



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

MODELAMIENTO DEL PLAN ANUAL DE PREPARACIÓN MINERA DE LA DIVISIÓN EL TENIENTE UTILIZANDO EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN UDESS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

TOMÁS ERNESTO GONZÁLEZ PONCE

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN DÍAZ FONTALBA

HANS GÖPFERT HIELBIG

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Tomás Ernesto González Ponce
FECHA: 17/01/2018
PROFESOR GUÍA: Nelson Morales Varela

MODELAMIENTO DEL PLAN ANUAL DE PREPARACIÓN MINERA DE LA DIVISION EL TENIENTE UTILIZANDO EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN UDESS

La planificación de la preparación minera es un proceso fundamental para dar sustento a los planes de producción de los proyectos mineros. En la División El Teniente de CODELCO, la Gerencia de Obras Mina es la encargada de construir los planes de preparación minera solicitados por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos en respuesta a los requerimientos de incorporación de área necesarios para mantener la producción de la división en cada uno de sus sectores productivos. Cada plan tiene un horizonte de planificación y de detalle diferente, uno de estos planes corresponde al Programa de Preparación Minera Revisión B (Rev. B), plan de horizonte anual, mensualizado, en el cuál se definen la totalidad de obras de preparación a realizar y controlar durante el periodo de ejecución. Dicho plan está sujeto a distintas restricciones tanto operativas, geomecánicas como de hitos a cumplir.

Actualmente, el equipo de planificación de la Gerencia de Obras Mina no cuenta con una metodología establecida para la construcción del Programa Rev. B, es decir, el proceso de elaboración de los planes de preparación está sujeto principalmente al criterio de los expertos. Bajo este contexto, el presente trabajo busca definir una metodología de construcción del Programa Rev. B que, entre otras cosas, permita reducir los tiempos actuales de elaboración del programa y generalizar criterios de constructibilidad. El trabajo se enfoca en modelar y replicar el actual Programa Rev. B 2017 elaborado para el sector Esmeralda Sur de la Mina El Teniente.

La metodología propuesta consta de dos etapas. En la primera, donde se realiza el modelamiento de las actividades de construcción, se incorporan restricciones de precedencia, restricciones operacionales y restricciones de hitos, para cada nivel de la mina. La segunda etapa de la metodología consiste en unir, a través de restricciones de precedencia o de recursos, los distintos niveles para finalmente obtener un modelo completo e integrado de la mina. Para realizar el agendamiento de las actividades se utiliza el agendador de actividades UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler), el cual a través de la implementación de un modelo de optimización es capaz de entregar resultados robustos minimizando el tiempo de ejecución del programa.

Los resultados del agendamiento entregados por UDESS fueron validados por los planificadores de la Gerencia, obteniendo un 100% de cumplimiento en todos los hitos de obras estipulados para el periodo de evaluación. Además, el agendamiento en su conjunto logra establecerse dentro de los 12 meses disponibles, incorporando restricciones geomecánicas y operacionales.

En conclusión, los resultados indican que fue posible establecer una metodología de modelamiento que permita la construcción del Programa Rev. B en UDESS, incorporando todas las restricciones que se requieren y utilizan actualmente. Además, la metodología permite disminuir considerablemente los tiempos de elaboración de los planes, permitiendo ganar tiempo de análisis de distintos escenarios antes de la ejecución del plan, agregando valor al proceso de planificación.

**ABSTRACT TO THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF:** Mining Engineer
BY: Tomás Ernesto González Ponce
DATE: 17/01/2018
THESIS ADVISOR: Nelson Morales Varela

MODELING THE ANNUAL MINING PREPARATION PLAN OF THE EL TENIENTE MINE USING THE UDESS OPTIMIZATION MODEL

Mining preparation planning is a fundamental process to support production plans of Mining projects. In División El Teniente (Codelco Chile), the Mine Works Management (Gerencia de Obras Mina) is in charge of developing the mining preparation plans requested by the Mining Resources and Development Management (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos) in response to the requirements for the incorporation of the necessary area to maintain the division's production in each one of its productive sectors. Every plan has a different planning and detail horizon, one of these plans corresponds to the Mining Preparation Program Revision B (Rev. B) (Programa de Preparación Minera Revisión B), annual horizon plan, monthly detailed, which defines the totality of the preparation works to be performed and controlled during the execution period. This plan is subject to various operational, geomechanical and milestones constraints.

Currently, the Mine Works Management planning team does not have an established methodology for the development of the Rev. B program, i.e. the process of elaboration of the preparation plans are mainly subject to judgment of the experts. In this context, the present work seeks to define a methodology for the development of the Rev. B program that, among other things, will make possible to reduce the construction actual times of the program and to generalize constructability criteria. The work focuses on modeling and replicating the actual Rev. B. Program 2017 developed for Esmeralda Sur sector of the El Teniente mine.

The proposed methodology consists of two stages. The first stage, where construction activities are modelled, incorporates precedence, operational and milestones constraints, for each level of the mine. The second stage consists on joining, through precedence or resource constraints, the different levels in order to get a complete and integrated model of the mine. The activities scheduler UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) is used to realize the activities schedule, which through the implementation of a model of an optimization model is able to deliver robust results minimizing the program's execution time.

The schedule results delivered by UDESS were validated by the management planners, obtaining 100% compliance of all milestones of the works stipulated for the evaluation period. In addition, the schedule manages to be established within the 12 months available, incorporating geomechanical and operational constraints.

In conclusion, the results indicate that it was possible to establish a modeling methodology that allows the development of the Rev. B. Program in UDESS, incorporating all constraints that are required and currently used. In addition, the methodology makes possible the considerable reduction of the plan's elaboration times, allowing to gain time for analysis of different scenarios before the execution of the plan, adding value to the planning process.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por haberme apoyado, ayudado y aguantado durante todos los años que duro esta etapa que hoy se acaba, a mi papa, mi mama, mi hermano Nicolás, mi tía Sole y mi tío Pancho, muchas gracias por todo.

A los tres miembros de mi comisión, mi profesor guía Nelson Morales por ayudarme cuando lo necesité, a Freddy Díaz por recibirme en la División y darme todas las facilidades posibles para llevar a cabo mi trabajo, y también, al profesor Hans por sus consejos, buena voluntad y apoyo cuando le comenté sobre mi trabajo.

A mis amigos de la universidad y del departamento, Francisco Arancibia, Nolberto Vega, Felipe Gutiérrez, Kevin Flores, etc, muchas gracias por todo. A Javiera Oyarce, por aguantarme en todos esos trabajos en que nos tocó estar juntos y ahora en los desafíos laborales que espero se vengán por delante. A Cristian Vallejos, amigo, colega y socio de negocios, gracias por recibirme en el “Hogar de Cristian” cuando me quedaba sin bus o cuando había que estudiar o hacer un trabajo, nos seguiremos viendo.

A Valentina Rojas, por la buena onda que tuviste conmigo desde mi primer día en Delphos cuando cruzando por la calle en Blanco me contaste que nos tocaría trabajar juntos, por toda la ayuda y los consejos, por esas conversaciones y madrugadas que nos pegamos en los viajes a Rancagua, por todo, muchas gracias.

A toda la gente del laboratorio Delphos, a Japi y Peter por hacerme reír con sus peleas todo el día, a Raulito y Manolo por esas conversaciones en japonés después de las seis, a chechito por hacerme reír con sus cosas de pókemon, a erótico por los infinitos memes que ha hecho, al maestro Nelis por la jugada maestra que hizo a mitad de año, a Max por la buena onda, a Consuelo, Gerson y Pierre, por ayudarme con UDESS cuando no me salía algo y en general a todos los miembros de Delphos por la buena onda, por recibirme, y por darme la oportunidad de ser parte del laboratorio y realizar mi trabajo de título ahí.

A todas las personas que me recibieron en la Gerencia de Obras Minas de la División el Teniente, a Marcelita por permitirme ir todos los días a robarle café, a Don Ivan por todos los planos e información facilitada, a Ignacio Alvarado y Natalia Campos por sus consejos y por la buena onda, a mi compañero memorista jefe Gonzalo Cañon por estar ahí para ayudar cuando se necesita, pero especialmente a Matias Navarro y Héctor Toro por la buena onda, disponibilidad y ayuda que me dieron desde antes de llegar a la GOBM, cuando el proyecto recién estaba comenzando.

Finalmente quiero agradecer a la División El Teniente, al AMTC y a CORFO, que mediante el proyecto “16CONTEC-67413” otorgaron el financiamiento necesario para hacer posible este trabajo.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.2.1	Objetivo Principal.....	1
1.2.2	Objetivos específicos.....	1
1.3	Alcances.....	2
1.4	Estructura del trabajo.....	2
2	Antecedentes Bibliográficos.....	4
2.1	Antecedentes Mina El Teniente.....	4
2.1.1	Ubicación y Acceso.....	4
2.1.2	Sectores productivos.....	5
2.1.3	Mina Esmeralda.....	6
2.2	Métodos de explotación.....	8
2.2.1	Método de Panel Caving.....	9
2.3	Preparación minera.....	14
2.3.1	Planificación de la preparación minera.....	14
2.4	Optimización en la planificación minera.....	16
2.5	UDESS.....	18
2.5.1	Actividades.....	19
2.5.2	Precedencias.....	19
2.5.3	Restricciones.....	20
3	Metodología.....	22
3.1	Etapa incremental.....	22
3.2	Etapa de modelamiento.....	23
3.2.1	Definición y limitación de la problemática.....	24
3.2.2	Análisis de información disponible.....	25
3.2.3	Definición de metodología de planificación.....	25
3.2.4	Modelamiento en UDESS.....	25
3.2.5	Análisis de resultados.....	25
3.2.6	Análisis de sensibilidad.....	26
3.2.7	Conclusiones y recomendaciones.....	26
4	Caso de Estudio.....	27
4.1	Antecedentes.....	27
4.1.1	Nivel de Hundimiento.....	27
4.1.2	Nivel de Producción.....	28
4.1.3	Sistema de Traspaso.....	29
4.1.4	Nivel de Acarreo.....	30
4.1.5	Subnivel de Ventilación.....	31
4.1.6	Precedencias.....	31
4.1.7	Restricciones.....	32
4.2	Modelamiento.....	36

4.2.1	Actividades	36
4.2.2	Precedencias	37
4.2.3	Restricciones.....	37
4.3	Resultados.....	42
4.3.1	Resultados globales del modelamiento.....	42
4.3.2	Actividades principales.....	47
4.3.3	Resultados análisis de sensibilidad.....	52
4.4	Análisis de Resultados	55
4.4.1	Modelamiento.....	55
4.4.2	Resultados del Programa Rev. B modelado en UDESS	57
4.4.3	Cumplimiento de Hitos definidos para el Programa Rev. B.....	58
4.4.4	Análisis de sensibilidad	62
5	Conclusiones.....	64
6	Trabajo Futuro	65
7	Recomendaciones.....	66
8	Bibliografía.....	67
9	Anexos.....	69
	Anexo 1: Modelamiento de precedencias	69
	Anexo 2: Detalle resultados agendamiento.....	72
	Anexo 3: Resultados análisis de sensibilidad	77

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación y ruta de acceso a la Mina El Teniente.....	5
Figura 2. Sectores productivos de la mina El Teniente.	6
Figura 3. Bloques 1 y 2 dentro de la Mina Esmeralda.	7
Figura 4. Estrategia de crecimiento e incorporación de área para la mina Esmeralda Sur.	8
Figura 5. Clasificación para los métodos de explotación subterráneos (Brady & Brown, 2004).....	9
Figura 6. Esquema de distribución de niveles dentro de un Panel Caving.....	10
Figura 7. Variante de Panel Caving Convencional.	11
Figura 8. Variante de Panel Caving con Hundimiento Previo.	12
Figura 9. Variante de Panel Caving con Hundimiento Avanzado.	13
Figura 10. Comparación gráfica de las obras de desarrollos horizontales incorporadas en el programa Rev. A con el Programa Rev. B.....	15
Figura 11. Diagrama que representa precedencias entre actividades.	20
Figura 12. Diagrama que representa el enfoque incremental propuesto para el modelo.....	23
Figura 13. Resumen de metodología propuesta para abordar el modelamiento.....	24
Figura 14. Resultado del proceso de discretización de una actividad.	36
Figura 15. Representación para construcción de restricciones de zona de transición.	39
Figura 16. Representación para construcción de restricciones de agrupación por bloques.	42
Figura 17. Distribución global de precedencias en el modelo.....	43
Figura 18. Distribución de precedencias por nivel.....	43
Figura 19. Distribución de precedencias por Nivel en Porcentaje.	44
Figura 20. Precedencias de todas las actividades principales del sector Esmeralda Sur. Se incluye la interacción entre niveles.....	45
Figura 21. Distribución global de restricciones en el modelo.	46
Figura 22. Distribución de restricciones por nivel.	46
Figura 23. Distribución de restricciones por nivel en porcentaje.	47
Figura 24. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Hundimiento.....	47
Figura 25. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Producción.	48
Figura 26. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Nivel de Producción.....	48
Figura 27. Comparación de agendamientos para los Muros de Confinamiento del Nivel de Producción.	48
Figura 28. Comparación de agendamientos para los Puntos de Extracción del Nivel de Producción.	49
Figura 29. Comparación de agendamientos para los Blindajes de Pique del Sistema de traspaso.....	49
Figura 30. Comparación de agendamientos para la Habilitación Hidráulica de los Buzones del Sistema de traspaso.....	50
Figura 31. Comparación de agendamientos para la Construcción de los Buzones del Sistema de traspaso.	50
Figura 32. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Acarreo.....	51
Figura 33. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Nivel de Acarreo.....	51
Figura 34. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Subnivel de Ventilación.	51
Figura 35. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Subnivel de Ventilación.....	52
Figura 36. Porcentajes de hitos que lograron ser adelantados en las dos pruebas realizadas.....	53
Figura 37. Porcentajes de actividades pertenecientes a los hitos que lograron ser adelantados en las dos pruebas realizadas.	54
Figura 38. Diagrama representativo de problema asociado a discretización de actividades.....	55
Figura 39. Agendamiento en UDESS para desarrollos horizontales de Nivel de Hundimiento.	58
Figura 40. Agendamiento Rev. B original para desarrollos horizontales del Nivel de Hundimiento.	59
Figura 41. Agendamiento de UDESS para desarrollos horizontales del Nivel de Producción.	59
Figura 42. Agendamiento de UDESS para puntos de extracción del Nivel de Producción.	60
Figura 43. Agendamiento de UDESS para muros de confinamiento del Nivel de Producción.	60
Figura 44. Agendamiento de UDESS para la habilitación hidráulica del Sistema de Traspaso.	61

Figura 45. Agendamiento de UDESS para la habilitación de ventiladores del Subnivel de Ventilación. ...	61
Figura 46. Precedencias de actividades dentro del Nivel de Hundimiento.	69
Figura 47. Precedencias de las actividades principales dentro del Nivel de Producción.	69
Figura 48. Precedencias de las actividades principales dentro del Nivel de Acarreo.	70
Figura 49. Precedencias de las actividades principales dentro del Subnivel de Ventilación.	70
Figura 50. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso desde el Nivel de Acarreo.	70
Figura 51. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso desde el Nivel de Producción.	71
Figura 52. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso en el desde el Nivel de Producción.	71

Índice de Tablas

Tabla i. Reservas Plan 2017 sector Bloque 1 Esmeralda.	8
Tabla ii. Reservas Plan 2017 sector Bloque 2 Esmeralda.	8
Tabla iii. Actividades fortificación mecanizada.	19
Tabla iv. Resumen de obras del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.	27
Tabla v. Hitos para planificación en Nivel de Hundimiento.	28
Tabla vi. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Producción.	28
Tabla vii. Hitos para planificación en Nivel de Producción.	29
Tabla viii. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Sistema de Traspaso.	29
Tabla ix. Hito para planificación en Sistema de Traspaso.	30
Tabla x. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Acarreo.	30
Tabla xi. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Subnivel de Ventilación.	31
Tabla xii. Hitos para planificación en Sistema de Traspaso.	31
Tabla xiii. Listado de recursos utilizados en el modelamiento.	34
Tabla xiv. Porcentajes utilizados en los ramp-up de rendimientos.	35
Tabla xv. Resumen modelamiento realizado en UDESS.	42
Tabla xvi. Tabla comparativa de cumplimiento de hitos para los dos programas.	62
Tabla xvii. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento. ...	72
Tabla xviii. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Producción.	73
Tabla xix. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Sistema de Traspaso.	74
Tabla xx. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.	75
Tabla xxi. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Subnivel de Ventilación. .	76
Tabla xxii. Detalle de las dos pruebas realizadas en el análisis de sensibilidad.	77

1 Introducción

El presente trabajo, que permite optar al título de Ingeniero Civil de Minas, se enmarca en el contexto del proyecto “16CONTEC-67413 Herramienta de secuenciamiento con incorporación de la variabilidad de factores operativos para planificación minera” financiado por CORFO y desarrollado en conjunto por CODELCO CHILE – División El Teniente, Proactive Office y el Laboratorio DELPHOS de Planificación Minera, dependiente de la Universidad de Chile.

1.1 Contexto

El presente estudio surge de la necesidad presentada por la Gerencia de Obras Mina (GOBM) de la División El Teniente de optimizar y desarrollar una metodología de construcción para el Plan de Preparación Minera Revisión B que se construye anualmente en el área.

En la actualidad el plan es realizado por los planificadores del área, pero no existe una metodología definida para su construcción, solo se utilizan criterios comunes y rendimientos históricos conocidos.

Dentro de las líneas de investigación del laboratorio DELPHOS existe una enfocada en el desarrollo de herramientas computacionales que sean capaces de cumplir y ser solución a los diferentes problemas que enfrenta la industria. Una de esas herramientas es UDESS, un secuenciador de actividades que mediante un algoritmo de optimización lineal es capaz de entregar agendamientos o cartas Gantt óptimas. Este programa será el utilizado para los fines de optimización del proyecto.

Se espera que como complemento al trabajo principal de modelado y optimización se logre realizar un levantamiento completo (necesario para la modelación) de las actividades de preparación, secuencia constructiva y método de planificación actual del programa Rev. B, ya que, en la actualidad, esta información no está documentada ni definida completamente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

El objetivo principal del trabajo consiste en crear una metodología de modelamiento, modelar, optimizar y obtener el mejor plan anual del Programa de Preparación Mina Revisión B.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un levantamiento del proceso de planificación del Programa Rev. B para modelarlo en UDESS.
- Implementar Programa Rev. B en UDESS, eventualmente extendiendo los alcances actuales de esta herramienta computacional a fin de lograr incorporar elementos propios de este programa.
- Validar la implementación computacional en un sector específico de El Teniente, a ser definido en las etapas iniciales del trabajo.

1.3 Alcances

Los alcances definidos para el trabajo se presentan a continuación:

- El modelo se construirá y validará para la mina Esmeralda, específicamente el sector Esmeralda Sur, bloques 1 y 2.
- Se considerarán todos los niveles de la mina, estos son: Nivel de hundimiento, Nivel de producción, Subnivel de ventilación, Nivel de Acarreo y Sistema de Traspaso.
- El nivel de detalle de cada actividad de preparación será el mismo considerado en el actual programa Rev. B.
- No se considerarán incertidumbres dentro del modelo.
- Se utilizará criterio de experto y rendimientos históricos para definir las duraciones de las actividades y las tasas máximas de avance.

1.4 Estructura del trabajo

El trabajo será presentado a bajo la siguiente estructura.

1. Introducción

Se presenta el contexto, objetivos y alcances del trabajo realizado.

2. Antecedentes Bibliográficos

Se muestran los antecedentes relacionados a la División El Teniente, métodos de explotación, preparación minera, optimización matemática y el programa utilizado para la optimización del plan, UDESS.

3. Metodología

Se explican las dos grandes etapas que componen la metodología y las subetapas respectivas.

4. Caso de Estudio

En esta sección se aplica la metodología definida previamente, definiendo los antecedentes utilizados, la explicación de cómo se realizó el modelamiento, los resultados obtenidos y su respectivo análisis.

5. Conclusiones

Se muestran las conclusiones del trabajo, derivadas de los resultados obtenidos y de su análisis.

6. Trabajo Futuro

Se muestra una serie de puntos en los que el trabajo realizado podría ser extendido, optimizado o complementado.

7. Recomendaciones

Se muestra una serie de recomendaciones para ser utilizadas en caso de que se deba modelar el mismo sector u otro dentro de la mina.

8. Referencias

Se listan las referencias utilizadas para la elaboración del trabajo.

9. Anexos

Se muestra en detalle parte de los resultados presentados de manera resumida en el cuerpo principal del trabajo.

2 Antecedentes Bibliográficos

Se presentan los antecedentes relacionados a la Mina El Teniente como también los antecedentes bibliográficos necesarios para la correcta comprensión del trabajo.

2.1 Antecedentes Mina El Teniente

El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del mundo. Comenzó a ser explotado en 1905, y ya cuenta con más de 3,000 kilómetros de galerías subterráneas.

Pese a que la mina ha sido trabajada desde el periodo prehispánico, su explotación industrial no comenzó sino recién en el año 1905 cuando William Braden adquirió los derechos de la mina, fundando la compañía *Rancagua Mines* con sede en Estados Unidos. Ese mismo año la empresa cambio de nombre, pasando a llamarse *Braden Copper Company*. En el año 1916, la empresa *Kennecott Corporation* se hizo con el 95% de las acciones de la *Braden Copper Company*, pasando a ser los nuevos propietarios de la mina. Desde el año 1967 hasta 1971, el yacimiento de El Teniente fue parte del proceso de nacionalización del cobre que se llevó a cabo en el país, así, a partir del día 11 de julio de 1971, el estado de Chile a través de CODELCO, paso a ser el único dueño de la mina, situación que se mantiene hasta la actualidad.

División El Teniente es una de las 8 Divisiones de CODELCO, en al año 2016 alcanzó una producción anual de 475,339 toneladas métricas de cobre fino, lo que representa un 26% de la producción anual total de la corporación. Cuenta con 1,583 Mt en reservas totales con una ley de cobre total promedio de 0.89%, por sobre el promedio divisional que alcanza un valor de 0.68% (Codelco, 2016).

Actualmente en la División El Teniente se encuentra en construcción el proyecto estructural “Nuevo Nivel Mina”, con el cual se espera sumar reservas que extiendan la vida útil de la división en más de 50 años. La construcción actual del proyecto presenta un avance del 44% y su puesta en marcha está estimada para el año 2023.

2.1.1 Ubicación y Acceso

La Mina El Teniente está ubicada en la comuna de Machalí, sexta Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, entre los 2,200 y 3,200 metros sobre el nivel del mar, a aproximadamente 50 kilómetros la ciudad de Rancagua, ver Figura 1.

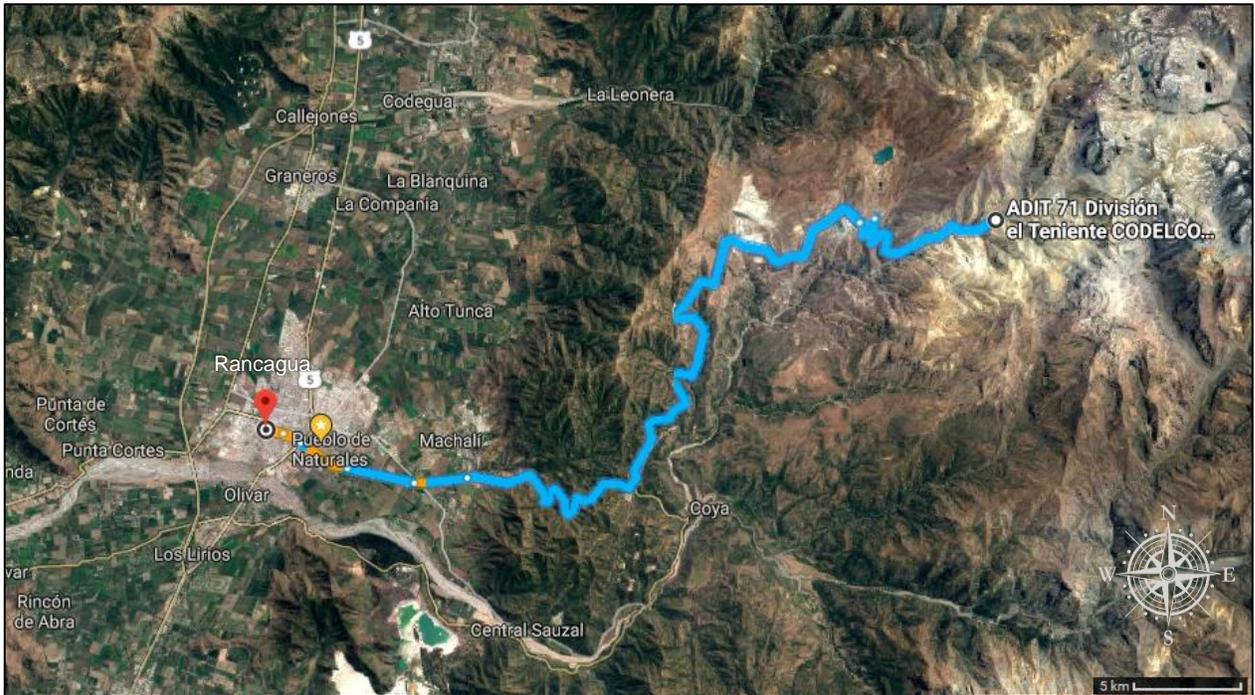


Figura 1. Ubicación y ruta de acceso a la Mina El Teniente.

El principal acceso a la mina desde la zona residencial de Machalí y Rancagua corresponde a la Carretera Presidente Eduardo Frei Montalva (H-25), conocida también como la Carretera del Cobre. La longitud total de la vía es de 63 kilómetros, que van desde Rancagua hasta las instalaciones de la Mina. En el kilómetro 21 de la vía se encuentra ubicado el Control Maitenes de la División El Teniente, punto desde el cual, el camino deja de ser de acceso público y solo se permite el acceso a personal y vehículos autorizados.

2.1.2 Sectores productivos

La operación actual de la división está compuesta por la explotación de nueve minas subterráneas y un rajo abierto. Las nueve minas a su vez están compuestas por doce sectores productivos, los que en su conjunto representan una producción anual promedio de aproximadamente 142,000 tpd. Algunos de estos sectores productivos son: Esmeralda, Reservas Norte, Dacita, Pilar Norte, Diablo Regimiento, Sur Andes Pipa, Pacifico Superior, entre otros.

Gráficamente la ubicación de los sectores dentro de la mina se puede ver en la Figura 2.

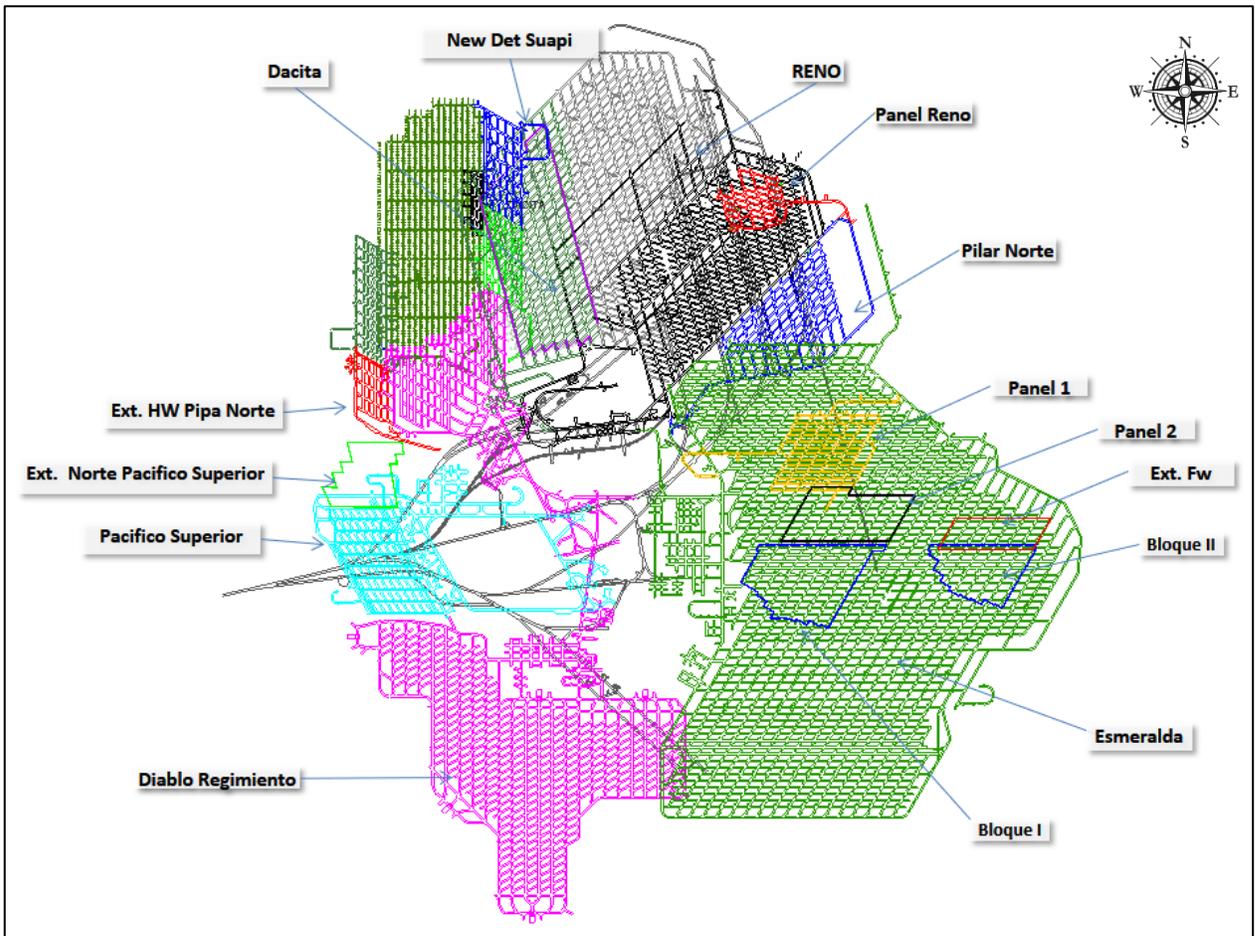


Figura 2. Sectores productivos de la mina El Teniente.

Con respecto al Nuevo Nivel Mina, el atraso en su puesta en marcha ha llevado a la necesidad de implementar los proyectos PDA (Proyectos de Desarrollo Alternativo) los cuales permitirán solventar el agotamiento de los actuales proyectos que están en ejecución, pero cercanos al fin de su vida útil. Dentro de dichos proyectos se encuentran el proyecto Diamante, Bajo Diablo, Andesita, Recursos Norte, entre otros.

2.1.3 Mina Esmeralda

La mina Esmeralda corresponde a una de las nueve minas de la División El Teniente. A su vez, esta mina tiene 4 sectores productivos: Esmeralda Sur, Bloque 2 Extensión Norte, Bloque 2 Extensión Fw y Panel 2.

Está ubicada al este del yacimiento, bajo el área de producción agotada del sector Teniente 4 a una altitud de 2.211 msnm (Nivel de Hundimiento).

La explotación del sector se realiza mediante el método de Panel Caving con variante de Hundimiento Convencional, además de un preacondicionamiento completo mediante perforaciones ascendentes desde el Nivel de Hundimiento y pozos descendentes en el Nivel de Producción, orientados al control sísmico entorno a fallas y contactos litológicos.

La variante de hundimiento convencional aplicada a este sector presenta una zona de transición definida por el avance del frente de socavación, de aproximadamente 70 m para todos los niveles.

Las obras civiles deben realizarse en zona de preminería, por lo que los puntos de extracción, muros de confinamiento, y los sistemas de traspaso deben estar construidos y terminados, fuera de la zona de transición.

2.1.3.1 Esmeralda Sur

Esmeralda Sur es uno de los 4 sectores productivos de la Mina Esmeralda, presenta una producción promedio de 35.407 tpd, con una ley de cobre total de 0.93% y una ley de molibdeno de 0.021%. Dicha producción corresponde a aproximadamente un 24.9% de la producción total de la División.

El crecimiento se realiza a través de una macrosecuencia de dos bloques (Bloque 1 y Bloque 2) desde la Zanja 29 (Z-29) hacia el sur, estando el Bloque 1 comprendido entre la Calle 21 (C-21) y la C-37, mientras que el Bloque 2 desde la C-43 a la C-61, tal como se puede ver en la Figura 3.

La secuencia considera un avance perpendicular a las estructuras principales del sector, Falla P para el caso del Bloque 1 y Dique de Lamprófido para el caso del Bloque 2.

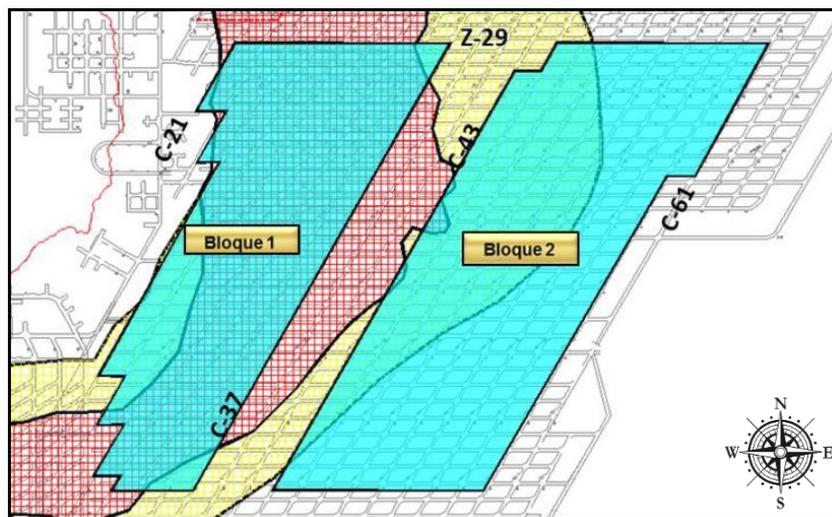


Figura 3. Bloques 1 y 2 dentro de la Mina Esmeralda.

La capacidad de incorporación definida para el sector es de 2 bateas máximo al mes por bloque, tal como se puede ver en la Figura 4.

El detalle de las reservas incorporadas y quebradas para el Bloque 1 y para el Bloque 2 se puede ver en la Tabla i y en la Tabla ii respectivamente.

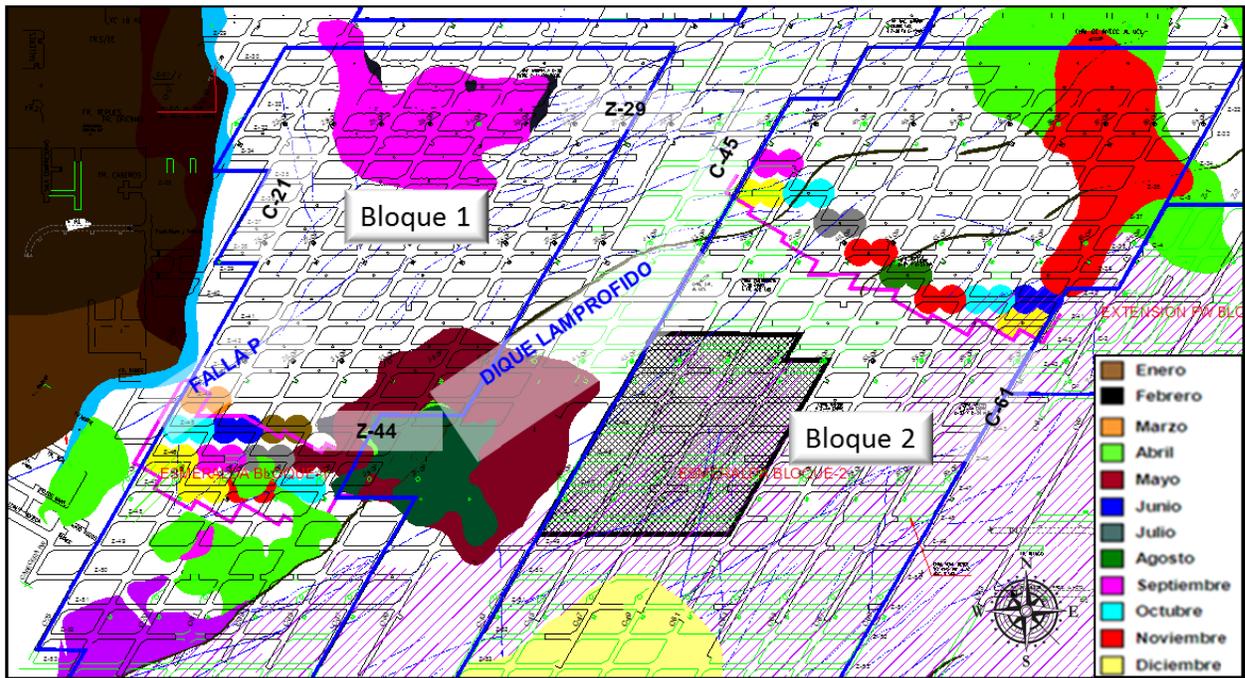


Figura 4. Estrategia de crecimiento e incorporación de área para la mina Esmeralda Sur.

Tabla i. Reservas Plan 2017 sector Bloque 1 Esmeralda.

Antecedentes al 31-dic-2016			Antecedentes incorporación 2017			
Puntos abiertos	Área abierta	Reservas quebradas	Puntos nuevos	Área nueva	Reservas incorporadas	Reservas quebradas
unidad	m ²	Kt	unidad	m ²	Kt	Kt
124	37.926	9.363	22	8.097	4.227	7.967

Tabla ii. Reservas Plan 2017 sector Bloque 2 Esmeralda.

Antecedentes al 31-dic-2016			Antecedentes incorporación 2017			
Puntos abiertos	Área abierta	Reservas quebradas	Puntos nuevos	Área nueva	Reservas incorporadas	Reservas quebradas
unidad	m ²	Kt	unidad	m ²	Kt	Kt
128	41.812	15.179	20	6.551	3.845	11.900

2.2 Métodos de explotación

Existen dos formas de realizar minería, a cielo abierto o de forma subterránea. Dentro de la minería subterránea, se han desarrollado múltiples métodos de explotación, los cuales son aplicables según las condiciones propias de cada yacimiento. Una forma de clasificar los métodos subterráneos es la presentada por Brady & Brown, donde la clasificación se realiza por tipo de soporte, definiendo tres categorías de métodos: soportado por pilares, artificialmente soportado y sin soporte o por hundimiento.

Gráficamente, la clasificación propuesta se puede ver en el diagrama de la Figura 5.

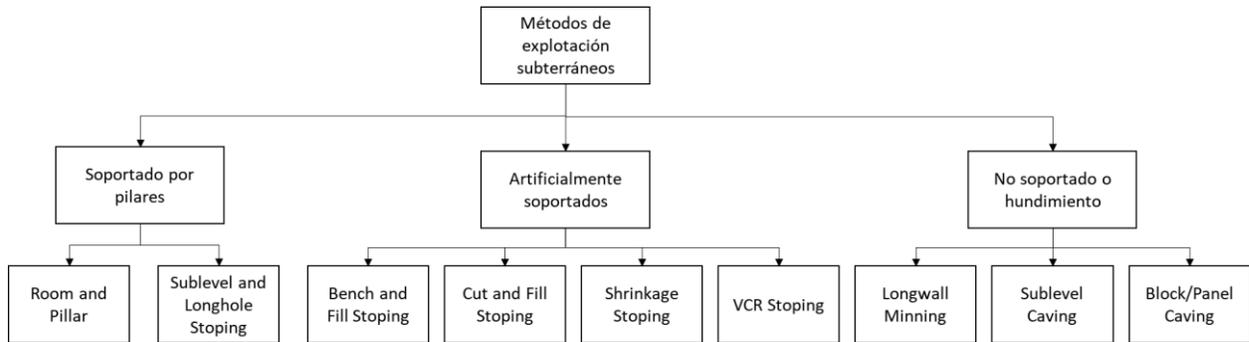


Figura 5. Clasificación para los métodos de explotación subterráneos (Brady & Brown, 2004).

2.2.1 Método de Panel Caving

Panel Caving es un método de explotación subterráneo para yacimientos masivos. Es de bajo costo y alta productividad por lo que es económicamente atractivo en comparación al resto de los métodos subterráneos.

El principio del método consiste en realizar un corte basal horizontal al macizo rocoso, con lo cual, aprovechando el efecto gravitacional de la tierra, se produce una propagación del hundimiento en altura.

Los métodos de Block y Panel Caving utilizan el mismo principio de socavación para realizar la fragmentación del mineral. La principal diferencia entre ambos métodos es que para el caso del Panel Caving no se realiza una socavación de todo el bloque a extraer, sino que se realiza de manera parcial y constante en el tiempo, esto genera un frente de socavación dinámico, que se desplaza en función de la incorporación de área.

La utilización de este método requiere una serie de niveles que den el soporte necesario para poder realizar la extracción de manera satisfactoria. A continuación, se entrega una breve reseña de los niveles principales.

- Nivel de Hundimiento (NH)

Nivel en el cual se produce la socavación del macizo rocoso. Dicha socavación se lleva a cabo mediante perforación y tronadura. Realizada la socavación, se realiza la conexión con el Nivel de Producción a través de las bateas, punto en el cual se extrae el mineral fragmentado.

- Nivel de Producción (NP)

Nivel en donde se realiza la extracción del mineral fragmentado. Esta extracción se realiza utilizando equipos mecanizados (LHD) los cuales extraen el mineral desde los puntos de extracción para posteriormente depositarlo en piques de traspaso.

- Nivel de Acarreo (NA)

En este nivel se recolecta y transporta el material proveniente del Nivel de Producción y que ha descendido a través de los sistemas de traspaso. El transporte usualmente se realiza mediante camiones o ferrocarril, siendo este último el sistema que se usa en Esmeralda.

- Subnivel de Ventilación (SNV)

Subnivel mediante el cual se realiza la inyección y extracción de aire, hacia y desde la mina respectivamente. Su diseño estará dado según los requerimientos propios de la mina en términos de los caudales necesarios para la extracción efectiva del aire viciado que se genera por la ejecución de las diferentes actividades dentro de la mina.

Además de los niveles recién mencionados, pueden existir otros según sean las necesidades propias de cada operación, por ejemplo, un Nivel de Preacondicionamiento en donde se centren estas actividades de preparación, o un Nivel de Drenaje que permita el mejor manejo de las aguas dentro de la mina. La Figura 6 muestra un ejemplo de una mina de Panel Caving, la distribución de los niveles en sus diferentes cotas y los elementos que conectan dichos niveles.

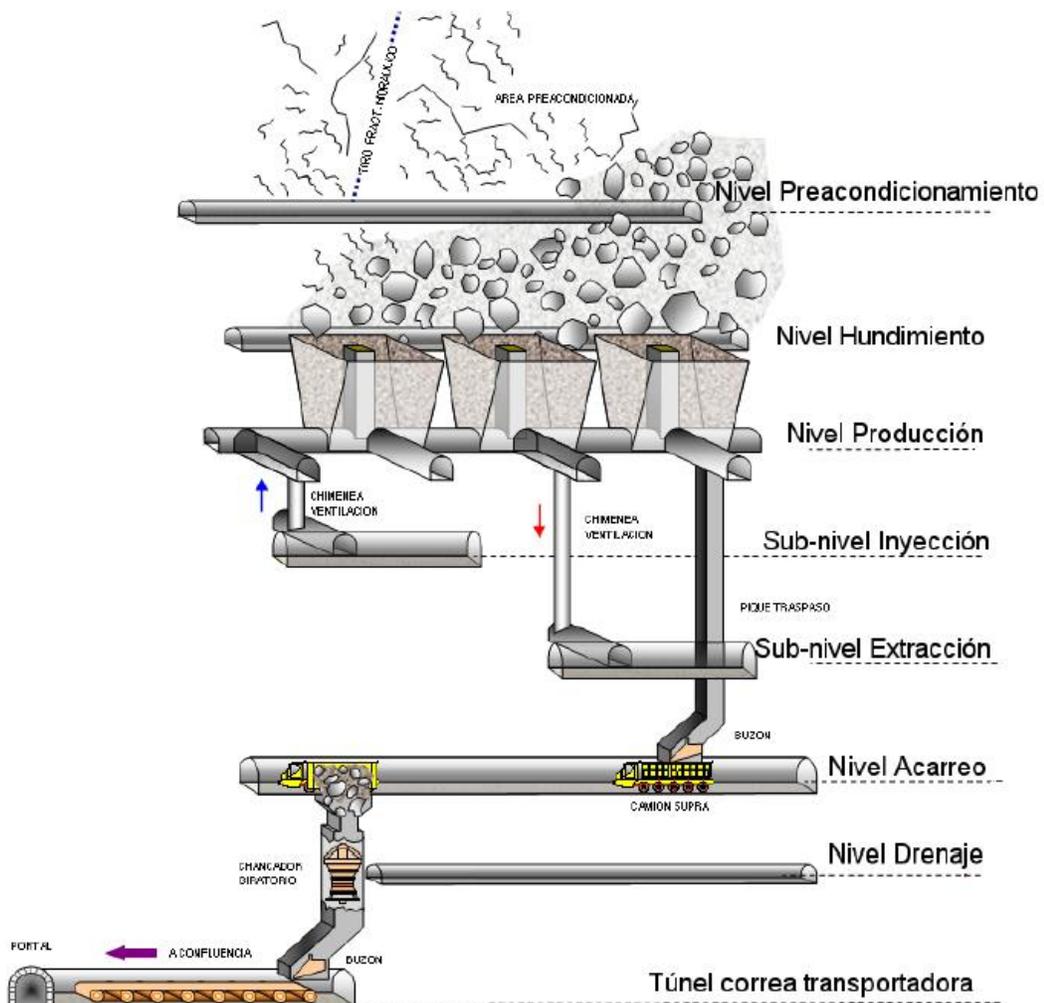


Figura 6. Esquema de distribución de niveles dentro de un Panel Caving.

Este método tiene ventajas y desventajas con respecto al Block Caving. La generación de un frente de incorporación permite lograr un mejor control de la dilución, pero a la vez, genera una serie de incidencias de carácter geomecánicas, principalmente, concentraciones de esfuerzos. Económicamente, el uso de Panel Caving es positivo ya que no se requiere tener toda la preparación realizada antes de iniciar la producción, sino que se puede realizar de manera paulatina a medida que avanza la extracción.

2.2.1.1 Variantes del método de Panel Caving

El método de Panel Caving ha sido utilizado en minas con diferentes características, tanto geológicas como geomecánicas, en respuesta a estas diferencias se han desarrollado diferentes variantes del método, las cuales se detallan a continuación.

- Panel Caving Convencional

En esta variante la totalidad de la preparación minera se realiza por delante de la zona de transición, incluyendo la preparación del Nivel de Producción. Esto produce que, al avanzar el frente de socavación, y por lo tanto también la zona de transición, la concentración de esfuerzos pueda generar daños en las obras ya construidas.

La Figura 7 muestra la variante convencional del método y los puntos relevantes a considerar.

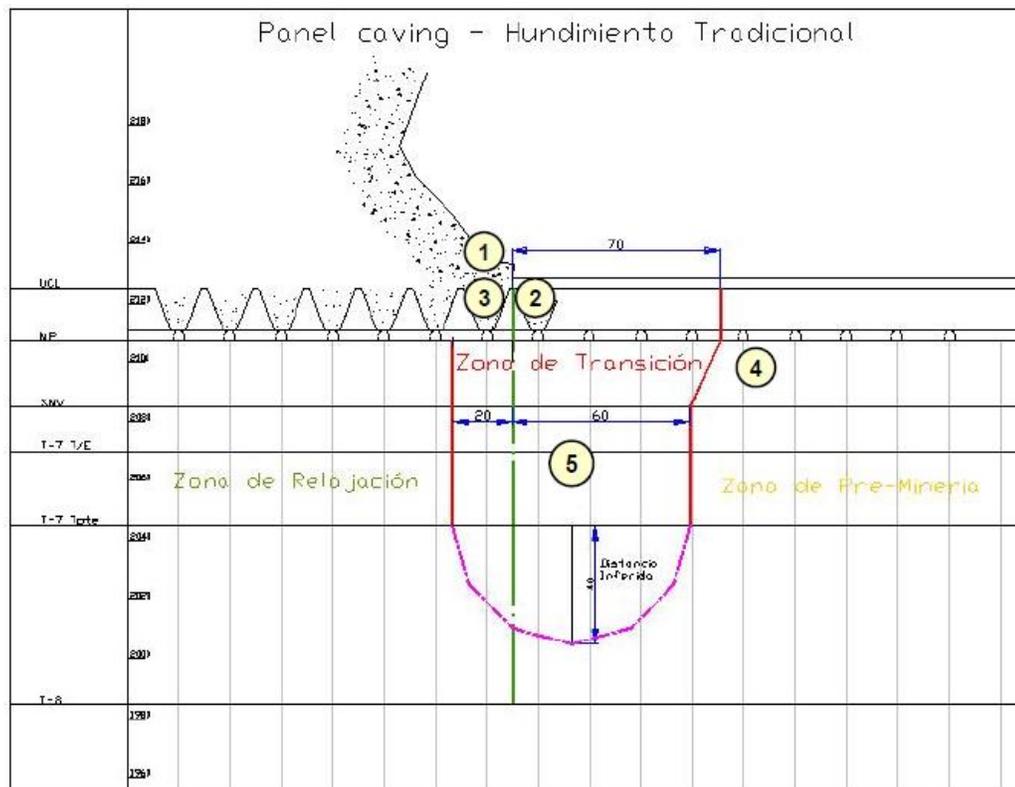


Figura 7. Variante de Panel Caving Convencional.

Los puntos señalados dentro del diagrama corresponden a:

1. Frente de hundimiento

2. Frente de incorporación de área
3. Frente de producción
4. Frente de preparación minera
5. Trabajos en zona de transición

La zona de transición corresponde a la zona en que se produce la transición desde un estado de pre-minería a uno de relajación. Esta zona es donde se concentran, varían y rotan los esfuerzos generados por el frente de socavación, por lo que es en general una zona de cuidado en términos geomecánicos donde no se programan actividades de preparación minera. Las únicas actividades planificadas para ser realizadas dentro de esta zona son las obras requeridas para el avance de la socavación e incorporación de área (principalmente actividades de perforación y tronadura).

- Panel Caving con Hundimiento Previo

Como se puede ver en la Figura 8, la principal diferencia con respecto a la variante convencional es que acá las obras de preparación minera del nivel de producción se realizan “bajo sombra”, es decir, en la zona de relajación. El resto de los niveles se preparan al igual que el sistema convencional, por delante de la zona de transición.

La principal ventaja con respecto al método convencional es que, al preparar el nivel de producción bajo sombra, las construcciones y obras civiles no son afectadas por la concentración de esfuerzos que se genera en la zona de transición, reduciendo así los daños generados. La principal desventaja de la variante es la complejidad para el manejo de marinas.

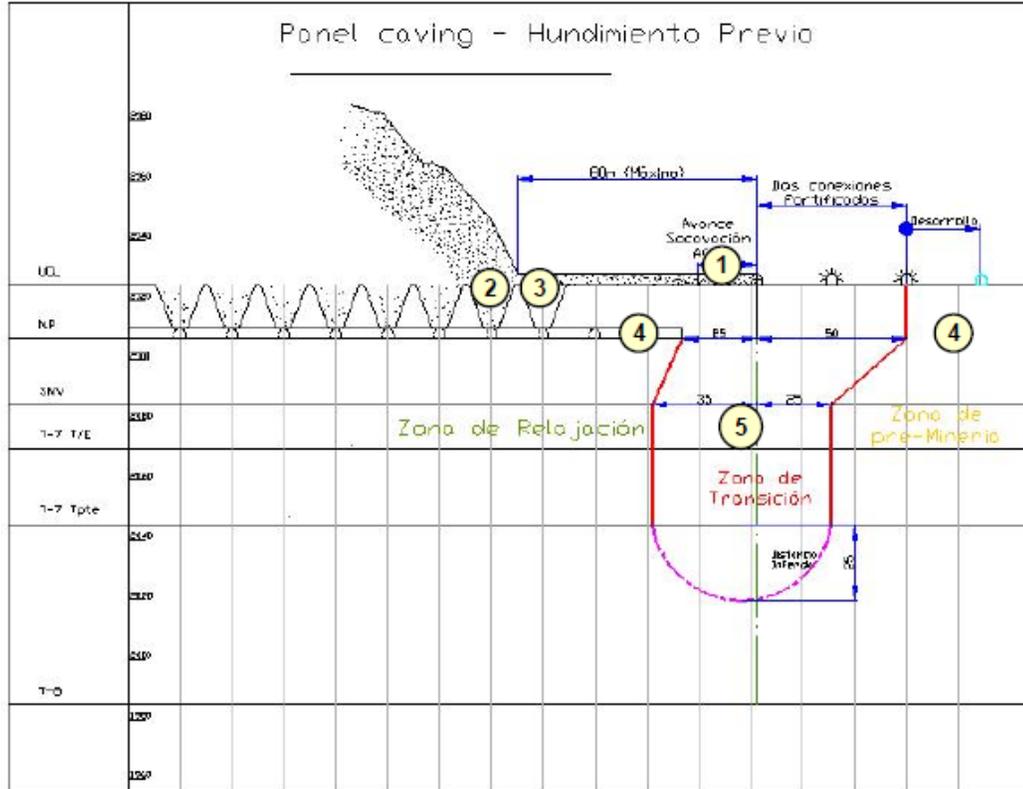


Figura 8. Variante de Panel Caving con Hundimiento Previo.

Los puntos señalados dentro de la figura corresponden a:

1. Frente de hundimiento
2. Frente de producción
3. Frente de incorporación de área
4. Frente de preparación minera
5. Trabajos en zona de transición

- Panel Caving con Hundimiento Avanzado

Esta variante de hundimiento se puede entender como un estado intermedio entre la variante convencional y la previa, ya que acá si se realizan actividades de preparación minera en el nivel de producción antes de que pase el frente de hundimiento, específicamente los desarrollos de calles de producción, sistemas de traspaso y accesos.

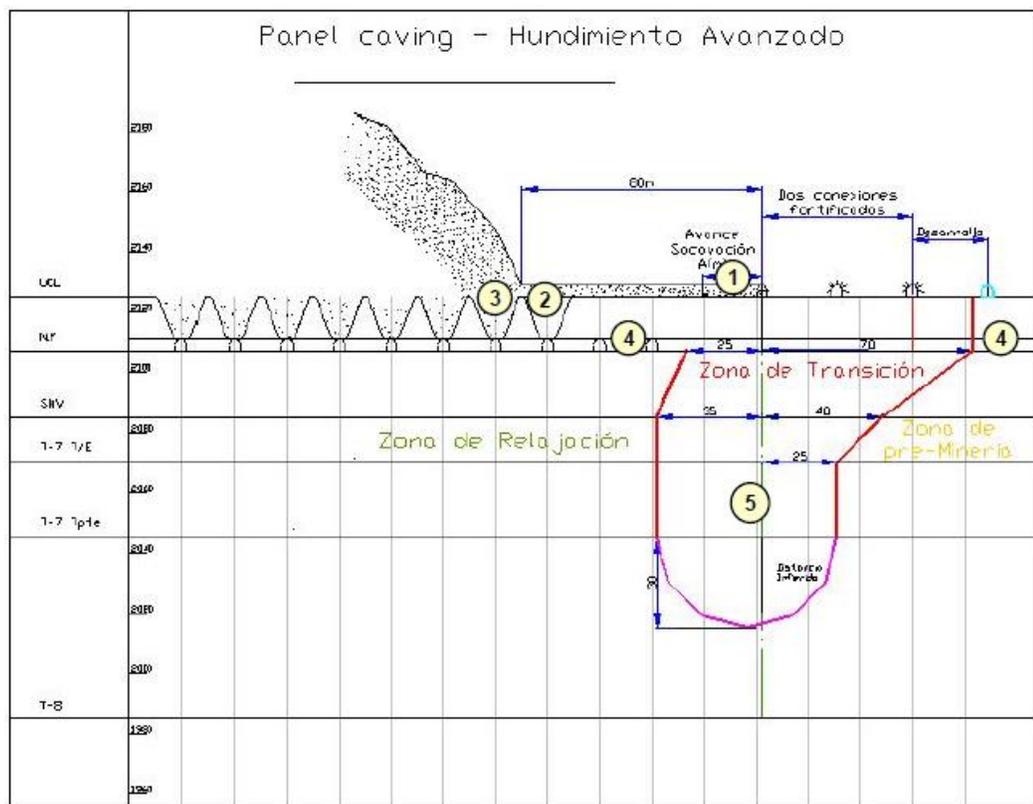


Figura 9. Variante de Panel Caving con Hundimiento Avanzado.

Los puntos señalados dentro de la figura corresponden a:

1. Frente de hundimiento
2. Frente de incorporación de área
3. Frente de producción
4. Frente de preparación minera
5. Trabajos en zona de transición

2.3 Preparación minera

La preparación minera comprende todas las actividades necesarias para habilitar la infraestructura necesaria para la explotación de un sector productivo.

En forma general, la preparación minera se puede dividir en dos etapas:

- i. Infraestructura de pre-producción, en la cual se habilita la infraestructura para la producción de un sector. Las actividades que se consideran en esta etapa son las siguientes: accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación.
- ii. Infraestructura de explotación, la cual incorpora el resto de las actividades de preparación minera en todos los niveles involucrados en el proyecto.

2.3.1 Planificación de la preparación minera

De la misma manera en que para un proyecto minero se desarrollan planes de producción, se deben realizar también planes de preparación minera que sustenten dicha producción.

La División El Teniente genera diferentes planes de preparación minera, de largo, mediano y corto plazo, para cumplir con los planes de producción establecidos para cada uno de los proyectos en ejecución o futuros. A continuación, se detallan los principales planes asociados a la preparación minera.

- Plan de Negocios Divisional (PND)

El Plan de Negocios Divisional es un plan de largo plazo desarrollado en la División El Teniente, su horizonte temporal va de los 6 a los 50 años y en relación con la preparación minera, entrega cifras globales de las obras requeridas para poder dar cumplimiento a los planes de producción.

- Programa Quinquenal

Este programa tiene un horizonte temporal de mediano plazo, de 1 a 5 años. El programa entrega los volúmenes anuales de obras que serán requeridos para dar cumplimiento a los planes de producción. Incorpora los sectores en operación como también los sectores que iniciarán su explotación dentro del periodo de 5 años.

- Programa de preparación minera Revisión A

Este programa de corto plazo tiene un horizonte temporal de 1 año, su principal función es entregar los volúmenes de obras que serán considerados durante el periodo anual en el Presupuesto de Preparación y sobre el cual se tendrán las Autorizaciones de Gastos Diferidos (AGD's).

- Programa de preparación minera Revisión B

El Programa Rev. B es emitido por la GRMD y tiene un horizonte temporal de 1 año. El plan entrega los lineamientos de crecimiento para cada sector y los requerimientos mensuales de incorporación de área, además, incorpora todos los hitos de preparación minera que deben ser realizados para dar sustento y continuidad a la producción.

El Programa Rev. B, a diferencia del Rev. A, es mensualizado, por lo tanto, define el programa de obras que deberán realizarse mes a mes. Este programa que es entregado por la GRMD no cuenta con un detalle para todas las actividades de preparación que se deben realizar, sino que solo indica en que fechas se deben desarrollar algunas de las principales (hitos).

A continuación, es la GOBM la encargada de incorporar en detalle todas las actividades de preparación minera que se deberán desarrollar, mes a mes, para dar cumplimiento a dichos hitos y a los otros requisitos que se deben incorporar.

Los principales inputs requeridos para realizar la mensualización del plan son:

- Programa Rev. B (GRMD)
- Informe de lineamientos geomecánicos P0
- Plan de preacondicionamiento
- Planos de Ingeniería
- Recursos y rendimientos históricos
- Rutas de acceso
- Contratos

La Figura 10 muestra una comparación gráfica de los programas Rev. A y Rev. B donde es posible ver que no todas las obras consideradas en el Rev. A fueron incorporadas en el Programa Rev. B final.

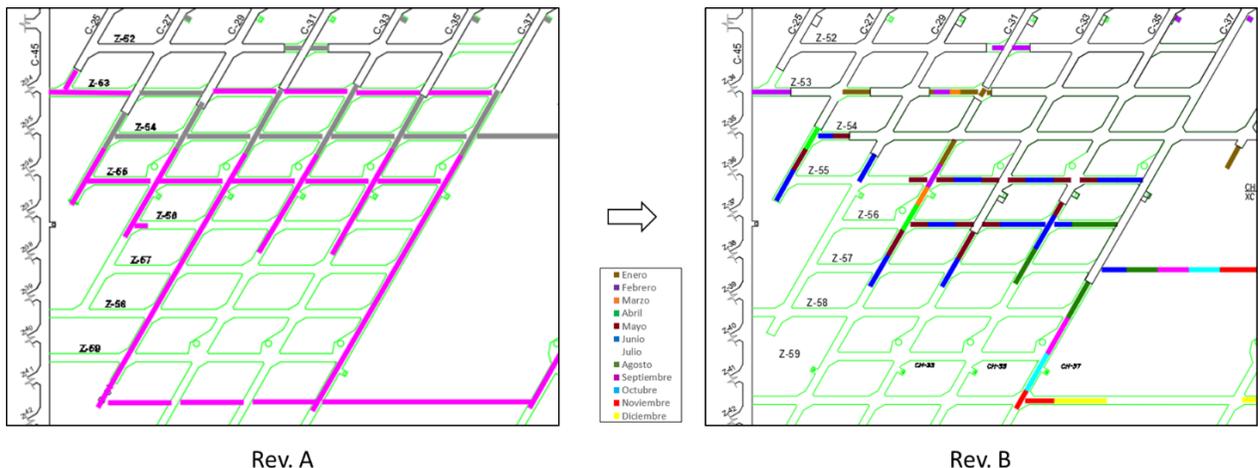


Figura 10. Comparación gráfica de las obras de desarrollos horizontales incorporadas en el programa Rev. A con el Programa Rev. B.

- Programa Actualizado Mensual (PAM)

Programa de corto plazo, con un horizonte temporal de 1 mes. En este programa se actualiza la programación realizada en el Rev. B según los avances de obras y rendimientos obtenidos el mes anterior.

2.4 Optimización en la planificación minera

La optimización de la planificación minera ha sido desarrollada y ampliamente utilizada en minería a cielo abierto, ya que, para este tipo de operaciones, la dirección en que se desarrolla la mina es fija, descendente y hacia el exterior de los límites del pit. Sin embargo, la minería subterránea es mucho más compleja, ya que, a lo largo del ciclo de vida de la mina, pueden existir diferentes direcciones de crecimiento, las que dependerán entre otros factores, del método de explotación utilizado (Alford et al, 2006). Además de esto, cada mina subterránea tiene un diseño único y su operación también se ajusta a las características específicas de cada depósito mineral, haciendo difícil la creación de algoritmos de optimización genéricos (Newman et al, 2010).

Esta misma complejidad genera que en muchas ocasiones los algoritmos de resolución no se puedan aplicar o dar solución a los problemas de optimización existentes, por lo que se deben resolver utilizando un enfoque heurístico.

Entendiendo un algoritmo de optimización y una heurística como un procedimiento definido paso a paso, que se ejecuta iterativamente comparando las soluciones sucesivas hasta que estas converjan, la principal diferencia entre los dos es que, el algoritmo de optimización itera hasta que encuentra una solución óptima, la heurística en cambio, itera realizando un trade-off entre calidad de la solución y tiempo de cálculo.

A continuación, se presentan algunos de los algoritmos y heurísticas de optimización utilizados en planificación minera (Musingwini, 2016).

i. Algoritmo simplex para problemas de programación lineal (LP)

El algoritmo simplex fue desarrollado por George Dantzig y presentado en el año 1947 para resolver problemas de programación lineal. La formulación genérica de un problema LP se define como:

$$\text{Optimizar } Z = c^T x_i$$

$$\text{Sujeto a } Ax_i \leq b, x_i \geq 0$$

Donde Z : función lineal a maximizar o minimizar
 c^T : coeficientes de la función objetivo (traspuestos)
 x_i : variable del problema i
 A : matriz de m (variables) por n (restricciones)
 b : vector de constantes

Dependiendo de los valores que las variables x_i puedan tomar, los problemas de programación lineal pueden ser extendidos a distintas variantes, por ejemplo: programación lineal binaria en que $x_i \in [0,1]$, programación lineal mixta (MIP) donde x_i puede ser un número entero o decimal, y finalmente, programación entera (IP) donde $x_i \in \mathbb{Z}^+$.

Las variantes de estas programaciones lineales han sido ampliamente utilizadas en problemas de optimización de planificación minera, tanto en minería a cielo abierto (Osanloo et al, 2008) como en minería subterránea (Newman et al, 2010).

ii. Algoritmo de programación dinámica (DP)

Los algoritmos de programación dinámica consisten en la utilización de subproblemas superpuestos y subestructuras óptimas para resolver el problema de optimización.

Las subestructuras óptimas hace referencia al hecho de utilizar soluciones óptimas de subproblemas para encontrar la solución óptima del problema global. En general, para utilizar subestructuras óptimas se debe utilizar el siguiente procedimiento de tres pasos:

1. Dividir el problema en subproblemas más pequeños
2. Resolver cada problema pequeño de manera óptima utilizando este procedimiento de tres pasos de manera recursiva.
3. Usar las soluciones óptimas encontradas para construir la solución óptima del problema original.

Los subproblemas se resuelven dividiéndolos en problemas más pequeños hasta que el tamaño de estos permite su resolución de manera fácil. Que estos sean superpuestos quiere decir que la solución de un problema pequeño se puede usar en más de una solución de un problema más grande.

En minería se han utilizado este tipo de algoritmos en planificación, en cielo abierto por ejemplo para la determinación del pit final (Lerchs and Grossmann, 1965) como en minería subterránea, en el agendamiento de actividades de producción y control de leyes (Dowd and Elvan, 1987).

iii. Algoritmo Genético (GA)

Algoritmo desarrollado en 1975 por John Holland como método para imitar el proceso biológico de selección natural.

El algoritmo genético es iterativo, y utiliza una serie de nombres relacionados con el proceso natural de selección genética. Por ejemplo, las soluciones son llamadas “cromosomas”, la función objetivo tiene el nombre de función de ajuste o función de evaluación, una iteración del algoritmo se denomina como “generación”, etc.

El proceso se resume en los siguientes puntos: primero, se genera un set de soluciones factibles de manera aleatoria, segundo, se genera un nuevo set de soluciones después de aplicar un operador genético (reproducción, cruce y mutación), tercero, cada solución del nuevo set es evaluada con la función de ajuste, por último, iterar el proceso hasta que se alcanza la convergencia.

Este tipo de algoritmos se ha utilizado en planificación minera para resolver problemas de agendamiento, específicamente problemas de producción asociados a la mezcla desde varios orígenes (Kumral, 2004).

iv. Algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO)

Este algoritmo es relativamente nuevo, fue propuesto en el año 1995 por Kennedy y Eberhart. La naturaleza del algoritmo (al igual que el reto) está basado en la naturaleza, específicamente

en el comportamiento e interacción que tienen los individuos cuando forman parte de un grupo. Por ejemplo: peces en un cardumen, pájaros en una bandada, etc.

El algoritmo es iterativo y genera una búsqueda haciendo uso de los individuos (partículas) y de la población (enjambre).

El funcionamiento del algoritmo se puede resumir de la siguiente forma: cada partícula representa una solución al problema de optimización, a cada partícula se le asigna una posición y una velocidad de movimiento (aleatorios), mediante una serie de iteraciones y haciendo uso de unas ecuaciones definidas en el método se actualizan las posiciones de cada partícula y del enjambre como un global, cuando las partículas y el enjambre convergen, se da por finalizado el proceso.

Una ventaja con respecto a los otros algoritmos es que el comportamiento de las partículas se puede asociar a una planificación a corto plazo mientras que el del enjambre se puede asociar a una planificación de largo plazo.

Este algoritmo ha sido utilizado en planificación de minería a cielo abierto tanto en el trabajo de Khan and Niemann (2014), como en el de Goodfellow et al (2016).

v. Algoritmo de optimización de colonia de hormigas (ACO)

El algoritmo fue propuesto por Marco Dorigo en 1992 como forma de replicar el comportamiento colectivo de las hormigas al moverse desde y hacia su hormiguero.

En la naturaleza si una hormiga encuentra un camino desde la comida que encuentra hacia su colonia, genera una sustancia química que informa al resto de hormigas que el camino es correcto, generando que más hormigas sigan su camino y consecuentemente refuercen el mismo camino o encuentren rutas aún más óptimas. Ese es el comportamiento que se pretende imitar con este algoritmo, generando “hormigas simuladas” que se muevan alrededor del grafo que representa el problema a ser solucionado.

Este algoritmo ha sido utilizado en planificación minera, específicamente en el agendamiento de producción (Gilani and Sattarvand, 2016)

Al revisar la bibliografía disponible es claro el hecho de que la mayoría de la investigación está centrada en el agendamiento y optimización de los planes de producción, hay muy poca investigación asociada a otros temas de planificación como por ejemplo la preparación minera.

Aun así, se pudo identificar referencias asociadas el tema de preparación minera, por ejemplo, el agendamiento de manera conjunta de actividades de producción y de preparación minera en minería de block/panel caving (Rocher, 2012) o la programación de actividades de producción y preparación minera en minería subterránea selectiva (Rojas, 2016).

2.5 UDESS

UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) es un software agendador óptimo de actividades, desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile.

La principal diferencia con otros softwares de la industria que permiten realizar agendamientos, como Microsoft Project o Primavera, es que UDESS entrega soluciones óptimas, debido a que incorpora un algoritmo de optimización lineal.

El programa funciona utilizando actividades y precedencias, las cuales a través de restricciones generan un problema lineal a ser solucionado mediante la aplicación del algoritmo de optimización.

2.5.1 Actividades

Las actividades dentro de UDESS corresponden a todas las actividades u obras que se deseen incorporar dentro de un secuenciamiento, por ejemplo, considerando el ciclo de la actividad de fortificación mecanizada simplificado que aparece en la Tabla iii, se puede ver que la actividad global de fortificación mecanizada está compuesta de 4 subactividades que la componen, las cuales serían las actividades que aparecen en la tabla.

A cada actividad se le pueden asignar diversos atributos que la identifiquen, como por ejemplo un costo por realizarla, un beneficio por completarla, el consumo de múltiples recursos por su desarrollo, etc. Además, y de forma obligatoria, todas las actividades deben incorporar un “Max rate”, parámetro que se entiende como “cuantas veces puedo realizar la actividad dentro de un periodo” parámetro que está directamente relacionado con los rendimientos de cada actividad. Por ejemplo, en la tabla presentada, para la actividad N° 4 se ve que la actividad tiene un max rate de 1.5, esto significa que la actividad se puede realizar 1.5 veces dentro del periodo que se defina en el modelo.

Tabla iii. Actividades fortificación mecanizada

N° actividad	Actividad	Beneficio	Max rate
2	Perforación de pernos	-100	1.0
3	Lechado de pernos	-200	2.0
4	Colocación de malla	-150	1.5
5	Shotcrete en cajas	-200	0.5

2.5.2 Precedencias

Las precedencias corresponden a la relación que existe entre dos actividades consecutivas, en que una actividad inicial debe completarse antes de poder acceder o desarrollar la actividad sucesora.

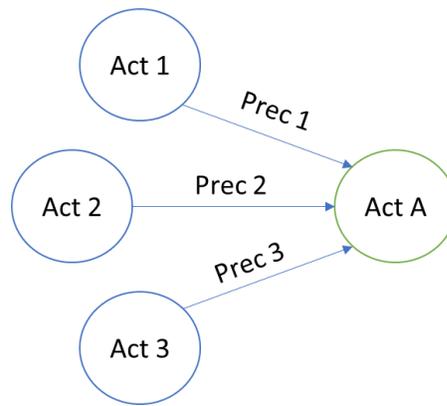


Figura 11. Diagrama que representa precedencias entre actividades.

UDESS tiene la capacidad de trabajar con dos tipos de precedencias, las del tipo “o” y las del tipo “y”. Softwares comerciales para el agendamiento de actividades como Primavera o Microsoft Project, solo utilizan precedencias del tipo “y”, por lo tanto, la utilización de UDESS presenta una ventaja con respecto al uso de los otros programas.

A continuación, se presenta una breve descripción de los dos tipos de precedencias.

- Precedencias tipo “y”

Las precedencias del tipo “y” son todas aquellas que, al conectar dos o más actividades, las antecesoras deben completarse en su totalidad para dar acceso a la actividad sucesora.

Considerando la Figura 11, si las tres precedencias del diagrama fueran del tipo “y” significaría que para que la actividad A pueda comenzar, necesariamente se tienen que completar en su totalidad las actividades 1, 2 y 3.

- Precedencias tipo “o”

Las precedencias del tipo “o” son todas aquellas que, al conectar dos o más actividades, al menos una de las actividades predecesoras se debe completar para dar acceso a la actividad sucesora.

Considerando la Figura 11, si las tres precedencias del diagrama fueran del tipo “o” significaría que para que la actividad A pueda comenzar, al menos la actividad 1, 2 o 3. se debe completar.

2.5.3 Restricciones

UDESS dispone de 6 tipos de restricciones para realizar los modelos las cuales se detallan a continuación.

- **Restricción de recurso operacional:** restricción que limita el consumo de un recurso dado para todas las actividades del modelo.
- **Restricción de capacidad de recurso inicial:** restricción que limita el consumo de un recurso dado, al iniciar las actividades.
- **Restricción de progreso límite:** Restricción que obliga realizar un cierto progreso de una actividad en un rango de tiempo determinado.

- **Restricción de rango de recursos:** restricción que limita el consumo de un grupo de actividades, de un recurso determinado.
- **Restricción de incompatibilidad de actividades:** Restricción que limita el desarrollo simultaneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado.
- **Restricción de periodo de inicio:** Restricción que limita el intervalo de tiempo en el que un grupo de actividades debe comenzar.

3 Metodología

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para abordar el modelamiento del Programa Rev. B en UDESS.

A grandes rasgos la metodología cuenta con dos etapas, la primera, una etapa incremental, relacionada con la forma de manejar e incorporar la información requerida para el modelo, mientras que la segunda, corresponde a una etapa de modelamiento, relacionada con la forma de resolver y hacer el modelamiento.

Es importante mencionar que ambas etapas se desarrollan en paralelo y se repiten hasta completar el modelo, es decir, inicia la etapa 2 de modelamiento con un nivel de la mina, termina la etapa y se inicia la etapa 1, consistente en incorporar un segundo nivel al modelo global, definido el nivel se vuelve a iniciar la etapa 2 de modelamiento, y así sucesivamente hasta completar el modelamiento del sector. Ambas etapas se detallan a continuación.

3.1 Etapa incremental

En primer lugar, dadas las características del sector, y el alcance definido en el Capítulo 1.3, se decidió no construir el modelo completo de manera inmediata, sino que hacerlo de manera progresiva, es decir, partir con uno de los niveles del sector, modelarlo, analizar los resultados obtenidos, verificar que el modelamiento cumple con todos los objetivos o hitos que tenga establecidos, para posteriormente, una vez validados los resultados, incorporar los siguientes niveles y la interacción entre los mismos.

El orden de incorporación de los niveles no fue definido aleatoriamente, sino que responde a los volúmenes de actividades y precedencias involucrados en cada uno de ellos.

Como se verá en capítulos posteriores, dentro del sector en estudio, el nivel con mayor volumen de actividades y precedencias corresponde al Nivel de Producción, mientras que el Nivel de Acarreo y Subnivel de Ventilación son los que menos tienen. Es importante mencionar que tanto el tiempo de modelamiento, como la dificultad del mismo, tienen una relación directa con los volúmenes de información a incorporar en el modelo.

De lo anterior, se decidió partir con un nivel intermedio de dificultad, para posteriormente avanzar a los niveles más complejos, dejando los dos niveles con menos volumen de información hacia el final.

Como se puede ver en la Figura 12, el primer nivel del sector a modelar corresponde al Nivel de Hundimiento, seguido por el Nivel de Producción, el Sistema de Traspaso, el Nivel de Acarreo y finalmente el Subnivel de Ventilación.

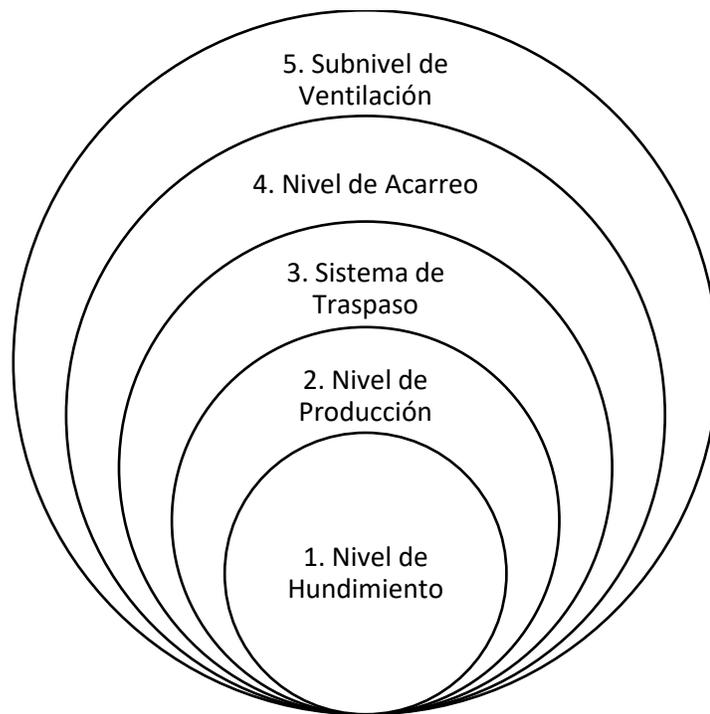


Figura 12. Diagrama que representa el enfoque incremental propuesto para el modelo.

Es importante mencionar que, aunque el Sistema de Traspaso no es un nivel dentro de la mina, ya que está construido con obras del Nivel de Producción y del Nivel de Acarreo, en el modelamiento si se trató como si fuera un nivel independiente, principalmente por su relevancia dentro del Programa Rev. B y porque la interacción con el resto de las actividades de los niveles recién mencionados es compleja.

3.2 Etapa de modelamiento

La metodología propuesta para el modelamiento propuesta consta de 7 etapas principales, tal como se puede ver en Figura 13.

El listado de las etapas se presenta a continuación:

1. Definición y limitación de la problemática
2. Recopilación de información
3. Definición de la metodología de planificación
4. Modelamiento en UDESS
5. Análisis de resultados
6. Análisis de sensibilidad
7. Conclusiones y recomendaciones

Es posible que durante el proceso de análisis de los resultados obtenidos con UDESS o durante la etapa de modelamiento en UDESS, se identifiquen puntos o valores que deban ser corregidos. Para esto, la metodología se ha diseñado para que sea iterativa, permitiendo volver a etapas anteriores, corregir el problema, y así obtener los nuevos resultados. Este ciclo iterativo está diseñado para que se lleve a cabo entre las etapas 2 a la 5.

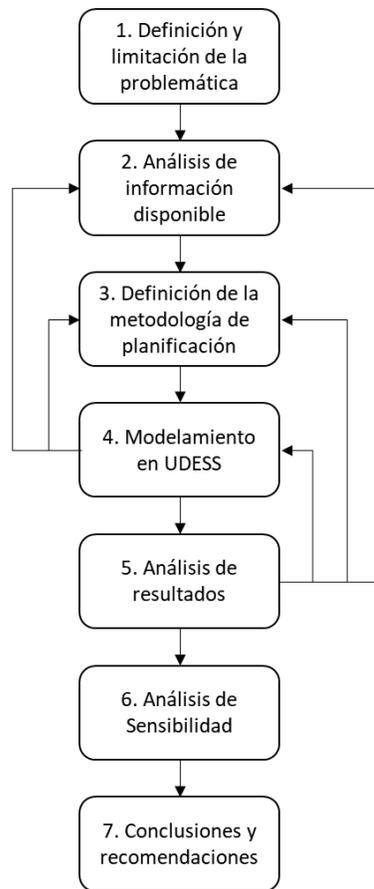


Figura 13. Resumen de metodología propuesta para abordar el modelamiento.

A continuación, se detalla cada una de las etapas de la metodología propuesta.

3.2.1 Definición y limitación de la problemática

Esta primera etapa consistirá en definir claramente cuál es la problemática por resolver, los objetivos del trabajo, la metodología global para abordar el problema y cuáles serán los alcances del trabajo.

La problemática por resolver está dada fundamentalmente por el requerimiento realizado por la Gerencia de Obras Minas de la División El Teniente, la cual se encuentra definida en la sección 1.1.

Como la presente memoria de título se enmarca en un proyecto desarrollado en conjunto entre varias entidades, los objetivos y los alcances del trabajo fueron definidos en función de cumplir con las expectativas y los requerimientos de cada uno de los involucrados. Ambos puntos de detallan en las secciones 1.2 y 1.3.

Finalmente, la metodología global para abordar el problema fue definida a partir de sucesivas iteraciones en que se debió analizar la información disponible, los requerimientos, objetivos, etc., y como cada uno de estos puntos debía ser incorporado dentro del modelamiento.

3.2.2 Análisis de información disponible

La segunda etapa por desarrollar corresponde a la de identificar, cuantificar y analizar qué información es relevante para la construcción del Plan Rev. B

Una vez identificada la información requerida, se procederá a verificar qué información está efectivamente disponible y cuál no. La que no esté disponible se gestionará con los respectivos involucrados.

Es importante recalcar que esta etapa es dinámica e iterativa, ver Figura 13, ya que a medida que se realice el modelamiento, o cuando se analicen los resultados, se podrían identificar puntos o ítems que no hayan sido mapeados inicialmente, y, por lo tanto, se requerirá nuevamente proceder a gestionar la información con las personas respectivas.

El nivel de detalle de la información a analizar está definido en los alcances del trabajo, pero, a modo de resumen, corresponde al mismo nivel de detalle utilizado actualmente en la construcción del programa Rev. B.

3.2.3 Definición de metodología de planificación

La tercera etapa corresponde a definir una metodología de planificación. Esta metodología será utilizada para modelar el programa Rev. B en UDESS, y obtenerla es uno de los objetivos del trabajo.

Un punto importante de esta metodología es que debe lograr incorporar todos los puntos que están definidos como inputs para la elaboración del programa Rev. B, pero además debe incorporar criterios de planificación que actualmente son usados por los planificadores en la elaboración del programa y que no están documentados.

Esta etapa, al igual que otras mencionadas previamente, forma parte de las etapas iterativas dentro de la metodología propuesta, por lo que, según la necesidad, esta etapa deberá repetirse y adaptarse a nuevas circunstancias.

3.2.4 Modelamiento en UDESS

El modelamiento en UDESS consistirá en incorporar todas las actividades, precedencias, hitos, restricciones y consideraciones del programa Rev. B a un lenguaje computacional apto para que UDESS pueda interpretar la información recibida y realizar el agendamiento.

La necesidad de realizar iteraciones sobre esta etapa estará dada directamente según se presente el requerimiento de adaptar o modificar la información que se debe incorporar a UDESS.

3.2.5 Análisis de resultados

Esta etapa consiste en analizar los resultados entregados por UDES y compararlos con el agendamiento realizado por los planificadores para el sector (Rev. B).

Los resultados obtenidos pueden indicar directamente la necesidad de hacer ajustes en etapas anteriores para ajustar el programa a los requerimientos establecidos.

3.2.6 Análisis de sensibilidad

Además del análisis de los resultados principales, se realizará un análisis de sensibilidad. Este consistirá en la evaluación de la flexibilidad de las fechas de término de los hitos del programa.

Las actividades por incorporar dentro de este análisis de sensibilidad serán en un principio, todas las actividades que tengan una fecha límite para su realización (hitos) y las actividades que se consideran críticas dentro del programa.

3.2.7 Conclusiones y recomendaciones

En esta última etapa del trabajo se entregarán las principales conclusiones del análisis realizado a los resultados. Se entregarán también recomendaciones para adaptar la metodología propuesta a futuros modelamientos de el mismo sector u otros, según las necesidades de la División.

4 Caso de Estudio

Como se mencionó previamente en el Alcance del trabajo, el modelamiento será aplicado al sector productivo Esmeralda Sur de la División El Teniente.

4.1 Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes relevantes para el modelamiento y el detalle para cada uno de los niveles.

4.1.1 Nivel de Hundimiento

La Tabla iv muestra el resumen global de las obras incorporadas en el Programa Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.

Los rendimientos presentados corresponden a los utilizados en el modelamiento del programa, las duraciones fueron utilizadas para el cálculo del max rate de las actividades.

Tabla iv. Resumen de obras del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.

Actividad	Unidad	Total Rev. B	Rendimiento mes
Desarrollos horizontales	m	1,345	140
Desarrollos verticales	m	42	21
Fortificación de intersecciones	un	22	4
Construcción de vaciaderos de marina	un	2	1.5
Construcción de chimeneas de emergencia	gl	1	1.5
Tiros de Drenaje	m	950	200
Perforación preacondicionamiento	m	3,772	345
Perforación de pozos cave back y especiales	m	150	200
Hidrofracturamiento	un	40	2.5
Perforación radial	mb	91,443	-
Socavación	m ²	23,715	-

Las actividades de perforación radial y de socavación se incorporan como actividades fijas dentro el programa ya que son un requerimiento de la GRMD.

El Programa Rev. B 2017 desarrollado por la GRMD definió 3 hitos a ser incorporados en la versión final mensual del Programa Rev. B, los cuales se listan en la Tabla v.

Tabla v. Hitos para planificación en Nivel de Hundimiento.

Nº	Descripción	Hito
1	Término galería especial al sur XC Acceso 4 UCL	Febrero
5	Conexión C-25/C-27 UCL	Marzo
6	Conexión XC Acceso 6 UCL con rampa lado Fw	Marzo

El detalle mensual agendado para cada una de las actividades del nivel se puede ver en el Anexo 2.

4.1.2 Nivel de Producción

Tabla vi. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Producción.

	Unidad	Total Rev. B	Rendimiento mes
Desarrollos horizontales	m	2,064	245
Desarrollos verticales	m	775	95
Carpeta de rodado	m	1,165	125
Construcción de puntos de extracción	un	87	10
Construcción de viseras de puntos de extracción	un	87	10
Construcción de pisos de puntos de extracción	m	870	10
Construcción de muros de confinamiento	un	83	9
Fortificación de intersecciones	un	55	6
Perforación Hidrofracturamiento	m	960	300
Hidrofracturamiento	un	24	3
Tiros de drenaje	m	840	200
Fortificaciones especiales	m	250	65
Perforación de zanjas	mb	27,978	-
Voladura de zanjas	un	30	-

Las actividades de perforación de zanjas y voladura de zanjas se incorporan como actividades fijas dentro el programa ya que son un requerimiento de la GRMD.

El Programa Rev. B 2017 desarrollado por la GRMD definió 9 hitos a ser incorporados en la versión final mensual del Programa Rev. B, los cuales se listan en la Tabla vii.

Tabla vii. Hitos para planificación en Nivel de Producción.

Nº	Descripción	Hito
2	Conexión Z-53/C-45 NP (DR/Bloque 1)	Febrero
3	Término del hidrofracturamiento especial Bloque 2 NP	Febrero
4	Término construcción de muros entre Z-49/Z-50 Bloque 2 NP	Febrero
7	Conexión total Z-54 entre C-27/C-59 NP	Abril
8	Término fortificación especial zona interacción DR/Bloque 1	Abril
10	Término fortificación especial Cabecera Hw NP	Mayo
11	Término de construcciones en C-51/C-53 al norte Z-49 NP	Junio
14	Z-54 con fortificación total	Julio
15	Conexión Z-54/C-63/C-1 NP	Agosto

4.1.3 Sistema de Traspaso

Tabla viii. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Sistema de Traspaso.

Actividad	Unidad	Total Rev. B	Rendimiento mes
Excavación de punto de vaciado	un	9	0.85
Construcción de brocal de punto de vaciado	un	10	0.85
Rotura de chiflón de punto de vaciado	un	11	6
Desquinche y fortificación de pique	un	11	0.95
Blindaje de piques	un	13	1.2
Construcción base martillo	un	13	3
Instalación telecomando martillo	un	9	2
Desquinche y fortificación de buzón	un	14	0.75
Construcción de buzón	un	13	0.6
Montaje de buzón	un	12	1
Habilitación hidráulica de buzón	un	16	0.75
Telecomando buzón	un	10	2
Puesta en marcha sistema de traspaso	un	11	1.5

El Programa Rev. B 2017 desarrollado por la GRMD definió 1 hito a ser incorporado en la versión final mensual del Programa Rev. B, el cual se lista en la Tabla ix.

Tabla ix. Hito para planificación en Sistema de Traspaso.

N°	Descripción	Hito
19	Término de trabajos en interior de piques XC-43AS	Variable
13	Habilitación XC-38AS para Bloque 1	Junio
17	Habilitación XC-38AS total	Diciembre
18	Término de todos los montajes de buzones del XC-43AS NA	Diciembre

La fecha de término para el hito es independiente para cada uno de los piques.

4.1.4 Nivel de Acarreo

Tabla x. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Nivel de Acarreo.

Actividad	Unidad	Total Rev. B	Rendimiento mes
Desarrollos horizontales	m	274	65
Desarrollos verticales	m	275	40
Tiros de drenaje	m	260	200
Construcción máquinas de cambio	un	7	1
Construcción de cruzamientos	un	1	1
Preparación piso vía férrea	m	1,400	120
Construcción vía férrea	m	1,400	85
Construcción red de agua	m	1,400	85
Construcción red de aire	m	1,400	85
Construcción trolley	m	1,400	150
Fortificaciones especiales	m	400	100

El Programa Rev. B 2017 desarrollado por la GRMD no definió hitos a ser incorporados en la versión final mensual del Programa Rev. B para el Nivel de Acarreo. Es importante mencionar que, sí se definieron hitos en el nivel, pero para actividades del Sistema de Traspaso por lo que no se asignarán a este nivel.

4.1.5 Subnivel de Ventilación

Tabla xi. Resumen de actividades del programa Rev. B 2017 para el Subnivel de Ventilación.

Actividad	Unidad	Total Rev. B	Rendimiento mes
Desarrollos horizontales	m	243	60
Desarrollos verticales	m	600	60
Construcción salas de ventiladores	un	20	2
Montaje de ventiladores	un	23	2.5
Habilitación de ventiladores	un	28	2.5
Construcción y habilitación OOC especiales	gl	1	2.5
Construcción de cunetas de drenaje	m	2,026	85
Construcción y habilitación SSE	gl	1	0.12
Construcción y habilitación CDC	gl	1	0.5
Construcción y habilitación SH	gl	1	0.5
Construcción y habilitación OCC	gl	1	0.5

El Programa Rev. B 2017 desarrollado por la GRMD definió 3 hitos a ser incorporados en la versión final mensual del Programa Rev. B, los cuales se listan en la Tabla xii.

Tabla xii. Hitos para planificación en Sistema de Traspaso.

Nº	Descripción	Hito
9	Habilitación SEE XC-46AS SNV	Abril
12	Habilitación total XC-41AS inyección SNV	Junio
16	Habilitación total XC-46AS extracción SNV	Diciembre

4.1.6 Precedencias

Con respecto a las precedencias existentes entre las obras de preparación minera, estas están definidas casi en su totalidad por la secuencia constructiva. Para el caso de la Mina Esmeralda, actualmente existe un quiebre del programa que es utilizado por los planificadores del programa y que podría ser utilizado para la construcción de las precedencias entre las obras, pero, de manera formativa y para conocer el procedimiento constructivo de cada obra civil involucrada en el programa, se definió construir la secuencia genérica

La secuencia depende de varios factores, entre estos están:

- Variante del método de explotación
- Procedimientos constructivos propios de las empresas contratistas
- Requerimientos de ingeniería
- Restricciones no planificadas

La variante de método de explotación es un factor fuerte dentro de la secuencia constructiva, pues no es lo mismo realizar la preparación minera de un Panel Caving con variante convencional que un Panel Caving con Hundimiento previo.

En el caso de la Mina Esmeralda, se utiliza la variante convencional del método de Panel Caving, con lo que necesariamente se deberán realizar la totalidad de las obras por delante de la zona de transición antes de hacer la socavación del bloque.

Los procedimientos constructivos de las empresas contratistas pueden también llegar a afectar y cambiar la secuencia constructiva. Un caso directo que evidencia este factor es el que ocurre al comparar la Mina Esmeralda con la Mina Reservas Norte, ambas pertenecientes a la Mina El Teniente. Al comparar la secuencia constructiva de los sistemas de traspaso de ambas minas, se puede observar que, para el caso de Esmeralda, el sistema de traspaso comienza su construcción desde el Nivel de Acarreo hacia el Nivel de Producción, en cambio, en la mina Reservas Norte, la secuencia es al revés, primero se construyen las obras del Nivel de Producción para finalmente realizar las del Nivel de Acarreo.

Por diversos motivos pueden existir requerimientos de ingeniería que obliguen a cambiar la secuencia constructiva de determinadas obras, o la no realización de otras. Un caso de esto corresponde a la construcción de Muros de Confinamiento antes de realizar la Carpeta de Rodado previa, o directamente realizar el Muro de Confinamiento sin Carpeta. Se debe tener especial cuidado durante el modelamiento en revisar si alguna de las obras a planificar tiene un requerimiento especial que obligue a modificar la secuencia constructiva genérica que se seguirá.

4.1.7 Restricciones

A continuación, se listan las restricciones que deberán ser incorporadas al modelo para representar todas las variables que afectan al Programa Rev. B.

- **Hitos**

Durante el horizonte temporal de un año en que el plan Rev. B incorpora todas las obras de preparación minera que se realizarán en la mina, se establecen una serie de hitos de construcción de obras que se deben cumplir, cada hito incorpora una o más obras que deberán estar completadas en una determinada fecha.

En UDESS estos hitos se modelarán como restricciones de progreso límite según el procedimiento explicado en la sección de “Hitos” en el punto 4.2.3.

- **Actividades fijas**

Varias actividades del Programa Rev. B tienen una fecha de realización fija durante el año, esto debido a que son parte de otros programas y por lo tanto tienen sus plazos asignados. Estas actividades se concentran en dos niveles, el de Hundimiento y el de Producción.

Las actividades fijas dentro del programa y el nivel en que se encuentran se listan a continuación:

- Perforación de hidrofracturamiento (NH y NP)
- Hidrofracturamiento (NH y NP)
- Perforación radial (NH)
- Socavación (NH)
- Perforación de zanjas (NP)
- Voladura de zanjas (NP)

En UDESS estas actividades se fijarán en las fechas determinadas utilizando restricciones de progreso límite según el procedimiento explicado en la sección de “Hitos” en el punto 4.2.3.

- **Zona de transición**

La mina Esmeralda es explotada mediante el método de Panel Caving con variante convencional, esto significa que las obras de preparación minera se deben realizar antes de que el avance de la zona de transición las alcance. Para lograr esto, las actividades cercanas a la zona de transición se deben finalizar por adelantado, esto se realizará en UDESS utilizando restricciones de progreso límite según el procedimiento explicado en la sección de “Zona de transición” en el punto 4.2.3.

- **Recursos**

Los recursos utilizados para el modelamiento del Programa Rev. B se muestran en la Tabla xiii. Se presenta el nombre de los 32 recursos utilizados en la construcción del modelo, el nivel, las obras del programa involucradas y la unidad correspondiente.

Tabla xiii. Listado de recursos utilizados en el modelamiento.

Nivel	Actividad	Recurso	Unidad
NH	Desarrollo horizontal	NH DH metros	m/mes
NH	Desarrollo vertical	NH DV metros	m/mes
NH	Fortificación de intersecciones	NH FI unidad	un/mes
NH	Perforación tiros de drenaje	NH Resto extras	un/mes
NP	Desarrollo horizontal	NP DH metros	m/mes
NP	Desarrollo vertical	NP DV metros	m/mes
NP	Carpeta de rodado	NP CR metros	m/mes
NP	Muro de confinamiento	NP MU unidad	un/mes
NP	Construcción punto de Extracción	NP PE unidad	un/mes
NP	Fortificación de intersecciones	NP FI unidad	un/mes
NP	Tiros de drenaje	NP TD metros	m/mes
ST	Excavación de punto de vaciado	ST DPV unidad	un/mes
ST	Construcción de brocal de punto de vaciado	ST BPV unidad	un/mes
ST	Rotura de chiflón de punto de vaciado	ST RCH unidad	un/mes
ST	Desquinche y fortificación de pique	ST DPQ unidad	un/mes
ST	Blindaje de piques	ST BPQ unidad	un/mes
ST	Construcción base martillo	ST BM unidad	un/mes
ST	Instalación telecomando martillo	ST TM unidad	un/mes
NA	Desarrollo horizontal	NA DH metros	m/mes
NA	Desarrollo vertical	NA DV metros	m/mes
NA	Tiros de drenaje	NA TD metros	m/mes
NA	Construcción máquinas de cambio	NA CMC unidad	un/mes
NA	Preparación piso vía férrea	NA PVF metros	m/mes
NA	Construcción vía férrea	NA CVF metros	m/mes
NA	Construcción trolley	NA CT metros	m/mes
NA	Fortificaciones especiales	NA FE metros	m/mes
SNV	Desarrollo horizontal	SNV DH metros	m/mes
SNV	Desarrollo vertical	SNV DV metros	m/mes
SNV	Construcción salas de ventiladores	SNV CSV unidad	un/mes
SNV	Montaje de ventiladores	SNV MV unidad	un/mes
SNV	Habilitación de ventiladores	SNV HV unidad	un/mes
SNV	Construcción de cunetas de drenaje	SNV CD metros	m/mes

Los consumos de recursos fueron modelados en UDESS utilizando restricciones de recurso operacional, según el procedimiento descrito en la sección “Límites de recursos” del punto 4.2.3.

- **Desarrollos horizontales en múltiples frentes**

Operacionalmente, en la construcción de desarrollos horizontales no es conveniente trabajar a frente única, para maximizar la utilización de los recursos se requiere que haya múltiples frentes disponibles.

En UDESS esto se modeló con restricciones de rango de recursos, siguiendo el procedimiento descrito en la sección “Desarrollos horizontales en múltiples frentes” del punto 4.2.3.

- **Bloques de actividades**

Estas restricciones son del tipo operacional y surgen de la necesidad de optimizar el uso de los recursos en ciertas obras civiles como muros de confinamiento o puntos de extracción, en que generar la construcción de las obras como bloques, manteniendo los puntos de trabajo cercanos entre obras, permite disminuir los tiempos de traslado de equipos y cuadrillas, disminuyendo interferencias y mejorando la productividad.

En UDESS esto se modeló con restricciones de rango de recursos, siguiendo el procedimiento descrito en la sección “Bloques de actividades” del punto 4.2.3.

- **Ramp-up de rendimientos**

Debido a condiciones operacionales, en los meses de verano (enero y febrero) y post cambio de contrato (agosto y septiembre), la construcción de obras se ve mermada dentro de la mina.

De la misma forma, en el mes de diciembre se produce un efecto administrativo en que el mes se cierra el día 10 de enero del año siguiente, generando el efecto de que en enero se reduzca el rendimiento y en diciembre aumente con respecto a los otros meses. Para efectos de las restricciones en UDESS, se realizó un traspaso del 20% de enero hacia diciembre.

Para modelar esto en UDESS se utilizaron restricciones de recurso operacional, disminuyendo los rendimientos bases de todas las actividades en un porcentaje predefinido (según criterio experto e información histórica). El procedimiento para la construcción de las restricciones es el explicado en la sección “Límites de recursos” del punto 4.2.3.

Los porcentajes se muestran en la Tabla xiv.

Tabla xiv. Porcentajes utilizados en los ramp-up de rendimientos.

Mes	Porcentaje del rendimiento base [%]
Enero	60%
Febrero	80%
Agosto	50%
Septiembre	90%
Diciembre	120%

- **Cambio de contrato**

Debido al cambio de contrato estipulado para los Niveles de Producción y Hundimiento de la mina, por parte de los planificadores se definió no programar actividades en el mes de Julio (mes de ejecución del cambio de contrato). En UDESS esto se modeló con restricciones de recurso operacional, siguiendo el procedimiento de la sección “Límites de recursos” del punto 4.2.3.

4.2 Modelamiento

En esta sección se muestran las consideraciones y la forma en que se realizó el modelamiento del Programa Rev. B en UDESS.

4.2.1 Actividades

Las actividades corresponden a todas las actividades de preparación minera a desarrollarse durante la ejecución del programa. Estas obras civiles pueden o no ser discretizadas en varias actividades, que, desarrolladas en conjunto, representan la ejecución de la obra civil completa. La decisión de hacer la división en obras más pequeñas tendrá directa relación con el tipo de obra, siendo las más comunes las obras ejecutadas en “metros” ya que, por lo general, son de gran extensión.

Por ejemplo, considerando la obra de desarrollo horizontal en el Nivel de Hundimiento, al sur del XC Acceso 6, por la Calle 37, se tiene que se deben realizar 37.9 metros de galería, para agendar la obra y discretizar los frentes de trabajo, dicho desarrollo se discretizó en 3 actividades más pequeñas, de 12.8, 12.7 y 12.4 metros cada una.

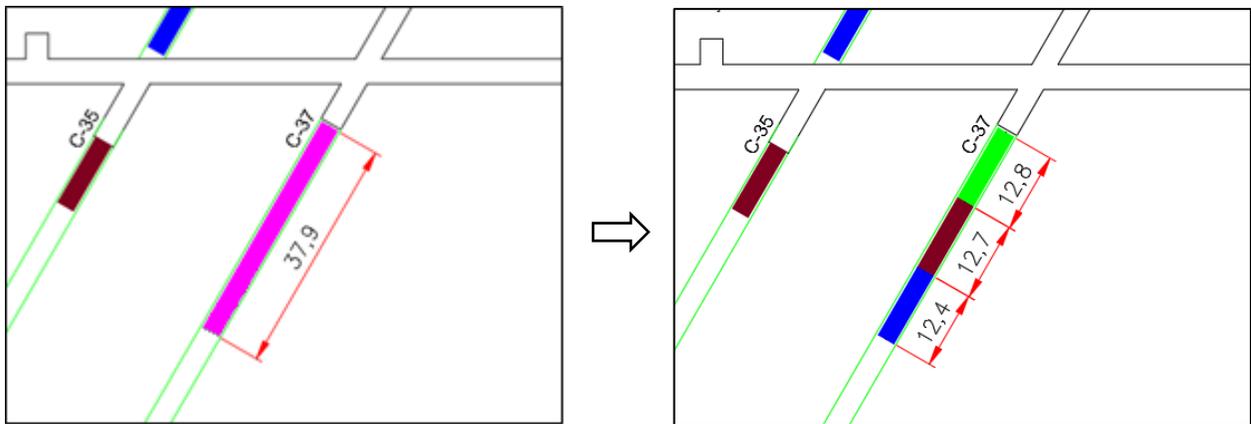


Figura 14. Resultado del proceso de discretización de una actividad.

Es importante mencionar que la discretización de las actividades utilizada en el modelamiento es la misma que fue utilizada para construir el Programa Rev. B 2017 en el área de planificación de la GOBM, la única diferencia y que a la vez es una ventaja, es que UDESS permite ejecutar la obra completa o solo una parte de ella en los diferentes periodos, por lo que la discretización utilizada no es una limitación, sino que solo una forma de construcción.

4.2.2 Precedencias

Antes de construir las precedencias de cada una de las actividades fue necesaria la elaboración de una secuencia constructiva genérica para la Mina Esmeralda, ya que no se disponía de ella de forma directa. La información utilizada para su elaboración corresponde a la que se encuentra listada en el punto 4.1.6.

La secuencia se elaboró para cada nivel por separado, partiendo por el Nivel de Hundimiento, seguido por el Nivel de Producción, Sistema de Traspaso, Nivel de Acarreo y finalmente el Subnivel de Ventilación. El detalle de la secuencia para cada uno de los niveles se puede ver en el Anexo 0.

La segunda etapa fue realizar las conexiones de precedencias entre niveles (sin sistema de ventilación) para finalmente agregar las precedencias relacionadas a los sistemas de ventilación.

El resultado final de la secuencia constructiva se puede ver en el diagrama de la Figura 20.

4.2.3 Restricciones

Se presenta la forma en que se modelaron las restricciones incorporadas en el modelo.

- **Hitos**

Las restricciones de hitos en UDESS fueron modeladas como restricciones de progreso límite, es decir, se seleccionaron la o las actividades de preparación asociadas a un determinado hito y se definió que antes de la fecha requerida, la actividad debería alcanzar un progreso del 100%.

Para esto, se define como periodo de inicio el primer periodo, y como periodo final, el periodo asociado a la fecha del hito, con esto se le indica al programa que debe realizar la actividad dentro de ese rango de periodos. Para forzar que se complete la o las actividades, se indica que el progreso mínimo y el progreso máximo sean de un 100%. A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento con uno de los hitos del programa.

Ejemplo: Considerando para el Nivel de Hundimiento el hito N° 1 de la Tabla v, el cual consiste en terminar la galería especial al sur XC Acceso 4, se define que la fecha límite corresponde al mes de febrero, por lo tanto, el segundo periodo del modelo.

El desarrollo horizontal asociado a dicha galería está compuesto por 5 tramos, lo que en el modelo corresponde a 5 actividades, para cada actividad se creó una restricción de progreso límite, con el fin de forzar el desarrollo completo de la galería antes de la fecha límite.

Los parámetros de las 5 restricciones son los mismos y se definen en los siguientes puntos:

- Periodo de inicio: 1 (enero)
- Periodo final: 2 (febrero)
- Progreso mínimo: 1 (100%)
- Progreso máximo: 1 (100%)

- **Límites de recursos**

Para modelar el consumo de recursos por las actividades dentro del modelo en UDESS se utilizaron restricciones de recurso operacional. Estas restricciones requieren que previamente se le asigne a la actividad que se va a restringir, un recurso y cuánto de ese recurso se va a consumir por el desarrollo de la actividad.

El procedimiento para la construcción de las restricciones es el siguiente:

1. Definir qué recurso se va limitar y en qué periodos
2. Establecer límites mínimos y máximos de consumo para el recurso dentro de ese rango de periodos.

El procedimiento se explica a continuación con un ejemplo.

Ejemplo: Considerando la restricción operacional existente para el año 2017 en que se indica que para el mes de julio en los niveles de hundimiento y producción ocurriría un cambio de contrato, se definió no programar actividades de preparación en ese periodo. Por lo tanto, como ejemplo se restringirá la construcción de muros de confinamiento en el periodo indicado.

Para tal efecto, al modelar el Nivel de Producción se creó un recurso llamado “NP MU”, este recurso tiene un valor de 1 para todas las actividades de muros de confinamiento y tiene un valor de 0 para todo el resto de actividades.

Al crear la restricción requerida, los parámetros a utilizar serán los siguientes:

- Recurso: NP MU
- Periodo de inicio: 7 (julio)
- Periodo final: 7 (julio)
- Límite inferior: 0 (permite que el consumo sea 0)
- Límite superior: 0 (junto con la anterior, obliga a que el consumo de ese recurso sea 0)

- **Zona de transición**

Las restricciones utilizadas para modelar el avance de las obras de preparación por delante de la zona de transición corresponden a restricciones de progreso límite. A partir de las proyecciones de avance de la zona de transición, se fijaron los periodos límites en los cuales la actividad debe estar desarrollada en un 100%.

El procedimiento de construcción fue el siguiente:

1. Considerando las proyecciones de avance de la zona de transición para el año 2017, se selecciona la proyección de avance más cercana al frente actual.
2. Identificar todas las actividades dentro de la zona proyectada.
3. Para cada una de esas actividades, crear una restricción de progreso límite, con el fin de forzar el desarrollo de la actividad antes de que sea alcanzada por el avance de la zona de transición.
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 para la siguiente proyección de avance de la zona de transición.

A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento con una de las proyecciones de avance.

Ejemplo: Considerando el Nivel de Hundimiento de la Mina Esmeralda Sur, la primera proyección de avance de la zona de transición corresponde a la del mes de marzo de 2017.

De la Figura 15 se puede ver que hay un tramo del desarrollo horizontal de 16.5 metros que conecta a través de la Calle 45, el XC Acceso 5 con el XC Acceso 6 que se encuentra dentro de zona delimitada como proyección. Por lo tanto, para ese tramo de DH, que se representa como una actividad dentro del modelo, se debe crear una restricción de progreso límite que fuerce el cumplimiento de la actividad antes de la fecha indicada por la proyección. La fecha límite será un mes antes de la fecha indicada por la proyección ya que se debe considerar que el avance de la zona de transición es continuo y, por lo tanto, la obra de preparación debe estar hecha antes de la llegada del frente, no se debe realizar bajo la zona de transición.

Los parámetros para la restricción serán:

- Periodo de inicio: 1 (enero)
- Periodo final: 2 (febrero, un periodo antes de la fecha indicada como límite)
- Progreso mínimo: 1 (100%)
- Progreso máximo: 1 (100%)



Figura 15. Representación para construcción de restricciones de zona de transición.

Una vez terminadas las restricciones para la primera zona, se pasa a la siguiente proyección de avance y se repite el procedimiento. Para el caso del ejemplo, corresponde a la proyección de junio de 2017.

• Desarrollos horizontales en múltiples frentes

En UDESS existen dos formas de modelar que los desarrollos horizontales se realicen en múltiples frentes, la primera es utilizando restricciones de incompatibilidad, y la segunda es con restricciones de rango de recursos.

Como se explicó previamente, para este trabajo el modelamiento se realizó con restricciones de rango de recursos, pero, para términos de explicar la metodología de modelamiento, a continuación, se explicará el procedimiento con ambos métodos.

Restricciones de incompatibilidad: El procedimiento para poder utilizar este tipo de restricciones es el siguiente:

1. Una vez segmentadas las actividades, según el procedimiento mencionado en el punto 4.2.1, para cada par de segmentos de un desarrollo horizontal, que sean consecutivos, se deberán crear 12 restricciones de incompatibilidad, 1 por cada periodo.
2. En cada restricción se indicará que para ese par de actividades el límite de consumo de la restricción será de 1 (solo una de las dos actividades podrá realizarse en ese periodo).
3. Repetir el procedimiento para el siguiente par de segmentos consecutivos.

El procedimiento se explica a continuación con un ejemplo:

Ejemplo: Considerando un desarrollo horizontal de 60 metros de largo, dividido en 4 segmentos de 15 metros cada uno. Nombrando los segmentos como S1, S2, S3 y S4, existen 3 grupos de pares de segmentos consecutivos para los cuales se deben crear las restricciones, estos son: S1-S2, S2-S3, S3-S4. Para cada uno de estos 3 pares de segmentos se deberán crear 12 restricciones de incompatibilidad con los siguientes parámetros. Para el primer par, la primera restricción tendrá los siguientes parámetros:

- Actividades: S1-S2
- Periodo inicial: 1 (enero)
- Periodo final: 1 (enero)
- Cantidad: 1 (solo 1 actividad se completará en ese periodo)

Para las siguientes 11 actividades solo se debe variar los periodos de inicio y términos a los 11 meses restantes. Posteriormente, repetir el procedimiento para cada uno de los 2 pares de actividades restantes.

Restricciones de rango de recursos: El procedimiento para poder utilizar este tipo de restricciones es el siguiente:

1. Identificar un desarrollo horizontal en donde, después de realizada la segmentación, por su naturaleza pueda existir la probabilidad de ocurrencia de que el programa realice muchas actividades el mismo periodo, generando una frente única.
2. Formar grupos de 3 a 6 segmentos consecutivos.
3. Para cada grupo de segmentos se deberán crear 12 restricciones de rango de recursos, una para cada periodo.
4. En cada restricción se debe asignar un recurso (creado previamente, asignado para todas las actividades involucradas) que tendrá un consumo de 1 durante el periodo que indica la restricción, así, para cada grupo de actividades, en cada periodo, solo se podrá desarrollar una de las actividades.

El procedimiento se explica a continuación con un ejemplo:

Ejemplo: Considerando un desarrollo horizontal de 90 metros de largo, dividido en 6 segmentos de 15 metros cada uno. A cada segmento se le asigna un nombre identificador, para este caso: S1, S2, S3, S4, S5 y S6.

Los 6 segmentos se pueden dividir en 2 grupos de 3 actividades cada uno, las actividades dentro de cada grupo deben ser consecutivas. Resultando en un Grupo 1 (G1) conteniendo a las actividades S1, S2 y S3, y un Grupo 2 (G2) conteniendo las actividades S4, S5 y S6.

Para cada uno de estos 2 grupos de segmentos se deberán crear 12 restricciones de rango de recursos. Para el primer grupo, la primera restricción tendrá los siguientes parámetros:

- Actividades: S1-S2-S3
- Recurso: Recurso (mismo recurso asignado a todas las actividades involucradas)
- Periodo inicial: 1 (enero)
- Periodo final: 1 (enero)
- Límite inferior: 0 (permite que en ese periodo no se realice ninguna actividad del bloque)
- Límite superior: 1 (permite que en el periodo se realice solo 1 actividad del bloque)

Para las siguientes 11 restricciones solo se debe variar los periodos de inicio y términos a los 11 meses restantes. Posteriormente, repetir el procedimiento para el otro grupo de actividades.

• **Bloques de actividades**

Para generar bloques o clústeres de actividades en determinados periodos se utilizaron restricciones de periodo límite. El procedimiento que se utilizó para su modelamiento fue el siguiente:

1. A partir de la dirección de crecimiento del sector y de las proyecciones de crecimiento de la zona de transición, se define la dirección en que se construirán los bloques, siguiendo la dirección de los dos puntos recién mencionados.
2. El total de actividades se divide en no más de 5 bloques, de tamaño similar. Los periodos se dividen en la misma cantidad de bloques para después hacer la asignación.
3. Definidos los bloques, y considerando uno de estos, para cada actividad dentro del bloque se crea una restricción de progreso límite, en que se indica que se requiere un progreso del 100% para la actividad, dentro de los periodos especificados. El periodo inicial para todas las actividades es el 1, ya que se desea que se haga lo antes posible, mientras que el periodo final será el que se asignó al respectivo bloque en el punto 2.

A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento recién mencionado.

Ejemplo: Se considerarán para el ejemplo todas las obras de Muros de Confinamiento del Nivel de Producción de la mina Esmeralda Sur.

Existen 92 muros de confinamiento, los cuales se dividirán en 5 bloques de actividades, como se puede ver en la Figura 16, donde bloque tiene un periodo final asignado.

Considerando el Bloque 1, con fecha hasta marzo, significa que todas las restricciones asociadas a las actividades de ese bloque tendrán los siguientes parámetros:

- Periodo de inicio: 1 (enero)
- Periodo final: 2 (febrero, un periodo antes de la fecha indicada como límite)
- Progreso mínimo: 100%
- Progreso máximo: 100%

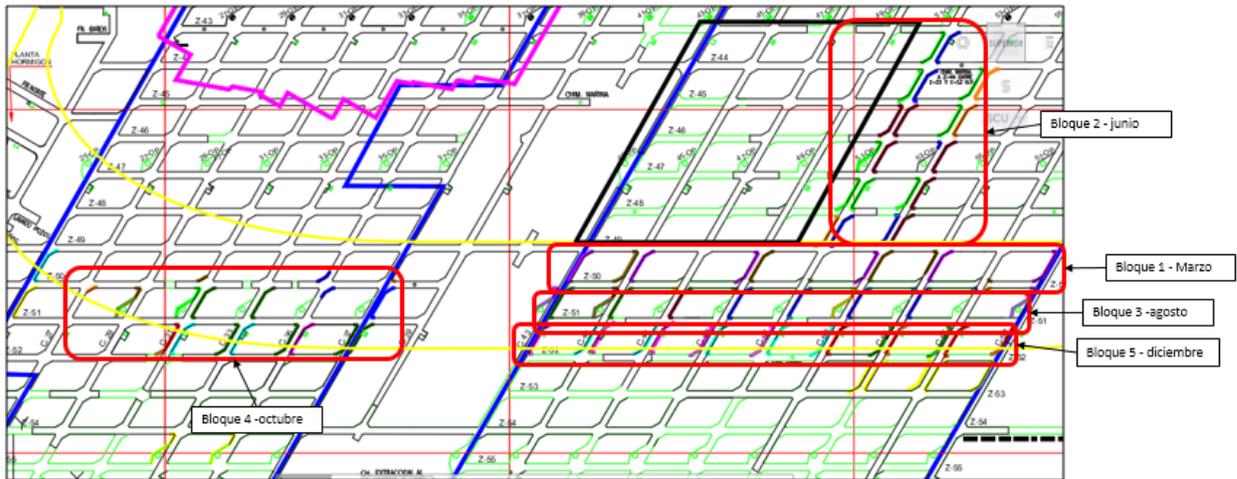


Figura 16. Representación para construcción de restricciones de agrupación por bloques.

El mismo procedimiento es aplicable a otras actividades que requieran su desarrollo por bloques, como por ejemplo la construcción de los puntos de extracción.

4.3 Resultados

Se muestran los resultados principales obtenidos del modelamiento del programa Rev. B en UDESS.

4.3.1 Resultados globales del modelamiento

La Tabla xv muestra un resumen de los resultados del modelamiento realizado en UDESS.

Tabla xv. Resumen modelamiento realizado en UDESS.

Nivel	Actividades	Precedencias	Restricciones
Nivel de Hundimiento	210	417	409
Nivel de Producción	775	1489	812
Sistema de Traspaso	153	258	39
Nivel de Acarreo	140	232	64
Subnivel de Ventilación	162	286	68
Total	1,440	2,682	1,392

En el modelamiento en UDESS se utilizaron precedencias del tipo “o” y del tipo “y”, el gráfico de la Figura 17 muestra la distribución de las precedencias según el tipo. En la Figura 18 se puede ver la distribución de las precedencias para cada nivel.

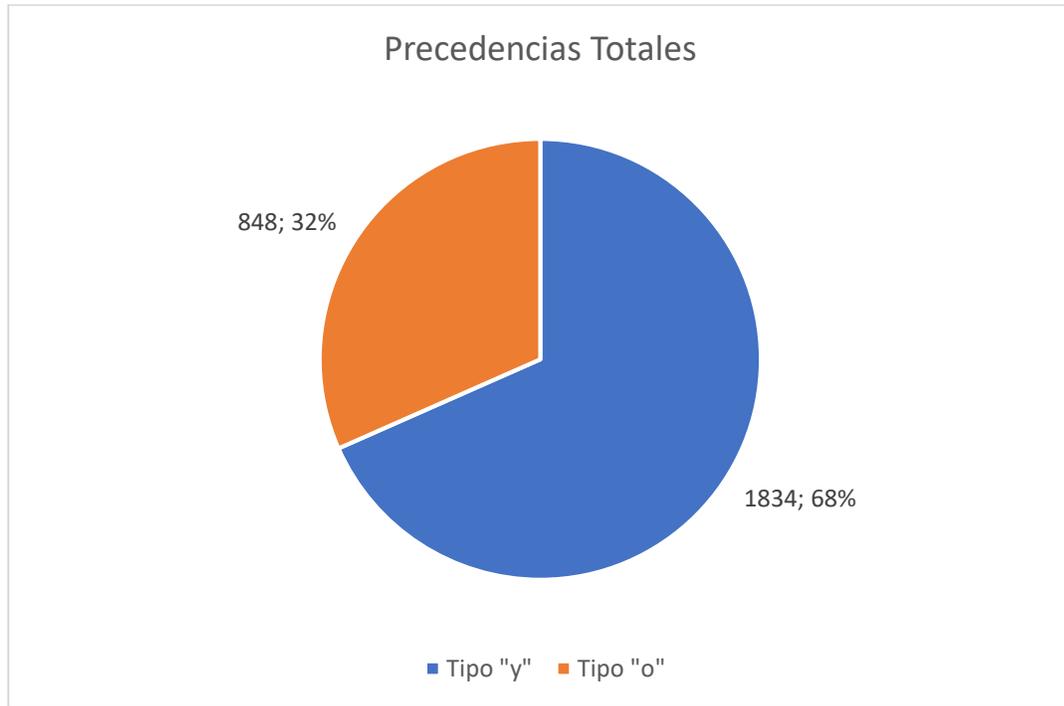


Figura 17. Distribución global de precedencias en el modelo.

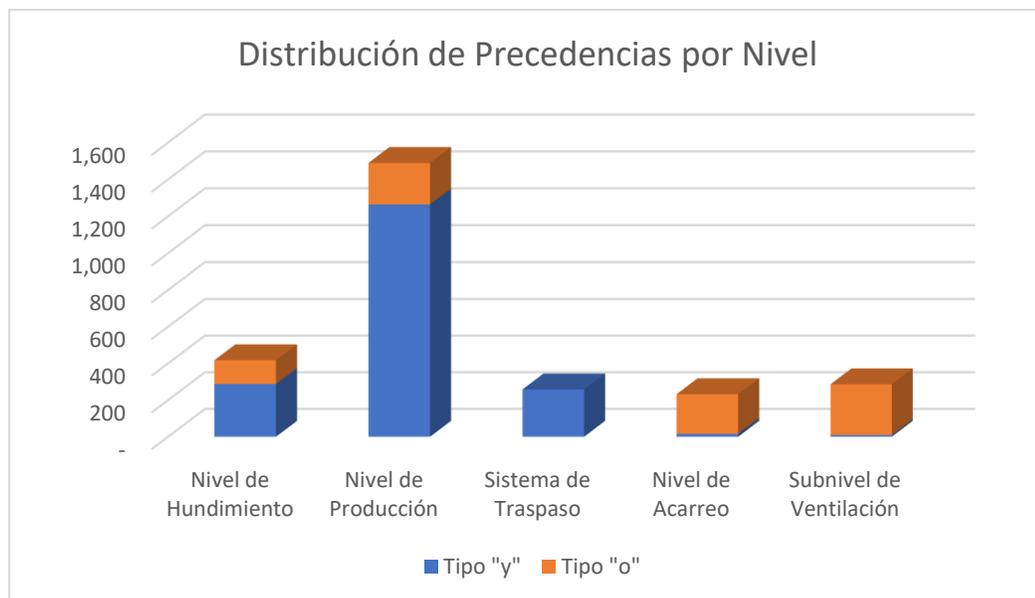


Figura 18. Distribución de precedencias por nivel.

Distribución de Precedencias por Nivel en Porcentaje

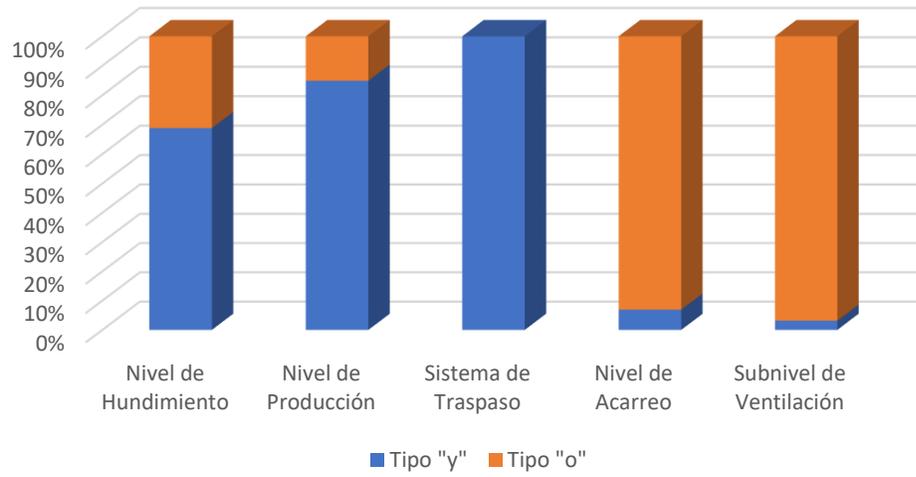


Figura 19. Distribución de precedencias por Nivel en Porcentaje.

La Figura 20 la secuencia constructiva genérica desarrollada para la Mina Esmeralda 2017.

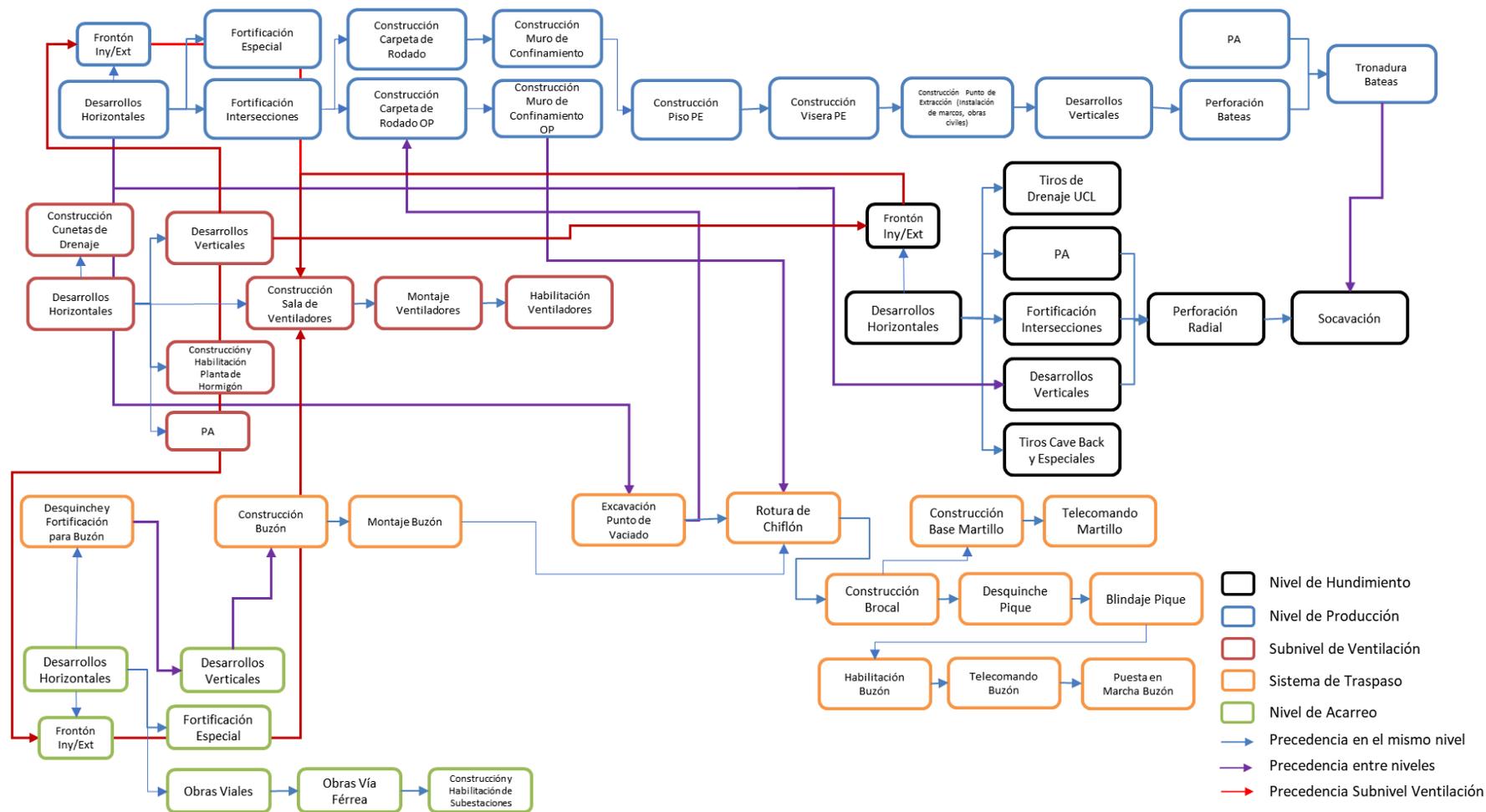


Figura 20. Precedencias de todas las actividades principales del sector Esmeralda Sur. Se incluye la interacción entre niveles.

El detalle de las precedencias para los respectivos niveles se puede ver en el Anexo 1.

Con respecto a las restricciones, el gráfico de la Figura 21 muestra la distribución de las restricciones según el tipo mientras que el gráfico de la Figura 22 muestra la distribución de las restricciones para cada uno de los niveles.

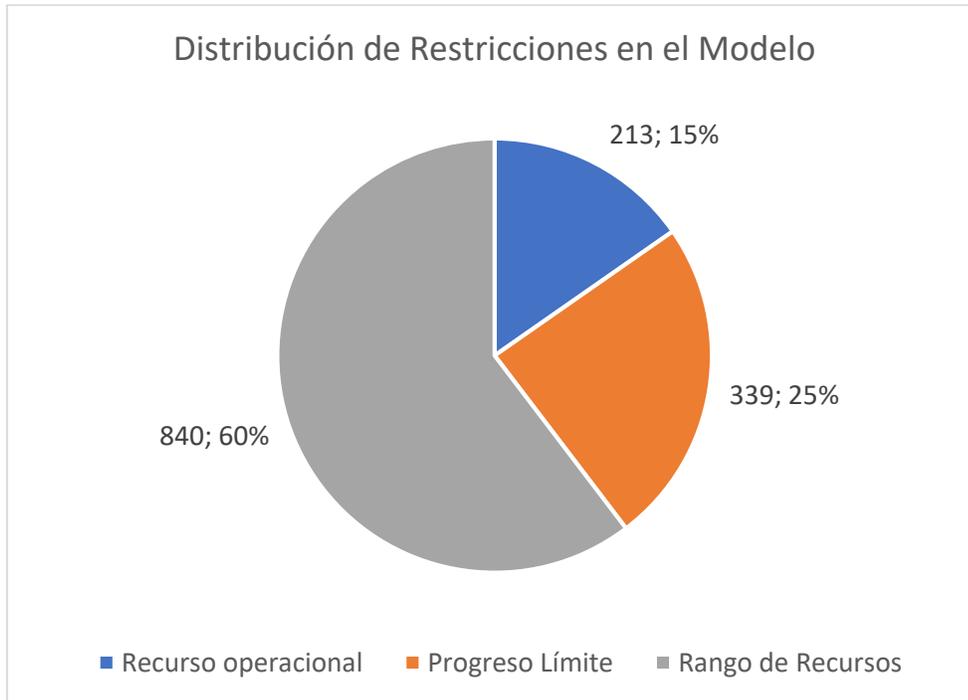


Figura 21. Distribución global de restricciones en el modelo.

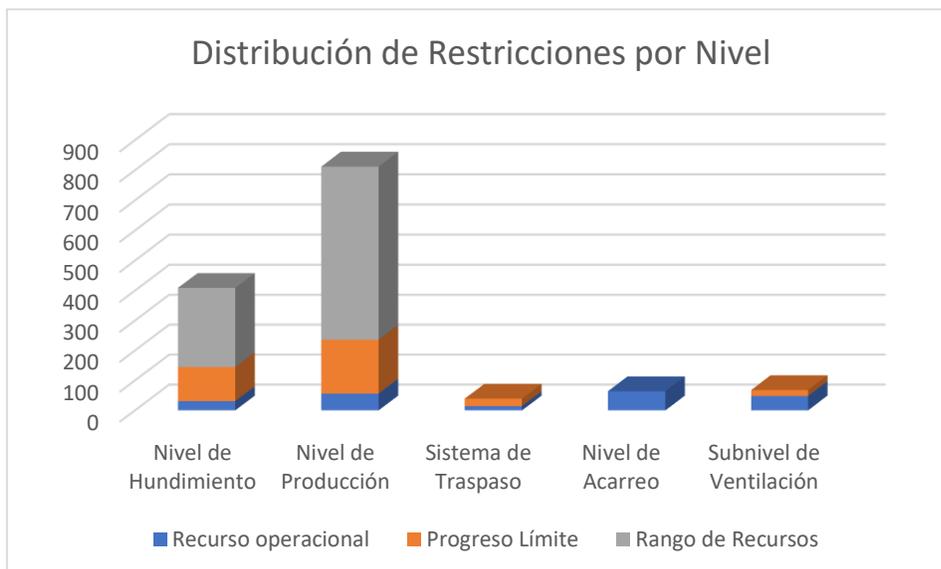


Figura 22. Distribución de restricciones por nivel.

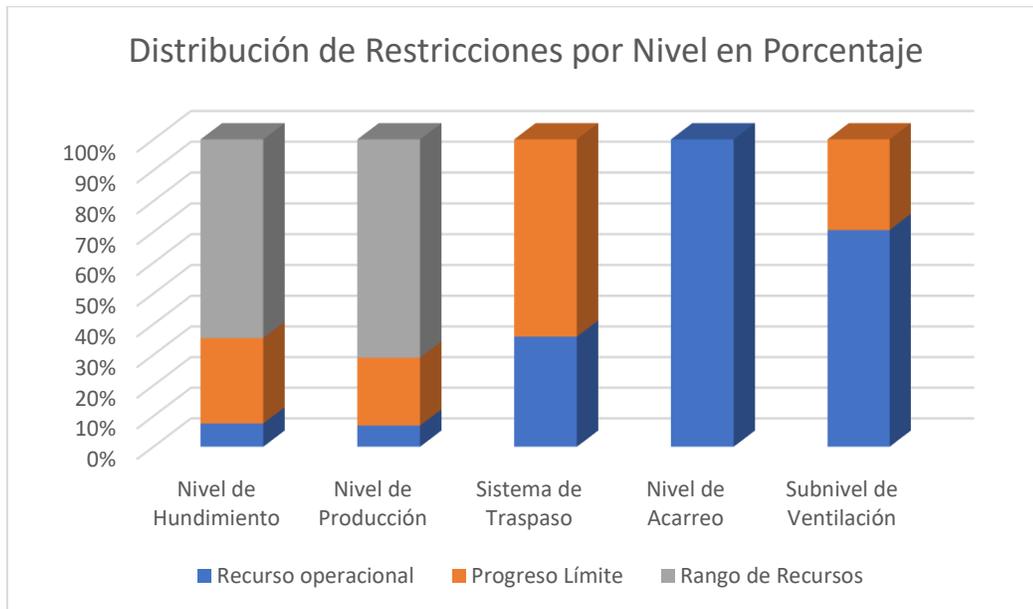


Figura 23. Distribución de restricciones por nivel en porcentaje.

4.3.2 Actividades principales

A continuación, se presenta la comparación gráfica del agendamiento obtenido en UDESS con el realizado por los planificadores en el Programa Rev. B 2017. Con respecto a las actividades, se mostrarán las actividades con mayor presencia de obras y las actividades críticas. El detalle y la comparación mensual para todas las actividades se puede ver en el Anexo 2.

La actividad que presenta la mayor cantidad de obras en el Nivel de Hundimiento corresponde a los Desarrollos Horizontales. Ver Figura 24.

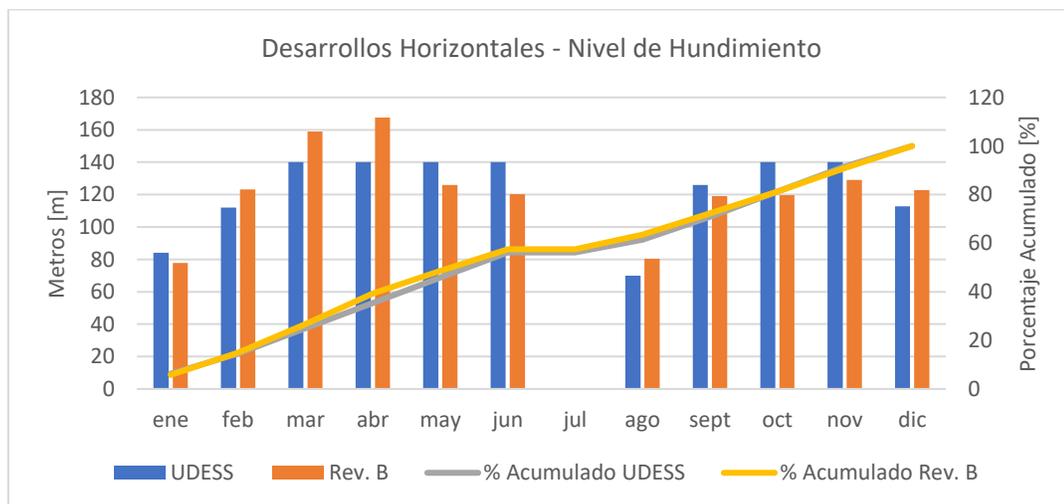


Figura 24. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Hundimiento.

Las actividades críticas dentro del Nivel de Producción son los Desarrollos Horizontales, Desarrollos Verticales, Muros de Confinamiento y Puntos de Extracción. Los gráficos comparativos para cada una de estas actividades se presentan a continuación.

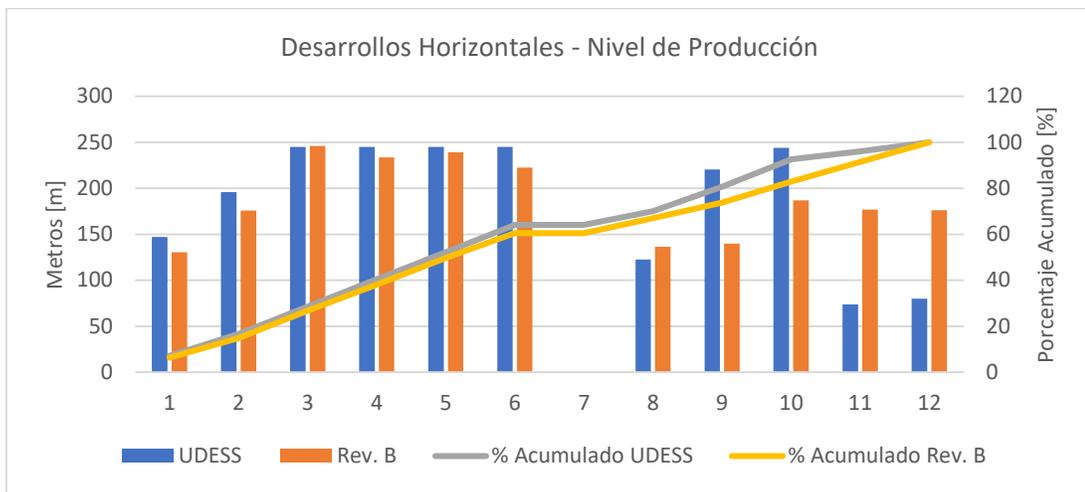


Figura 25. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Producción.

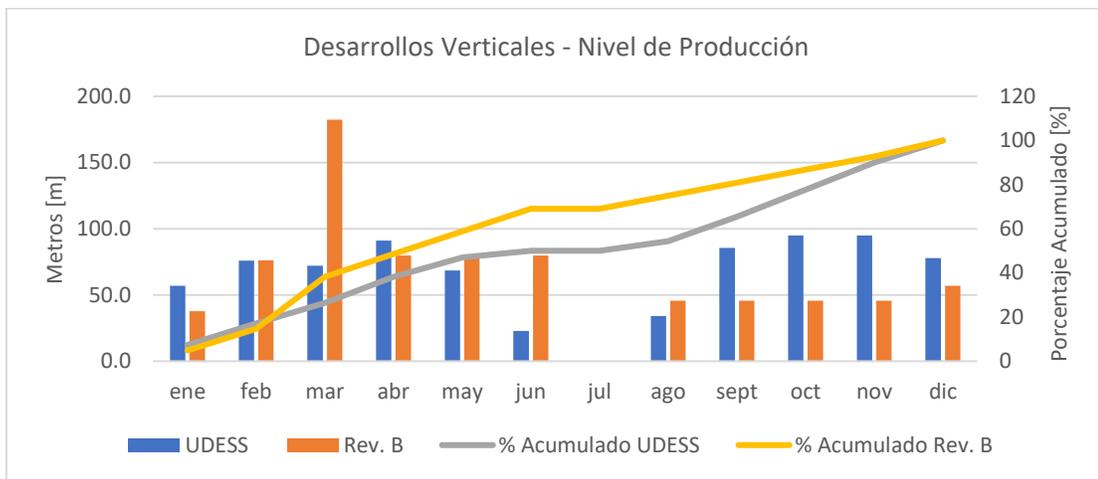


Figura 26. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Nivel de Producción.

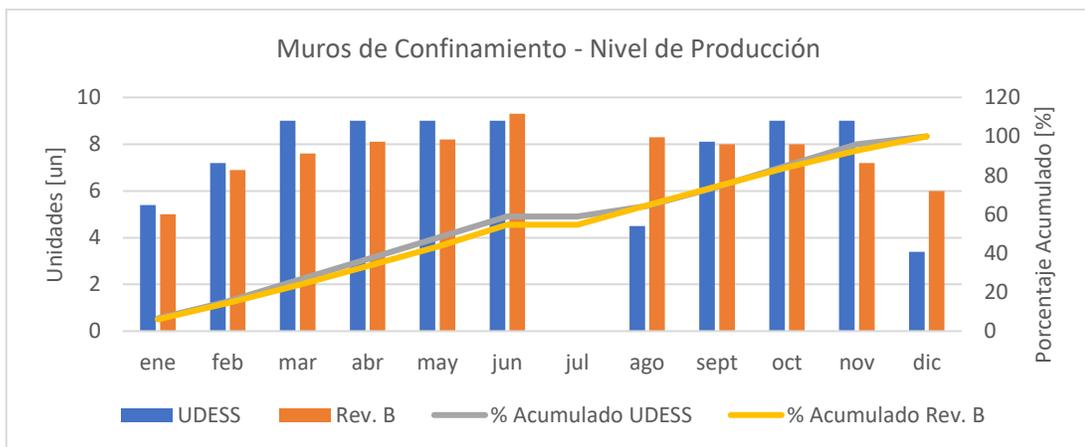


Figura 27. Comparación de agendamientos para los Muros de Confinamiento del Nivel de Producción.

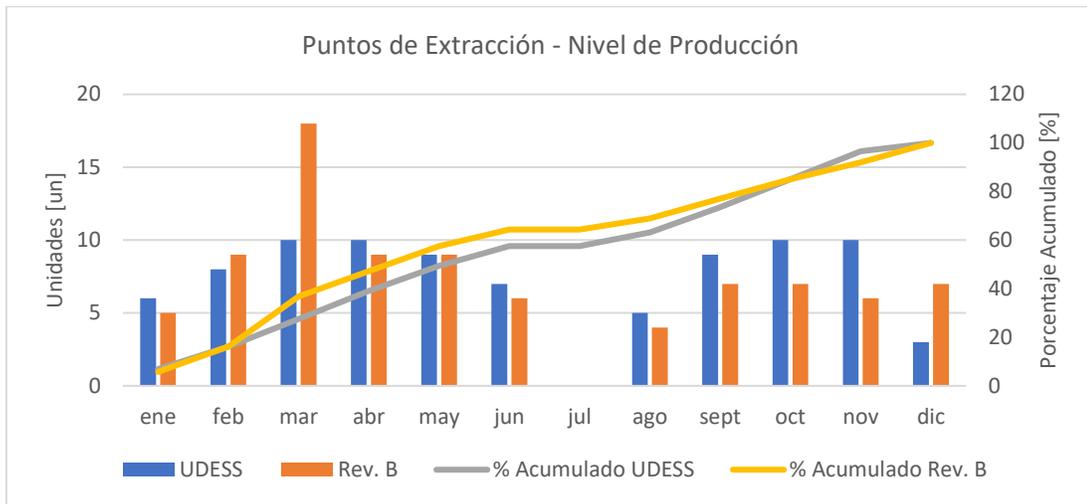


Figura 28. Comparación de agendamientos para los Puntos de Extracción del Nivel de Producción.

La totalidad de las actividades asociadas a los sistemas de traspaso se consideran como actividades críticas. A continuación, se presentan gráficamente tres de las más relevantes dentro de la secuencia, esta son el blindaje de pique, habilitación hidráulica de buzón y construcción de buzón, las que corresponden a actividades relevantes dentro de los trabajos interior pique, habilitación y construcción de obras civiles respectivamente.

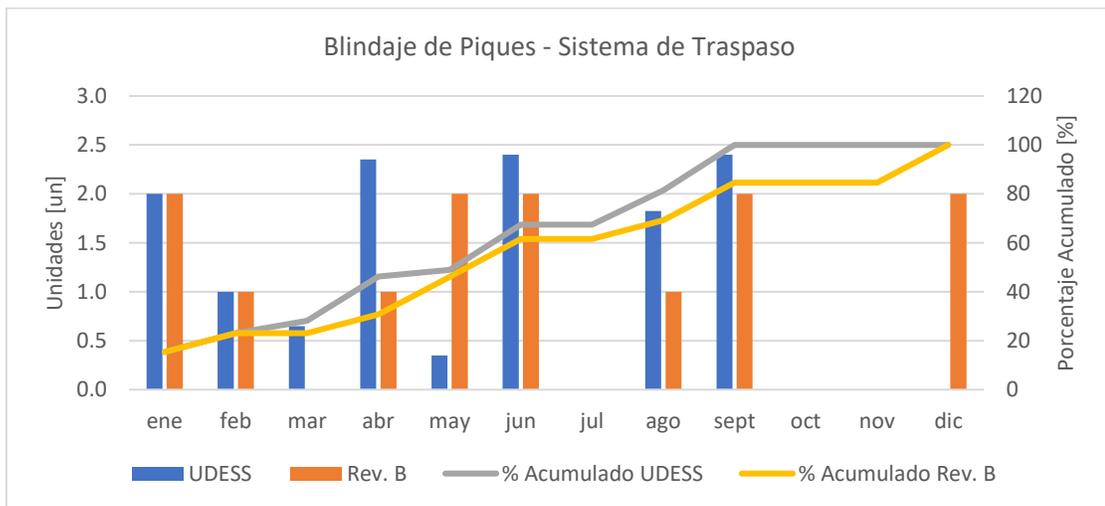


Figura 29. Comparación de agendamientos para los Blindajes de Pique del Sistema de traspaso.

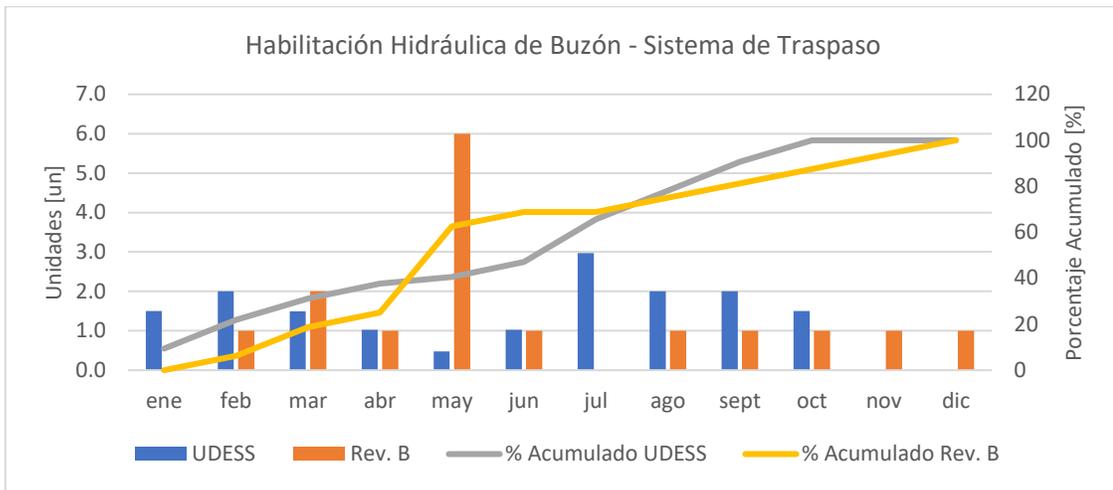


Figura 30. Comparación de agendamientos para la Habilitación Hidráulica de los Buzones del Sistema de traspaso.

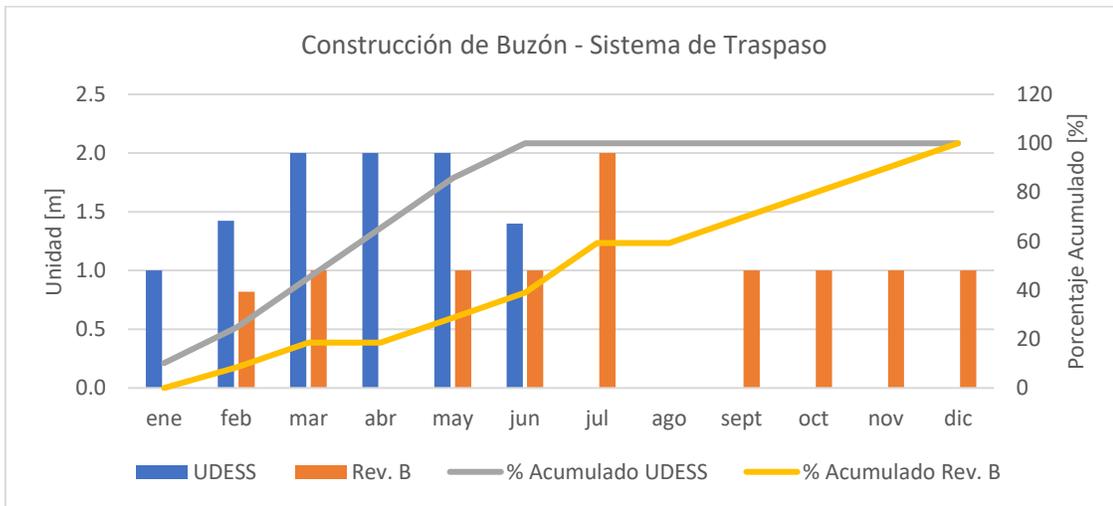


Figura 31. Comparación de agendamientos para la Construcción de los Buzones del Sistema de traspaso.

Dentro del nivel de acarreo, las obras más relevantes están los desarrollos horizontales y verticales, los que se presentan a continuación.

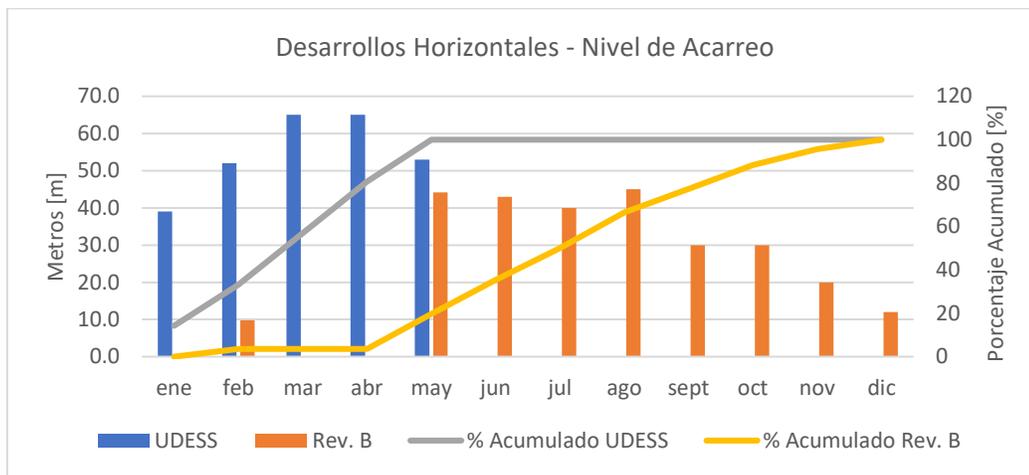


Figura 32. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Nivel de Acarreo.

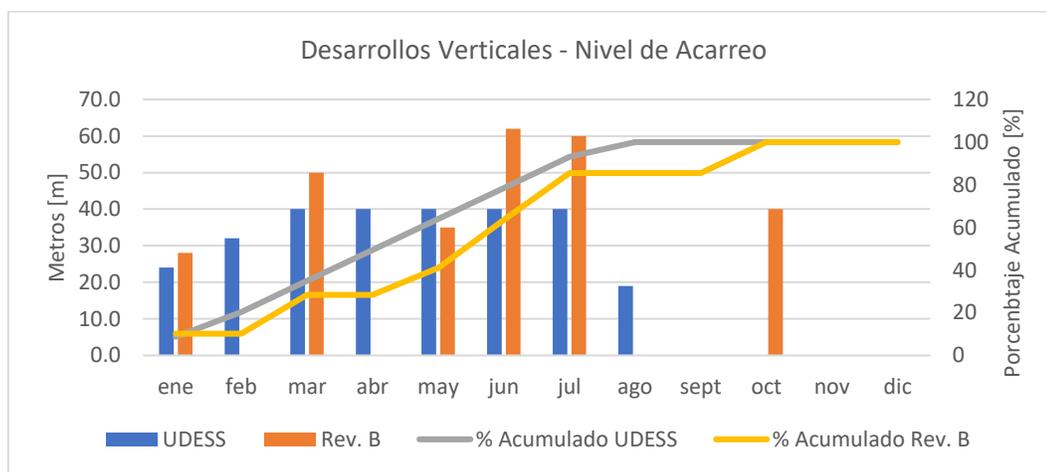


Figura 33. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Nivel de Acarreo.

Al igual que para el Nivel de Acarreo, para el Subnivel de Ventilación las obras más relevantes y con mayor volumen corresponden a los desarrollos horizontales y verticales, cuyos gráficos se presentan a continuación.

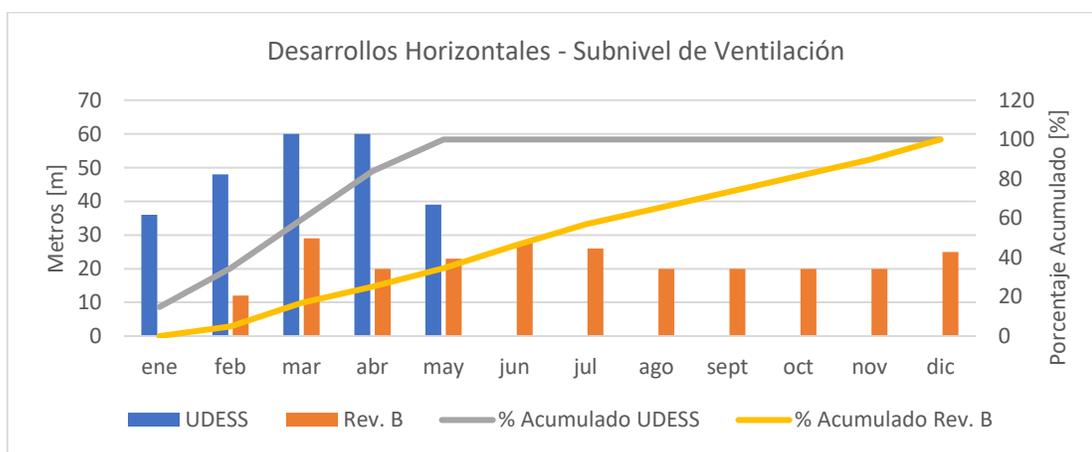


Figura 34. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Horizontales del Subnivel de Ventilación.

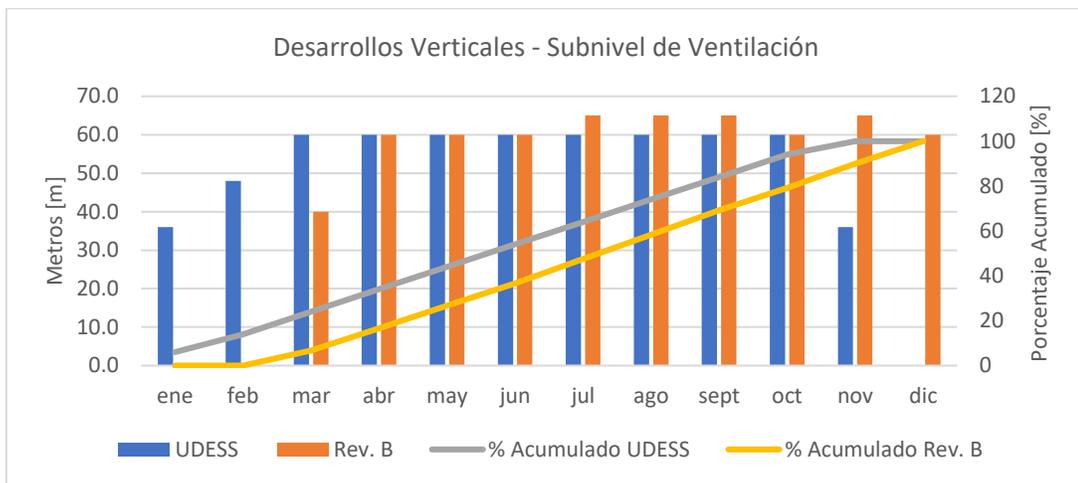


Figura 35. Comparación de agendamientos para los Desarrollos Verticales del Subnivel de Ventilación.

4.3.3 Resultados análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad a las fechas establecidas para los Hitos en el programa. El fin es verificar si al cambiar (adelantar) las fechas, el programa siendo factible o no.

Un resumen de los resultados del análisis de sensibilidad realizado a los hitos establecidos para el programa se presenta a continuación. De la Figura 36 se puede ver que, en la primera prueba, consistente en adelantar la fecha límite de los hitos en un periodo, el 59% de los hitos no lo permite, mientras que el 41% restante sí.

Los resultados indican que solo 1 hito pudo adelantarse 2 periodos, los otros 6 que habían adelantado 1 periodo, no pudieron hacerlo en uno adicional.

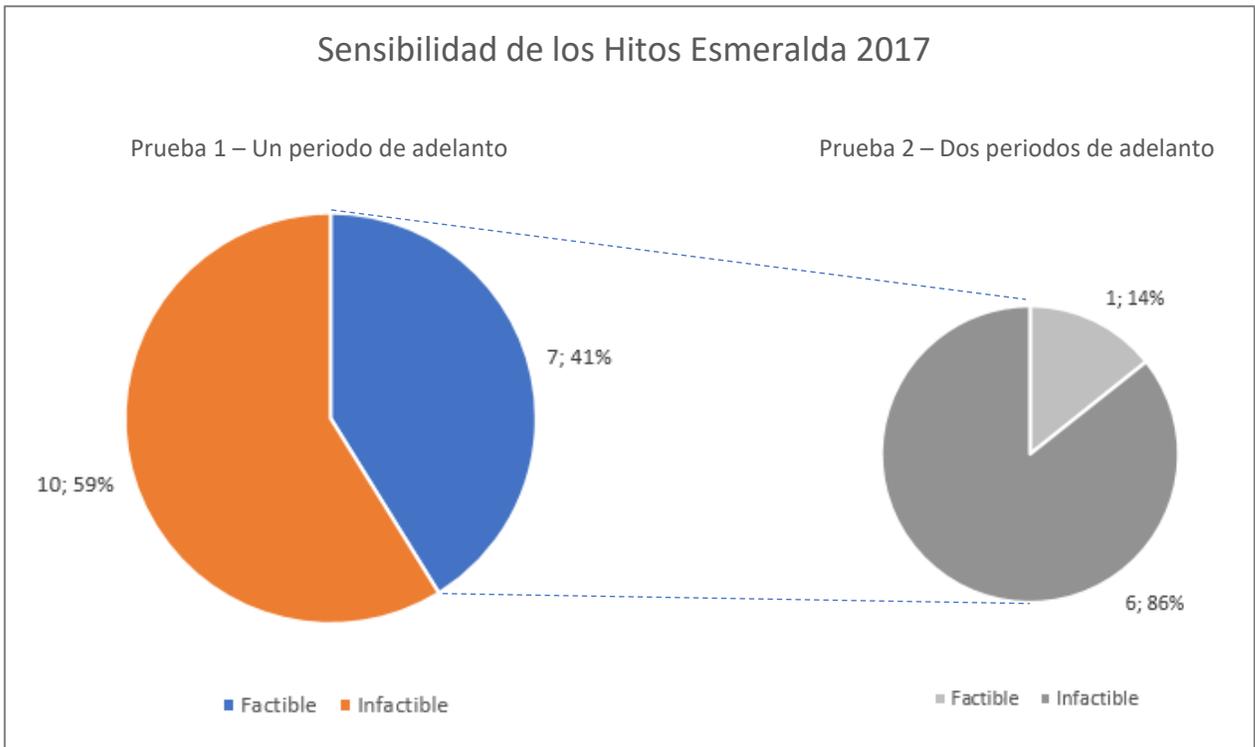


Figura 36. Porcentajes de hitos que lograron ser adelantados en las dos pruebas realizadas.

Cada hito tiene asociada una determinada cantidad de actividades, el detalle de la cantidad, hitos y fechas límites para cada prueba se puede ver en el Anexo 3.

Con respecto a las actividades pertenecientes a cada uno de los hitos, la Figura 37 muestra los porcentajes de obras de preparación que dieron factibles a las dos pruebas realizadas. Un 57% de las actividades mostraron ser factible de adelantarse un periodo en su fecha de término para la primera prueba, mientras que, para la segunda, solo un 3% de las que pudieron cambiar su fecha de término resultaron en un programa factible.

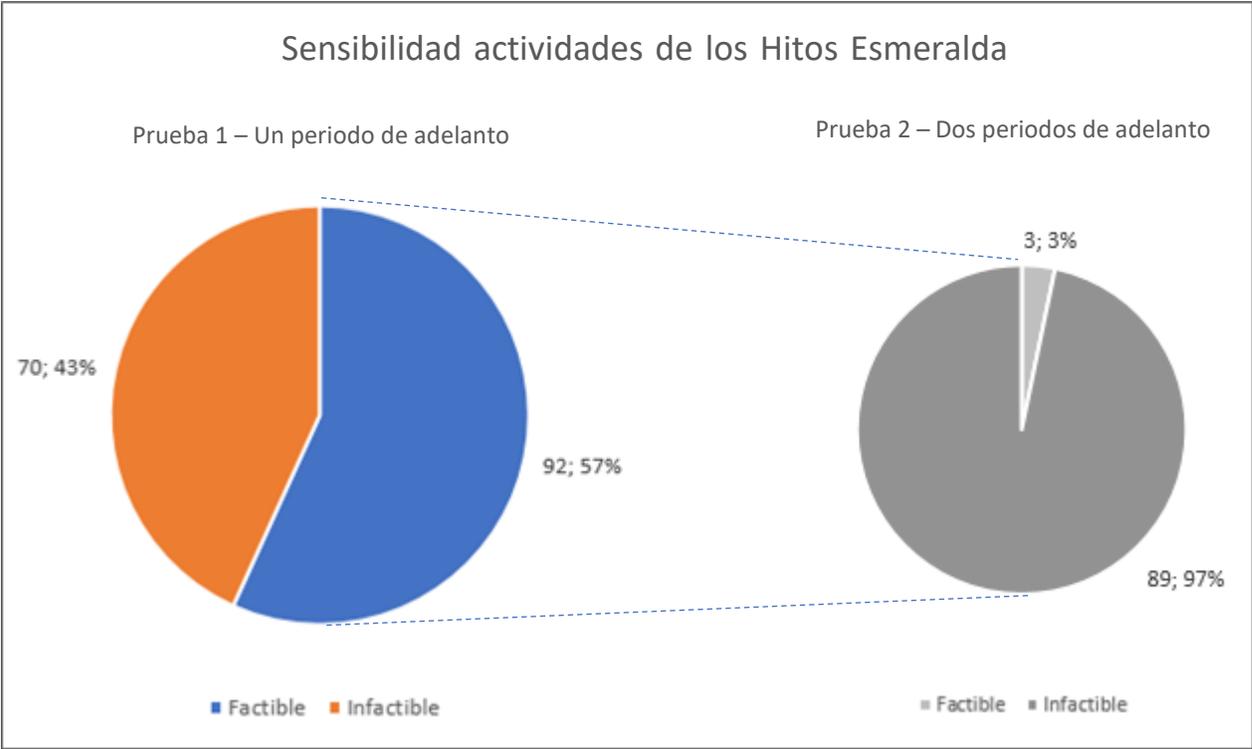


Figura 37. Porcentajes de actividades pertenecientes a los hitos que lograron ser adelantados en las dos pruebas realizadas.

4.4 Análisis de Resultados

4.4.1 Modelamiento

El modelamiento realizado en UDESS presentó varios desafíos, desde la forma de incorporar las actividades de preparación minera, pasando por cómo se debieron modelar las precedencias entre las actividades, hasta la incorporación de las restricciones, las cuales eran de diversa naturaleza, geomecánicas, de recursos, operacionales, entre otras.

Con respecto a las actividades, el primer punto a abordar consistió en definir si era necesario o no discretizar las actividades de obras civiles que forman parte del Programa Rev. B. UDESS tiene la capacidad de discretizar las actividades automáticamente, es decir, si se incorpora una actividad de desarrollo horizontal de 40 metros de longitud, con un rendimiento de construcción de 50 m/mes de avance, UDESS tiene la capacidad de decidir (según la función objetivo) si es conveniente realizar los 40 metros en un mes o si es más conveniente realizar 20 metros en un mes y dejar los otros 20 para que sean realizados en otro periodo.

El inconveniente de esto es que se pueden producir dos problemas. El primero consiste en la imposibilidad de indicarle al programa que desde cierto punto de avance del desarrollo, pueda tener acceso a otras frentes, tal como se ve en la Figura 38, en donde, al dejar que el programa genere la discretización solo (tramo de gran longitud T3), no hay forma de indicarle que ya paso una intersección (círculo indicado con el numero "1"), y que con eso puede tener acceso a dos frentes más de trabajo. Esto se puede solucionar entregándole como input al software la discretización de las actividades, tal como se ve en el círculo "2", en que, a través de precedencias, se le puede indicar al programa que una vez terminado el tramo 2 (T2) tiene acceso a dos nuevas frentes de trabajo.

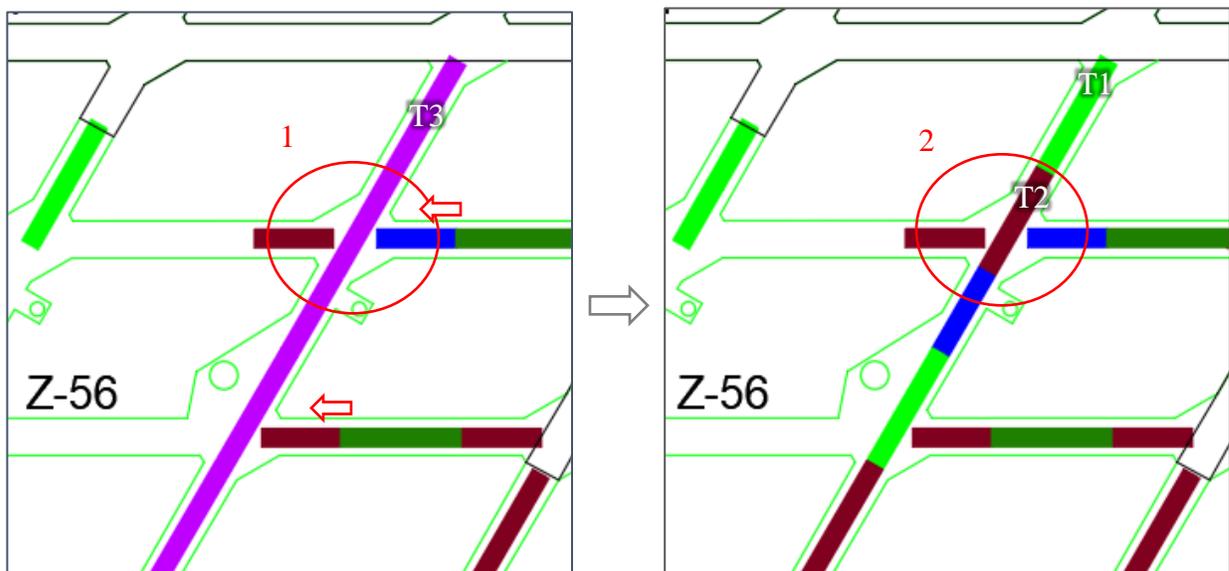


Figura 38. Diagrama representativo de problema asociado a discretización de actividades.

Otro problema que puede surgir al no entregar una discretización al programa, y que de cierta forma tiene relación con el problema anterior, es que no hay forma de indicarle al software que tiene más de un acceso disponible a una determinada zona. Esto se representa en la Figura 38, donde las flechas rojas muestran que existen dos accesos adicionales disponibles para realizar el tramo 3 (T3), además del acceso superior que se está utilizando, pero como no hay una actividad

involucrada en esas intersecciones, no se puede definir una precedencia que indique la existencia de una frente de trabajo. Por lo tanto, en el resultado del modelamiento se generan largas frentes únicas de trabajo, las cuales como se discutirá más adelante, no son operacionalmente viables.

Finalmente, se decidió optar por utilizar la misma discretización que usaron los planificadores del área para la construcción del programa, ya que dicha discretización cumplía con todos los requerimientos previamente mencionados, siendo operacionalmente correcta y de proporciones adecuadas (tramos de tamaño intermedio).

Como se mencionó previamente, UDESS tiene la capacidad de utilizar precedencias de tipo “o” y de tipo “y”. La mayoría de los softwares agendadores de actividades comerciales solo utilizan precedencias del tipo “y” por lo que la ventaja competitiva de utilizar este programa es sustancial.

La distribución de precedencias en el modelo completo y por niveles se puede ver en la Figura 17 y Figura 18 respectivamente. De los gráficos es posible ver cómo la mayoría de las precedencias son del tipo “y”, específicamente el 68%. Esto se explica principalmente porque las únicas actividades que utilizan restricciones del tipo “o” son desarrollos horizontales; todo el resto de las obras civiles se modelaron con precedencias del tipo “y”. Con respecto a la distribución por niveles, la mayor cantidad de precedencias en el Nivel de Producción se explica debido a la cantidad de obras a realizar en el nivel, ya que la relación actividades – precedencias es directamente proporcional.

Otro punto relevante con respecto a las precedencias tiene que ver con el mapeo y elaboración de una secuencia genérica constructiva de las obras de preparación minera para la Mina Esmeralda. El resultado final se presenta en la Figura 20, donde se puede ver la relación de precedencias dentro de los niveles y entre ellos. Un detalle para cada uno de los niveles se puede ver en el Anexo 1.

Como se explicó en la sección 4.2.3, para modelar las diferentes condiciones que afectan y condicionan la constructibilidad del programa Rev. B, se utilizaron diferentes restricciones. UDESS incorpora 6 tipos de restricciones, para el modelamiento se utilizaron solo 3 de estas, las cuales son: Recurso Operacional, Rango de Recursos y Progreso Límite.

Como se puede ver en los resultados presentados en la Figura 21 y en la Figura 22, del total de restricciones utilizadas, el 60% son de rango de recursos, un 15% son de recurso operacional y un 25% son de progreso límite. Las restricciones de recursos operacionales tienen presencia en todos los niveles pues restringen los recursos asociados a las diferentes actividades. Las restricciones de progreso límite permiten definir los hitos en el programa, lo que también explican su presencia en los diferentes niveles. Las restricciones de rango de recursos se utilizaron específicamente para modelar las múltiples frentes en los desarrollos horizontales; esto explica su fuerte presencia en el Nivel de Hundimiento y en el Nivel de Producción.

La explicación de por qué se utilizaron restricciones de rango de recursos y no restricciones de incompatibilidad en el modelo tiene que ver con un pequeño proceso de optimización que se llevó a cabo previo a crear las restricciones. Se calculó previamente la cantidad de restricciones necesarias para solucionar un problema pequeño, a menor escala, utilizando el procedimiento descrito en la sección 4.2.3. El resultado indicó que la cantidad de restricciones se reducía (en promedio) en un 75%, optimizando con esto los tiempos de cálculo del programa.

4.4.2 Resultados del Programa Rev. B modelado en UDESS

El primer resultado relevante derivado del modelamiento del Programa Rev. B en UDEES corresponde a que efectivamente el modelo logró agendar todas las actividades asociadas al programa en el plazo de 12 meses (enero a diciembre de 2017), el cuál corresponde al horizonte de planificación del programa.

Se incorporaron múltiples restricciones de tipo operacional al programa, una de estas restricciones consistía en el no agendamiento de actividades en el mes de julio por el cambio de contrato a realizarse en el sector. Como se puede ver en los gráficos de la sección 4.3.2, dicho requerimiento se cumple para todas las obras pertenecientes al Nivel de Hundimiento y al Nivel de Producción.

Otra restricción importante que debía ser incorporada al modelo consistía en forzar el desarrollo de múltiples frentes para los desarrollos horizontales. Como se puede ver en la Figura 39 y la Figura 41, el modelamiento propuesto para dicho requerimiento resulta efectivo, desarrollándose múltiples frentes en tramos de tamaño definidos durante el proceso de discretización de actividades

Una tercera restricción operacional corresponde a la de agrupar obras, para optimizar el uso y transporte de recursos entre las actividades. Los resultados obtenidos indican que las restricciones implementadas cumplen el objetivo pues como se puede ver en la Figura 42 y Figura 43, las actividades efectivamente se agrupan en clústeres para su ejecución.

Con respecto al agendamiento de las actividades, como era de esperarse, los resultados obtenidos varían con respecto al programa original, produciéndose en muchos casos diferencias importantes en los agendamientos, tal como se puede ver en los gráficos comparativos de la sección 4.3.2. Esto se explica principalmente al analizar la función objetivo que está utilizando UDESS, la cual consiste en minimizar el tiempo total de ejecución del programa Rev. B, por lo tanto, siempre que pueda el software tratará de adelantar obras.

La comparación mensual para las actividades críticas entre los dos agendamientos se presenta en los gráficos de la sección 4.3.2. Se ven diferencias importantes en algunas obras particulares, por ejemplo, considerando las obras de construcción de buzones que se muestra en la Figura 31, existe prácticamente un desfase de las obras, en el programa original se concentran en la segunda mitad del año, mientras que UDESS, en función de la función objetivo que se le indicó, adelantó las obras al primer semestre del año.

Los resultados más importantes que se derivan de la comparación de los agendamientos se resumen en los siguientes puntos.

- Desarrollos horizontales de los niveles de hundimiento y producción tienen una distribución muy similar a la del plan original; el nivel de acarreo y subnivel de ventilación en cambio presentan distribuciones muy diferentes. Parte de la explicación de esto puede ser que los rendimientos utilizados para ambos niveles, obtenido de los registros históricos, puede ser demasiado altos, lo que genera tal diferencia. Otra razón puede tener que ver con la disponibilidad de recursos en el nivel, dando preferencia a otras obras de mayor impacto como lo son los sistemas de traspaso.
- Las actividades del sistema de traspaso tienden a agendarse en el primer semestre del año en comparación al plan original que tiende a hacerlo en el segundo semestre. Esto se explica principalmente ya que muchas de las actividades de este nivel no tienen precedencias, es

decir, son sistemas que fueron avanzados en años anteriores, por lo que no se debe realizar el sistema completo, sino que, en varios casos, solo había que terminarlo. Otra razón que explica este comportamiento tiene que ver con que las actividades de los sistemas de traspaso no se limitaron en términos de recursos (cuadrillas, equipos, unidades mensuales, etc.) sino que se programaron con la libertad de que, al terminar la actividad previa, la siguiente pudiera comenzar, independiente de las demás.

- Varias obras civiles mostraron un adelantamiento en los agendamientos tales que los últimos meses quedaron sin actividades por realizar, ejemplo de esto son: preparación de vía férrea, construcción de trolley, montaje de ventiladores, desarrollos verticales y horizontales en el subnivel de ventilación, entre otras. Este adelantamiento permite verificar que sería interesante evaluar la posibilidad de incorporar más obras al programa para cubrir esos gaps finales ó reducir los recursos a utilizar, generando una redistribución en el agendamiento que cubra el gap.

4.4.3 Cumplimiento de Hitos definidos para el Programa Rev. B

Además de la operatividad del plan este debía cumplir con una serie de hitos en cada uno de los niveles. Como se ve en las figuras a continuación el agendamiento entregado por UDESS cumple todos los requisitos de hitos existentes para el plan.

Para el Nivel de Hundimiento se definieron 3 hitos a realizarse durante el periodo, específicamente los Hitos 1, 5 y 6, que se encuentra detallados en la Tabla v. Como se ve en la Figura 39, el programa logra agendar las actividades para dar cumplimiento a los hitos, sin incumplir el resto de restricciones y condiciones incorporadas en el modelo.

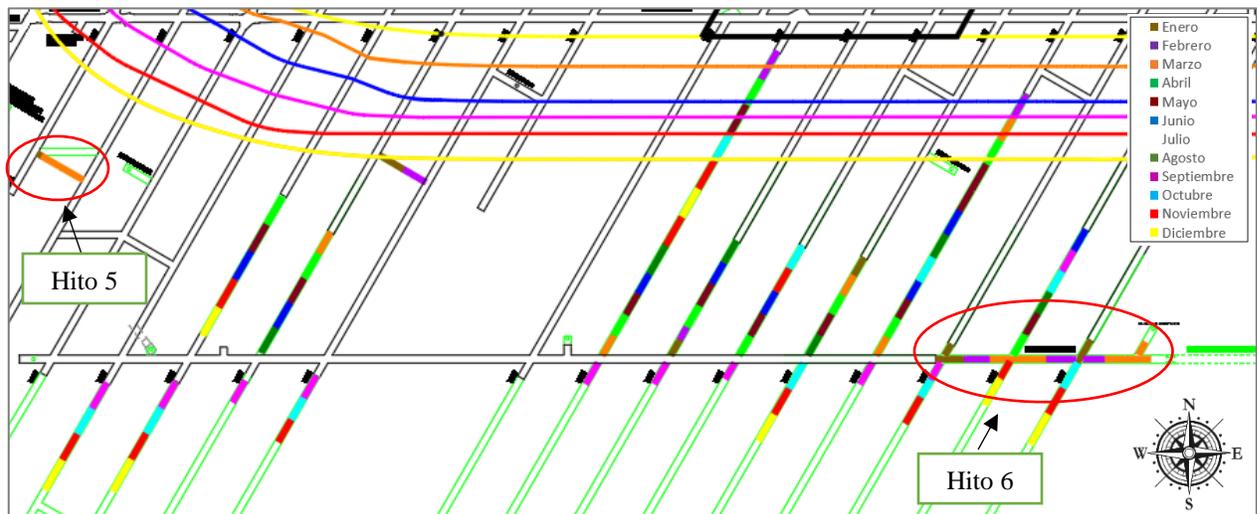


Figura 39. Agendamiento en UDESS para desarrollos horizontales de Nivel de Hundimiento.

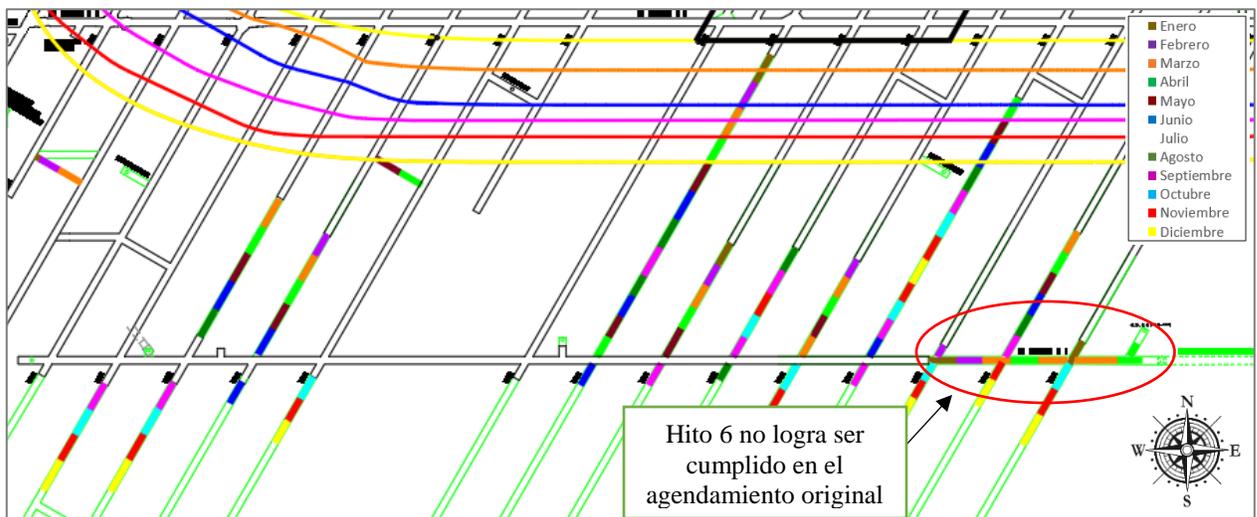


Figura 40. Agendamiento Rev. B original para desarrollos horizontales del Nivel de Hundimiento.

La misma situación ocurre con los hitos establecidos para el Nivel de Producción; la Figura 41 muestra el agendamiento de UDESS para los desarrollos horizontales y además muestra la ubicación de 4 hitos del nivel, todos cumplidos según los plazos establecidos.

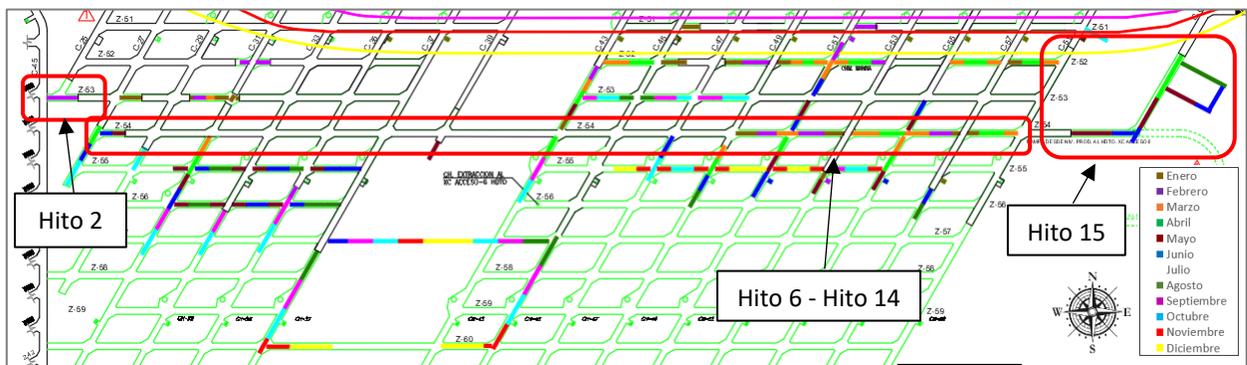


Figura 41. Agendamiento de UDESS para desarrollos horizontales del Nivel de Producción.

Además de los desarrollos horizontales, existen también hitos asociados a otras obras del programa, como por ejemplo los muros de confinamiento y los puntos de extracción. La Figura 42 y la Figura 43 muestran los agendamientos obtenidos para los puntos de extracción y los muros de confinamiento del Nivel de Producción. Una parte de estas obras conforman el Hito 11, el cual indica que todas las obras deben estar terminadas al norte de la Z-49 en las Calles 51 y 53 para el mes de junio. Se muestra en ambas figuras como el agendamiento entrega una solución factible a dicha restricción.

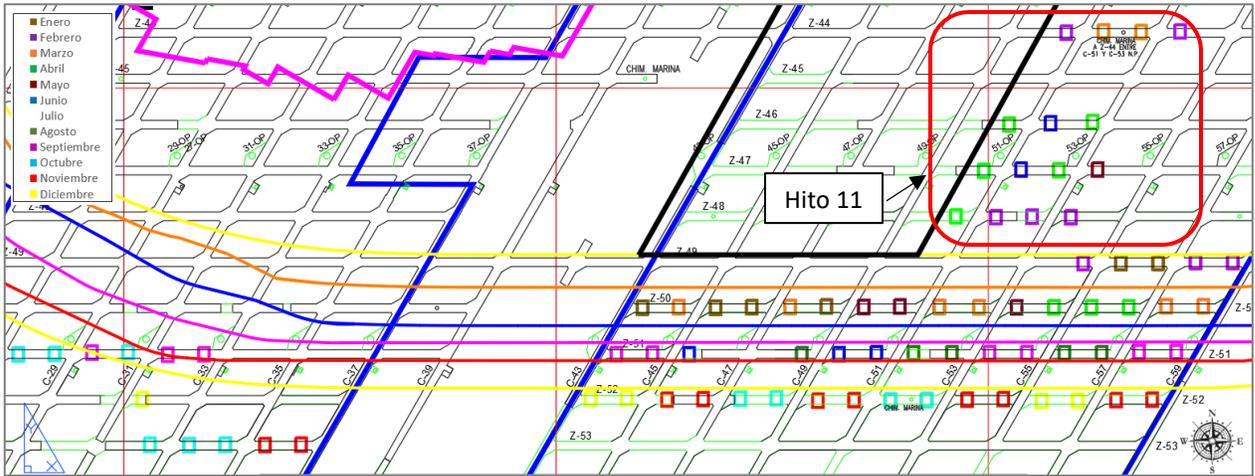


Figura 42. Agendamiento de UDESS para puntos de extracción del Nivel de Producción.

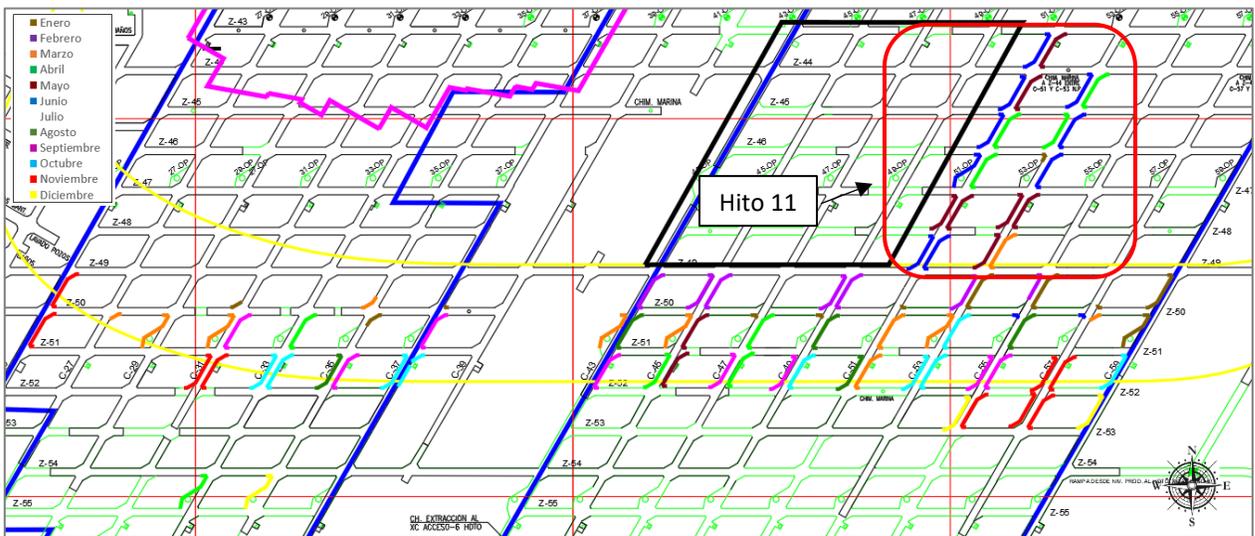


Figura 43. Agendamiento de UDESS para muros de confinamiento del Nivel de Producción.

Los otros niveles de la mina también presentan fecha límites definidas para ciertas obras de interés. Por ejemplo, la Figura 44 muestra la habilitación hidráulica de los buzones, en donde existían dos hitos establecidos, el 13 y el 17; como se ve en la figura, ambos hitos se cumplen. Otro ejemplo es el de las obras de habilitación de ventiladores del Subnivel de Ventilación, en donde el Hito 16 establecía que el XC-46AS debía estar completamente habilitado al mes de diciembre. Dicho requerimiento se cumple satisfactoriamente como se puede ver en la Figura 45.

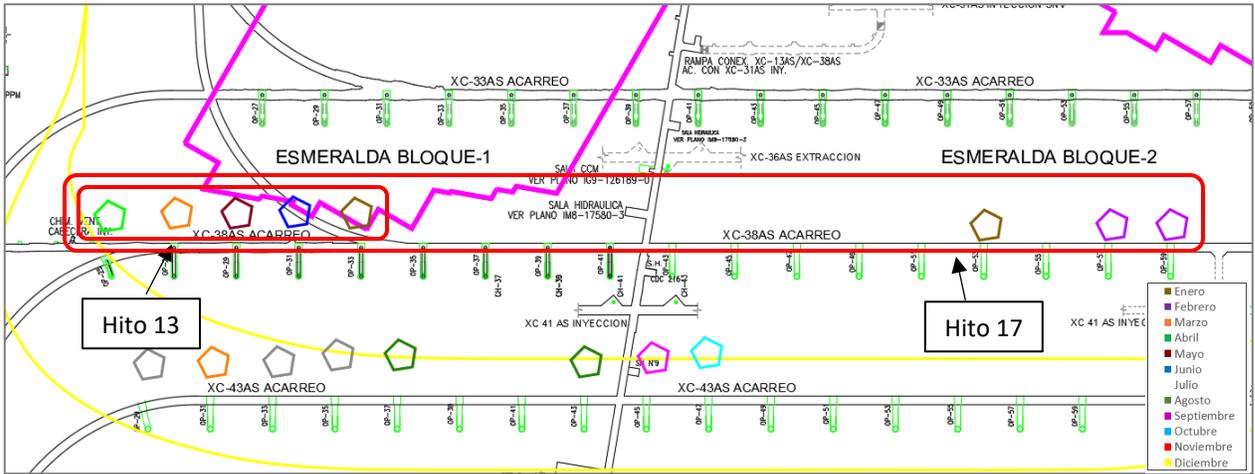


Figura 44. Agendamiento de UDESS para la habilitación hidráulica del Sistema de Traspaso.

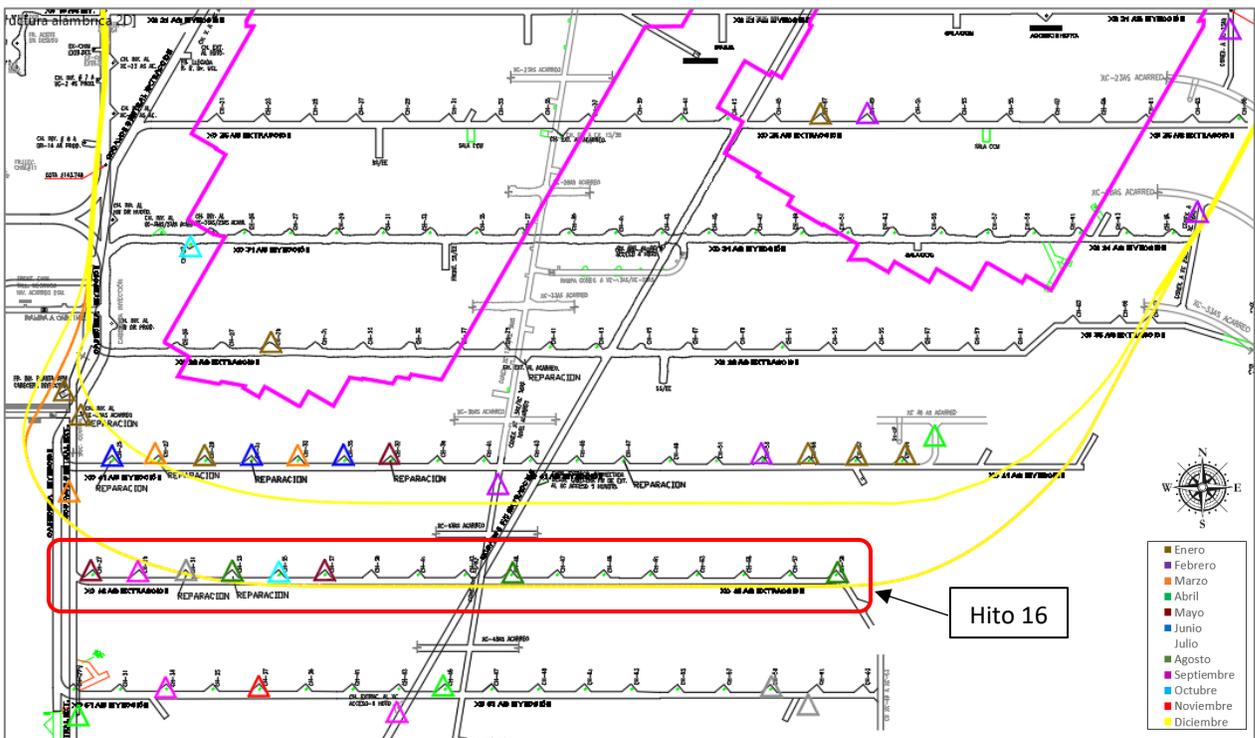


Figura 45. Agendamiento de UDESS para la habilitación de ventiladores del Subnivel de Ventilación.

Para finalizar, se puede ver de la Tabla xvi que, al analizar y comparar ambos programas, el entregado por UDESS logra agendar todas las actividades e hitos en los plazos establecidos; en cambio, el programa original, aunque logra incorporar todas las obras dentro del plazo anual del programa, no cumple los plazos requeridos para 3 hitos establecidos, lo que equivale a un 84% de cumplimiento. Gráficamente, se puede verificar el incumplimiento de uno de los hitos en la Figura 40.

Tabla xvi. Tabla comparativa de cumplimiento de hitos para los dos programas.

N°	Hito	Fecha Límite	Cumplimiento Rev. B	Cumplimiento UDESS
1	Término galería especial al sur XC Acceso 4 UCL	Febrero	✓	✓
2	Conexión Z-53/C-45 NP (DR/Bloque 1)	Febrero	✓	✓
3	Término del hidrofracturamiento especial Bloque 2 NP	Febrero	✓	✓
4	Término construcción de muros entre Z-49/Z-50 Bloque 2 NP	Febrero	✓	✓
5	Conexión C-25/C-27 UCL	Marzo	✓	✓
6	Conexión XC Acceso 6 UCL con rampa lado Fw	Marzo	✗	✓
7	Conexión total Z-54 entre C-27/C-59 NP	Abril	✓	✓
8	Término fortificación especial zona interacción DR/Bloque 1	Abril	✗	✓
9	Habilitación SEE XC-46AS SNV	Abril	✓	✓
10	Término fortificación especial Cabecera Hw NP	Mayo	✓	✓
11	Término de construcciones en C-51/C-53 al norte Z-49 NP	Junio	✓	✓
12	Habilitación total XC-41AS inyección SNV	Junio	✗	✓
13	Habilitación XC-38AS para Bloque 1	Junio	✓	✓
14	Z-54 con fortificación total	Julio	✓	✓
15	Conexión Z-54/C-63/C-1 NP	Agosto	✓	✓
16	Habilitación total XC-46AS extracción SNV	Diciembre	✓	✓
17	Habilitación XC-38AS total	Diciembre	✓	✓
18	Término de todos los montajes de buzones del XC-43AS NA	Diciembre	✓	✓
19	Término de trabajos en interior de piques XC-43AS	Varios	✓	✓

4.4.4 Análisis de sensibilidad

A partir del modelo de la Mina Esmeralda Sur creado en UDESS se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a los hitos de obras definidos para el programa Rev. B 2017.

El análisis realizado consistió en adelantar la fecha de término de todas las obras asociados a los respectivos hitos del programa. Esta variación se realizó en dos etapas o pruebas, la primera consistió en adelantar la fecha de término original de las actividades asociados a los hitos en 1 periodo. La segunda prueba en cambio consistió en adelantar la fecha de término de las actividades en dos periodos. Cabe mencionar que la segunda prueba solo se realizó a los hitos y actividades que resultaron factibles en la primera prueba, es decir, que una vez realizado el cambio en la fecha de término, el agendamiento resultante se mantuvo dentro de los doce periodos.

El fin de este análisis de sensibilidad representado en estas dos pruebas es mostrar cómo se podría realizar un análisis de escenarios con un modelo terminado, evaluando la flexibilidad del programa en su conjunto y en cada una de las partes que lo componen.

Con respecto a las corridas, se realizó una para cada hito, variando en cada corrida solo las fechas de término de las actividades involucradas, el resto de variables y restricciones se mantuvieron constantes con sus valores originales. Un detalle de la cantidad de obras que fueron adelantadas dentro de cada hito se puede ver en el Anexo 3.

Es importante hacer una distinción con respecto a las actividades dentro de los hitos y los hitos mismos. Un hito se consideró infactible de ser adelantado cuando al menos una de las actividades que lo componen no pudo ser adelantada. Para el análisis se consideraron los hitos y las actividades dentro de los hitos de manera separada, con el fin de lograr un nivel de profundidad en el detalle mayor.

Los resultados de ambas pruebas, para hitos y para las actividades dentro de los hitos, se presentan en la Figura 36 y Figura 37 respectivamente. De la primera se puede ver que, en la primera prueba, consistente en adelantar la fecha límite de los hitos en un periodo, el 59% de los hitos no lo permite, mientras que el 41% restante sí.

Considerando los resultados obtenidos en la primera prueba, se realizó la segunda prueba, consistente en adelantar la fecha de término de los hitos en un periodo más, lo que es igual a adelantar la fecha límite original de los hitos en dos periodos.

Realizada la segunda prueba, los resultados indican que solo 1 hito pudo adelantarse 2 periodos, los otros 6 que se habían adelantado 1 periodo, no pudieron hacerlo en uno adicional.

Al analizar los resultados por actividades, Figura 37, se pueden ver diferencias en los porcentajes con respecto a los hitos. Se ve que el resultado de factibilidad en la primera prueba aumentó de un 41% a un 57%, lo que representa un incremento del 16%. Los resultados de la segunda etapa en cambio, aunque el porcentaje relativo de factibles es menor comparado con el caso de hitos, el porcentaje efectivo de factibilidad es el mismo pues resultaron factibles las mismas 3 actividades.

5 Conclusiones

Después del análisis realizado se puede concluir que los objetivos principales y específicos se cumplieron, fue posible establecer una metodología de modelamiento que permite construir el Programa Revisión B de la Mina Esmeralda en UDESS. A la vez, los resultados obtenidos fueron validados por los planificadores del área lo que robustece la metodología presentada y la implementación realizada.

La metodología propuesta incorpora una serie de procesos de modelamiento para condiciones y restricciones particulares que condicionaban el Programa Rev. B 2017, dichos modelamientos pueden ser utilizados o adaptados en futuras implementaciones que se hagan de la metodología en la misma mina o en otros sectores productivos de la división.

Con respecto a los resultados obtenidos, la comparación de ambos programas permite identificar múltiples puntos en que el agendamiento del plan podría mejorar, por ejemplo, en varias actividades se identifican periodos sin obras, que pudieran ser completados agregando más obras al programa o reasignando y redistribuyendo los recursos disponibles para ser más eficiente, reduciendo incluso las cantidades utilizadas actualmente.

Un resultado comparable entre ambos agendamientos es el cumplimiento de las fechas establecidas para las obras críticas y para el agendamiento como un global. Ambos programas agendan todas las actividades dentro del plazo máximo establecido de un año, pero no sucede lo mismo con el cumplimiento para los hitos definidos en el Programa Rev. B entregado por la GRMD, mientras que el programa original cumple con 84% de los hitos establecidos, el programa construido en UDESS cumple con el 100% de ellos.

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad permiten establecer que existen posibilidad de mejora en el agendamiento, que el Programa Rev. B actual tiene ciertas holguras que no habían sido establecidas ni probadas previamente; pero lo más importante, es que queda manifiesta la capacidad que otorga la utilización del software y de la metodología para probar escenarios, capacidad inexistente en la actualidad debido a la forma que se utiliza para construir el programa.

Finalmente, se puede decir que a través del trabajo realizado se creó una metodología de modelamiento efectiva, validada en un caso real de la industria, que al ser implementada como un estándar para la construcción del Programa Revisión B permitiría agregar valor al proceso de planificación que se desarrolla en la Gerencia de Obras Mina de la División El Teniente.

6 Trabajo Futuro

En la presente sección se presenta una serie de puntos a ser desarrollados en futuros estudios o proyectos para complementar o profundizar el trabajo realizado.

La incorporación de recursos operacionales en todas las actividades, tales como consumo de agua, concreto, electricidad, horas equipos, cuadrillas, etc. en un mismo nivel y entre niveles en los casos que se pueda, resultaría fundamental para operativizar aún más la solución obtenida actualmente.

El presente estudio utiliza agenda las actividades del Programa Anual Rev. B en 12 periodos de un mes; en futuros estudios sería interesante utilizar periodos de menor duración, tales como semanas o días, para mejorar la resolución y precisión del resultado.

El nivel de detalle de las actividades en el Programa Rev. B actualmente es relativamente “grosso”; es probable que haya actividades que pudieran ser subdivididas en actividades más pequeñas y con eso mejorar la resolución de la solución, especialmente si en algún momento el programa pasa de mensual a semanal o diario, no tendría sentido tener actividades con duración de meses. Si esto llega a implementarse, es importante mencionar que se debieran revisar ciertos procedimientos y procesos dentro de la gerencia pues, las licitaciones, contratos y control de pago se hace con el nivel de detalle mensual (actual) y no con uno más fino.

El modelamiento de otros sectores en UDESS utilizando la metodología presentada sería un proyecto o estudio interesante, permitiría comprobar cuánto del modelamiento realizado en Esmeralda es extrapolable a otros sectores de la mina y cuánto no.

En el mismo sentido, modelar nuevamente el sector Esmeralda Sur, pero para otro programa (por ejemplo, Esmeralda Sur 2018) también sería un estudio de sumo interés ya que permitiría probar la metodología en el mismo sector, pero bajo otras condiciones.

Al modelar otros sectores o otros programas del mismo sector pueden surgir nuevas restricciones o situaciones operacionales que se deberán incorporar en la metodología de modelamiento, este mejoramiento continuo que puede sufrir la metodología también puede ser un trabajo futuro por desarrollar.

Con respecto al análisis de sensibilidad, sería de gran valor ampliar el trabajo realizado, incorporando por ejemplo un análisis de recursos críticos o una variación del análisis de hitos.

Finalmente, una mejora que sería fundamental al trabajo presentado sería incorporar incertidumbre al modelo, esto permitiría entregar indicadores de cumplimiento al plan y a los hitos, y con eso dar robustez a los planes que se construyen año a año.

7 Recomendaciones

La presente sección busca entregar una serie de recomendaciones para futuros modelamientos que se deban realizar en UDESS del mismo sector o de otro sector de la mina El Teniente.

Realizar un mapeo completo de las actividades relacionadas al programa Rev. B del sector. Es fundamental conocer todas las actividades presentes en el programa, sus precedencias, relevancia dentro del programa, y las restricciones a las que están sujetas. Esto permitirá que toda la etapa de modelamiento sea más simple y se tengan que hacer menos correcciones a la hora de hacer las primeras corridas y obtener los primeros resultados.

Usar una secuencia constructiva genérica para el sector o crearla si es que no está definida es fundamental para todos los procesos de modelamiento, análisis y corrección del modelo que se deba realizar. Con ella es más fácil identificar cada proceso y en qué etapa del modelo se encuentra.

Si se deben modelar incompatibilidades de actividades en el programa, considerando un gran número de actividades, es conveniente utilizar restricciones de rango de recursos en vez de restricciones de incompatibilidad. Este cambio requiere un poco más de trabajo en el modelamiento, pero permite ser mucho más eficiente, reduciendo la cantidad de restricciones a crear hasta en un 80%.

Al igual que la metodología utilizada, se recomienda fuertemente partir por un nivel en que el volumen de actividades sea bajo a intermedio, especialmente si es la primera vez que se está haciendo un modelamiento de este tipo en UDESS. Esto permitirá ir realizando pruebas cortas al modelo para verificar que está haciendo lo que se desea que haga, y además para ganar confianza y rapidez en los niveles más complejos.

8 Bibliografía

Alford, C., Brasil, M. y Lee, D (2006). Optimisation in Underground Mining. Chapter 30.

Camhi, J. (2012). Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving caso estudio mina el teniente Codelco Chile. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

CODELCO CHILE (2016). Memoria Anual 2016 [en línea]. CODELCO. Santiago, Chile. <<https://www.codelco.com/memoria2016/pdf/memoria-anual/memoria-anual-codelco-2016.pdf>> [consulta: 23 diciembre 2017]

Downd, P., y Elvan, A (1987). Dynamic programming applied to grade control in sub-level open stoping. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Technology) 96: A171-A178.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2017). Informe del Proceso de Planificación Anual PND-PQ 2017 El Teniente. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-INF-002-2017.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2006). MANUAL DE PREPARACIÓN MINERA. 2006. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. SGP-I-043/2006.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2017). INFORME PROGRAMA DE OBRAS REV-A 2017. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-SPL-INF-002/2017.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2017). PROGRAMA DE PREPARACIÓN MINA 2017 REVISIÓN B. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-SGP-I-0004-2017.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2017). INFORME PLAN MINERO P1 2017. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-SPL-INF-001-2017.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2017). INFORME LINEAMIENTOS PARA PLANIFICACIÓN PROGRAMA P0-2017. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-DGD-I-0027-2016.

Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (2016). REQUIERIMIENTO DE POZOS DE PRE-ACONDICIONAMIENTO PARA FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO P0 AÑO 2016. MINA EL TENIENTE. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile. GRMD-SGM-NI-0055-2016.

Gerencia de Proyectos (2011). Aplicación de Prefabricados en Construcciones Mineras. CODELCO División El Teniente. Rancagua, Chile.

Gilani, A., y Sattavand, J. (2016). Integrating geological uncertainty in long-term open pit mine production planning by ant colony optimization. Computers and Geosciences 87: 31-40.

Goodfellow, R., y Dimitrakopoulos, R. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. *Applied Soft Computing* 40: 292-304.

Khan, A., y Niemann-Deijus, C. (2014). Production scheduling of open pit mines using particle swarm optimization algorithm. *Advances in Operations Research 2014*: 1-9.

Kumral, M. (2004). Genetic algorithms for optimization of a mine system under uncertainty. *Production Planning and Control* 15 (1): 34-41.

Musingwini C. (2016). Presidential Adress: Optimization in underground mine planning – developments and opportunities. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 116 (9): 809-820.

Newman, A., et al. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfases* 40 (3): 222-245.

Osanloo, M., Gholamnejad, J., y Karimi, B. (2008). Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 22 (1): 3-35.

Rocher, W. (2012). *Secuenciamiento óptimo de preparación minera*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

Rocher, W., Rubio, E., Morales, N. (2011). *Secuenciamiento de Preparación y Desarrollo Minero en Faenas Subterráneas*. Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile. 62° Convención Anual Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Calama, Chile.

Rocher, W, Rubio, E, Morales, N, (2011). Eight dimensional planning: Construction of an integrated model for the mine planning involving constructability. *Proceedings 35th International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry*, pp. 393-406 (Australian Institute of Mining and Metallurgy: Wollongong, Australia).

Rojas, V. (2016). *Secuenciamiento óptimo de caserones en minería subterránea selectiva*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

Salgado, J. (2009). *Secuenciamiento Genérico de Obras Para la Planificación de Preparación Minera Mina El Teniente*. Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

9 Anexos

En la presente sección se presentan los anexos asociados al trabajo realizado.

Anexo 1: Modelamiento de precedencias

Se presenta el detalle del modelamiento de las precedencias para cada uno de los niveles.

- Nivel de Hundimiento

Las precedencias dentro del Nivel de Hundimiento se muestran en la Figura 46.

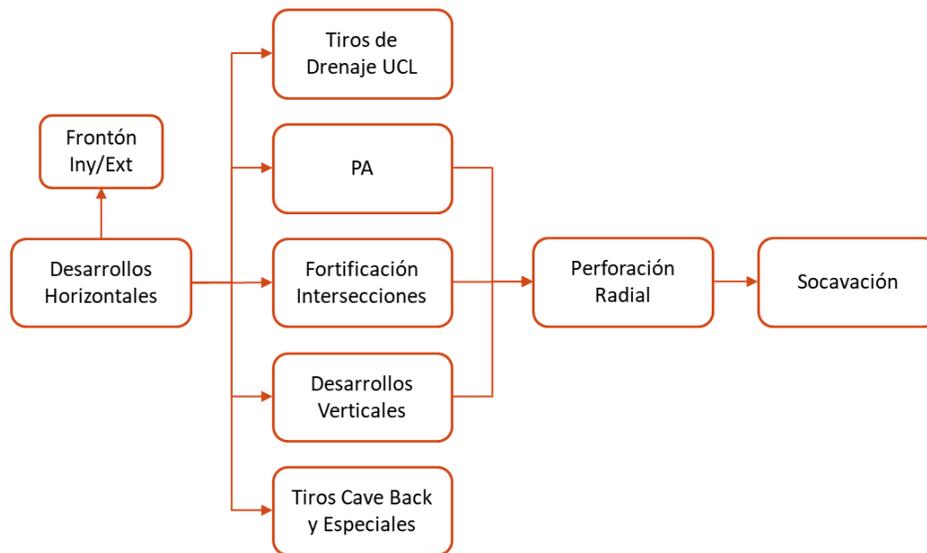


Figura 46. Precedencias de actividades dentro del Nivel de Hundimiento.

- Nivel de Producción

Las precedencias dentro del Nivel de Producción se muestran en la Figura 47.



Figura 47. Precedencias de las actividades principales dentro del Nivel de Producción.

- Nivel de Acarreo

Las precedencias dentro del Nivel de Acarreo se muestran en la Figura 48.

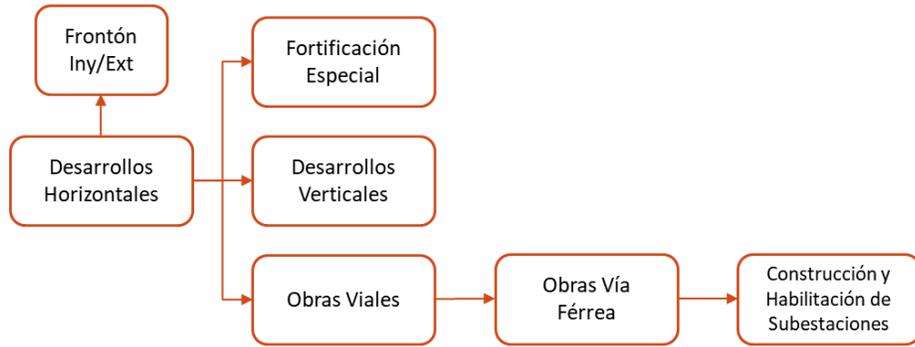


Figura 48. Precedencias de las actividades principales dentro del Nivel de Acarreo.

- Subnivel de Ventilación

Las precedencias dentro del Subnivel de Ventilación se muestran en la Figura 49.

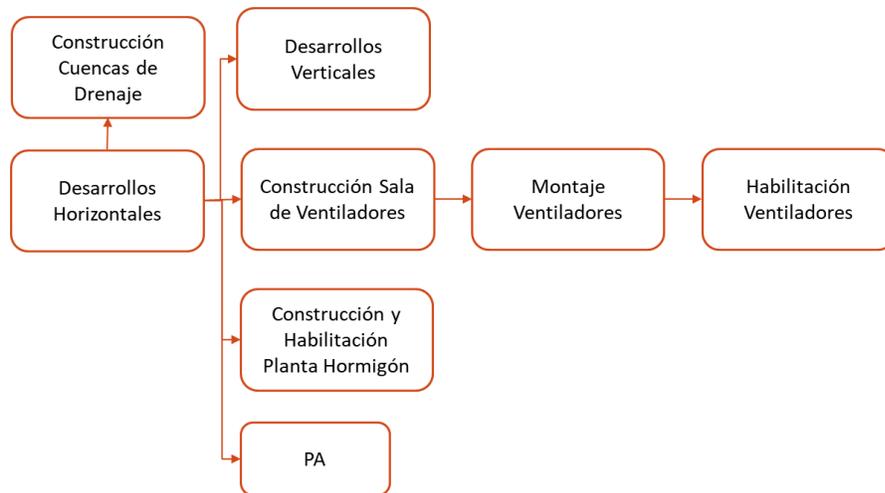


Figura 49. Precedencias de las actividades principales dentro del Subnivel de Ventilación.

- Sistema de Traspaso

Es importante mencionar que el sistema de traspaso está compuesto por actividades que son parte de los Niveles de Acarreo y de Producción, las cuales se desarrollan según la secuencia constructiva presentada en la Figura 20.

- Desde el Nivel de Producción hacia el Nivel de Acarreo



Figura 50. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso desde el Nivel de Acarreo.

- Desde el Nivel de Acarreo hacia el Nivel de Producción



Figura 51. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso desde el Nivel de Producción.

- En el Nivel de Producción



Figura 52. Precedencias de las actividades principales dentro del Sistema de Traspaso en el desde el Nivel de Producción.

Anexo 2: Detalle resultados agendamiento

Se muestran para cada uno de los niveles de la mina Esmeralda Sur los resultados obtenidos del agendamiento en UDESS y la comparación directa mes a mes con el Programa Rev. B 2017 original.

- Nivel de Hundimiento

Tabla xvii. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.

Actividad	Programa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Desarrollos Horizontales	Rev. B	78	123	159	168	126	120	-	80	119	120	129	124	1346
	UDESS	84	112	140	140	140	140	-	70	126	140	140	114	1346
Desarrollos Verticales	Rev. B	-	14	-	-	14	-	-	-	-	14	-	-	42
	UDESS	13	15	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	42
Fortificación de intersecciones	Rev. B	-	-	3	4	5	2	-	2	2	4	-	-	22
	UDESS	2	3	4	4	0	-	-	1	4	3	-	-	22
Construcción de vaciaderos de marina	Rev. B	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	2
	UDESS	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Construcción de chimeneas de emergencia	Rev. B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
	UDESS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Tiros de Drenaje	Rev. B	-	-	-	-	-	-	-	120	120	220	220	270	950
	UDESS	120	160	200	200	200	70	-	-	-	-	-	-	950
Perforación preacondicionamiento	Rev. B	368	300	1,004	-	-	500	400	400	-	-	400	400	3772
	UDESS	368	300	1,004	-	-	500	400	400	-	-	400	400	3772
Perforación de pozos cave back y especiales	Rev. B	-	-	-	-	-	-	150	-	-	-	-	-	150
	UDESS	-	-	-	-	-	-	150	-	-	-	-	-	150
Hidrofracturamiento	Rev. B	2	4	4	-	-	-	4	4	4	4	7	7	40
	UDESS	2	4	4	-	-	-	4	4	4	4	7	7	40

- Nivel de Producción

Tabla xviii. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Producción.

Actividad	Programa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Desarrollos Horizontales	Rev. B	130	176	246	234	239	222	-	136	140	187	177	176	2064
	UDESS	147	196	245	245	245	245	-	123	221	244	74	80	2064
Desarrollos Verticales	Rev. B	38	76	182	80	80	80	-	46	46	46	46	57	775
	UDESS	57	76	84	91	57	34	-	46	86	95	95	55	775
Carpeta de rodado	Rev. B	95	108	78	91	142	166	-	102	150	137	96	-	1165
	UDESS	75	100	122	125	116	125	-	63	112	125	125	77	1165
Construcción de puntos de extracción	Rev. B	5	9	18	9	9	6	-	4	7	7	6	7	87
	UDESS	6	8	10	8	9	7	-	5	9	10	10	5	87
Construcción de viseras de puntos de extracción	Rev. B	5	9	18	9	9	6	-	4	7	7	6	7	87
	UDESS	6	8	10	8	9	7	-	5	9	10	10	5	87
Construcción de pisos de puntos de extracción	Rev. B	50	90	180	90	90	60	-	40	70	70	60	70	870
	UDESS	60	80	100	80	90	70	-	50	90	100	100	50	870
Construcción de muros de confinamiento	Rev. B	5	7	8	8	8	9	-	8	8	8	7	6	83
	UDESS	5	7	9	9	9	9	-	5	8	9	9	3	83
Fortificación de intersecciones	Rev. B	6	6	7	6	9	1	-	4	4	5	3	4	55
	UDESS	4	5	6	6	6	6	-	3	5	6	6	2	55
Perforación Hidrofracturamiento	Rev. B	-	-	-	-	-	180	300	240	240	-	-	-	960
	UDESS	-	-	-	-	-	180	300	240	240	-	-	-	960
Hidrofracturamiento	Rev. B	5	3	-	-	-	-	-	2	5	5	2	2	24
	UDESS	5	3	-	-	-	-	-	2	5	5	2	2	24
Tiros de drenaje	Rev. B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	300	300	240	840
	UDESS	120	160	200	200	160	-	-	-	-	-	-	-	840
Fortificaciones especiales	Rev. B	-	-	-	-	-	60	-	60	60	70	-	-	250
	UDESS	70	60	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	250

- Sistema de Traspaso

Tabla xix. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Sistema de Traspaso.

Actividad	Programa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Excavación de punto de vaciado	Rev. B	0	-	2	1	-	3	-	1	-	-	1	-	8
	UDESS	1	2	3	1	-	1	-	-	-	-	-	-	8
Construcción de brocal de punto de vaciado	Rev. B	-	2	1	1	1	1	2	-	1	1	-	-	10
	UDESS	1	2	1	4	2	-	-	-	-	-	-	-	10
Rotura de chiflón de punto de vaciado	Rev. B	-	2	1	1	1	1	2	-	1	1	-	-	10
	UDESS	3	-	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Desquinche y fortificación de pique	Rev. B	1	-	2	1	2	-	1	2	-	1	1	-	11
	UDESS	1	1	2	0.5	4	2	-	-	-	-	-	-	11
Blindaje de piques	Rev. B	2	1	-	1	2	2	-	1	2	-	-	2	13
	UDESS	2	1	1	2	0	2	-	2	2	-	-	-	13
Construcción base martillo	Rev. B	-	2	2	1	2	2	1	-	-	1	-	2	13
	UDESS	3	1	2	1	5	2	-	-	-	-	-	-	13
Instalación telecomando martillo	Rev. B	-	1	-	-	5	-	-	-	-	1	2	-	9
	UDESS	1	2	2	1	1	1	1	-	-	-	-	-	9
Desquinche y fortificación de buzón	Rev. B	-	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	11
	UDESS	2	1	2	1	1	1	1	1	1	-	-	-	11
Construcción de buzón	Rev. B	-	1	1	-	1	1	2	-	1	1	1	1	10
	UDESS	1	1	2	2	2	1	-	-	-	-	-	-	10
Montaje de buzón	Rev. B	-	-	1	2	-	2	-	2	-	1	1	1	10
	UDESS	2	3	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Habilitación hidráulica de buzón	Rev. B	-	1	2	1	6	1	-	1	1	1	1	1	16
	UDESS	2	2	2	1	1	1	3	2	2	2	-	-	16
Telecomando buzón	Rev. B	-	2	-	-	-	5	-	-	1	1	1	-	10
	UDESS	3	2	2	1	2	-	-	-	-	-	-	-	10
Puesta en marcha sistema de traspaso	Rev. B	-	3	-	-	-	5	-	-	-	1	2	-	11
	UDESS	4	2	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	11

- Nivel de Acarreo

Tabla xx. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Nivel de Hundimiento.

Actividad	Programa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Desarrollos Horizontales	Rev. B	-	10	-	-	44	43	40	45	30	30	20	12	274
	UDESS	39	52	65	65	53	-	-	-	-	-	-	-	274
Desarrollos Verticales	Rev. B	28	-	50	-	35	62	60	-	-	40	-	-	275
	UDESS	24	32	40	40	40	40	40	19	-	-	-	-	275
Tiros de drenaje	Rev. B	-	-	-	-	-	130	130	-	-	-	-	-	260
	UDESS	120	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	260
Construcción máquinas de cambio	Rev. B	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	7
	UDESS	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	7
Construcción de cruzamientos	Rev. B	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	UDESS	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Preparación piso vía férrea	Rev. B	30	100	160	135	145	100	100	150	110	110	110	150	1400
	UDESS	87	116	145	145	145	145	145	145	145	145	37	-	1400
Construcción vía férrea	Rev. B	30	100	160	135	145	100	100	150	110	110	110	150	1400
	UDESS	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	48	1400
Construcción red de agua	Rev. B	30	100	160	135	145	100	100	150	110	110	110	150	1400
	UDESS	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	48	1400
Construcción red de aire	Rev. B	30	100	160	135	145	100	100	150	110	110	110	150	1400
	UDESS	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	48	1400
Construcción trolley	Rev. B	-	-	-	155	165	150	150	150	150	150	150	180	1400
	UDESS	90	120	150	150	150	150	150	150	150	140	-	-	1400
Fortificaciones especiales	Rev. B	-	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	100	400
	UDESS	60	80	100	100	60	-	-	-	-	-	-	-	400

- Subnivel de Ventilación

Tabla xxi. Comparación agendamiento de UDESS con el Rev. B 2017 para el Subnivel de Ventilación.

Actividad	Programa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Desarrollos Horizontales	Rev. B	-	12	29	20	23	28	26	20	20	20	20	25	243
	UDESS	36	48	60	60	39	-	-	-	-	-	-	-	243
Desarrollos Verticales	Rev. B	-	-	40	60	60	60	65	65	65	60	65	60	600
	UDESS	36	48	60	60	60	60	60	60	60	60	36	-	600
Construcción salas de ventiladores	Rev. B	-	1	2	2	2	3	2	2	2	2	2	-	20
	UDESS	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	-	20
Montaje de ventiladores	Rev. B	-	-	2	2	3	3	2	3	2	2	2	2	23
	UDESS	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	-	23
Habilitación de ventiladores	Rev. B	1	2	3	3	1	4	3	3	2	2	2	3	28
	UDESS	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	1	-	28
Construcción y habilitación OOCC especiales	Rev. B	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
	UDESS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Construcción de cunetas de drenaje	Rev. B	-	-	100	100	200	228	250	250	250	237	200	211	2026
	UDESS	126	168	210	210	210	210	210	210	210	210	52	-	2026
Construcción y habilitación SSE	Rev. B	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	6
	UDESS	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	6
Construcción y habilitación CDC	Rev. B	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	UDESS	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Construcción y habilitación SH	Rev. B	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	2
	UDESS	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Construcción y habilitación OCC	Rev. B	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	UDESS	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2

Anexo 3: Resultados análisis de sensibilidad

Se muestra el detalle obtenido de las dos pruebas del análisis de sensibilidad para los hitos y las actividades dentro de ellos.

Tabla xxii. Detalle de las dos pruebas realizadas en el análisis de sensibilidad.

Hito	Actividades	Prueba 1				Prueba 2			
		Fecha límite	Nueva Fecha	Factible	Actividades que son adelantadas	Fecha límite	Nueva Fecha	Factible	Actividades que son adelantadas
1	5	Febrero	Enero	si	5	Hito no pasó a esta prueba			
2	1	Febrero	Enero	si	1	Hito no pasó a esta prueba			
3	10	Febrero	Enero	no	1	Hito no pasó a esta prueba			
4	3	marzo	febrero	si	3	marzo	enero	si	3
5	8	marzo	febrero	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
6	17	abril	marzo	si	17	abril	febrero	no	0
7	4	abril	marzo	si	4	abril	febrero	no	0
8	1	abril	marzo	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
9	47	junio	mayo	si	47	junio	abril	no	0
10	11	junio	mayo	si	11	junio	abril	no	0
11	5	junio	mayo	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
12	14	julio	junio	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
13	8	agosto	julio	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
14	8	diciembre	Noviembre	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
15	3	diciembre	Noviembre	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
16	6	noviembre	octubre	no	0	Hito no pasó a esta prueba			
17	11	mixto	mixto	no	3	Hito no pasó a esta prueba			
Total	162				92				3