultados sensibilización programa de producción

## 7.5 Análisis de resultados

A partir de las cartas Gantt construidas con los resultados de la simulación determinística (Figura 10-5 a Figura 10-27) se puede ver que la simulación sigue un orden lógico y coherente con respecto a la operación real, las interferencias y condiciones operacionales establecidas, por lo que se puede considerar que el modelo de simulación ha sido verificado.

De los resultados de escenarios principales (Tabla 7-4 y Figura 7-1) se desprende que sólo es posible alcanzar la tasa requerida usando emulsión como explosivo y adelantando las operaciones de perforación de tiros DDE y desarrollo de chimeneas piloto. También se destaca que la utilización de ANFO como explosivo puede significar una disminución considerable de la tasa de incorporación, se ve una disminución de 8,8% para el caso base y 21,4% para el caso de adelantar chimeneas y perforación de tiros DDE.

Se observa que para las sensibilizaciones de altura de socavación y rendimiento de jumbos, las variaciones afectan en menor grado al caso base. Esto lleva a suponer que existe uno o más procesos que están presentes sólo en el caso base que están limitando al sistema. Debido a esto, desde ahora en adelante en este documento se va a generalizar el análisis de las sensibilizaciones a los casos en que sí se nota una variación considerable, que son los casos de adelanto de chimeneas y perforación de DDE.

Se nota un aumento considerable de la tasa de incorporación de área al bajar a una altura de socavación de 10 m, con un factor de sensibilidad promedio de -0,66, esto quiere decir que una disminución de un 1% en la altura de socavación equivale a un aumento en 0,66% en la tasa de incorporación de área. Esto se debe a que:

- Se disminuyen la cantidad de metros barrenados por parada, lo que implica una disminución en los tiempos de perforación y de repaso.
- Se disminuye el volumen de explosivo por cargar, lo que implica una disminución en los tiempos de carguío de explosivo.
- Y por último, se disminuye a la mitad el volumen tronado en cada polvorazo, por lo que la cantidad de tonelaje de esponjamiento a extraer mediante LHD también disminuye, disminuyendo tiempos de carguío de material.

La sumatoria de todas estas disminuciones conduce a poder ejecutar el programa mensual en menos tiempo, traduciéndose en un alza o aseguramiento de la tasa de incorporación de área.

El comportamiento al disminuir las horas operativas es el esperado, mientras menos horas operativas al día, los procesos tardan más días en completarse, entonces la cantidad de área abierta en un mes disminuye. Se ve una correlación casi lineal entre esta variable y la tasa de incorporación, dando un factor de sensibilidad promedio de 1,02.

Con el análisis de sensibilidad del rendimiento de equipos radiales se comprueba que Jumbos radiales son equipos influyentes en cuanto al cumplimiento del programa mensual de socavación. Se calcula un factor de sensibilidad promedio de aproximadamente 0,71.

Del análisis incremental de la Figura 7-5 se puede ver que la máxima capacidad de incorporación de área del sistema sería con la implementación de emulsión en socavación baja y adelantando las operaciones de perforación de tiros DDE y desarrollo de chimeneas piloto con un valor de 5.560 m<sup>2</sup>/mes. Por otro lado, la utilización de ANFO representa amenaza para la tasa de incorporación de área socavada. Esto se debe a 2 razones:

- Se aumentan la cantidad de metros barrenados por unidad de área: Esto quiere decir, que por cada metro horizontal socavado, se deben perforar mayor cantidad de metros, y como la perforación radial es un proceso influyente en el programa mensual de socavación (hecho que se ha demostrado con la sensibilización de rendimientos de jumbos radiales), se traduce en mayores tiempos de perforación, por lo tanto, disminución de la tasa de incorporación de área mensual.
- Tiempos de ventilación son mayores: Esto disminuye las horas operativas promedio, parámetro que también demostró ser influyente en la tasa de incorporación de área socavada.

Por último, con respecto a la sensibilización de la producción, de la Figura 7-6 se puede ver que a medida que se aumenta la producción, la tasa de incorporación de área se ve disminuida. Se nota una disminución creciente al aumentar el tonelaje de producción, indicando una saturación en la capacidad del sistema. Se tiene un factor de sensibilidad que va en aumento pero con un valor promedio de 0,04. A partir de lo anterior, se puede decir que para el escenario más favorable, es decir, “E-ADC”, lo máximo que podría soportar el sistema son aproximadamente 15 ktpd de mineral en producción para seguir logrando los 4.000 m<sup>2</sup>/mes.

## Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones

---

El estudio buscaba medir el impacto que ciertos parámetros o condiciones pudieran tener en la incorporación de área de una mina subterránea de block caving. Para ello, por medio de simulaciones, se analizaron los efectos que tenían en la tasa de incorporación de área diferentes variables y condiciones. En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas luego de la realización del estudio.

A partir de las cartas Gantt construidas con los resultados de la simulación determinística es posible concluir que la simulación sigue un orden lógico y coherente con respecto a la operación real. El comportamiento de la tasa de incorporación de área bajo los distintos escenarios planteados demuestra coherencia con lo que se espera en la realidad, es decir, si se quitan actividades, se observa un aumento de la tasa y viceversa, por lo que se puede decir que el modelo es capaz de entregar una tasa de incorporación de área coherente a los parámetros de entrada. Por lo anterior, se concluye que si se incorporan datos de entrada que estén dentro del rango de valores de la operación, el modelo debería entregar una estimación educada y bastante aproximada a la realidad.

De acuerdo a los 6 escenarios simulados en primera instancia, se observa que las operaciones de perforación de chimeneas piloto y perforación de tiros para el DDE limitan la capacidad de incorporación de área del sistema. Al adelantar estas operaciones, para el escenario base con emulsión como explosivo, se puede alcanzar el requerimiento de la operación, llegando a la tasa de 4.203 m<sup>2</sup>/mes.

La capacidad máxima del sistema se observa al evaluar el mismo caso anterior pero con una altura de socavación de 10 m, llegando a los 5.560 m<sup>2</sup>/mes. Es decir, para el escenario con emulsión como explosivo, socavación de 10 m y adelantando las operaciones de perforación de tiros para DDE y chimeneas piloto.

Para el escenario con ANFO, si se considera una altura de socavación de 20 m, a pesar de adelantar operaciones de perforación de chimeneas y de tiros del DDE, no hay forma de alcanzar la tasa requerida. La única forma de cumplir el requerimiento es bajando la altura de socavación a 10 m, llegando a los 4.417 m<sup>2</sup>/mes.

Cabe destacar que, a pesar de que la implementación de una altura de socavación de 10 m parece ser bastante beneficiosa en cuanto a temas de velocidad de incorporación de área para todos los escenarios, no se han cuantificado los efectos que tiene en el tiraje del mineral de producción. Una altura de socavación más baja podría producir una granulometría más gruesa y mayores colgaduras en las primeras toneladas de mineral extraídas por punto de extracción, en especial porque el diseño de DDE considera una loza de 20 m de altura sin pre acondicionar desde el subnivel de hundimiento hacia arriba. Se recomienda estudiar estos factores antes de considerar esta opción como viable para el mejoramiento de la tasa.

El hecho de que al aumentar el tonelaje extraído en producción disminuya la tasa de incorporación de área es un aspecto a tener en consideración. Se debe verificar este factor en la elaboración de los planes de producción, de la forma en que se considere que no se va



a poder mantener una tasa mayor o igual a 4.000 m<sup>2</sup>/mes a partir de los meses en que el ritmo de extracción de producción sea mayor a 15 ktpd. Otra opción es revisar las condiciones particulares de esos meses en términos logísticos para mejorar la coordinación de actividades.

Según los resultados de sensibilidad se recomienda tener especial cuidado con la pérdida de horas operativas, y con la baja de rendimientos de los jumbos radiales, ya que ambos han demostrado estar fuertemente relacionados a la tasa de incorporación de área. Se recomienda también, según lo concluido de la sensibilización de la cantidad de tonelaje en producción, que se adelante apertura de área en los meses en que es posible extraer a una tasa mayor a 4.000 m<sup>2</sup>/mes para poder compensar la falta de capacidad en el futuro.

Por último, se recomienda fuertemente realizar una campaña de recolección de datos cuando comience el hundimiento de los MB centrales de la mina Chuquicamata Subterránea el año 2019 para poder calibrar este modelo. Otra opción viable es realizar algunos ajustes al modelo para poder ser calibrado con alguna mina en operación actualmente. Si se validan sus resultados podría ser de gran ayuda en la implementación de casos de estudio y futuros proyectos.

## Capítulo 9: Bibliografía

---

- Banks, J. (1999). *Discrete Event Simulation*. Marietta, Georgia: Winter Simulation Conference.
- Brady, B. H., & Brown, E. (2006). Chapter 5: Cave initiation by Undercutting. En B. H. Brady, & E. Brown, *Rock Mechanics: For underground mining, Third Edition* (págs. 191-244). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Brown, E. T. (2002). *Block Caving Geomechanics*. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland.
- Butcher, R. J. (2000). *Blockcave undercutting - Aims, strategies, methods and management*. Brisbane: MassMin 2000.
- Castro, C., Báez, F., Arancibia, E., & Barrera, V. (2014). *Study of the impact of rock mass preconditioning on a Block Caving Mine operation*. Santiago de Chile: Caving 2014.
- Catalan, A., Onederra, I., & Chitombo, G. (2012). *A proposed methodology for evaluation of the preconditioning by blasting at the Cadia East panel cave mine*. Sudbury: MassMin 2012.
- CODELCO. (2017). *Base de información operaciones*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, V. C. (2017). *Informe técnico final: Diseño Perforación y Tronadura de Socavación a 20 m y Bateas MB's Centrales N01-S01 (Informe no publicado)*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, V. C. (2017). *Memoria de cálculo: Diseño de Perforación y Tronadura de Socavación de 20 m de Altura en Pilar S01-S02 y Media Batea*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, V. C. (2017). *Memoria de cálculo: Diseño tronadura de socavación alta y batea*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos. (2009). *Estudio de prefactibilidad, Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, Criterios específicos de diseño*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos. (2009). *Estudio de prefactibilidad, Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, Principales Decisiones*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos. (2016). *Diseño alternativo manejo de materiales interior mina, Proceso de reformulación PMCHS (Informe no publicado)*. Santiago de Chile: Autor.
- Codelco Chile, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos. (2017). *Estudio de Factibilidad para la reformulación del PMCHS*. Santiago de Chile: Autor.

- Contreras Carrasco, C. F. (2016). *Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Contreras, J., Cornejo, J., & Caviedes, C. (2016). *Metodología para estimación de la tasa de incorporación de área en panel caving, Codelco - División El Teniente*. Santiago de Chile: 1st International Conference of Underground Mining.
- García, E., García, H., & Cárdenas, L. (2006). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*. México: Pearson Educación, Primera Edición.
- Gottreux Vollet, I. D. (2016). *Pre acondicionamiento con el uso de debilitamiento dinámico con explosivos en minería por caving*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
- Hatch. (2017). *Estudio Capacidad Productiva Mina Planta PMCHS Layout Reformulado*. Santiago de Chile: Autor.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*. Burgos: Universidad de Burgos.
- Kleijnen, J. P. (1995). *Verification and validation of simulation models*. European Journal of Operational Research.
- Lagos Coronado, E. A. (2007). *Gestión operativa del sistema de despacho, Estudio técnico y económico*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.
- Laubscher, D. H. (1994). Cave mining: state of the art. En D. H. Laubscher, *Cave mining: state of the art* (págs. 279 - 293). J S Afr Inst Min Metall.
- Laubscher, D. H. (2003). Chapter 13: Undercutting. En D. H. Laubscher, *Cave mining handbook* (págs. 48-55). De Beers.
- Li, Z. (2012). *Application of Simulation Techniques in Development Planning for Caving Methods, Thesis for the degree of master of applied science*. Vancouver, Canadá: The University of British Columbia.
- Marín, N. (2012). *Cuantificación del debilitamiento dinámico con explosivos en roca primaria*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Molina, R. E., Cerrutti, C. B., Henriquez, J. O., Morales, R. F., & Apablaza, R. A. (2008). *Preconditioning implementation on rock bulks in Codelco Chile and its results*. Luleå Sweden: MassMin 2008.
- Rivero Abarca, V. S. (2008). *Evaluación geomecánica de estrategias de socavación en minería subterránea*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.

- Salgado Véliz, J. (2009). *Secuenciamiento genérico de obras para la planificación de preparación minera Mina El Teniente*. Santiago: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Minas.
- Sargent, R. G. (2003). *Verification and Validation of Simulation Models*. Piscataway: Winter Simulation Conference.
- Valderrama Llantén, C. E. (2011). *Modelación numérica de la propagación del fracturamiento hidráulico*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.

# Anexos

---

## 10.1 Numero de réplicas

1. Definir la variable de salida a analizar.
2. Realizar una cantidad arbitraria de réplicas.
3. Calcular la media y la desviación estándar de la variable de salida.
4. Sustituir en la siguiente fórmula:

Ecuación 10-1 Número de réplicas

$$N = \left( \frac{\sigma \cdot Z}{Error \cdot X} \right)^2$$

Dónde:

N = Número de réplicas.

$\sigma$  = Desviación estándar de la variable de respuesta a analizar.

Z = Estadístico normal estándar (Ejemplo: Para un nivel de confianza de 95%, Z = 1.96).

*Error* = Error máximo admitido.

X = Promedio de la variable de respuesta a analizar.

5. Si el número de corridas obtenido de la fórmula se cubrió con el número de corridas preliminares significa que ya no es necesario hacer más corridas, pero si el número de corridas calculado es superior al que se consideró de manera preliminar entonces deberán realizarse las corridas que sean necesarias.

# 10.2 Diseños

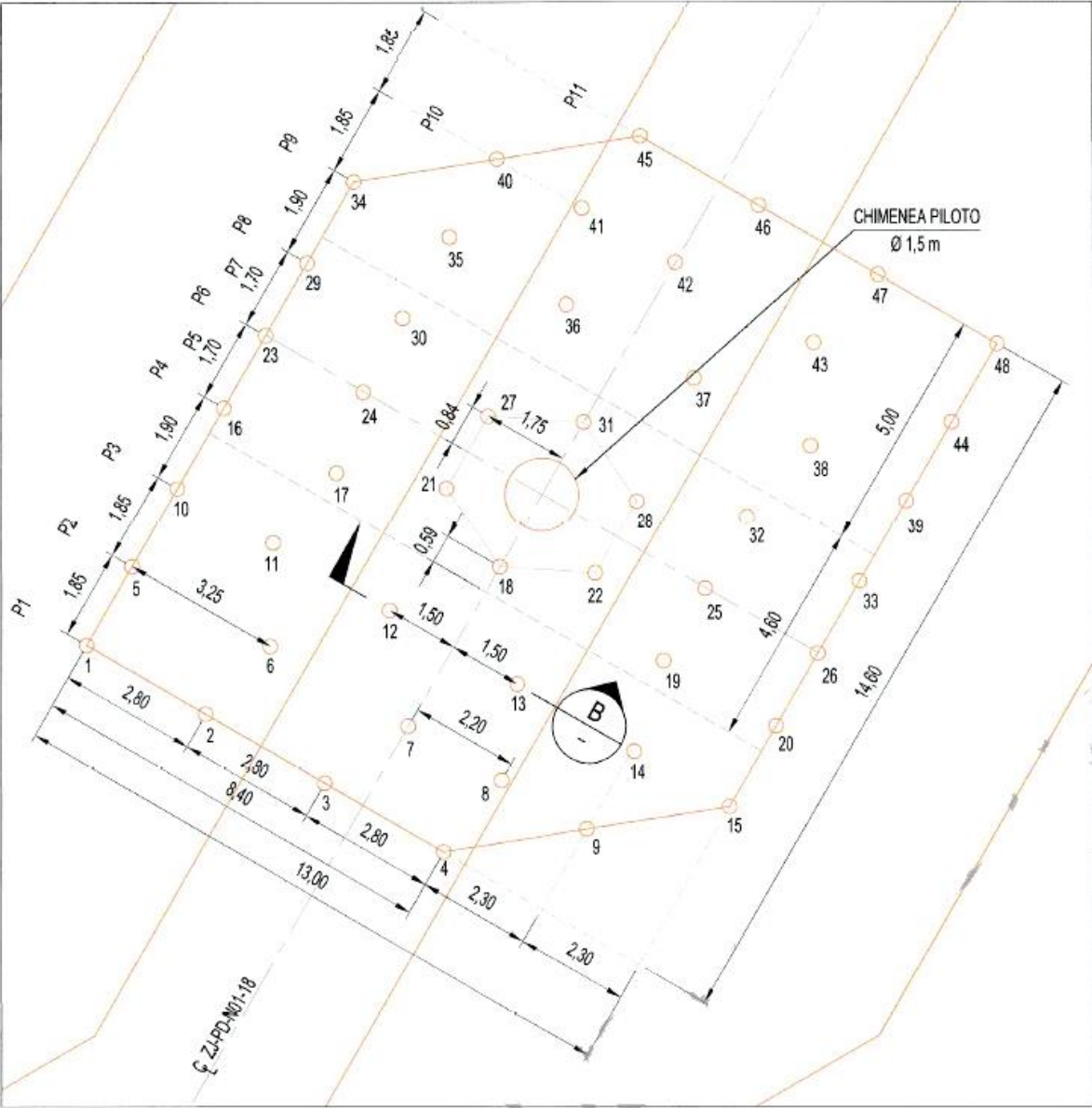


Figura 10-1 Diseño batea

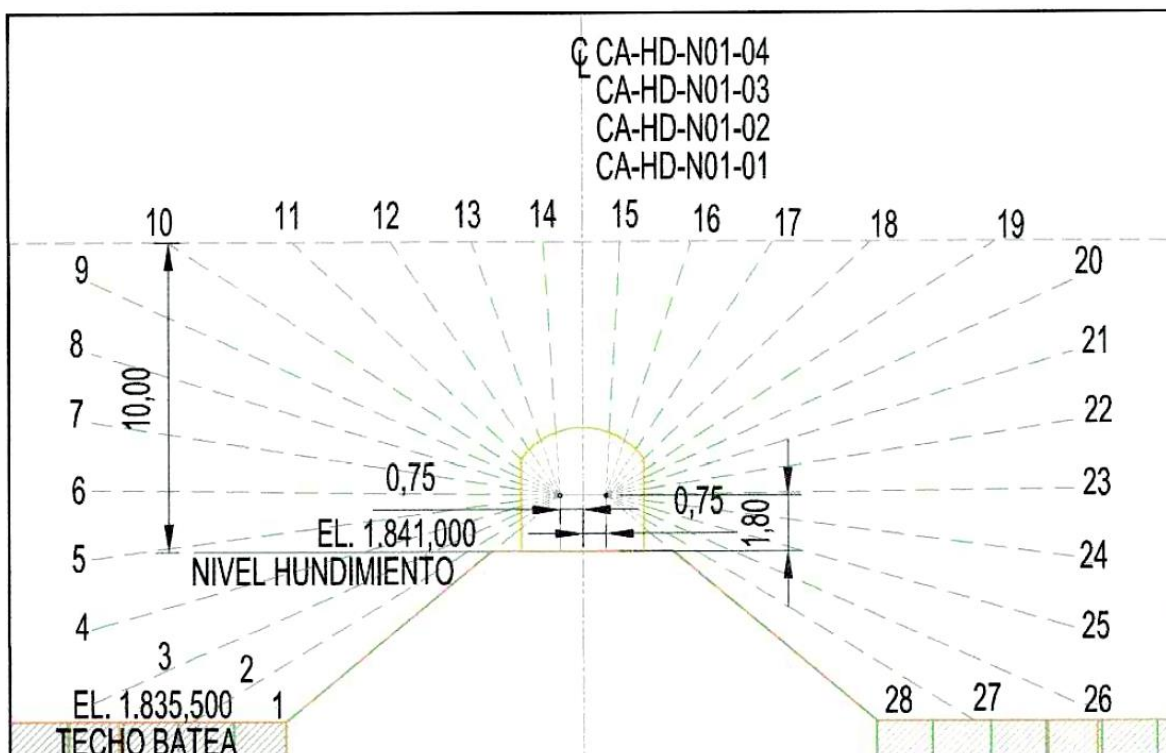


Figura 10-2 Diseño socavación 10 m

### 10.3 Cubicaciones

A continuación en la Tabla 10-1 se presenta la cubicación del tonelaje de las chimeneas piloto de las bateas.

Tabla 10-1 Cubicación tonelaje chimeneas

Chimenea	Valor	Unidad
Altura	10,00	m
Diámetro	1,50	m
Área basal	7,07	m <sup>2</sup>
Volumen	70,69	m <sup>3</sup>
Densidad	2,65	ton/m <sup>3</sup>
Tonelaje	187,32	ton

Se obtienen las cubicaciones para los diseños con explosivo ANFO a partir de la transformación de los diseños para emulsión por medio de 2 factores de corrección que son presentados en la Tabla 10-2. Estos factores fueron calculados a partir de un diseño que se tenía de una etapa de ingeniería anterior en que se comparaba el diseño de las paradas de socavación de 10 m con emulsión y ANFO.

Tabla 10-2 Factores de corrección emulsión - ANFO

Factor de corrección	Valor
Espaciamiento	1,12
Burden	1,18

## 10.4 Tiempos Operativos y Pérdidas Operacionales

Tabla 10-3 Tiempos operativos y pérdidas operacionales

	Unidad	Situación Operación Manual
<b>Tiempo Operativo</b>	<b>hr</b>	<b>18,0</b>
<b>Total Descuentos Tiempo Disponible</b>	<b>hr</b>	<b>6,0</b>
<b>Entrada de Turno (Entra Casa Cambio)</b>	min	<b>46,0</b>
<i>Tiempo casa de cambio</i>	min	10,0
<i>Tiempo casa de cambio-portal</i>	min	1,0
<i>Tiempo portal-nivel</i>	min	30,0
<i>Tiempo al frente de producción</i>	min	5,0
<b>Salida de Turno</b>	min	<b>46,0</b>
<i>Tiempo casa de cambio</i>	min	10,0
<i>Tiempo portal - casa de cambio</i>	min	1,0
<i>Tiempo nivel - portal</i>	min	30,0
<i>Tiempo desde frente producción hacia bus</i>	min	5,0
<b>Interferencias</b>	min	<b>30,0</b>
<i>Interferencias</i>	min	30,0
<b>Colación (x2)</b>	min	<b>120,0</b>
<i>Tiempo de Colación</i>	min	60,0
<b>Quemada</b>	min	<b>60,0</b>
<b>Cambio de Turno (x2)</b>	min	<b>60,0</b>
<b>Tiempo Adicional de Operación SA sin asistencia en terreno</b>	min	<b>0,0</b>

Tabla 10-4 Desglose instalación guirnalda y tacos

Actividad	Tiempo
Instalación de Detonadores e Izaje	5 hrs
Instalación de Mangueras	3 hrs
Pre-taco	2 hrs
Lechado Taco Confinamiento	2 hrs

## 10.5 Cartas Gantt

A continuación se presentan una serie de gráficos tipo carta Gantt (de Figura 10-5 a Figura 10-27) para ilustrar en detalle las actividades realizadas en cada calle. En estos gráficos se ha usado una notación especial que es explicada con la Figura 10-3, la Figura 10-4 y la Tabla 10-5. Por simplificación, los sets de 4 paradas de perforación A y B se asignan completamente a sector 2 y 1 respectivamente.



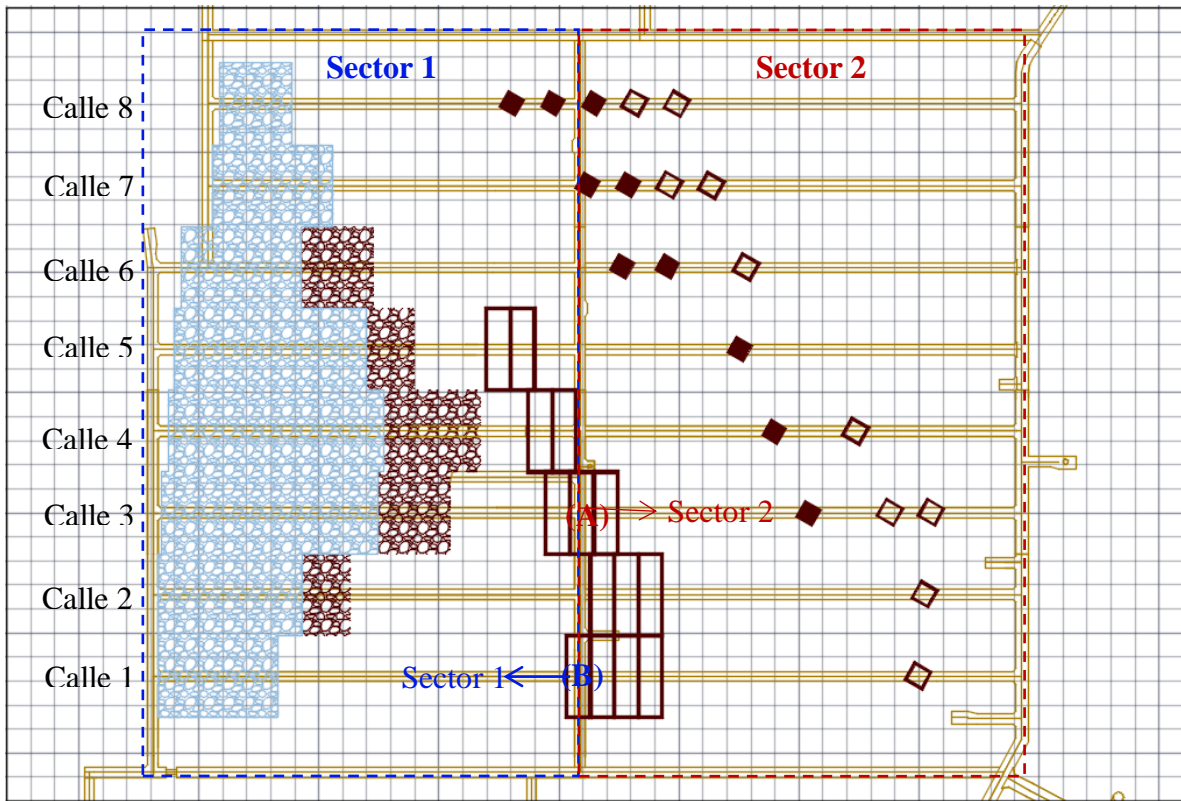


Figura 10-3 Sectores de subnivel de hundimiento (NH)

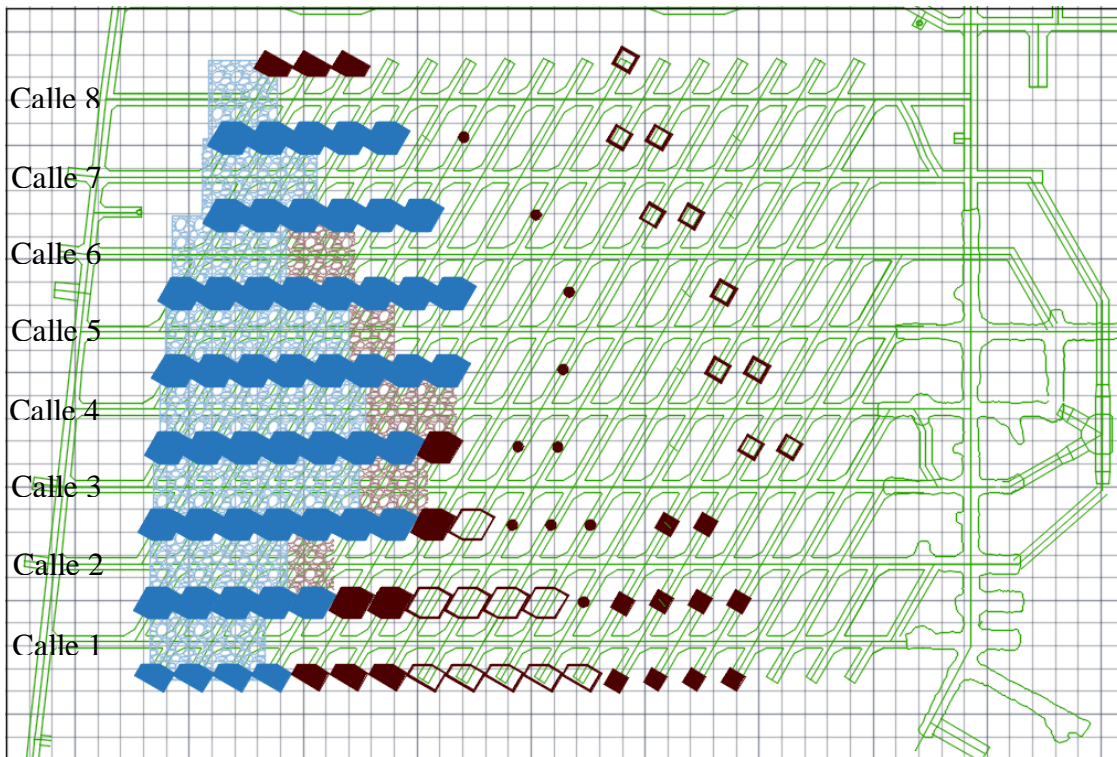


Figura 10-4 Nomenclatura calles subnivel de producción (NP)

Tabla 10-5 Nombres abreviados de actividades cartas Gantt

<b>Nombre actividad</b>	<b>Nombre abreviado</b>
Perforación radial en subnivel de hundimiento	Perfo soc
Descargue y reposición de malla y preparación de tapado en área de carguío de explosivos para socavación	Prep soc
Medición y soplado de tiros de socavación	Medysop soc
Repaso de tiros de socavación	Repaso soc
Carguío de explosivos de socavación	Cargexp soc
Carguío de material desde subnivel de hundimiento	Cargmat soc
Carguío de material desde subnivel de producción	Cargmat soc
Desarrollo de chimenea piloto	Chim piloto
Perforación de tiros bateas	Perfo bat
Medición y soplado de tiros bateas	Medysop bat
Repaso tiros bateas	Repaso bat
Carguío de explosivos en bateas	Cargexp bat
Carguío de material tronado de bateas	Cargmat bat
Perforación de tiros DDE e instalación de anclaje en subnivel de hundimiento	Perfo dde
Perforación de tiros DDE e instalación de anclaje en subnivel de producción	Perf dde
Operación de instalación de guirnalda y tacos en subnivel de hundimiento	Prep dde
Operación de instalación de guirnalda y tacos en subnivel de producción	Prep dde
Carguío de explosivos pozos DDE en subnivel de hundimiento	Cargexp dde
Carguío de explosivos pozos DDE en subnivel de producción	Cargexp dde

### 10.5.1 Subnivel de hundimiento sector 1

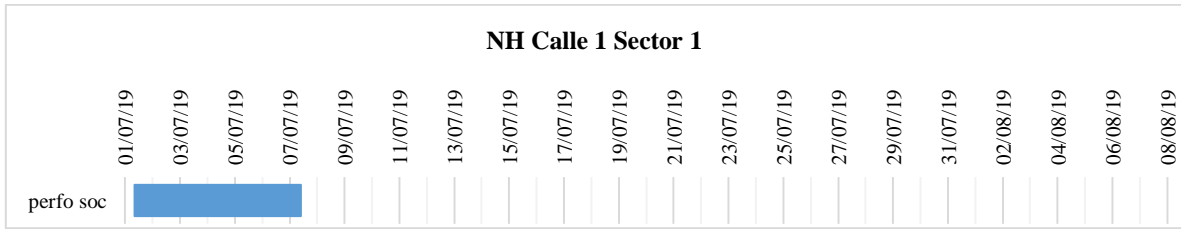


Figura 10-5 Carta Gantt de calle 1 Oeste, subnivel de hundimiento

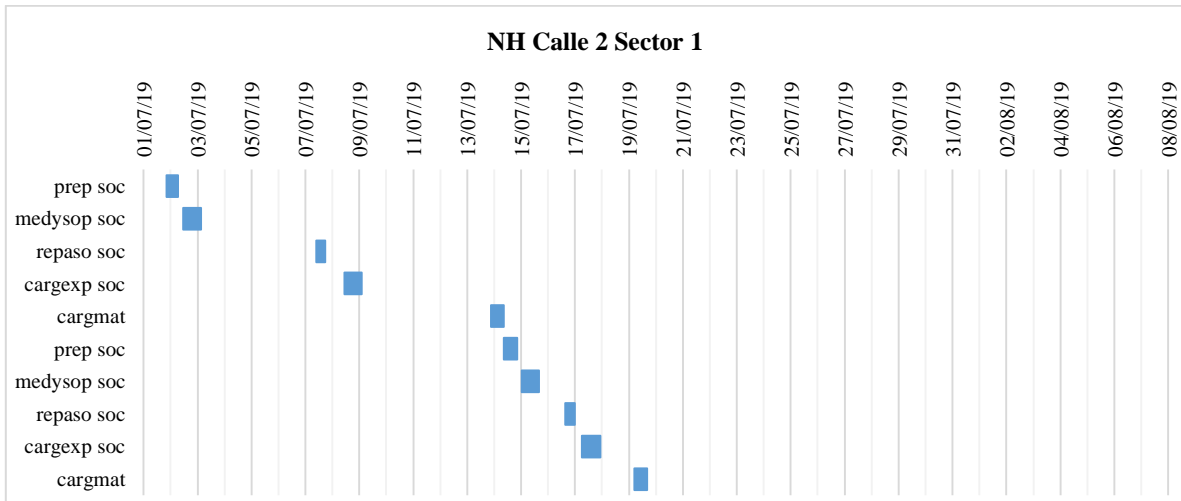


Figura 10-6 Carta Gantt de calle 2 Oeste, subnivel de hundimiento

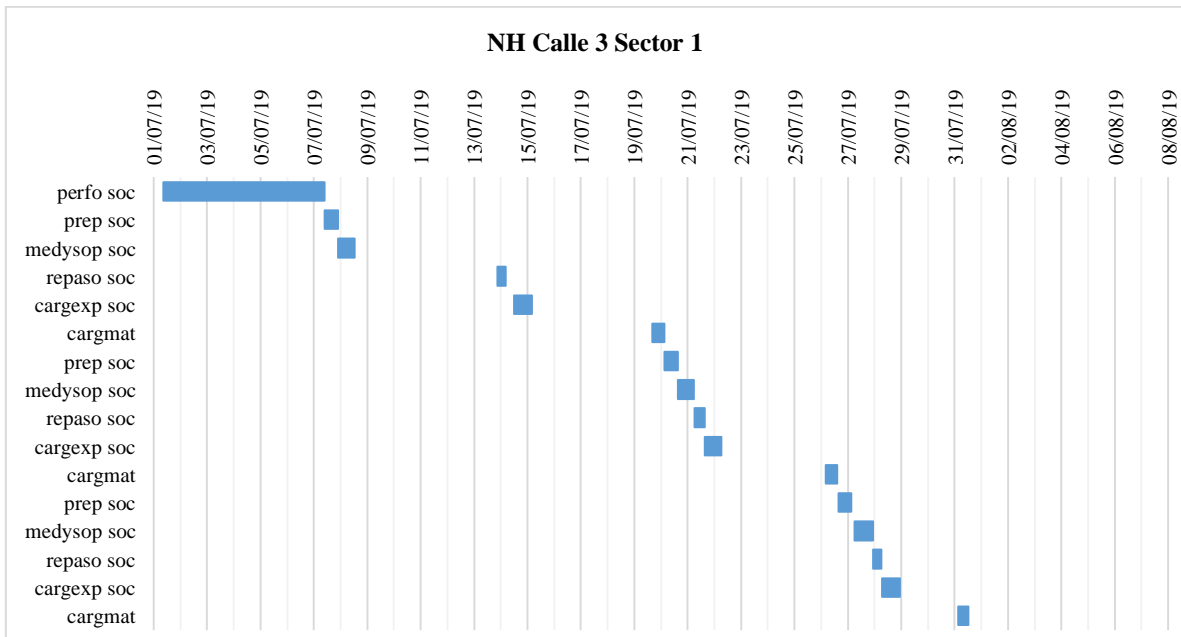


Figura 10-7 Carta Gantt de calle 3 Oeste, subnivel de hundimiento

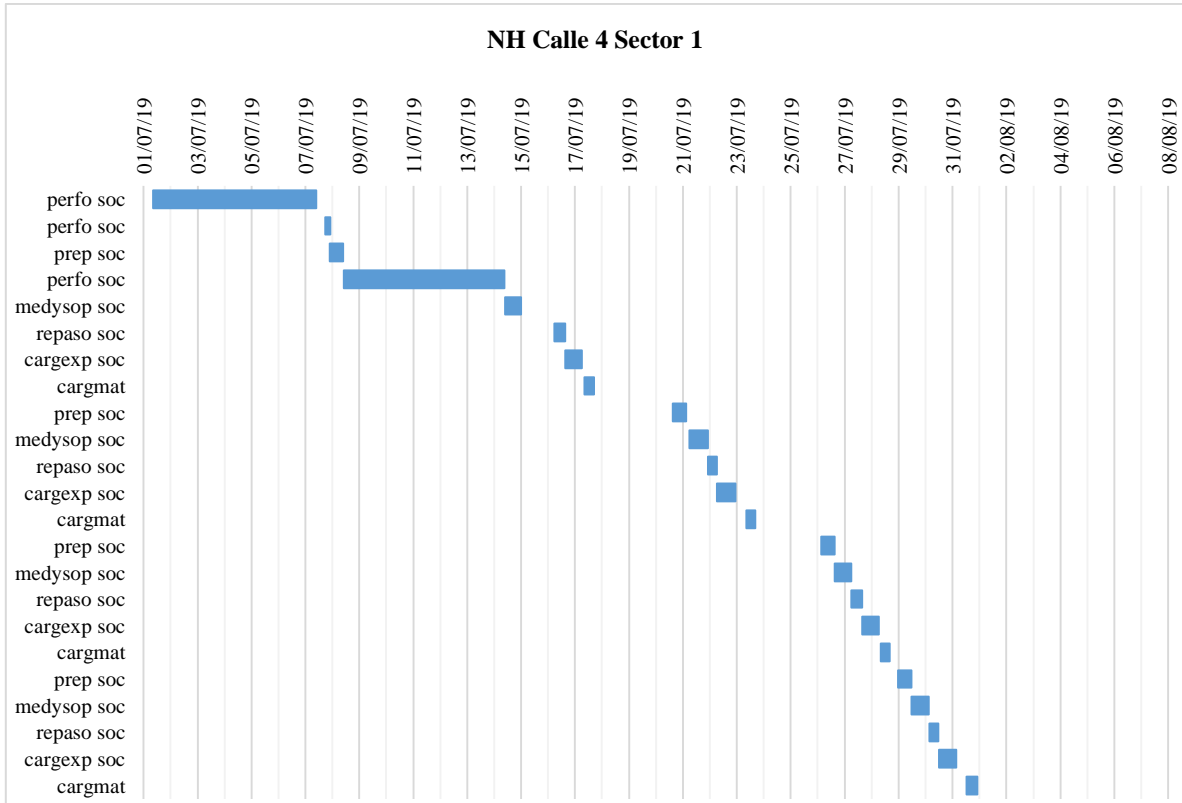


Figura 10-8 Carta Gantt de calle 4 Oeste, subnivel de hundimiento

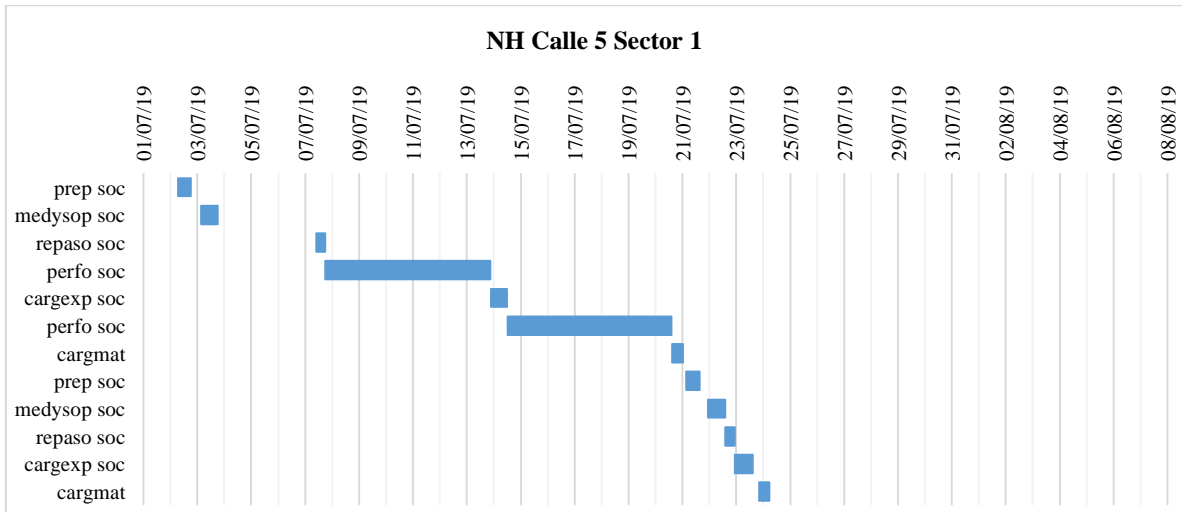


Figura 10-9 Carta Gantt de calle 5 Oeste, subnivel de hundimiento

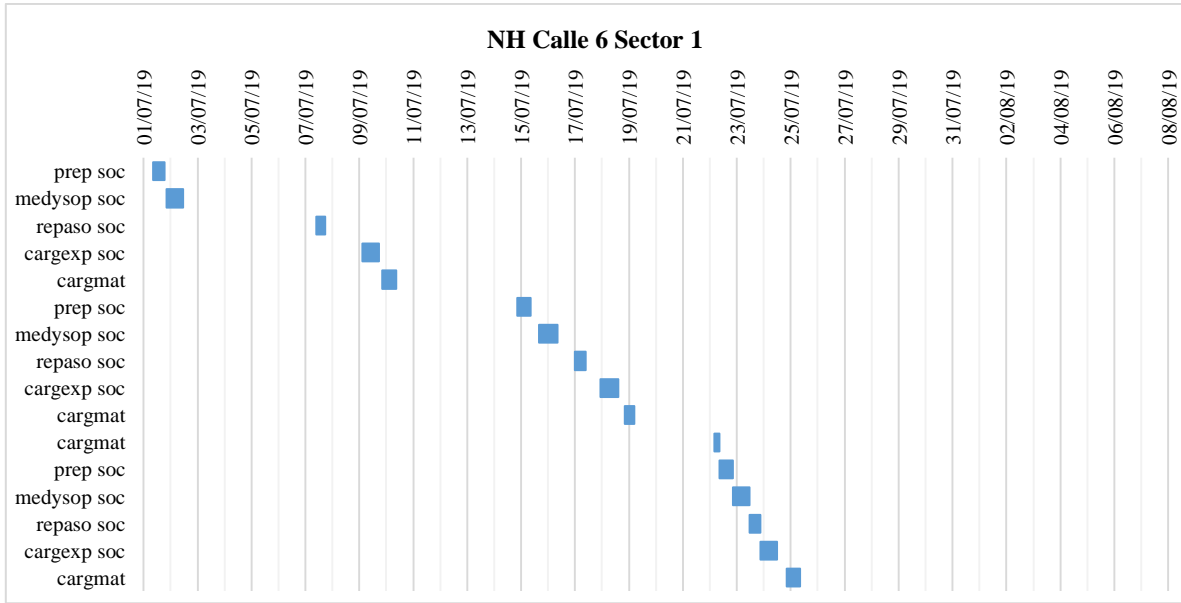


Figura 10-10 Carta Gantt de calle 6 Oeste, subnivel de hundimiento

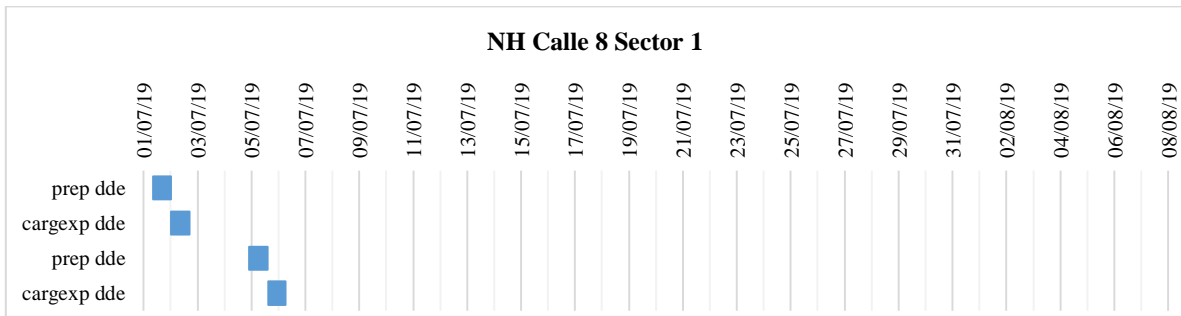


Figura 10-11 Carta Gantt de calle 8 Oeste, subnivel de hundimiento

### 10.5.2 Subnivel de hundimiento sector 2

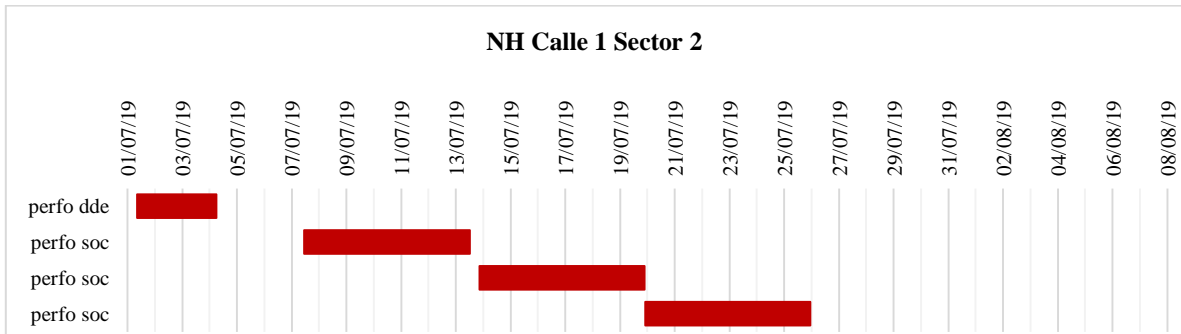


Figura 10-12 Carta Gantt de calle 1 Este, subnivel de hundimiento

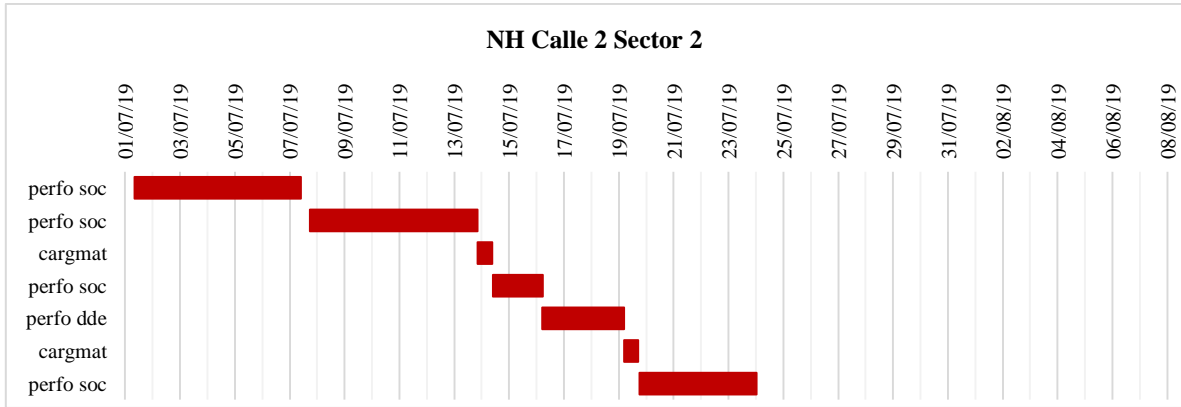


Figura 10-13 Carta Gantt de calle 2 Este, subnivel de hundimiento

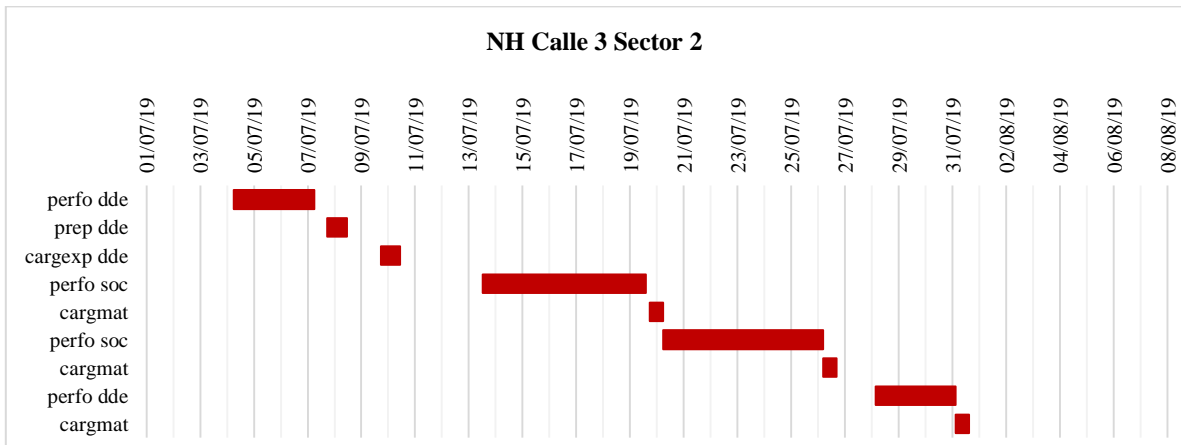


Figura 10-14 Carta Gantt de calle 3 Este, subnivel de hundimiento

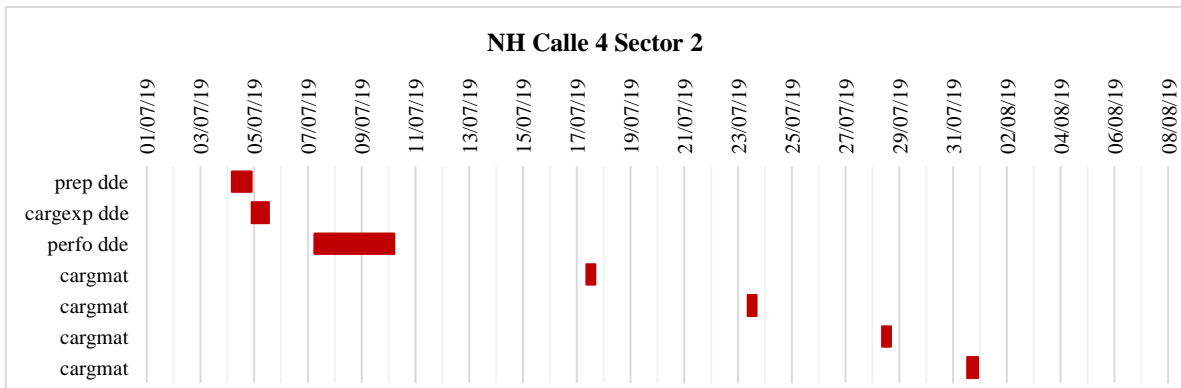


Figura 10-15 Carta Gantt de calle 4 Este, subnivel de hundimiento

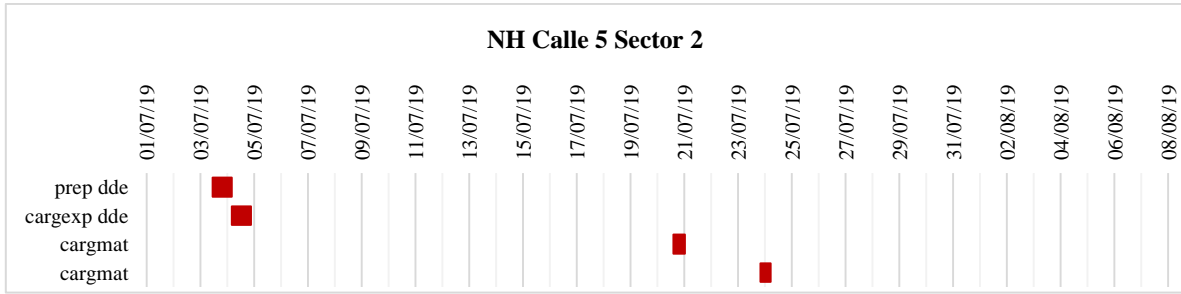


Figura 10-16 Carta Gantt de calle 5 Este, subnivel de hundimiento

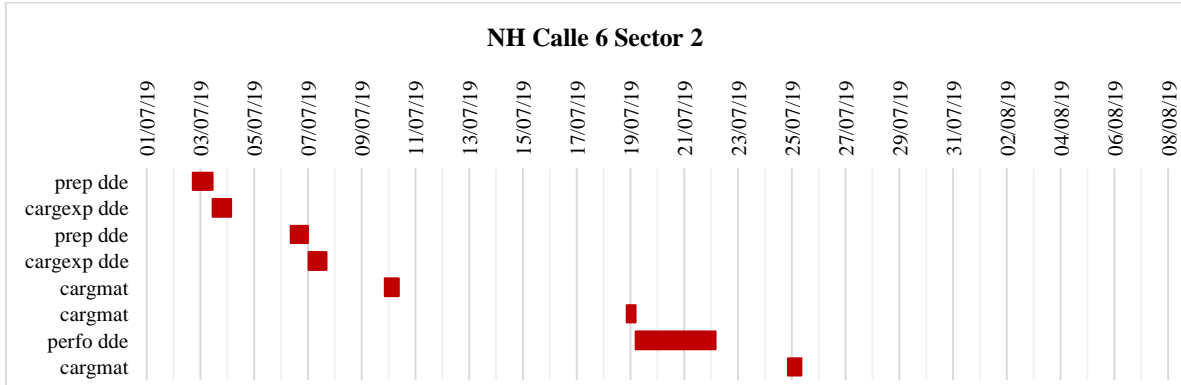


Figura 10-17 Carta Gantt de calle 6 Este, subnivel de hundimiento

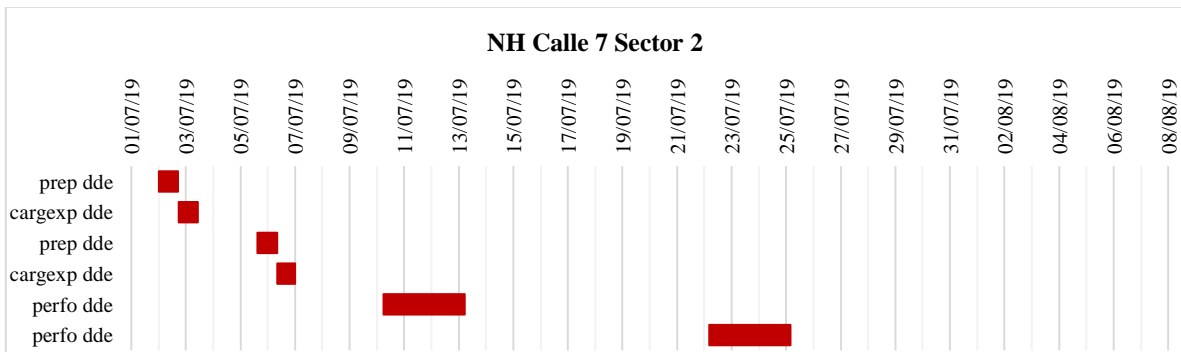


Figura 10-18 Carta Gantt de calle 7 Este, subnivel de hundimiento

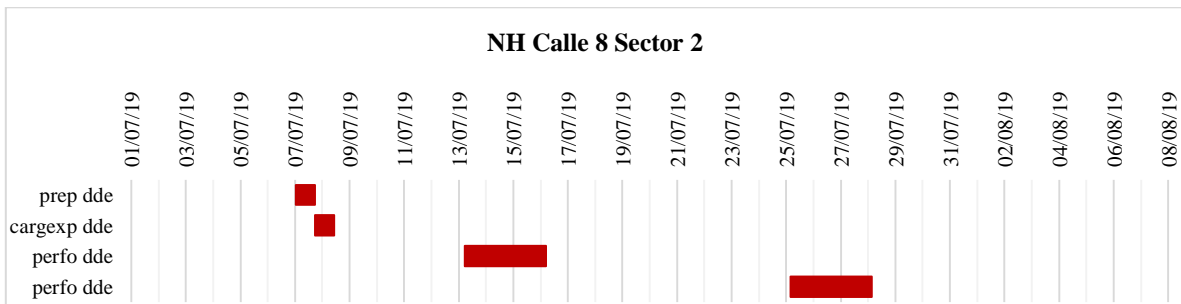


Figura 10-19 Carta Gantt de calle 8 Este, subnivel de hundimiento

### 10.5.3 Subnivel de producción

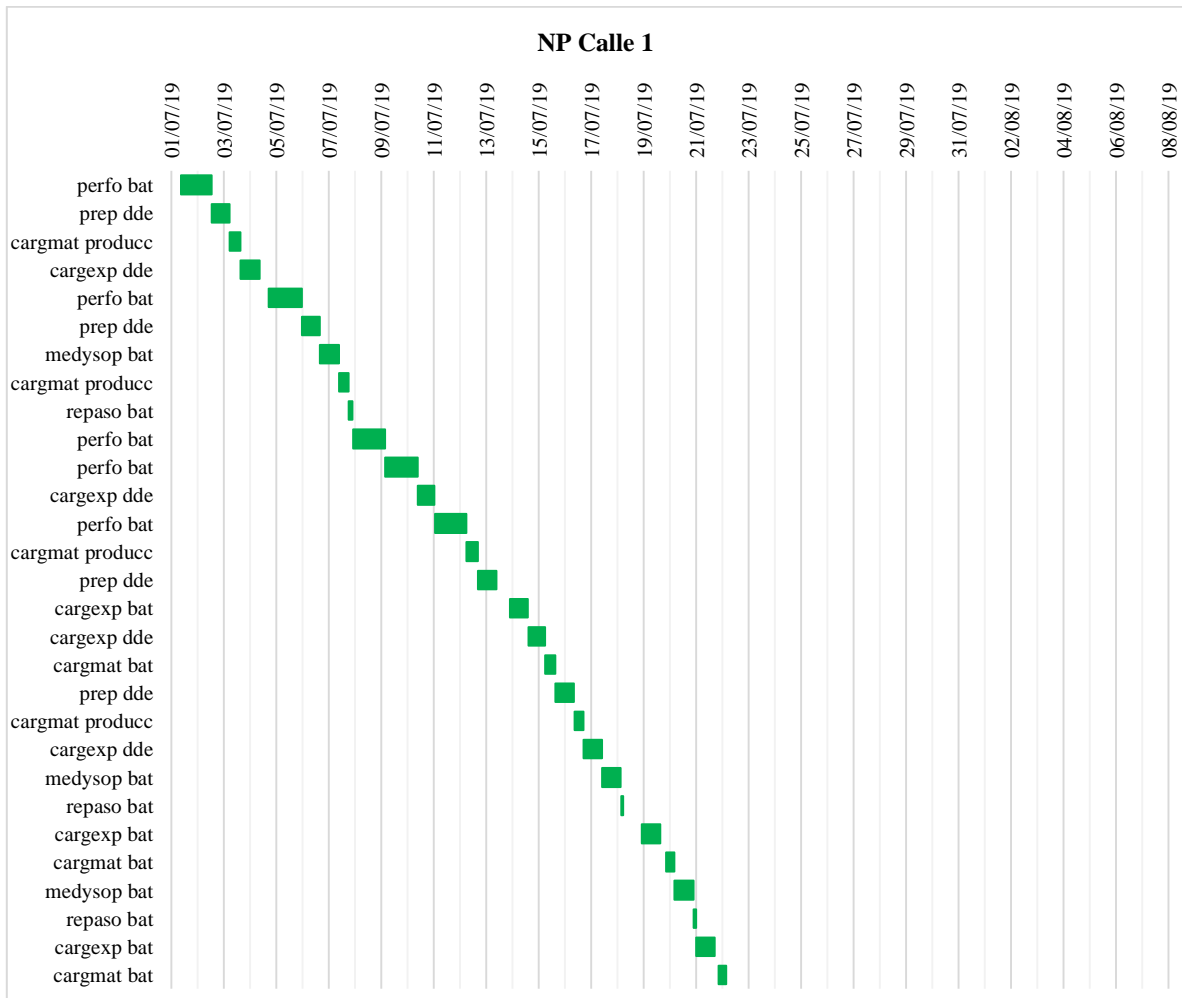


Figura 10-20 Carta Gantt de calle 1, subnivel de producción



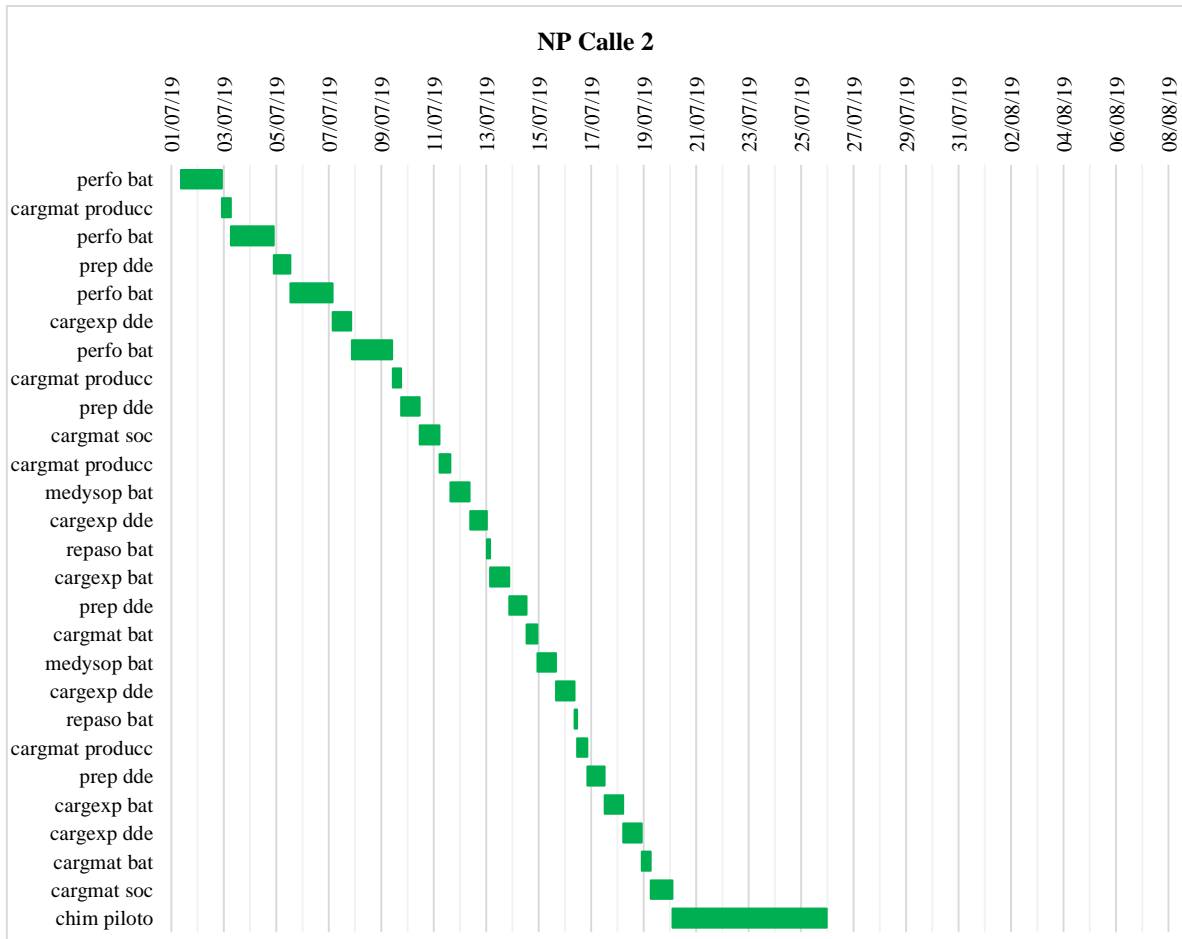


Figura 10-21 Carta Gantt de calle 2, subnivel de producción

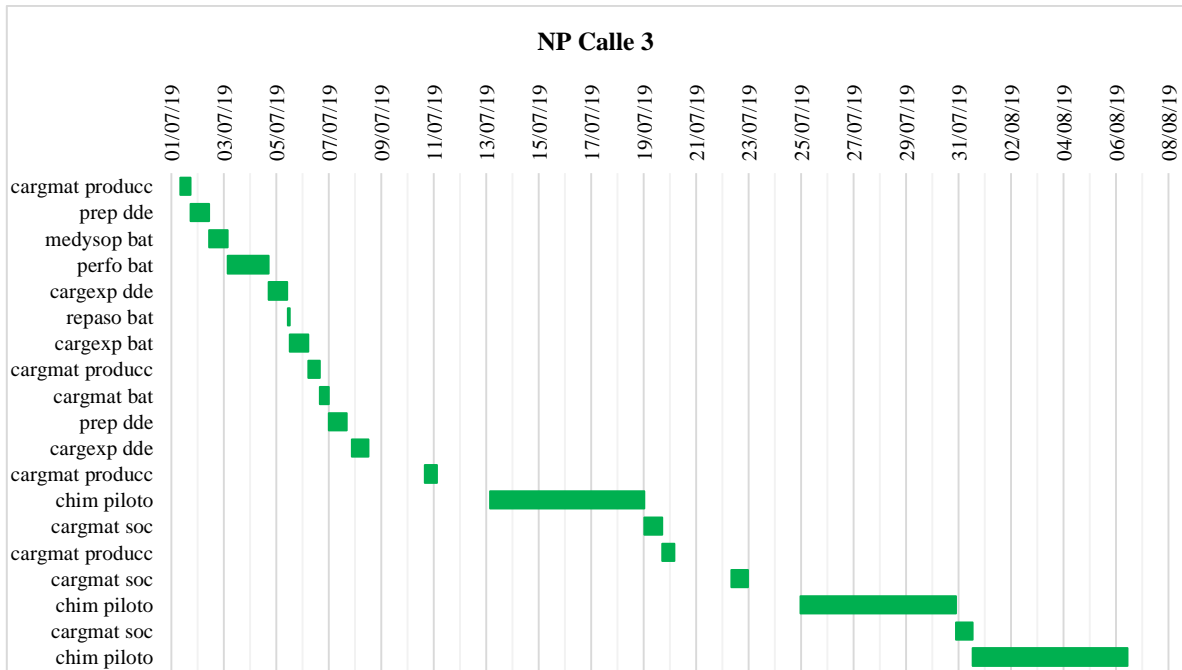


Figura 10-22 Carta Gantt de calle 3, subnivel de producción

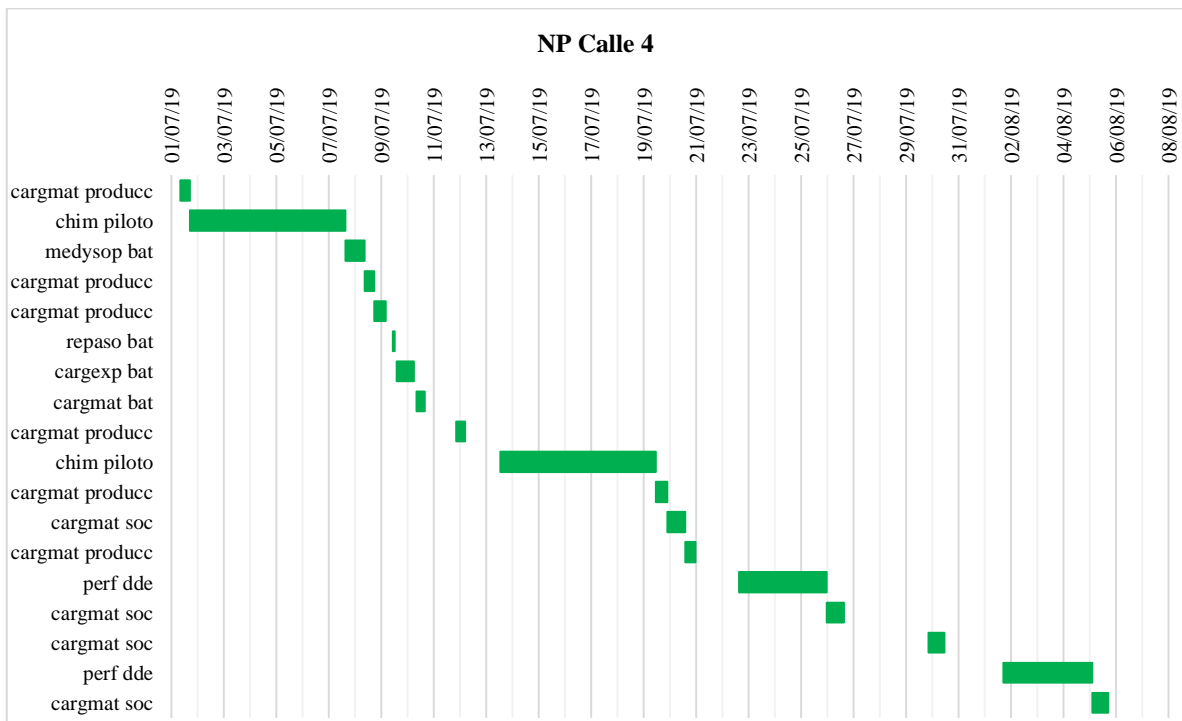


Figura 10-23 Carta Gantt de calle 4, subnivel de producción

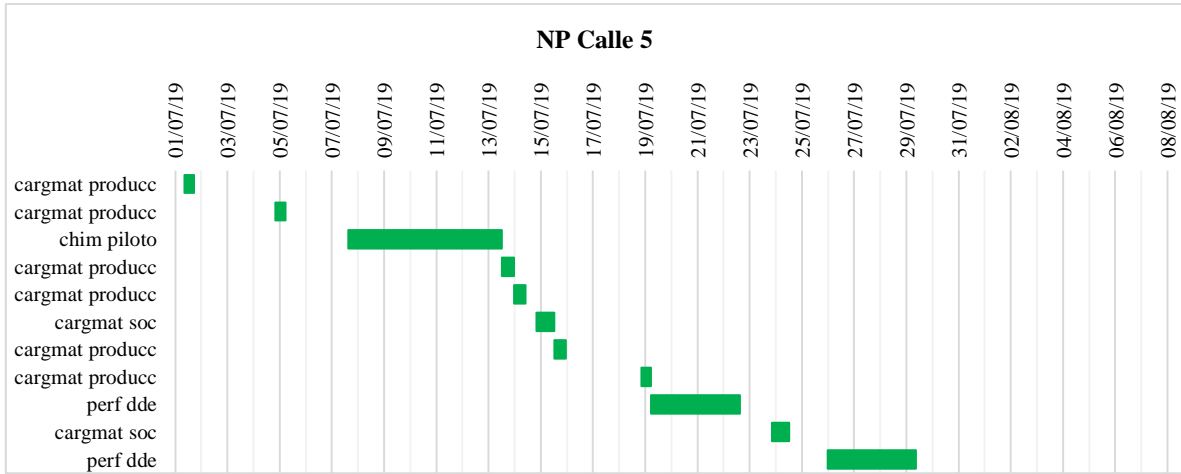


Figura 10-24 Carta Gantt de calle 5, subnivel de producción

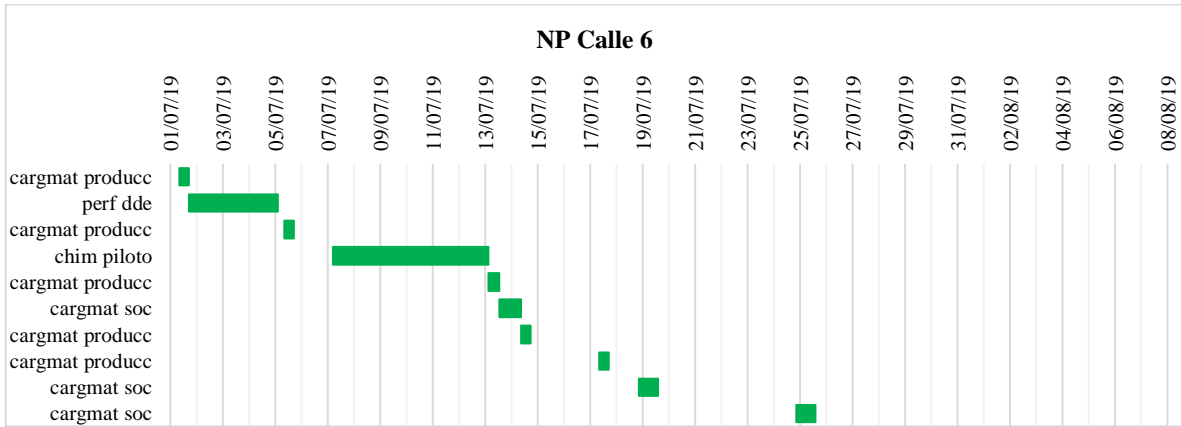


Figura 10-25 Carta Gantt de calle 6, subnivel de producción

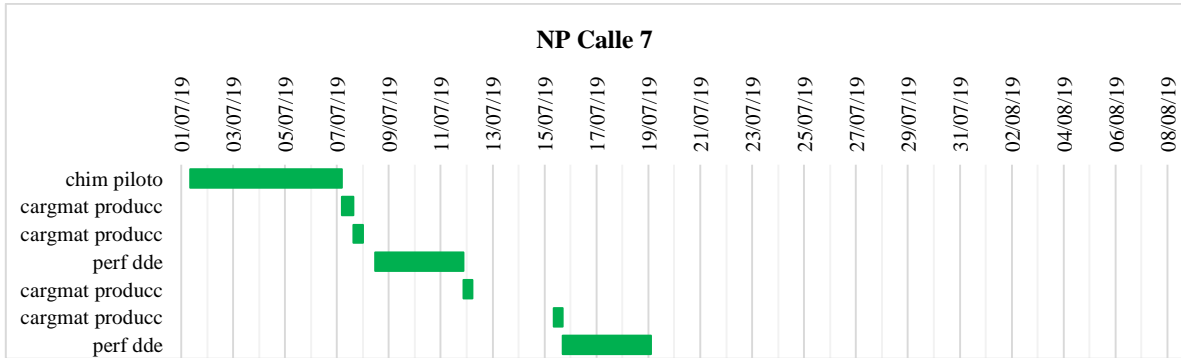


Figura 10-26 Carta Gantt de calle 7, subnivel de producción

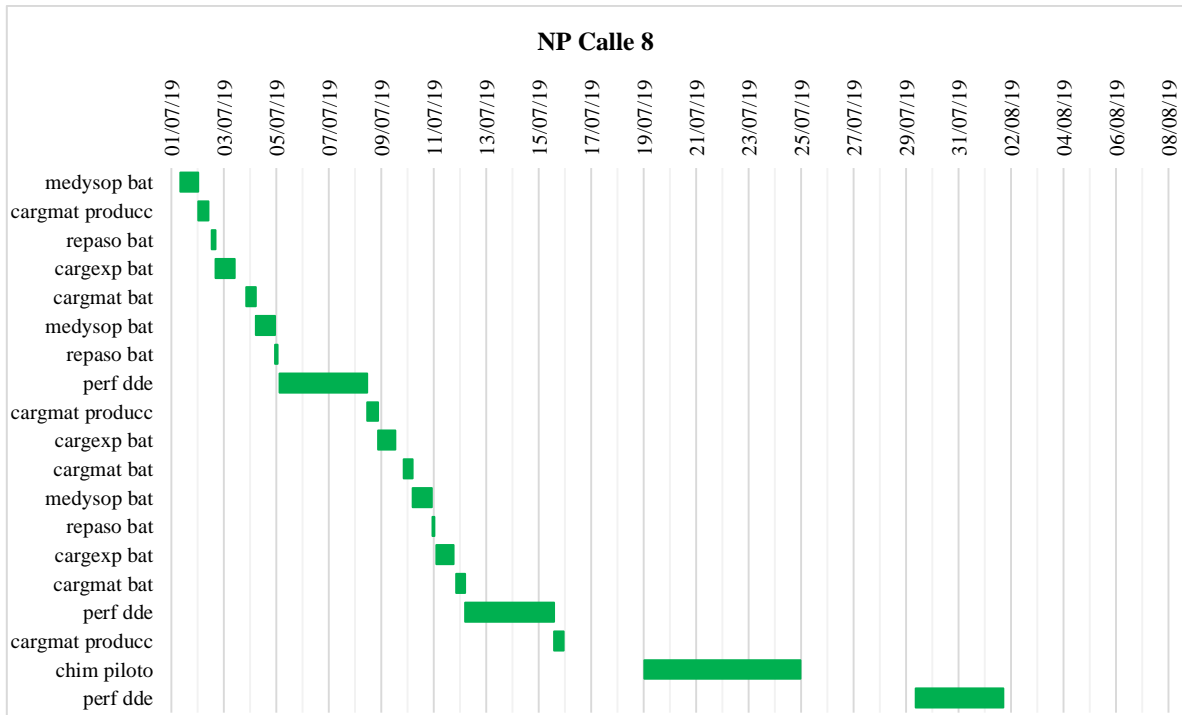


Figura 10-27 Carta Gantt de calle 8, subnivel de producción