



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

SECUENCIAMIENTO ÓPTIMO DE CASERONES EN MINERÍA
SUBTERRÁNEA SELECTIVA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

VALENTINA JAVIERA ROJAS CANALES

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAVIER VALLEJOS MASSA
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

SECUENCIAMIENTO ÓPTIMO DE CASERONES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA SELECTIVA

La planificación minera es un proceso iterativo, costoso en términos de tiempo y requiere de equipos de trabajo especializados. Tradicionalmente, el proceso de planificación es un proceso secuencial, es decir, se elabora un plan de producción el cual va siendo modificado o adaptado posteriormente, según los requerimientos de la operación. Esto se traduce en que las metas de producción originales no se cumplen, y el VAN final es menor al planificado.

El objetivo principal de este trabajo es comparar y cuantificar el impacto que tiene la dilución no planificada, a través de dos modelos, sobre el plan de producción, la secuencia de extracción y en el VAN de la operación. Para esto, se realiza la planificación de una mina explotada por el método selectivo Bench & Fill, a través de un enfoque tradicional y un enfoque integrado, el cual incorpora un modelo de dilución. El impacto que tiene la dilución sobre el proceso de planificación puede ser observado a través de la comparación de ambos enfoques.

Para la realización de este trabajo se utilizó el *software* agendador de actividades UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler), dado que es una herramienta robusta, flexible y que, además, posee la ventaja, por sobre otras herramientas, de entregar resultados optimizados. El secuenciamiento realizado por UDESS entregó las secuencias óptimas de extracción y los respectivos planes de producción para cada uno de los escenarios estudiados. En el proceso de planificación se incluyeron restricciones operacionales, tales como tasa de producción y movimiento de relleno, en conjunto con la valorización de ciertas actividades (desarrollos horizontales, extracción y relleno). Estas fueron utilizadas para determinar las restricciones de precedencia y el orden de la secuencia de extracción.

Al comparar los resultados obtenidos se observó que incluir la dilución dentro del proceso de planificación produce un impacto directo sobre la secuencia de extracción, el VAN de la operación disminuye aproximadamente un 2% y, por ende, el plan de producción cambia.

Finalmente, se concluye que la incorporación de los modelos de dilución como parámetro geomecánico al proceso de planificación impacta de manera directa los planes de producción, la secuencia de extracción y, de manera negativa, el VAN de la operación, sin embargo, la optimización del secuenciamiento realizado por el *software* permite que este impacto sea poco significativo. Además, la ventaja que tiene la incorporación de la dilución al proceso, es que permite obtener resultados más cercanos a la realidad operacional y menos susceptibles a cambios en etapas posteriores de la planificación minera.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF:** Mining Engineer
BY: Valentina Javiera Rojas Canales
DATE: 23/04/2017
THESIS ADVISOR: Nelson Morales Varela

OPTIMAL STOPE EXTRACTION SEQUENCE IN SELECTIVE UNDERGROUND MINING

Mine planning is an iterative process, expensive in terms of time and requiring specialized engineering teams. Usually, the mine planning process is sequential, that is, a production plan is completed first and then it is adapted to the mine requirements. This often results in not achieving the production goals and the lower NPV than estimated in the original plan.

The main goal of this work is to compare and quantify the impact of unplanned dilution on the production plan, the extraction sequence and the NPV of the operation. For this purpose, production plans have been prepared for a Bench & Fill operation using, firstly, the traditional approach of mine planning and, secondly, the integrated approach (integrating dilution in the mine planning process) using real mine site data.

The sequencing of the activities was made using the software UDESS, which provided the optimal extraction sequence and a production plan for each scenario. The operational constraints (fill movement and production rate) and the benefit of each activity were used in determining the order of the extraction sequence.

While comparing the results, it was observed that incorporating dilution into the process impacts directly into the extraction sequence, which means that the order of stope extractions is not the same as in the original plan, the NPV is around 2% lower, and therefore the plan is different.

Finally, it can be concluded that incorporating dilution models into the planning process directly impacts the production plan, the extraction sequence and the NPV of the operation. The advantage of incorporating dilution into the process is to obtain results that are closer to the operational reality and less susceptible to changes in later stages of the mine planning process.

*A mis padres, mis hermanos y a Nicolás,
por su amor y apoyo incondicional.
A mi Tata,
por haber sido el mejor abuelo del mundo.*

*“Strong am I with the Force, but not that strong. Twilight is upon me, and soon, night must fall.
That is the way of things. The way of the Force”*
– Master Yoda –

“The circle is now complete. When I left you, I was but the learner; now I am the master”
– Darth Vader –

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional, por siempre alentarme a seguir adelante, sin importar los obstáculos y no renunciar a mis sueños. Por todas sus enseñanzas y por entregarme, a punta de esfuerzo, siempre lo mejor de cada uno. Los amo, y esto es por y para ustedes.

A mis hermanos, Claudia y Rodrigo, por su apoyo y su cariño en cada etapa de mi vida. ¡Los quiero mucho! Especialmente gracias a mi Negro, por su ayuda durante este trabajo. Sin él, aún estaría en la introducción.

A mi Nicolás, mi compañero y mi mejor amigo, por aguantar cada queja, por ayudarme cada vez que lo necesité. Porque sin su paciencia, su apoyo y su amor, este camino hubiera sido mucho más difícil y aburrido. ¡Esta es para vos! ¡Te amo mucho! También quiero agradecer a los Carreño Godoy: tío Jaime, tía Yoly y Valentina, porque son mi segunda familia y siempre me han hecho sentir parte de ustedes, como si nos conociéramos de toda la vida.

A los Canales Peñailillo: tía Loly, tío Tali, Juan Pablo y Tomi. Muchas gracias por todo el apoyo y el cariño. Son una parte importante de este logro.

A Francisca, mi *soul sister*, porque siempre estuviste animándome a seguir adelante, por creer en mí más que yo, por cada risa, por cada aventura que vivimos y por el regalo de tu amistad. Te quiero mucho *sis*, ¡pronto te toca a ti, doc!

A mis amigos de minas. Carola, por cada hora de trasnoche, por cada risa (y por cada lágrima), por cada rabia que pasamos juntas, por toda la ayuda y por todo el apoyo que nos entregamos durante estos años, pero sobre todo, por nuestra amistad. A Cherezade, Giovanni y María Camila, porque fueron parte importante de este proceso que dejamos atrás, pero por siempre estarán en mi corazón.

A toda la gente de Delphos, todos y cada uno fueron parte de esto. Javier Pérez, *Japi/Papi*, porque fuiste un *partner* bacán de memoria/tesis y, gracias a este trabajo, conocí a la gran persona y al gran amigo que eres. Gonzalo Nelis, por toda la ayuda que me has brindado (¡siempre!) y por tantos buenos momentos. A Maximiliano Alarcón, por la ayuda y los consejos brindados durante este proceso.

A la gente del Departamento de Ingeniería de Minas: Nicole Cid, Luis Isamit, Carlos San Juan y Lily Salinas. Sin ustedes, no seríamos nada. Y a nuestra querida Juanita Vergara, gracias infinitas por toda su entrega. Siempre estará en mis recuerdos.

Quiero agradecer especialmente a mi profesor guía, Nelson Morales, por darme la oportunidad de desarrollar mi memoria en el laboratorio, por la ayuda, el apoyo y los consejos que siempre estuvieron presentes.

Finalmente, quiero agradecer a NCL Ingeniería y Construcción y al Advanced Mining Technology Center (Proyecto Basal FB0809) por hacer posible este trabajo.

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	v
1 Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Principal.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Alcances.....	3
1.4 Estructura de la Memoria.....	5
2 Antecedentes.....	6
2.1 Planificación minera.....	6
2.2 Métodos de Explotación Subterráneos Selectivos.....	8
2.2.1 Room & Pillar.....	8
2.2.2 Bench & Fill.....	10
2.3 Dilución.....	13
2.3.1 Equivalent Linear Overbreak/Slough (ELOS).....	14
2.3.2 Método empírico de diseño (Pakalnis, Vongpaisal).....	16
2.4 UDESS.....	18
3 Metodología.....	20
3.1 Recopilación de datos.....	20
3.2 Calibración del Modelo.....	20
3.3 Caso de Estudio.....	22
3.4 Análisis y Conclusiones.....	22
4 Calibración del modelo.....	23
4.1 Room & Pillar.....	23

4.1.1	Actividades y precedencias	24
4.1.2	Plan de producción (Enfoque tradicional).....	26
4.1.3	Plan de producción considerando dilución (Enfoque integrado).....	27
4.1.4	Plan de producción considerando razón de exposición (Enfoque integrado).....	28
4.1.5	Análisis caso de prueba Room & Pillar.....	29
4.2	Bench & Fill.....	32
4.2.1	Actividades y precedencias	33
4.2.2	Plan de producción (Enfoque tradicional).....	36
4.2.3	Plan de producción considerando dilución (Enfoque integrado).....	37
4.2.4	Plan de producción considerando razón de exposición (Enfoque integrado).....	38
4.2.5	Análisis caso de prueba Bench & Fill	39
5	Caso de estudio.....	43
5.1	Antecedentes generales.....	43
5.1.1	Alcances.....	47
5.1.2	Método de Explotación.....	48
5.1.3	Consideraciones operacionales y económicas.....	51
5.2	Modelamiento de Bench & Fill.....	52
5.2.1	Actividades	52
5.2.2	Precedencias	53
5.3	Resultados.....	55
5.3.1	Plan de producción (Enfoque tradicional).....	55
5.3.2	Plan de producción considerando dilución a través de ELOS (Enfoque integrado)	57
5.3.3	Plan de producción considerando dilución a través de la razón de exposición (Enfoque integrado).....	59
5.3.4	Análisis de resultados	61
6	Conclusiones.....	67

7	Recomendaciones y trabajo futuro	69
	Bibliografía.....	70
	Anexos	72
	A1. Casos de prueba	72
	A.1.1 Room & Pillar.....	72
	A.1.2 Bench & Fill	75

Índice de Figuras

Figura 1: Número y participación del total de trabajadores de la pequeña, mediana y gran minería del cobre.	1
Figura 2: Clasificación de la planificación minera.	6
Figura 3: Clasificación de los métodos subterráneos.	8
Figura 4: Vista en planta de una mina explotada por Room & Pillar.....	9
Figura 5: Vista isométrica de perforación en Room & Pillar.	10
Figura 6: Vista en perfil de una explotación Bench & Fill.....	11
Figura 7: Vista isométrica de niveles en un Bench & Fill.....	12
Figura 8: Dilución planificada y no planificada.	14
Figura 9: Cuantificación de la sobre excavación en las paredes del caserón, sección transversal.	15
Figura 10: Caserones aislados.	16
Figura 11: Caserones en echelón.....	17
Figura 12: Caserones rib.....	17
Figura 13: Actividades predecesoras y sucesoras.....	18
Figura 14: Precedencias tipo "o" (izquierda) y tipo "y" (derecha).	19
Figura 15: Diagrama de la metodología utilizada.	20
Figura 16: Diagrama de flujo de la etapa de calibración.	21
Figura 17: Diagrama de flujo de la etapa del caso de estudio.	22

Figura 18: Disposición de caserones (izquierda) y distribución de leyes (derecha) para Room & Pillar.....	23
Figura 19: Vista en planta del nivel Room & Pillar y precedencias tipo “o”, caso de prueba.	25
Figura 20: Plan de producción, Room & Pillar, caso base.	26
Figura 21: Plan de producción, Room & Pillar, caso 2.	27
Figura 22: Plan de producción, Room & Pillar, caso 3.	28
Figura 23: Variación de la ley media por caserón para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.	30
Figura 24: Secuencias de extracción para los casos base (izquierda), 2 (centro) y 3 (derecha), Room & Pillar, caso de prueba.....	31
Figura 25: Layout mina Bench & Fill.	32
Figura 26: Secuencia de desarrollo y explotación.	32
Figura 27: Vista isométrica de un nivel j de Bench & Fill, caso de prueba.	34
Figura 28: Precedencias para Bench & Fill, caso de prueba.	35
Figura 29: Plan de producción por período, caso base.	36
Figura 30: Plan de producción por período, caso 2.	37
Figura 31: Plan de producción por período, caso 3.	38
Figura 32: Variación de la ley media por caserón para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.	40
Figura 33: Secuencia de extracción caso base (arriba), caso 2 (al medio) y caso 3 (abajo), Bench & Fill, caso de prueba.	42
Figura 34: Vista en planta del depósito epidermal.	43
Figura 35: Curva tonelaje-ley para sectores Y y VS.	44
Figura 36: Vista en planta nivel 1,175 m, Mina Y.	45
Figura 37: Vista isométrica niveles 1187 y 1199, Mina Y Este.	46
Figura 38: Vista isométrica, layout final.	46
Figura 39: Plan de producción Proyecto B desarrollado por empresa de ingeniería.....	47
Figura 40: Vista en planta de diseño de caserones (izquierda) y diseño de caserones viste isométrica (derecha).	48

Figura 41: Bench & Fill - Mining method.....	49
Figura 42: Bench & Fill - Split blasting.	50
Figura 43: Bench & Fill - Sequence.	50
Figura 44: Empaquetamiento de caserones, elevación 1,175 m este.....	53
Figura 45: Actividades.....	54
Figura 46: Clasificación de precedencias Mina Y.....	54
Figura 47: Plan de producción anual, caso 1.	55
Figura 48: Secuencia de extracción Mina Y, escenario 1.....	56
Figura 49: Plan de producción anual, caso 2.	57
Figura 50: Secuencia de extracción Mina Y, escenario 2.....	58
Figura 51: Plan de producción anual, escenario 3.	59
Figura 52: Secuencia de extracción Mina Y, escenario 3.....	60
Figura 53: Variación de ley media por caserón, escenarios 1, 2 y 3.	62
Figura 54: Secuencia de extracción Mina Y, escenario 1 (izquierda), escenario 2 (centro) y escenario 3 (derecha).	63
Figura 55: Vista en perfil de los cambios en la secuencia de extracción Mina Y, para escenario 2 (izquierda) y escenario 3 (derecha) con respecto al escenario 1.	64
Figura 56: Planes de producción, escenarios 1, 2 y 3.	65
Figura 57: Variación de ley media por período, escenarios 1, 2 y 3.	65
Figura 58: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 1.	73
Figura 59: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 2.	74
Figura 60: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 3.	75

Índice de Tablas

Tabla 1: Información archivo de actividades.	18
Tabla 2: Precedencias tipo "o"	19
Tabla 3: Precedencias tipo "y"	19
Tabla 4: Carta Gantt de actividades.....	19
Tabla 5: Parámetros económicos para Room & Pillar.	23
Tabla 6: Actividades para Room & Pillar, caso de prueba.....	24
Tabla 7: Precedencias para Room & Pillar, caso de prueba.	25
Tabla 8: Tonelaje total para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.	29
Tabla 9: Variación de la ley por caserón para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.	29
Tabla 10: Comparación de resultados para casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.	30
Tabla 11: Validación para casos 2 y 3, Room & Pillar.	31
Tabla 12: Parámetros económicos para Bench & Fill.	33
Tabla 13: Actividades para Bench & Fill, caso de prueba.	34
Tabla 14: Precedencias para Bench & Fill, caso de prueba.....	35
Tabla 15: Tonelaje total para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.	39
Tabla 16: Variación de la ley por caserón para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.	40
Tabla 17: Comparación de resultados para casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.	41
Tabla 18: Validación para casos 2 y 3, Bench & Fill.	41
Tabla 19: Comparación de la secuencia de extracción para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.	42
Tabla 20: Alternativas de altura de banqueo.	48
Tabla 21: Parámetros económicos para Proyecto B.	51
Tabla 22: Resumen modelamiento caso de estudio.....	52
Tabla 23: Archivo de actividades, Mina Y.....	53
Tabla 24: Descripción para escenarios 1, 2 y 3, caso de estudio.....	61

Tabla 25: Comparación de resultados de los tres enfoques, caso de estudio.	62
Tabla 26: Validación para escenarios 2 y 3, caso de estudio.	63
Tabla 27: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 1.....	72
Tabla 28: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 2.....	73
Tabla 29: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 3.....	74
Tabla 30: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 1.	76
Tabla 31: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 2.	79
Tabla 32: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 3.	82

1 Introducción

1.1 Contexto

La minería es una de las principales actividades económicas de nuestro país. Su importancia histórica se remonta a los tiempos de los atacameños y diaguitas, quienes trabajaban el cobre o *payén* e incluso llegaron a desarrollar técnicas de fundición y temple. En la actualidad, la importancia estratégica y significado tecnológico del cobre a nivel mundial, ha impactado fuertemente la economía del país, así como también la economía mundial (Sutulov, 1975).

El aporte promedio de la actividad minera al PIB, desde enero de 2015 hasta junio de 2016, es del 9.40% del total, lo que se traduce en 3.42 millones de dólares (Banco Central, 2016). Esta importancia radica fundamentalmente en la presencia de grandes yacimientos de cobre que vienen siendo explotados desde comienzos del siglo pasado. En el año 2015, la producción de cobre supero las cinco mil millones de toneladas, lo que representa casi un 30% de la producción mundial (Cochilco, 2016).

Si bien Chile está dominado por la gran minería del cobre, la pequeña y mediana minería son actores de gran importancia en el sector minero. A pesar de que su aporte a la producción de cobre es marginal, en términos de empleo su contribución es significativa. La Figura 1 muestra la participación de la pequeña, mediana y gran minería en el total de empleos del sector. En el año 2012, la pequeña minería aportó con un 22.6% del total de los empleos del sector, mientras que la mediana minera aportó con un 28.7% y la gran minería con un 48.7%.

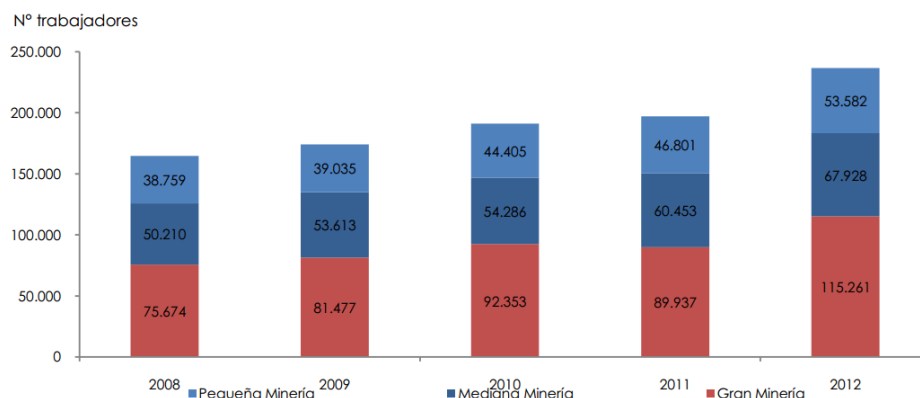


Figura 1: Número y participación del total de trabajadores de la pequeña, mediana y gran minería del cobre.

Fuente: Cochilco, *Monitoreo de la Pequeña y Mediana Minería Chilena*, 2013.

Dentro de la pequeña y mediana minería, los métodos selectivos de caseroneo son los más utilizados¹ y, a diferencia de la gran minería, los niveles de ingeniería que se realizan en este sector

¹ Desarrollo de herramientas de diseño para minería subterránea selectiva en Chile, Corfo, 2011 (<http://repositoriodigital.corfo.cl/handle/11373/5066?show=full>)

son limitados, principalmente por los recursos económicos disponibles, la complejidad de las tareas y el tiempo requerido para ejecutarlas. Es aquí donde se encuentra la oportunidad de mejorar los procesos y, por ende, agregar valor al negocio, a través del desarrollo e implementación de metodologías y herramientas orientadas a optimizar las etapas de la cadena de valor del negocio minero, en particular, en el proceso de planificación.

Es en el proceso de planificación donde se busca maximizar el valor de un proyecto minero, buscando la mejor estrategia de extracción del mineral en un período de tiempo determinado y considerando restricciones que, en general, complejizan el problema y dificultan encontrar una solución óptima. Es un proceso realizado en etapas, donde los planes de producción van siendo modificados *a posteriori* en relación a los requerimientos operacionales de la faena, lo que se traduce en diferencias entre lo planificado y lo realmente logrado.

Pero, ¿qué pasa si el proceso de planificación se realiza considerando *a priori* las variables que perturban los planes? Realizar un proceso de planificación integrando dichas variables *a priori* debería entregar planes de producción más cercanos a la realidad o más robustos, ya que son elaborados en base a una mayor cantidad de información, de manera tal que los resultados obtenidos después de llevar dichos planes a la realidad, sufran la menor variación posible.

A través de este trabajo, se pretende entregar una metodología de planificación integrada que busca maximizar el valor de un proyecto minero, encontrando una secuencia óptima de extracción y el correspondiente plan de producción asociado, a través de la herramienta secuenciadora UDESS.

1.2 Objetivos

Los objetivos planteados en este trabajo se detallan a continuación.

1.2.1 Objetivo Principal

El objetivo principal de este trabajo es comparar y cuantificar el impacto que tienen sobre el plan de producción, la secuencia de extracción y en el VAN de la operación, dos modelos de dilución integrados al proceso de planificación.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se plantean son los siguientes:

- Modelar la planificación de largo plazo para métodos selectivos utilizando el *software* UDESS, en particular para los casos de Room & Pillar y Bench & Fill (enfoque tradicional de planificación).
- Modelar la planificación de largo plazo para métodos selectivos utilizando el *software* UDESS, en particular para los casos de Room & Pillar y Bench & Fill, incorporando dos modelos de dilución (enfoque integrado de planificación).
- Comparar resultados entre la planificación tradicional y la planificación integrada, tanto para los casos de prueba como para el caso de estudio.

1.3 Alcances

Este trabajo se centrará en el estudio de la planificación de largo plazo en minas subterráneas cuyo método de explotación sea a través de métodos selectivos. En particular, se realizarán dos casos de prueba, para los métodos Room & Pillar y Bench & Fill, y un caso de estudio de una mina explotada por el método Bench & Fill. Quedan fuera de este estudio los métodos de explotación subterráneos masivos (Block/Panel Caving) y Cielo Abierto, así como también otros horizontes de tiempo (mediano y corto plazo).

Se cuantificará el impacto que tiene la dilución no planificada sobre el plan de producción, la secuencia de extracción y el valor final del proyecto, incorporando al estudio dos modelos de dilución:

- El modelo de Clark & Pakalnis (1996), el cual estima la dilución a través de la profundidad promedio de la sobre excavación en un área determinada (ELOS).
- El modelo de Pakalnis & Vongpaisal (1993), el cual estima la dilución a través de un modelo de regresión lineal construido en base a observaciones realizadas en una mina canadiense.

Para el caso de estudio, se modelará el método Bench & Fill, considerando tres actividades críticas:

- Desarrollos horizontales, donde se incluyen todos los túneles y galerías necesarias para la producción.

- Extracción, donde se engloba todo el proceso de productivo, desde la perforación para el banqueo hasta el transporte del mineral desde la frente.
- Relleno, donde se incluye el movimiento de material estéril y su aplicación en el caserón abierto. Para evitar demoras en la producción debido al movimiento del relleno, se estimó una capacidad de relleno similar al ritmo de explotación.

Todos los desarrollos, ya sea verticales u horizontales, relacionados con la ventilación de la mina, no fueron considerados en el modelo. Tampoco se incluyeron las actividades relacionadas con la fortificación. Considerar estas actividades dentro del modelo implica un mayor número de variables y restricciones y, por lo tanto, el *software* requiere más tiempo para resolver el problema. Si bien incluir dichas actividades resultaría en un plan de producción más realista, no están directamente relacionadas con el objetivo de este trabajo.

La flota de equipos que se utilizará para la resolución del caso de estudio será considerada como dato de entrada o *input* del modelo. En otras palabras, se considerará la flota de equipos calculada en el informe de prefactibilidad del proyecto utilizado como caso de estudio.

Finalmente, en el presente trabajo, el proceso de planificación es considerado un proceso determinístico, es decir, no se considerará incertidumbre de ningún tipo.

1.4 Estructura de la Memoria

A continuación, se presenta un resumen de cada una de las secciones incluidas en el presente trabajo de memoria de título.

1. Introducción

Este capítulo contiene el contexto en el cual es desarrollado el trabajo de título. Además, se muestran los objetivos generales y específicos, de los cuales se desprenderán las principales conclusiones. Se define el alcance que tendrá el trabajo, se describe qué es lo que queda fuera y cómo se acota el trabajo de memoria.

2. Antecedentes

Se presenta un resumen de cómo la bibliografía revisada se relaciona y sustenta el trabajo que se realizará como memoria de título, es decir, se repasa el conocimiento mínimo que se debe tener para leer el trabajo.

3. Metodología

Se describe la metodología que se utilizará para el desarrollo de la memoria, es decir, lo que se hará y cómo se hará.

4. Calibración del Modelo

En esta sección se aplica la metodología definida a dos casos de prueba, a modo de calibrar el *software* para métodos selectivos.

5. Caso de Estudio

En esta sección se aplica la metodología definida a un caso real de una mina explotada por el método subterráneos Bench & Fill. Se mostrarán los principales resultados obtenidos a partir de la metodología de trabajo. Además, se generará una discusión en base a los mismos, y en base a los conocimientos obtenidos durante la carrera.

6. Conclusiones

Se presentarán las conclusiones del trabajo realizado, a partir de los objetivos planteados inicialmente.

7. Recomendaciones y trabajo futuro

Se incluirán todas las propuestas de trabajo futuro relacionadas con el tema, las cuales se encuentran fuera de los alcances de este trabajo de título.

8. Referencias

Listado de referencias que apoyan el trabajo realizado.

9. Anexos

Este capítulo contiene todo tipo de información complementaria al trabajo realizado, como gráficos, tablas, figuras, etcétera.

2 Antecedentes

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica correspondiente a los temas abarcados en este trabajo de título.

2.1 Planificación minera

La planificación minera es el proceso a través del cual se busca alcanzar el crecimiento rentable del negocio minero (Hartman, 1992). Es un proceso iterativo, el cual busca las mejores alternativas de extracción para un yacimiento, es decir, incrementar el valor del negocio determinando las actividades, estimando los tiempos que duran dichas actividades, asignando adecuadamente los recursos y relacionando lo anterior dentro de un marco lógico de acuerdo a la faena que se está estudiando (Luxford, 2000).



Figura 2: Clasificación de la planificación minera.

Fuente: *SME Mining Engineering Handbook* (Hartman, 1992).

Como se muestra en la Figura 2, la planificación está dividida en dos grandes segmentos (Hartman, 1992):

- Planificación estratégica, la cual define los objetivos del negocio en el largo plazo, de modo que se obtenga el mayor valor agregado para el negocio.
- Planificación operacional, la cual se enfoca en controlar las acciones para alcanzar los objetivos planteados a nivel estratégico, además de estar relacionada con las actividades concernientes al corto plazo.

Con respecto a los horizontes de tiempo, se pueden distinguir tres niveles de la planificación (Hartman, 1992):

- Largo plazo, la cual corresponde a la planificación de las reservas totales. Se selecciona el mejor método de explotación, se determina la vida de la operación y su tamaño, ritmo de explotación y secuencias de extracción. La escala temporal corresponde a años.
- Mediano plazo, cuyo propósito es asegurar las condiciones necesarias para cumplir el plan de largo plazo, por lo tanto, los parámetros definidos son revisados con mayor precisión. La escala temporal va desde 2 a 5 años.
- Corto plazo, cuyo objetivo es la generación de planes a partir de información operacional y, de este modo, ajustarse más a la realidad de la operación. La escala temporal va desde días a meses, cubriendo un máximo de un año.

Dada la complejidad del proceso de planificación, generalmente el plan de producción obtenido no representa un óptimo global del problema. En este contexto, el proceso de optimización de los planes mineros es un problema muy difícil de resolver, ya que los modelos involucran un gran número de variables y restricciones, por lo que el costo en tiempo computacional es muy grande. Sin embargo, existen alternativas para abordar dichos problemas de manera exitosa (Rocher, 2011).

Una forma de hacer frente a la optimización de planes de producción es integrar las diversas actividades necesarias para el desarrollo del proyecto al proceso de planificación, es decir, no realizar la tarea de manera desagregada. Una vez que se van incorporando variables al proceso, los planes de producción sufren perturbaciones que es necesario tener en cuenta cuando se quiere maximizar el valor del negocio. Dentro de las variables más importantes, se tienen, por ejemplo, las variables económicas, geológicas, geomecánicas, hidrológicas, etc., las cuales, en general, no son consideradas en el proceso de planificación y se les hace frente durante la etapa de producción, produciendo ineficiencias y el inevitable incumplimiento de los planes (Rocher, 2011).

Actualmente, se cuenta con diversos *software* que apoyan el proceso de la planificación minera, tanto para minería a cielo abierto como para minería subterránea, entre los cuales se encuentra MinePlan, Whittle, Vulcan y MineSight, entre otros. También existen herramientas de agendamiento de actividades, como Deswik.Sched, pero que no optimizan las secuencias entregadas.

A pesar de la existencia de estas herramientas, no existen garantías de que las actividades programadas, en los planes desarrollados utilizando dichas herramientas, se cumplan a tiempo (Luxford, 2000). Por esto, se ha buscado aplicar la metodología de la planificación agregada o integrada, donde se aborda el tema de la planificación de minas subterráneas selectivas como un proceso conjunto o agregado, incluyendo la interacción de distintos tipos de variables con el proceso de planificación, para así obtener un plan que se acerque lo más posible al óptimo del problema y que tenga sentido operacional (Newman, 2004. Rocher, 2011).

2.2 Métodos de Explotación Subterráneos Selectivos

Los métodos de explotación subterránea se clasifican según el esquema de la Figura 3.

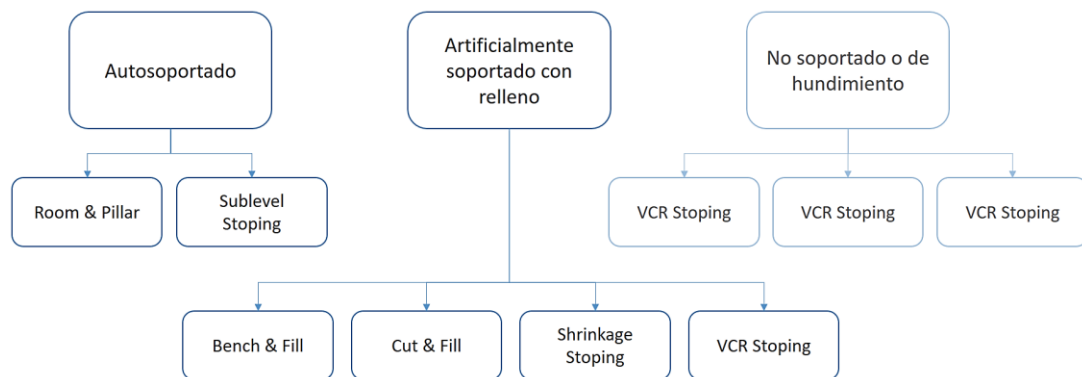


Figura 3: Clasificación de los métodos subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

Se entiende por minería selectiva (asociada principalmente a la pequeña y mediana minería) a las operaciones que pueden elegir las geometrías y secuencias en que se extraerán sus recursos minerales (Vallejos, 2013). Existen distintos tipos de métodos subterráneos de minería selectiva, por ejemplo:

- Room & Pillar
- Bench & Fill
- Sublevel Stopping
- Cut & Fill

A continuación, se realiza una breve descripción de los dos primeros métodos, los cuales están asociados al trabajo desarrollado.

2.2.1 Room & Pillar

Método de explotación auto soportado que consiste en la extracción de caserones, dejando pilares de mineral entre ellos dejando una configuración similar a un tablero de ajedrez, tal como se muestra en la Figura 4.

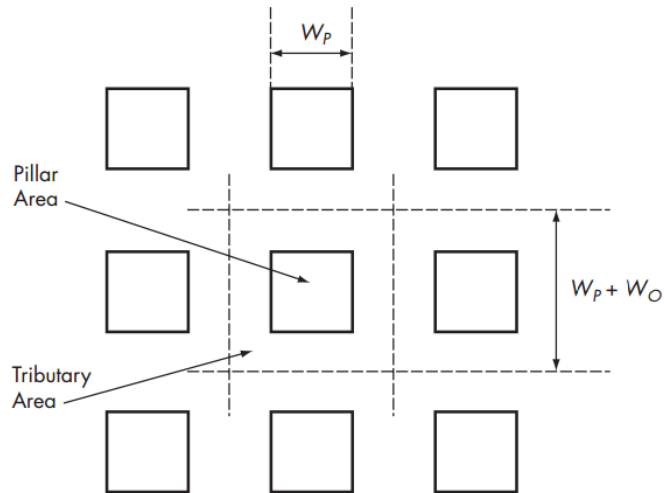


Figura 4: Vista en planta de una mina explotada por Room & Pillar.

Fuente: SME Mining Engineering Handbook (Hamrin, 2001).

La recuperación del método va desde el 60 hasta un 75% aproximadamente, debido a que en los pilares se deja mineral remanente que muchas veces no es recuperable. Estos pilares están diseñados con el objetivo de soportar el techo de material estéril que yace sobre la explotación. El método permite la extracción selectiva de los yacimientos, ya que es posible dejar los pilares en los sectores de menor ley. Es aplicable en yacimientos tabulares, horizontales o sub horizontales, incluso en cuerpos cuya inclinación llega hasta los 30°. Por lo general, se trata de depósitos estratificados de origen sedimentario.

Las dimensiones de los pilares y caserones dependen tanto de la competencia de la roca mineralizada como de la competencia de la roca caja, así como también del espesor del manto y de la condición de esfuerzos presente.

La perforación y tronadura se realiza de acuerdo a las técnicas usuales de avance de túneles y galerías. Según las características del yacimiento, el nivel de mecanización permite el uso de equipos que van desde las perforadoras manuales hasta jumbos de gran tamaño. Además, los equipos pueden ir montados sobre neumáticos o sobre orugas.

Según la potencia del manto mineralizado, el proceso de perforación se puede realizar de manera frontal o a través de banqueo, como se muestra en la Figura 5.

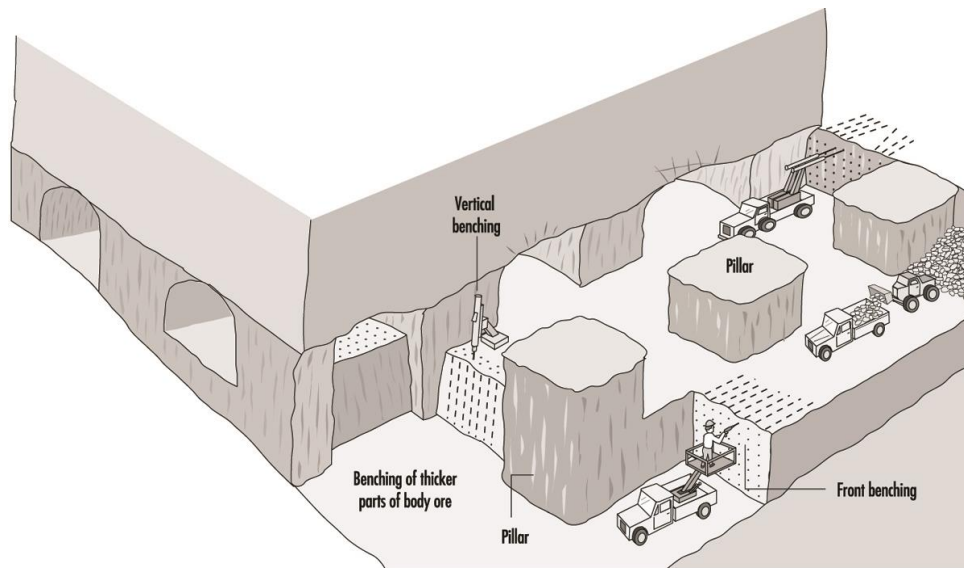


Figura 5: Vista isométrica de perforación en Room & Pillar.

Fuente: SME Mining Engineering Handbook (Hamrin, 2001).

El carguío y transporte puede ser realizado con equipos de tamaño variable, según las dimensiones de los desarrollos. Cuando no se tienen restricciones de espacio, las operaciones de carguío y transporte pueden ser realizadas utilizando cargadores frontales y camiones convencionales, respectivamente. Cuando se tienen restricciones de espacio, las operaciones de carguío y transporte pueden ser realizadas utilizando equipos LHD y camiones de bajo perfil.

Debido a que este método de explotación es aplicado en yacimientos estratificados, se debe tener un control riguroso de la estabilidad del techo, para minimizar el riesgo de derrumbes o desprendimientos de material. Lo usual, es utilizar pernos de manera sistemática en el techo y, de ser necesario, se fortifican los pilares mediante pernos y cables.

Es posible recuperar el mineral contenido en los pilares a través de relleno (*backfill*) y a través de la extracción en retroceso (*retreat mining*), donde la extracción de los pilares provoca el colapso de la mina y, como consecuencia, se produce subsidencia.

2.2.2 Bench & Fill

Método de explotación subterráneo selectivo, soportado artificialmente con relleno (variante del método Cut & Fill), que consiste en la explotación de caserones a través del banqueo y relleno. La secuencia de explotación de este método sigue dos direcciones principales: la extracción en un mismo nivel se realiza en retroceso a través de los *drift* de extracción y, de manera global, la extracción de los niveles se realiza de manera ascendente. La Figura 6 muestra un esquema de las distintas tareas realizadas durante la explotación por este método.

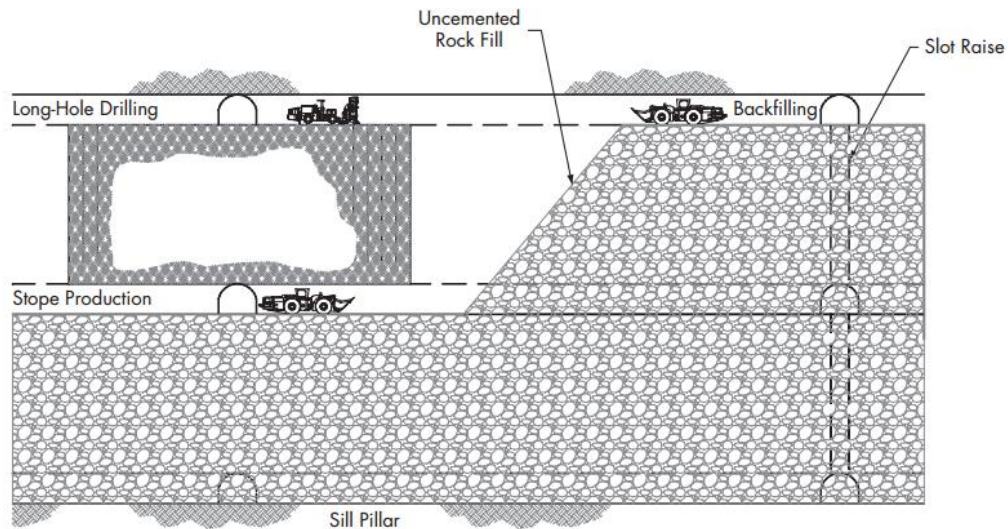


Figura 6: Vista en perfil de una explotación Bench & Fill.

Fuente: SME Mining Engineering Handbook (Hamrin, 2001).

Este método puede ser aplicado en cuerpos mineralizados de geometría vertical o sub vertical, de tal forma que la competencia de la roca mineralizada permita realizar las labores de banqueo para la posterior extracción del mineral.

El diseño de los caserones está determinado por la competencia tanto de la roca caja como de la roca mineralizada, así como también de la condición de esfuerzos, estructuras y forma del yacimiento en cuestión.

Las labores necesarias para realizar la explotación considera dos niveles principales, tal como se observa en la Figura 7:

- Nivel de producción: Compuesto por las galerías de transporte y estocadas o *drift* de extracción. Ambas estructuras deben ser diseñadas para permitir el adecuado tránsito y operación de los equipos dentro de la mina. La longitud y ubicación dependen de las características del depósito.
- Nivel de perforación: Tiene por objetivo la operación de los equipos de perforación para las labores de banqueo, las cuales se realizan de manera descendente. Los *drift* del nivel de perforación deben ser paralelos a los *drift* de extracción, y siguen los mismos parámetros de diseño que los *drift* en el nivel de producción. Como la secuencia del método es ascendente, para la extracción de niveles superiores, el nivel de perforación de un nivel será utilizado posteriormente como nivel de producción del nivel superior.

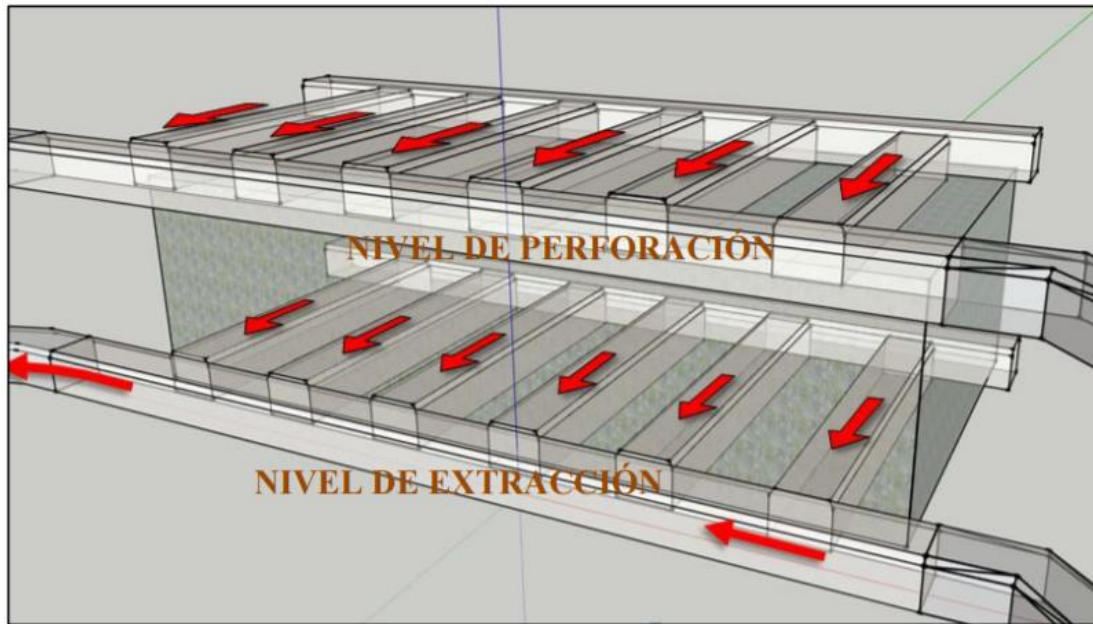


Figura 7: Vista isométrica de niveles en un Bench & Fill.

Fuente: Jorquera, M. (2015).

La utilización de relleno en minería subterránea es de vital importancia, ya que permite aumentar el porcentaje de recuperación de mineral, y proporciona estabilidad y seguridad para el desarrollo confiable de las labores de explotación dentro de la mina. El tipo de relleno dependerá principalmente de las condiciones de estabilidad del depósito, así como también de los costos y disponibilidad de espacio para la instalación de plantas de preparación, por ejemplo, de rellenos cementados.

Existen distintos tipos de relleno, entre los cuales destacan:

- Relleno seco, el cual consiste en el material estéril extraído durante el desarrollo de las labores de extracción, el cual es depositado en los caserones ya abiertos a través de métodos convencionales de carguío y transporte. Es el de menor costo, ya que solo considera los costos de remanejo de este material.
- Relleno hidráulico, el cual consiste principalmente en colas de relave, debe ser preparado en plantas ubicadas generalmente en superficie. Para su aplicación, se debe contar con sistemas de drenaje que permitan la remoción del agua presente.
- Relleno hidráulico cementado, es igual al anterior, pero se adiciona cemento o aglomerante antes de ser aplicado.

2.3 Dilución

La dilución puede ser definida como la contaminación del mineral por causa de material que se encuentra bajo la ley de corte durante el proceso minero (Wright, 1983).

La dilución es un parámetro útil para medir el desempeño de un caserón y la eficiencia minera. El desempeño de un caserón está medido según su capacidad de alcanzar el máximo de extracción con mínima dilución. Sin embargo, al aumentar la recuperación se tiene un aumento inherente de la dilución. Lo anterior se debe al aumento en los tamaños de los caserones, por lo que se tiene una disminución en la selectividad y un aumento en la probabilidad de ocurrencia de falla en las paredes del caserón. Para cuantificar la dilución, se define la sobre excavación como el volumen de material excavado en exceso con respecto a un volumen planificado según el diseño (Ceperutis, Villaescusa, 2006).

La dilución está también relacionada con la eficiencia, la cual es medida según la proporción de estéril que es incorporada al proceso minero. A mayor eficiencia, se tiene menor dilución y, por ende, menores costos (Scoble, Moss, 1994).

Las consecuencias que tiene la dilución en la planificación pueden ser dos:

- El tonelaje de material extraído será mayor que aquel necesario para obtener una misma cantidad de metal contenido en él.
- La ley del *run of mine* (ROM) será menor que aquella estimada *in situ* (Clark, 1998).

La dilución total está definida como: *dilución planificada* + *dilución no planificada*. La dilución planificada es aquel material bajo la ley de corte que se encuentra dentro de los límites del diseño del caserón, el cual es determinado por la selectividad del método. Por otro lado, la dilución no planificada es aquel material que se encuentra bajo la ley de corte que proviene de la roca o del relleno, por fuera de los límites del diseño del caserón. La incorporación de este material se debe a la sobre excavación causada por la tronadura o por desprendimientos de roca o relleno inestables (Scoble, Moss, 1994). Ambos conceptos se pueden apreciar gráficamente en la Figura 8.

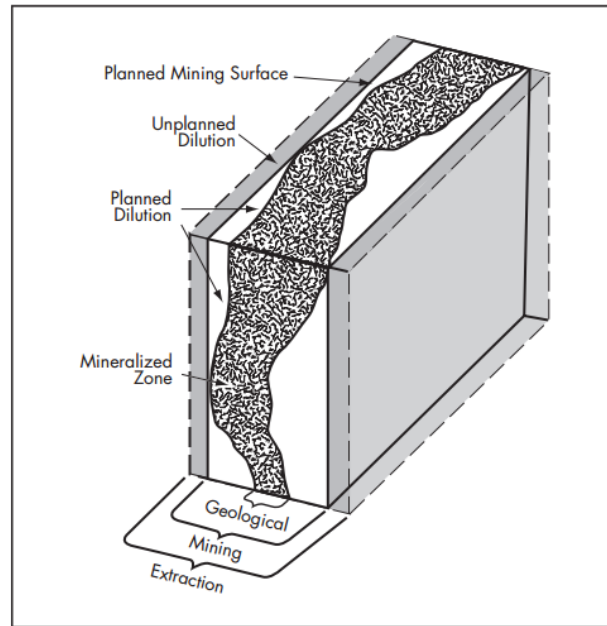


Figura 8: Dilución planificada y no planificada.

Fuente: Scoble, Moss. 1994.

Existen distintos métodos para medir la dilución. A continuación, se presentan los métodos desarrollados por Dunne, Pakalnis y Clark (1996) y por Pakalnis y Vongpaisal (1993).

2.3.1 Equivalent Linear Overbreak/Slough (ELOS)

El término ELOS o Equivalent Linear Overbreak/Slough es una forma alternativa de representar el volumen sobre excavado o desprendido como una profundidad promedio (la cual es una medida lineal) distribuida sobre el área estudiada. La Figura 9 muestra de manera esquemática la definición de ELOS sobre la sección transversal de un caserón.

Las ecuaciones (1) y (2) permiten formular el cálculo de la dilución mediante el concepto de ELOS (Clark, 1996).

$$ELOS [m] = \frac{\text{Volumen de sobre excavación de la pared [m}^3\text{]}}{\text{Área de la pared [m}^2\text{]}} \quad (1)$$

$$\text{Dilución [\%]} = \frac{ELOS [m]}{\text{Ancho de la pared [m]}} \quad (2)$$

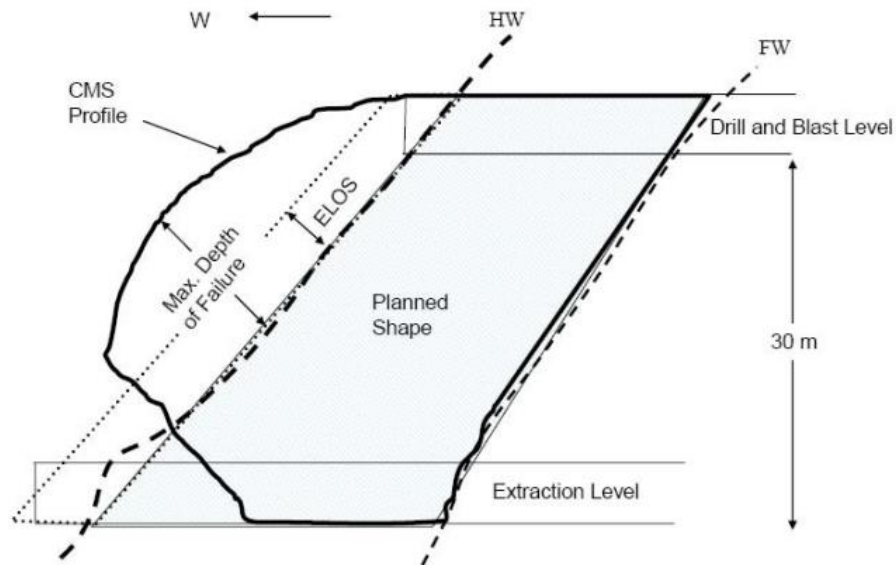


Figura 9: Cuantificación de la sobre excavación en las paredes del caserón, sección transversal.

Fuente: Geoffrey. 2009.

La ventaja que tiene esta formulación es que la información entregada es independiente del ancho del caserón, a diferencia del término porcentual de dilución. Cuando se utiliza el término porcentual, se generan distorsiones en los análisis, debido a que el ancho del caserón tiene un peso significativo en el volumen total excavado. De esta forma, si se tienen caserones de ancho variable, es conveniente utilizar el término ELOS para el cálculo de la dilución para así evitar distorsiones en los resultados.

2.3.2 Método empírico de diseño (Pakalnis, Vongpaisal)

Este modelo empírico fue desarrollado en base a 133 mediciones realizadas en caserones de la mina Ruttan en Canadá, generando gráficos de diseño en base a análisis estadístico de los datos para tres tipos de caserones (aislados, en echelón y adyacentes). El modelo propone que la dilución de un caserón proviene de la pared colgante, y es una función lineal de los siguientes parámetros:

- Rock Mass rating (RMR).
- Radio hidráulico (RH).
- Razón de exposición de la pared colgante (ER).
- Tipo de configuración de los caserones en el espacio.

Las ecuaciones (3), (4) y (5) permiten formular el cálculo de la razón de exposición de la pared colgante de un caserón, en base a su producción diaria y la tasa de excavación mensual.

$$\text{Producción por caserón [tpd]} = \frac{\text{Ritmo de producción [tpd]}}{\text{Caserones explotados simultáneos}} \quad (3)$$

$$\text{Tasa de excavación} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right] = \frac{\text{Producción por caserón [tpd]} \cdot 30 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right]}{\text{Densidad} \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]} \quad (4)$$

$$\text{Razón de exposición} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{mes}} \right] = \frac{\text{Tasa de excavación} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right]}{\text{Ancho caserón [m]}} \quad (5)$$

Según la disposición espacial de los caserones, se tienen tres ecuaciones para el cálculo de la dilución, las cuales son descritas a continuación.

2.3.2.1 Caserones aislados



Figura 10: Caserones aislados.

Fuente: Pakalnis & Vongpaisal, 1993.

La Figura 10 muestra una configuración de caserones aislados. Para esta configuración, la dilución puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Dil (\%)} = 5.9 - 0.08(\text{RMR}) - 0.010(\text{ER}) + 0.98(\text{HR})$$

2.3.2.2 Caserones en echelón

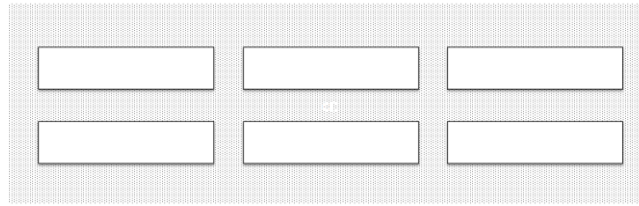


Figura 11: Caserones en echelón.

Fuente: Pakalnis & Vongpaisal, 1993.

La Figura 11 muestra una configuración de caserones en echelón. Para esta configuración, la dilución puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$Dil (\%) = 8.8 - 0.12(RMR) - 0.18(ER) + 0.8(HR)$$

2.3.2.3 Caserones adyacentes



Figura 12: Caserones rib.

Fuente: Pakalnis & Vongpaisal, 1993.

La Figura 12 muestra una configuración de caserones en rib. Para esta configuración, la dilución puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$Dil (\%) = 5.9 - 0.08(RMR) - 0.010(ER) + 0.98(HR)$$

Las limitaciones de este modelo son (Clark 1998):

- La base de datos proviene de mediciones de una sola mina, obedeciendo únicamente a las prácticas operacionales de dicha operación, por lo que es una base de datos sesgada.
- Los valores de dilución recolectados poseen un gran margen de error.
- Los valores de dilución se encuentran en valores porcentuales, por lo que son únicamente aplicables al rango de valores de anchos de Pakalnis.

2.4 UDESS

UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) es un agendador de actividades desarrollado íntegramente en el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile, con el objetivo de desarrollar una herramienta en la que fuese posible planificar y agendar de manera simultánea actividades de construcción y producción para métodos Block/Panel Caving (Rocher, 2012).

A diferencia de otras herramientas utilizadas en planificación minera, como MinePlan, Whittle, Vulcan o MineSight, o herramientas agendadoras como Deswik, UDESS realiza agendamiento de tareas de manera óptima, es decir, encuentra la secuencia óptima de realización de una serie de tareas maximizando una función objetivo como, por ejemplo, el VAN.

Este *software* funciona bajo el concepto de actividades o tareas, las cuales se relacionan a través de restricciones de precedencia, es decir, el inicio de cierta actividad está ligada a la conclusión de una o varias actividades. Por ejemplo, como se puede observar en la Figura 13, la actividad de extracción de mineral de un caserón está precedida por las actividades de preparación de un caserón (perforación, tronadura, ventilación y retiro de marinas), y la extracción es, a su vez, precedencia de la actividad de relleno.

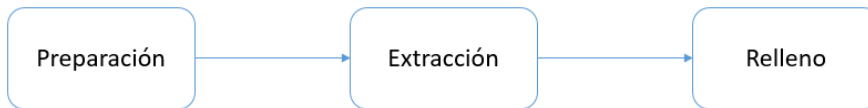


Figura 13: Actividades predecesoras y sucesoras.

Fuente: Elaboración propia.

Estas actividades, además, poseen un valor económico asociado y consumen recursos para su ejecución. Bajo estas consideraciones, UDESS realiza el agendamiento de las actividades de manera tal que se maximice el beneficio (o se minimice el costo).

Para realizar los agendamientos, UDESS usa como input dos archivos de texto: un archivo de actividades y un archivo de precedencias. La información mínima que debe contener el archivo de actividades se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Información archivo de actividades.

Actividad	Descripción
ID Actividad	Nombre identificador de la actividad
Ingreso	Valor de la actividad (ingreso total, si es positivo, o costo, si es negativo)
Max Rate	Tasa máxima realizable por mes de la actividad

El archivo de precedencias está agrupado en tres columnas: predecesor, sucesor y grupo. A modo de ejemplo, se pueden suponer dos situaciones, mostradas en la Figura 14.

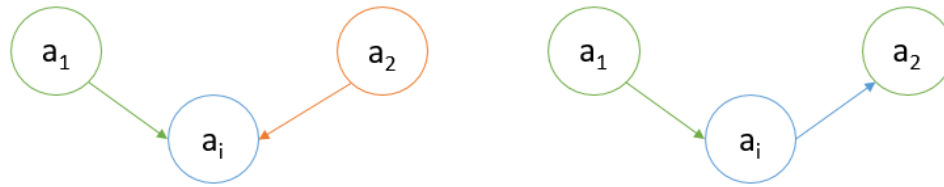


Figura 14: Precedencias tipo "o" (izquierda) y tipo "y" (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

En la primera situación (dos arcos de precedencia) se tiene una actividad a_i que tiene dos actividades predecesoras, a_1 y a_2 , tal que se puede comenzar la actividad a_i si ha finalizado la ejecución de a_1 o a_2 . Esta información quedaría registrada en el archivo de precedencias como lo muestra la Tabla 2.

Tabla 2: Precedencias tipo "o".

Predecesor	Sucesor	Grupo
a_1	a_i	1
a_2	a_i	2

La segunda situación (un arco de precedencia) muestra que para poder iniciar la actividad a_i sólo se requiere finalizar la actividad a_1 y, para iniciar la actividad a_2 sólo se requiere finalizar a_i . Esta información quedaría registrada en el archivo de precedencias como lo muestra la Tabla 3.

Tabla 3: Precedencias tipo "y".

Predecesor	Sucesor	Grupo
a_1	a_i	-1
a_i	a_2	-1

Es decir, cuando se tienen sólo arcos individuales (tipo "y") de precedencias, el grupo por defecto es -1. Cuando se tienen dos o más arcos de precedencia (tipo "o"), entonces los grupos de estas precedencias deben ser un número natural distinto de -1.

El output del *software* es un archivo Excel que contiene la Carta Gantt que especifica qué fracción de la actividad se realiza por período, como lo muestra la Tabla 4, y el valor de la función objetivo (por ejemplo, el VAN).

Tabla 4: Carta Gantt de actividades.

	t1	t2	t3	t4	t5
a1	0.5	0.5	0	0	0
a2	0	0	0.7	0.3	0
a3	0	0	0	0	1

3 Metodología

El presente capítulo detalla las etapas de la metodología aplicada para la realización de este trabajo. La Figura 15 muestra un esquema general de dicha metodología, donde se pueden ver sus principales etapas, las cuales son descritas en las secciones siguientes.

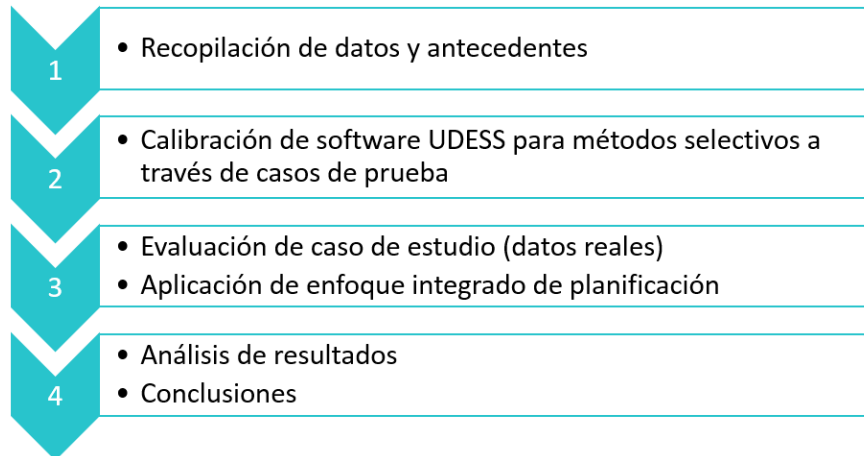


Figura 15: Diagrama de la metodología utilizada.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Recopilación de datos

La primera etapa consiste en la recopilación de antecedentes y datos reales de una mina explotada por algún método subterráneo selectivo, con lo cual se pretende desarrollar el caso de estudio.

Los datos utilizados para el desarrollo del caso de estudio fueron provistos por una empresa de ingeniería, los cuales corresponden a un proyecto desarrollado en el año 2014, el cual se identificará con el nombre “Proyecto B” y *Mina Y*, debido a cláusulas de confidencialidad.

Los datos entregados por la empresa corresponden al informe técnico elaborado durante la etapa de prefactibilidad del proyecto, además del diseño realizado contenido en archivos CAD, los cuales son la base para el desarrollo del caso de estudio.

3.2 Calibración del Modelo

La segunda etapa consiste en la calibración del *software* UDESS, a través del desarrollo de dos casos de prueba, usando datos hipotéticos, para dos métodos subterráneos selectivos: Room & Pillar y Bench & Fill. La idea de estos casos de prueba es, además de calibrar la herramienta, explorar el potencial del *software* al ir complejizando los ejemplos. La Figura 16 muestra un diagrama de flujo del desarrollo de los casos de prueba.

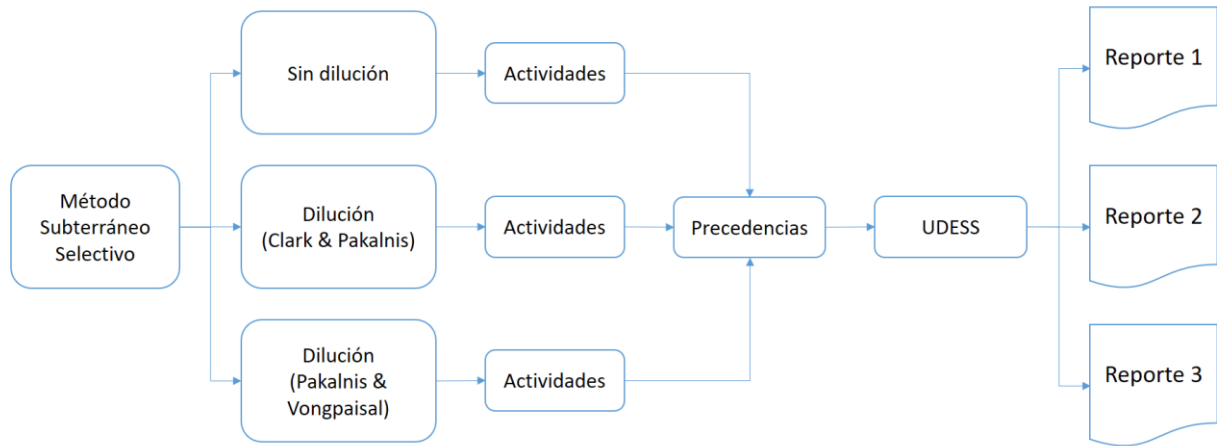


Figura 16: Diagrama de flujo de la etapa de calibración.

Con el objetivo de determinar y cuantificar el efecto que tiene incluir la dilución en el proceso de planificación, se realizan tres escenarios:

- Escenario 1, donde se realiza el proceso de planificación a través del enfoque tradicional. Se obtiene una secuencia de extracción óptima, un plan de producción y el VAN.
- Escenario 2, donde se realiza el proceso de planificación a través del enfoque integrado, incorporando un ELOS máximo permisible (modelo de Clark & Pakalnis) y, por lo tanto, una dilución para cada caserón. Se obtiene una secuencia de extracción óptima, un plan de producción y el VAN.
- Escenario 3, donde se realiza el proceso de planificación a través del enfoque integrado, incorporando la dilución a través del modelo de Pakalnis & Vongpaisal. Se obtiene una secuencia de extracción óptima, un plan de producción y el VAN.

Para cada uno de los casos desarrollados, se deben definir las actividades que serán agendadas, su respectiva valorización, y las restricciones de precedencia que servirán de input al *software*.

El primer caso consiste en un nivel de una mina hipotética explotada por Room & Pillar. Para el desarrollo de este caso, se consideran ciertos parámetros económicos para realizar la valorización de las reservas y se consideran sólo actividades de producción para, finalmente, obtener una secuencia de extracción de los caserones, el plan de producción y el VAN de los tres escenarios estudiados.

El segundo caso de prueba consiste en un nivel de una mina hipotética explotada por Bench & Fill. Al igual que en el caso anterior, se consideran ciertos parámetros económicos para realizar la valorización de las reservas. Además, se consideran actividades de producción y relleno para, finalmente, obtener una secuencia de extracción de los caserones, el plan de producción y el VAN de los tres escenarios estudiados.

3.3 Caso de Estudio

La tercera etapa de la metodología consiste en el desarrollo del caso de estudio con los datos recopilados en la primera etapa. El objetivo es realizar la planificación de la faena seleccionada a nivel de mina completa (no por sectores), replicando los tres escenarios descritos para los casos de prueba, como se observa en la Figura 17.

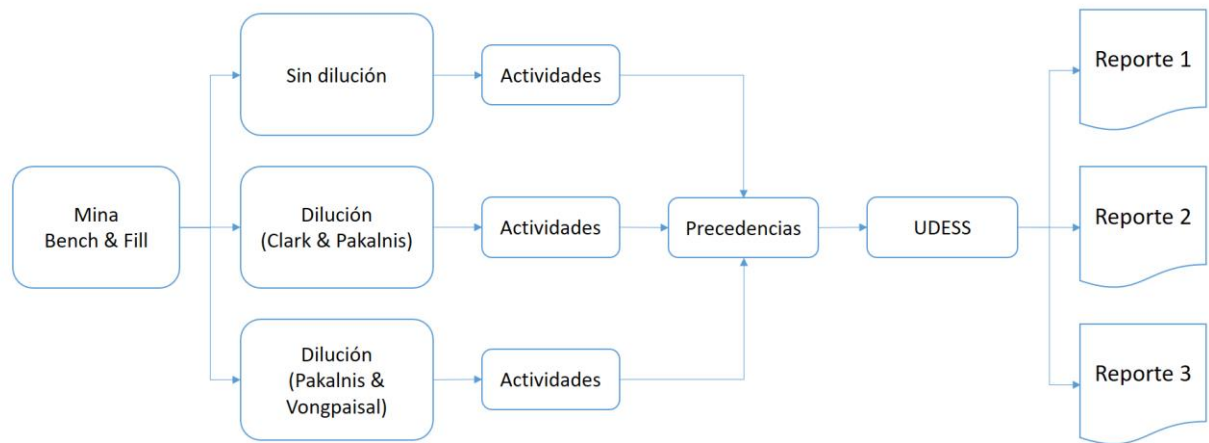


Figura 17: Diagrama de flujo de la etapa del caso de estudio.

El primer paso es definir las actividades y, en base a estas, definir las restricciones de precedencia para realizar el agendamiento. Considerando los parámetros económicos y operacionales descritos en el informe técnico, se realiza la valorización de dichas actividades, para así obtener una secuencia de extracción de los caserones, el plan de producción y el VAN de los tres escenarios estudiados.

3.4 Análisis y Conclusiones

La etapa final de este trabajo consiste en plantear una discusión en torno a los resultados obtenidos, tanto para los casos de prueba como para el caso de estudio, para luego realizar un análisis que permita obtener conclusiones alineadas con los objetivos establecidos al inicio de esta memoria.

Los análisis consisten en realizar comparaciones entre los resultados obtenidos a través de la planificación tradicional en contraste con aquellos obtenidos a través del enfoque integrado, comparando las secuencias de extracción, los porcentajes de avance por actividad, el VAN, el comportamiento de la ley media, los planes de producción, el movimiento de material y los planes de producción, todo dentro de un horizonte de 20 años. Se espera poder cuantificar el efecto que tiene sobre los planes de producción incluir la dilución a través de dos modelos distintos, y concluir que estos efectos dependen del modelo de dilución utilizado y que, si bien golpean los planes de manera marginal, realizar la planificación a través de un enfoque integrado permite adoptar una estrategia de extracción basada en mejor y mayor cantidad de información.

4 Calibración del modelo

En este capítulo se describen los dos casos de prueba, realizados con el fin de calibrar el *software* para el modelamiento de métodos subterráneos selectivos. Si bien ambos casos son ejercicios puramente académicos y de tamaño reducido, el objetivo de éstos es aprender a modelar los métodos en cuestión, para luego aplicar las habilidades adquiridas durante esta etapa en la etapa del modelamiento del caso de estudio, utilizando datos reales.

4.1 Room & Pillar

Se tiene el nivel de una mina hipotética de oro, cuyo layout y distribución de leyes (en [g/t]) se pueden observar en la Figura 18. Este nivel consta de 24 caserones y 12 pilares, cada uno de dimensiones 4 x 4 x 4 [m].

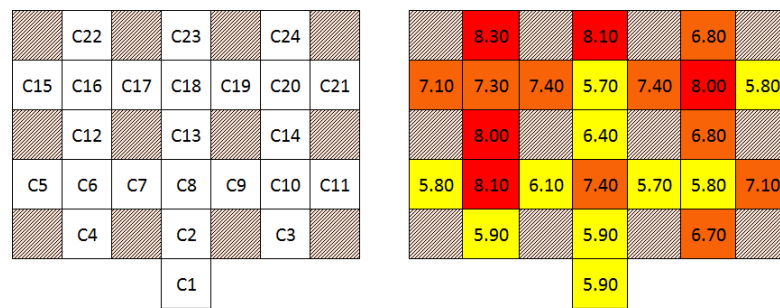


Figura 18: Disposición de caserones (izquierda) y distribución de leyes (derecha) para Room & Pillar.

Fuente: *Elaboración propia.*

Se busca encontrar la secuencia de explotación óptima para tres escenarios:

- Caso 1: planificación sin dilución.
- Caso 2: planificación incorporando dilución a través del modelo de Clark & Pakalnis, utilizando un ELOS máximo admisible.
- Caso 3: planificación incorporando dilución a través del modelo de Pakalnis & Vongpaisal, utilizando las ecuaciones descritas en el capítulo de Antecedentes.

Para ello, se realiza la valorización de cada caserón utilizando los parámetros económicos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros económicos para Room & Pillar.

Parámetros Económicos	
Costo mina [US\$/t]	54
Costo procesamiento [US\$/t]	31
Precio Au [US\$/oz.t]	1,281
Costo venta [US\$/oz.t]	4.87
Recuperación Au	0.93
Tasa de descuento (mensual)	10%

Para la realización de este caso, se considera una única actividad de extracción de caserones, la cual contempla todo el ciclo productivo del caserón, el cual se estimó en 3 días por caserón. Para cada uno de los escenarios estudiados, se fija un ritmo de explotación de 10 [tpd] o 300 [tpm] en un horizonte de planificación de 14 meses. Además, se considera que la roca es regular, con un RMR = 50.

4.1.1 Actividades y precedencias

En base al layout, mostrado en la Figura 18, se requiere modelar el método Room & Pillar en base a actividades y restricciones de precedencia.

Con el fin de simplificar el caso de estudio, se considera todo el ciclo productivo del método como una sola actividad, es decir, la actividad de extraer un caserón engloba a las operaciones de perforación, tronadura y carguío del mineral en la frente. Para mantener una cierta simplicidad en el modelo, se dejan fuera las actividades relacionadas con la ventilación de la mina y los desarrollos verticales, los cuales no interfieren de manera significativa con las actividades de producción. También se dejó fuera del análisis el desarrollo de la rampa, ya que se está analizando un solo nivel.

La Tabla 6 muestra una parte del archivo de actividades que es leído por el *software*. Este archivo viene organizado en columnas, donde cada una representa un determinado atributo de las actividades. Por ejemplo, la columna *caserón* contiene el nombre de la actividad, en este caso se tienen 24 caserones, por lo que se tienen 24 actividades de extracción. La columna *ley media* contiene el valor de la ley media por caserón, mientras que la columna *tonelaje* representa las toneladas de cada caserón. Además, se encuentran las columnas de atributos económicos, como ingresos y costos por caserón y, finalmente, se tiene la columna con el atributo *max rate*, el cual contiene la información de avance de la actividad en un mes.

Tabla 6: Actividades para Room & Pillar, caso de prueba.

caserón	ley_media	tonelaje	ingreso_usd	costo mina	costo planta	costo total	max_rate
C1	5.86	166.4	327,779.84	8,985.6	5,158.4	14,144	10
C2	5.91	166.4	330,510.08	8,985.6	5,158.4	14,144	10
C3	6.74	166.4	377,253.04	8,985.6	5,158.4	14,144	10

Para comprender el orden en que se desarrollan estas actividades en relación al layout de la mina se puede observar la Figura 19. La única entrada al nivel se encuentra en el caserón C1, el cual es necesario extraer para acceder al caserón C2. Del mismo modo, la extracción del caserón C2 es predecesora de la extracción del caserón C8. De esta forma, la extracción de cada uno de los caserones de esta mina está relacionada con la extracción de un caserón adyacente. En la Figura 19 se pueden observar cinco caserones encerrados en un círculo rojo (C16, C17, C18, C19 y C20), los cuales tienen la particularidad de tener dos actividades predecesoras del tipo “o”. Por ejemplo, para acceder al caserón C16 se debe extraer el caserón C12 o el caserón C17. Así mismo, la extracción del caserón C18 puede realizarse una vez extraídos los caserones C17 o C13 o C19. Gracias a que el *software* soporta este tipo de precedencias complejas, la secuencia de extracción resultante sólo depende de la rapidez con la que se extraigan los caserones y no está sujeto a restricciones más duras.

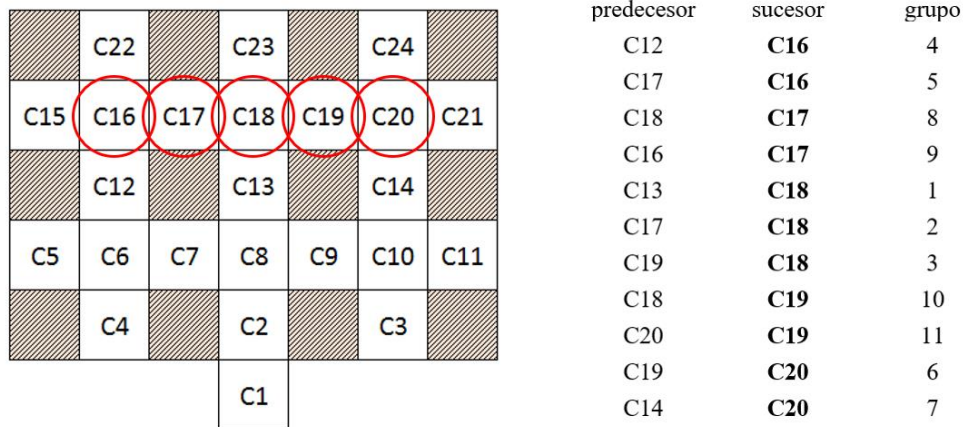


Figura 19: Vista en planta del nivel Room & Pillar y precedencias tipo “o”, caso de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Las restricciones de precedencia son ingresadas a UDESS a través de un archivo de texto, el cual contiene las actividades separadas en columnas de *predecesor* y *sucesor*. Para ejemplificar lo anterior, la Tabla 7 muestra algunas de las precedencias consideradas en el problema, de la forma en que son leídas por el *software*.

Tabla 7: Precedencias para Room & Pillar, caso de prueba.

predecesor	sucesor	group
C1	C2	-1
C2	C8	-1
C8	C7	-1
C12	C16	4
C17	C16	5
C18	C17	8
C16	C17	9

Una vez identificadas y valorizadas las actividades, y planteadas las restricciones de precedencia, se ingresan estos archivos a UDESS para resolver el problema de optimización. Para este caso de prueba, se tiene un total de 24 actividades, 29 restricciones de precedencia y una restricción de recursos (tasa de extracción de 300 [tpm]).

4.1.2 Plan de producción (Enfoque tradicional)

El enfoque tradicional del proceso de planificación considera, como ya se ha mencionado, la planificación sólo de las reservas, sin incluir ningún tipo de parámetro que afecte el proceso.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input (ver Anexo), para los cuales se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 20.

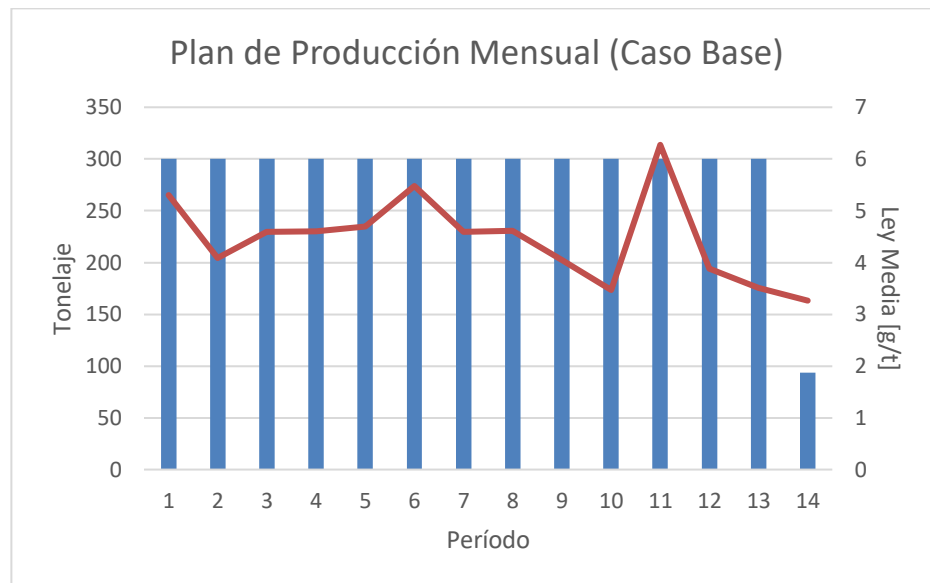


Figura 20: Plan de producción, Room & Pillar, caso base.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 8.437 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 0.6 segundos. La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso base se muestra de manera detallada en la Tabla 27, mientras que en la Figura 58 se puede observar la secuencia de extracción por períodos (sección Anexos).

4.1.3 Plan de producción considerando dilución (Enfoque integrado)

El enfoque integrado del proceso de planificación considera al menos un parámetro que afecte el proceso. En este caso, se considera la dilución a través de un máximo ELOS admisible. En este caso, se tiene un ELOS de 0.8 [m] para cada caserón, lo que resulta en una dilución del 0.2%.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan el archivo de actividades para este caso, ya que se utilizan las mismas precedencias que en el caso anterior (ver Anexo). Luego, se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 21.

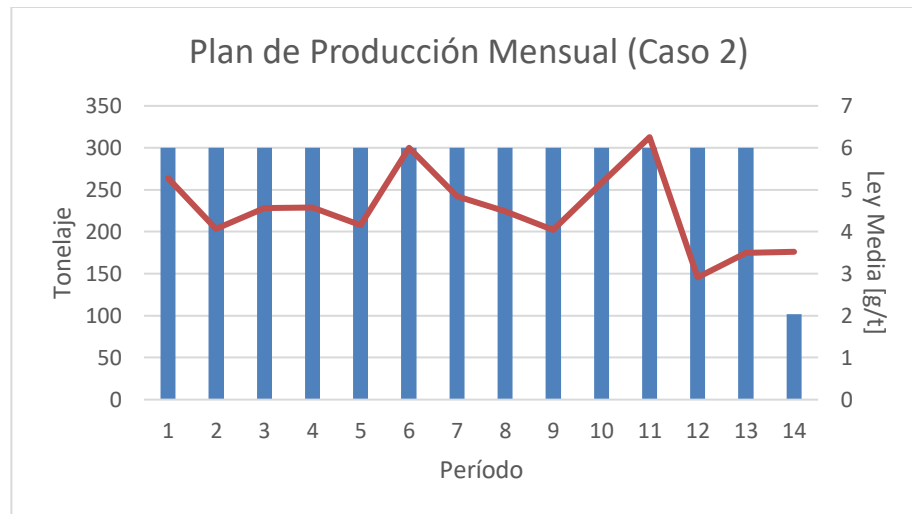


Figura 21: Plan de producción, Room & Pillar, caso 2.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 8.339 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 0.5 segundos.

La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso 2 se muestra de manera detallada en la Tabla 28, mientras que en la Figura 59 se puede observar la secuencia de extracción por períodos (sección Anexos).

4.1.4 Plan de producción considerando razón de exposición (Enfoque integrado)

El enfoque integrado del proceso de planificación considera, como ya se dijo, al menos un parámetro que afecte el proceso. En este caso, se considera la dilución a través del modelo lineal de Pakalnis (Pakalnis, Vongpaisal, 1993) a través del cálculo de la razón de exposición, la cual resulta en una dilución del 3.4% (los cálculos realizados se encuentran en la sección de Anexos).

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan el archivo de actividades para este caso, ya que se utilizan las mismas precedencias que en el caso anterior (ver Anexo). Luego, se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 22.

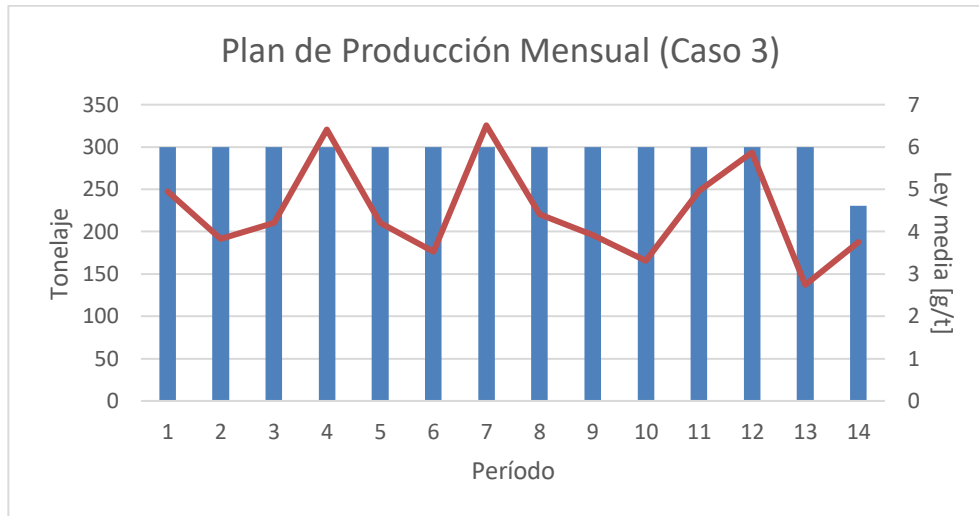


Figura 22: Plan de producción, Room & Pillar, caso 3.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 8.314 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 0.4 segundos.

La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso 2 se muestra de manera detallada en la Tabla 29, mientras que en la Figura 60 se puede observar la secuencia de extracción por períodos (sección Anexos).

4.1.5 Análisis caso de prueba Room & Pillar

Como se observa en la Tabla 8, el tonelaje movido en los casos 2 y 3 es mayor al tonelaje movido en el caso base, esto debido a que, al incluir la dilución en el modelo, se está incluyendo más material por caserón.

Tabla 8: Tonelaje total para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tonelaje Total	3,993.6	4,001.6	4,130.5

Si se comparan los casos 2 y 3, se puede observar que el aumento de tonelaje en el caso 2 es menor al aumento del tonelaje del caso base.

Para el caso 2, se consideró un ELOS máximo admisible de 0.8 [m], lo que resulta en una dilución del 0.2%, es decir, un aumento de 8 [t] en total. Esto significa que la sobre excavación de las paredes tendrá, en promedio, 0.8 [m] de profundidad, factor que proviene netamente del diseño de los caserones (ver ecuaciones en capítulo de Antecedentes).

Por otro lado, el modelo de dilución utilizado en el caso 3 no depende sólo del diseño de los caserones, sino que también de las cualidades geotécnicas del macizo rocoso a través del parámetro RMR, y del ritmo de explotación a través de la razón de exposición de la pared colgante. La dilución obtenida para este modelo es de 3.4%, lo que resulta en un aumento de 137 [t].

Debido a la incorporación de la dilución, se puede observar que entre el caso base y el caso 2, la ley prácticamente se mantiene invariable, esto debido a que la dilución es menor al 1%. Por otro lado, la variación de la ley entre el caso base y el caso 3 es a lo más 0.3 [g/t]. Estas variaciones se pueden observar en la Tabla 9 y la Figura 23.

Tabla 9: Variación de la ley por caserón para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.

Caserón	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24
Caso Base	5.9	5.9	6.7	5.9	5.8	8.1	6.1	7.4	5.7	5.8	7.1	8.0	6.4	6.8	7.1	7.3	7.4	5.7	7.4	8.0	5.8	8.3	8.1	6.8
Caso 2	5.8	5.9	6.7	5.9	5.8	8.1	6.0	7.4	5.6	5.8	7.1	7.9	6.3	6.8	7.1	7.3	7.4	5.7	7.4	8.0	5.8	8.3	8.1	6.8
Caso 3	5.7	5.7	6.5	5.8	5.6	7.9	5.9	7.2	5.5	5.6	6.9	7.7	6.1	6.6	6.8	7.1	7.2	5.5	7.2	7.7	5.6	8.0	7.9	6.5

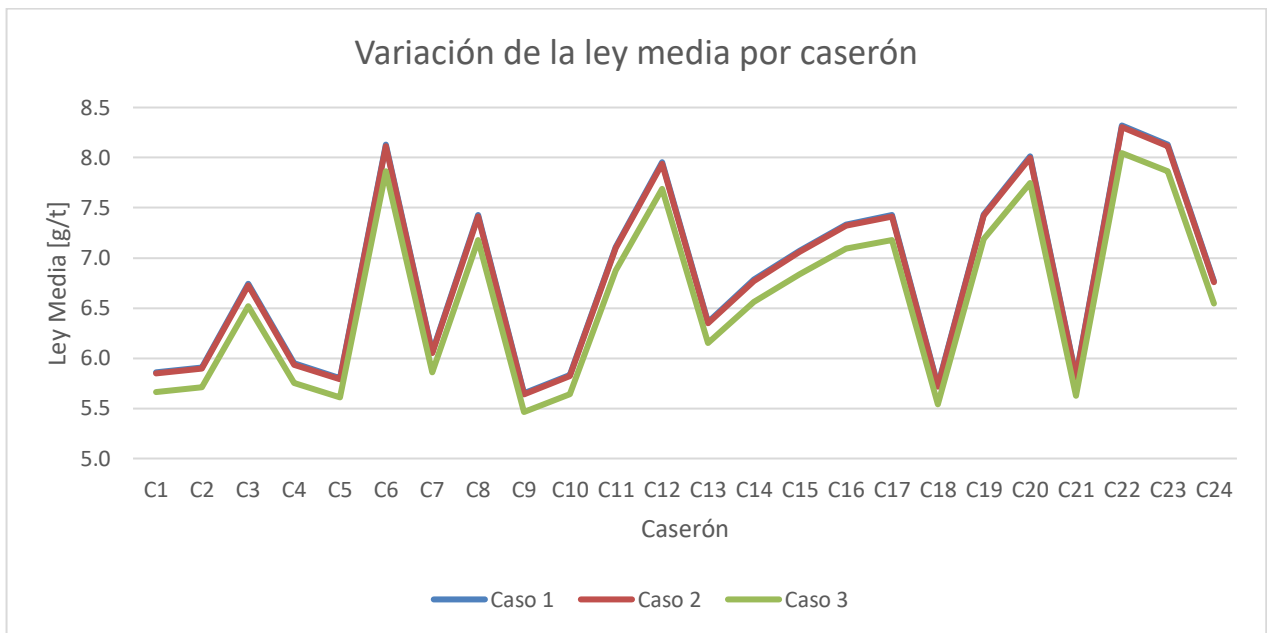


Figura 23: Variación de la ley media por caserón para los casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.

Estas diferencias en tonelaje y ley por caserón radican en los modelos de dilución utilizados. El modelo de Clark & Pakalnis (caso 2) es un modelo teórico, que considera aspectos sólo de diseño como el ancho del caserón, por lo que se generan menos distorsiones en los resultados. Por otro lado, el modelo de Pakalnis & Vongpaisal (caso 3) es un modelo empírico y, dado que fue alimentado con datos sólo de una mina, está sujeto a mayores márgenes de error al ser aplicado en minas con distintas condiciones geotécnicas y operacionales. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el caso 2 poseen mayor confiabilidad.

La Tabla 10 muestra el VAN obtenido para cada uno de los casos analizados. Se puede observar que el VAN de los casos 2 y 3 disminuye menos de un 1% en relación al caso base, es decir, la incorporación de los dos modelos de dilución afecta el VAN, pero solo de manera marginal, por lo que realizar un análisis comparativo entre los VAN obtenidos no es concluyente con respecto a si existe o no una ventaja en incluir modelos de dilución dentro del proceso de planificación.

Tabla 10: Comparación de resultados para casos 1, 2 y 3, Room & Pillar.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
VAN [MUSD]	8.341	8.339	8.314
Diferencia Porcentual Casos 1 y 2		0.011%	
Diferencia Porcentual Casos 1 y 3		0.157%	

UDESS entrega una secuencia óptima maximizando una función objetivo, en este caso, el VAN, en cada uno de los tres casos estudiados, entonces cualquier otra secuencia utilizada para generar los planes de los casos 2 y 3 debería reportar un VAN menor al entregado por el *software*. Para verificar esto, se realiza una validación cruzada de los planes, es decir, se utiliza la secuencia del caso base para generar el plan de producción y el correspondiente VAN de los casos 2 y 3. La Tabla 11 muestra los resultados de esta validación, donde queda en evidencia que, tanto la secuencia

como el VAN reportados por el *software* son efectivamente un óptimo para cada uno de los casos y que, al reemplazar la secuencia del caso base en los casos 2 y 3, se obtienen un VAN aún más golpeado por la inclusión del modelo de dilución dentro del proceso. Por lo tanto, los cambios en la secuencia de extracción en los casos 2 y 3 se explican por el cambio en las condiciones de tonelaje y ley introducido por los modelos de dilución.

Tabla 11: Validación para casos 2 y 3, Room & Pillar.

	VAN UDESS	VAN Validación	Dif. porcentual con respecto a la validación	Dif. porcentual con respecto al caso base
Caso Base	8,775,050.13	-	-	-
Caso 2	8,774,096.95	8,773,358.03	0.008%	0.019%
Caso 3	8,761,301.69	8,761,205.76	0.001%	0.158%

Por otro lado, en la Figura 24 se puede observar la secuencia óptima de extracción obtenida por UDESS para los tres casos estudiados. Se puede notar que, si bien el orden de extracción de los primeros ocho caserones es invariable en los tres casos, existen cambios en la secuencia desde el período 5.

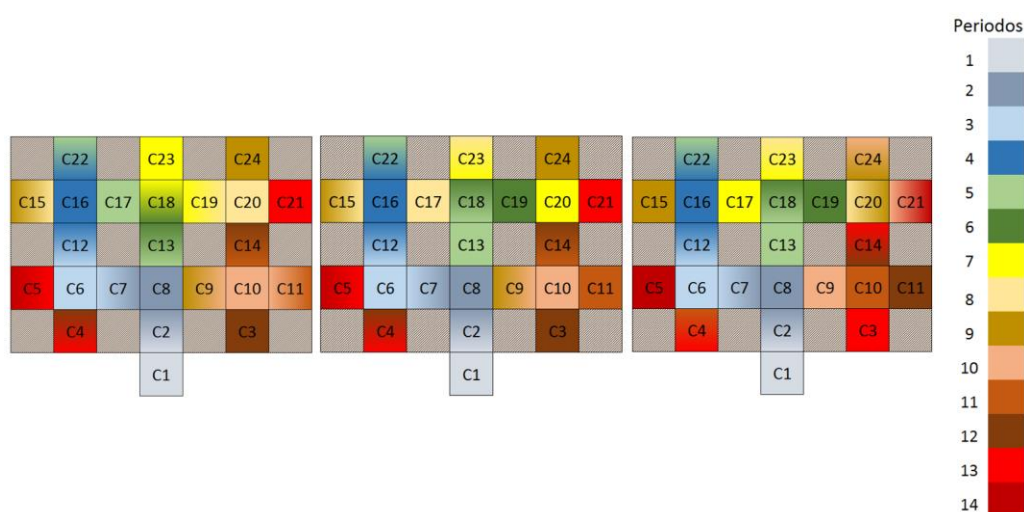


Figura 24: Secuencias de extracción para los casos base (izquierda), 2 (centro) y 3 (derecha), Room & Pillar, caso de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior, es posible concluir que la incorporación de los modelos de dilución en el proceso de planificación produce una perturbación en la secuencia de extracción y en los planes de producción que, si bien se ve reflejada de manera marginal en el VAN, incluir estos modelos permite desarrollar estrategias de extracción en base a una mayor cantidad de información alimentando el proceso, lo que finalmente entrega un plan de producción más confiable y realista.

4.2 Bench & Fill

Se tiene una mina hipotética explotada por Bench & Fill, cuyo layout se muestra en la Figura 25. Esta mina posee cuatro niveles, cada uno con 8 caserones. El acceso a cada nivel se realiza a través de un drift central el cual divide cada nivel en un sector izquierdo y un sector derecho, cada uno con 4 caserones.

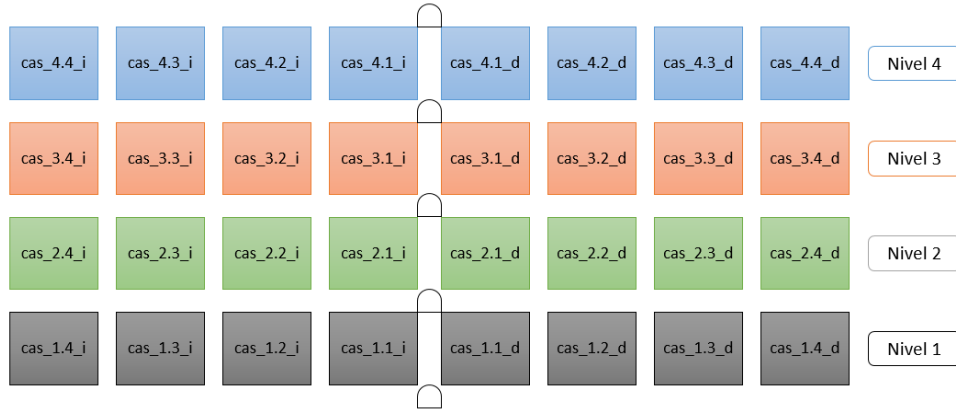


Figura 25: Layout mina Bench & Fill.

Fuente: Elaboración propia.

Para acceder a los caserones desde el drift central, se realiza el desarrollo de los túneles de acceso, desde el centro hacia los extremos, tal que los caserones quedan disponibles para realizar la explotación en retroceso. La Figura 26 muestra la secuencia de desarrollo, donde se observa el proceso de construcción de los drift de extracción en la parte superior de la figura, mientras que, en la parte inferior, se observan las actividades de banqueo y extracción del mineral.

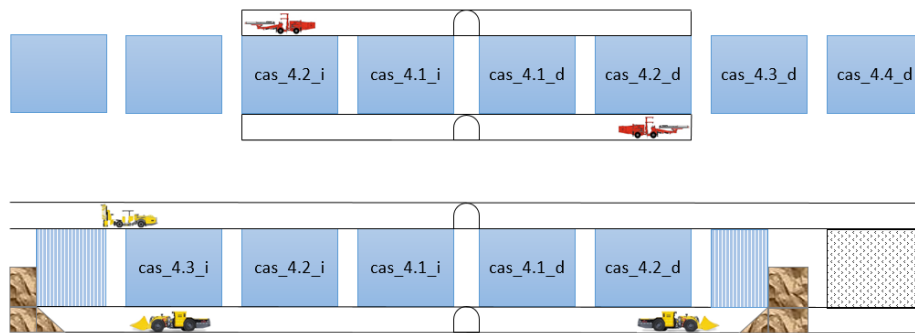


Figura 26: Secuencia de desarrollo y explotación.

Fuente: Elaboración propia.

Se busca encontrar la secuencia de explotación óptima para tres escenarios:

- Caso 1: planificación sin dilución.
- Caso 2: planificación incorporando dilución a través del modelo de Clark & Pakalnis, utilizando un ELOS máximo admisible.

- Caso 3: planificación incorporando dilución a través del modelo de Pakalnis & Vongpaisal, utilizando las ecuaciones descritas en el capítulo de Antecedentes.

Para ello, se realiza la valorización de cada caserón utilizando los parámetros económicos mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros económicos para Bench & Fill.

Parámetros Económicos	
Costo mina [US\$/t]	54
Costo procesamiento [US\$/t]	31
Precio Cu [US\$/lb]	2
Costo venta [US\$/lb]	0.3
Recuperación Cu	0.85
Precio Au [US\$/oz.t]	1,281
Costo venta [US\$/oz.t]	4.87
Recuperación Au	0.93
Costo de relleno [US\$/t]	4.36
Tasa de descuento (mensual)	10%

Para la realización de este caso, se considera una única actividad de extracción de caserones, la cual contempla todo el ciclo productivo del caserón, el cual se estimó en 5 días por caserón. Para cada uno de los escenarios estudiados, se fija un ritmo de explotación de 20 [tpd] o 600 [tpm] en un horizonte de planificación de 47 meses. Además, se considera que la roca es regular, con un RMR = 50.

4.2.1 Actividades y precedencias

En base al layout, mostrado en la Figura 25, y el ciclo productivo mostrado en la Figura 26, se requiere modelar el método Bench & Fill en base a actividades y restricciones de precedencia.

Con el fin de modelar el método lo más cercano posible al caso de estudio, se consideran las actividades relacionadas con los desarrollos horizontales necesarios para acceder al mineral y comenzar la extracción, las actividades necesarias para realizar la producción y el relleno. Para mantener una cierta simplicidad en el modelo, se dejan fuera las actividades relacionadas con la ventilación de la mina y los desarrollos verticales, los cuales no interfieren de manera significativa con las actividades de producción.

Las actividades consideradas dentro del modelo son las siguientes:

- La actividad llamada *rampa* representa todos los desarrollos horizontales relacionados con el avance de la rampa de acceso a la mina.
- La actividad llamada *desarrollo* considera los desarrollos horizontales como los drift de acceso por nivel y los drift de extracción, derecho e izquierdo.
- La actividad llamada *extracción* considera el banqueo de los caserones, la tronadura y el carguío del mineral en la frente de explotación.

- La actividad llamada *relleno* es considerada como una tasa o ritmo de movimiento de material estéril hacia un caserón vacío.

La Tabla 13 muestra una parte del archivo de actividades que es leído por el *software*. Este archivo viene organizado en columnas, donde cada una representa un determinado atributo de las actividades. Por ejemplo, la columna *id* contiene el nombre de la actividad. La columna *metros des* contiene la información de los metros totales a ser desarrollados, en caso de ser actividades de desarrollo horizontal de drift o de la rampa. La columna *ton* representa las toneladas de mineral presente en el caserón y la columna *ton relleno* contiene el tonelaje necesario para rellenar el caserón. Además, se encuentran las columnas de atributos económicos, como ingresos y costos y, finalmente, se tiene la columna con el atributo *max rate*, el cual contiene la información de avance de la actividad en un mes.

Tabla 13: Actividades para Bench & Fill, caso de prueba.

id	metros des	ton	ton relleno	ley au	ingreso au	costo relleno	costo mina	costo planta	costo total	max rate
cas_4-4_i	0	875.84	0	5.73	1,846,596.76	0	47,295.12	27,150.90	74,446.03	6
r_cas_4-4_i	0	0	875.84	0	0	3,818.64	0	0	0	0.69
RAMPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99,999,999
ACCN01	25	0	0	0	0	0	0	0	27,500	2.4

Para comprender el orden en que se desarrollan estas actividades en relación al layout de la mina se puede observar la Figura 27. Aquí se puede ver que el desarrollo de la rampa debe ser realizado antes de los desarrollos de drift de acceso y de extracción, y su avance es a un frente. Del mismo modo, el desarrollo del drift de acceso al nivel también se realiza a un frente de avance, y debe ser terminado para continuar con el desarrollo de los drift de extracción. El avance del desarrollo de los drift de extracción puede ser realizado a dos frentes de avance simultáneo. Debe mencionarse que el modelo ha sido construido de manera que, mientras se desarrollan los drift de acceso de un nivel, los avances de la rampa continúan, es decir, el frente de avance de la rampa es independiente del resto de los desarrollos horizontales.

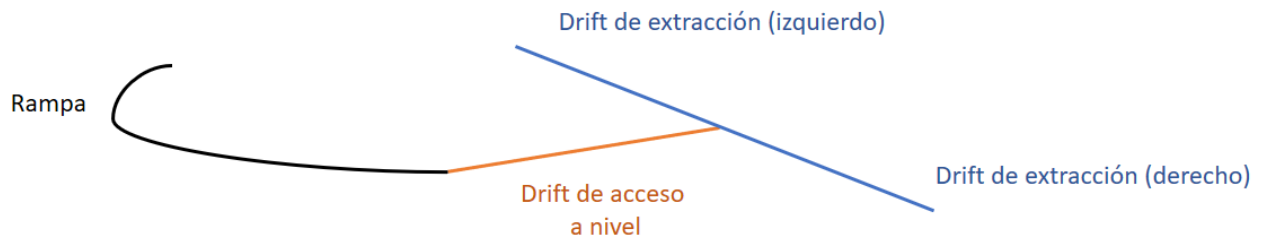


Figura 27: Vista isométrica de un nivel *j* de Bench & Fill, caso de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior, y que la extracción por nivel se realiza en retroceso, es decir, desde izquierda a derecha para el sector izquierdo y desde derecha a izquierda para el sector derecho, y entre niveles desde abajo hacia arriba, las restricciones de precedencia quedan determinadas según la Figura 28.

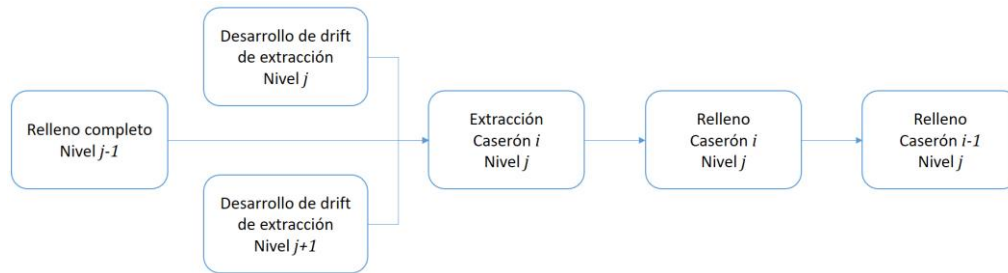


Figura 28: Precedencias para Bench & Fill, caso de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Para comenzar la extracción de un nivel j , el nivel $j-1$ debe haber sido rellenado por completo, y deben haber sido desarrollados los drift de extracción tanto del nivel j como del nivel $j+1$. Una vez realizadas estas actividades, se inicia el banqueo y la extracción del mineral de los caserones en retroceso. Cuando acaba la extracción del caserón i , comienza el relleno de este. Una vez finalizado el relleno del caserón i , puede iniciarse la extracción del caserón $i-1$. Finalmente, una vez rellenado el nivel j , se pueden iniciar las tareas de extracción en el nivel $j+1$.

Estas restricciones de precedencia son ingresadas a UDESS a través de un archivo de texto, el cual contiene las actividades separadas en columnas de *predecesor* y *sucesor*. Para ejemplificar lo anterior, la Tabla 14 muestra algunas de las precedencias consideradas en el problema para el lado izquierdo del layout de la Figura 25, de la forma en que son leídas por el *software*.

Tabla 14: Precedencias para Bench & Fill, caso de prueba.

predecesor	sucesor	group
cas_1-4_i	r_cas_1-4_i	-1
r_cas_1-4_i	cas_1-3_i	-1
cas_1-3_i	r_cas_1-3_i	-1
r_cas_1-3_i	cas_1-2_i	-1
cas_1-2_i	r_cas_1-2_i	-1
r_cas_1-2_i	cas_1-1_i	-1
cas_1-1_i	r_cas_1-1_i	-1
r_cas_1-1_i	cas_2-4_i	-1

La actividad *cas_1-4_i* identifica la actividad de extracción del nivel 1 en el caserón 4, en el lado izquierdo del layout. La actividad *r_cas_1-4_i* identifica la actividad de relleno del mismo caserón. Como se puede ver en la última fila de la tabla, para comenzar la actividad de extracción en el segundo nivel, la actividad de relleno del último caserón del nivel anterior debe ser completada.

Una vez identificadas y valorizadas las actividades, y planteadas las restricciones de precedencia, se ingresan estos archivos a UDESS para resolver el problema de optimización. Para este caso de prueba, se tiene un total de 80 actividades, 93 restricciones de precedencia y una restricción de recursos (tasa de extracción de 600 [tpm]).

4.2.2 Plan de producción (Enfoque tradicional)

Del mismo modo que ya se realizó para el caso de Room & Pillar, para el enfoque tradicional se realiza la planificación sólo de las reservas, sin incluir ningún tipo de parámetro que afecte el proceso.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input (ver Anexo), para los cuales se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 29.

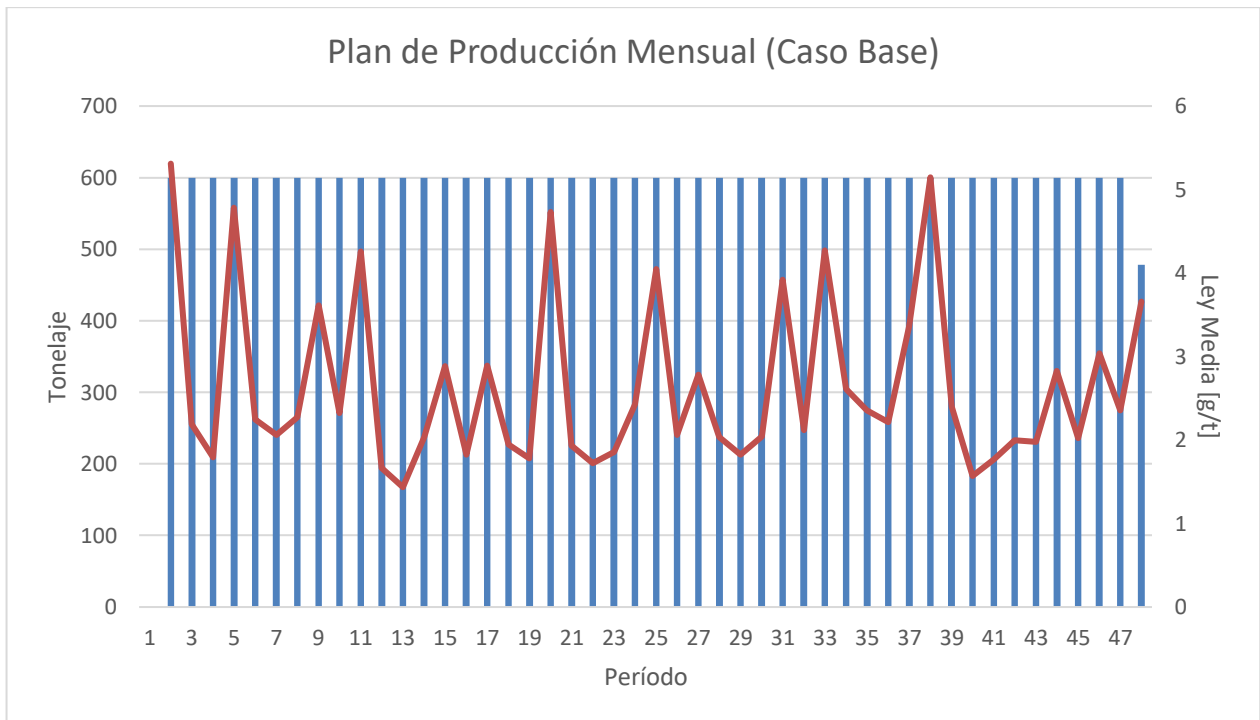


Figura 29: Plan de producción por período, caso base.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 56.61 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 422 segundos. La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso base se muestra de manera detallada en la Tabla 30 en la sección Anexos.

4.2.3 Plan de producción considerando dilución (Enfoque integrado)

Del mismo modo que ya se realizó para el caso de Room & Pillar, para el enfoque integrado se realiza la planificación considerando la dilución a través de un máximo ELOS admisible. En este caso, se tiene un ELOS de 0.6 [m] para cada caserón, lo que resulta en una dilución del 0.23%.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input (ver Anexo), para los cuales se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 30.

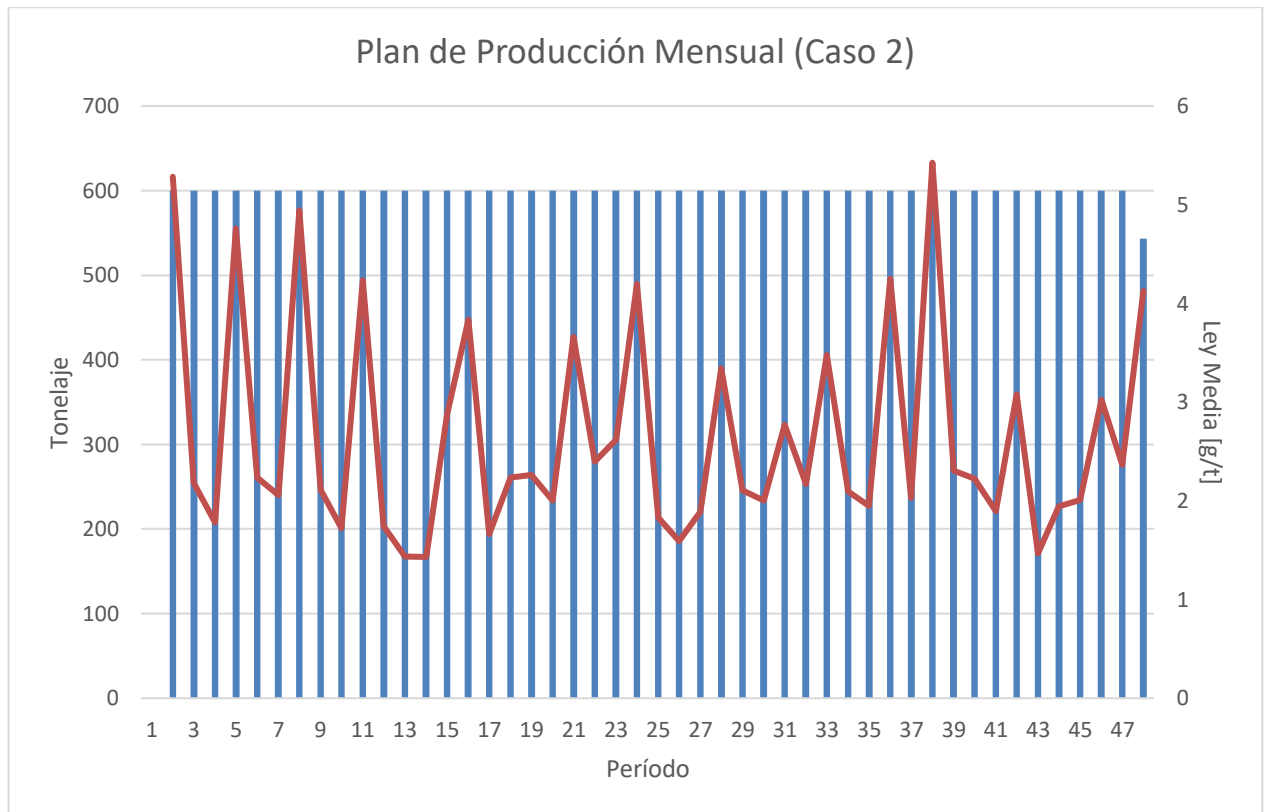


Figura 30: Plan de producción por período, caso 2.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 56.60 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 137 segundos. La Tabla 28 muestra el resumen de estos resultados. La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso 2 se muestra de manera detallada en la Tabla 31 en la sección Anexos.

4.2.4 Plan de producción considerando razón de exposición (Enfoque integrado)

En este caso, se considera la dilución a través del modelo lineal de Pakalnis (Pakalnis, Vongpaisal, 1993) a través la estimación de la dilución en base las ecuaciones mostradas en la sección de Antecedentes, la cual resulta en una dilución promedio de 3%.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan el archivo de actividades para este caso, ya que se utilizan las mismas precedencias que en el caso anterior (ver Anexo). Luego, se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 31.

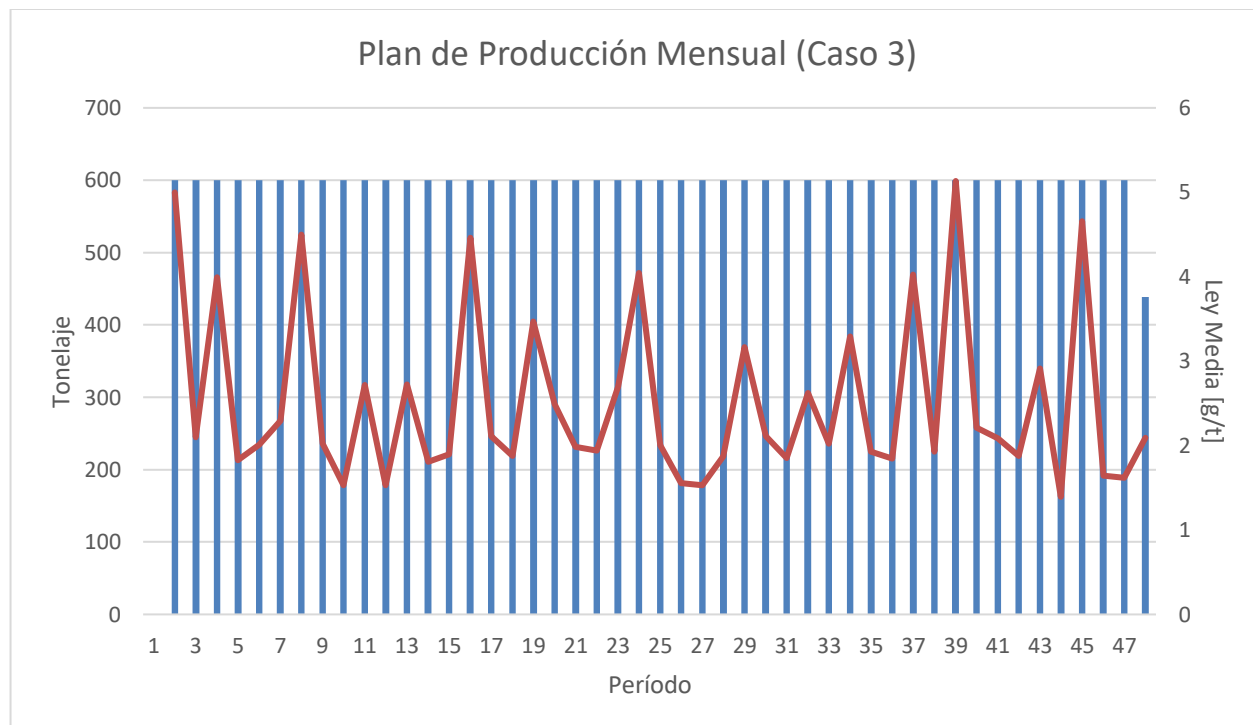


Figura 31: Plan de producción por período, caso 3.

La secuencia de extracción y plan de producción obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 54.54 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 400 segundos. La Carta Gantt de la secuencia de extracción para el caso 3 se muestra de manera detallada en la Tabla 32 en la sección Anexos.

4.2.5 Análisis caso de prueba Bench & Fill

Tabla 15: Tonelaje total para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tonelaje Total	28,078.53	28,143.04	28,038,71

Como se observa en la Tabla 15, el tonelaje movido en los casos 2 y 3 difiere del tonelaje movido en el caso base. Al comparar los tonelajes se puede notar que en el caso 2 hay un aumento del tonelaje, lo que se debe a la incorporación del modelo de dilución, donde el ELOS máximo admisible considerado es de 0.6 [m], lo que resulta en una dilución de 0.23%, es decir, un aumento en el tonelaje aproximadamente de 65 [t]. Esto significa que la sobre excavación de las paredes tendrá, en promedio, 0.6 [m] de profundidad, factor que proviene netamente del diseño de los caserones (ver ecuaciones en capítulo de Antecedentes). Por otro lado, y contrario a lo que ocurre en el caso de prueba de Room & Pillar, el tonelaje total del caso 3 es menor incluso al tonelaje del caso base, lo que se debe exclusivamente a que, en el plan generado por UDESS el caserón *cas_4.1_i* no es extraído, por lo que se tiene un déficit de 893.83 [t] correspondientes al tonelaje de dicho caserón. La razón por la cual este caserón no fue extraído es el horizonte de planificación, es decir, no fue posible agendar su extracción dentro de los 48 meses considerados y se requiere de uno o dos períodos adicionales para incluir la extracción del caserón faltante.

El modelo de dilución utilizado en el caso 3 no depende sólo del diseño de los caserones, sino que también depende de las cualidades geotécnicas de la roca a través del parámetro RMR, y del ritmo de producción a través de la razón de exposición de la pared colgante. La dilución obtenida para este modelo es, en promedio, de 3%, lo que resulta en un aumento de 842.35 [t].

Debido a la incorporación de la dilución, se puede observar que entre el caso base y el caso 2 la ley media se mantiene prácticamente sin variación, esto debido a la que la dilución incorporada en el caso 2 es menor al 1%. Por otro lado, la variación de la ley entre el caso base y el caso 3 es, a lo más, de 0.24 [g/t]. Estas variaciones se pueden observar con más detalle en la Tabla 16 y en la Figura 32.

Como ya se mencionó en el análisis del caso de prueba anterior, estas diferencias en el tonelaje y ley por caserón radican en los modelos de dilución utilizados. El modelo de Clark & Pakalnis (caso 2) es un modelo teórico, que considera aspectos sólo de diseño como el ancho del caserón, por lo que se generan menos distorsiones en los resultados. Por otro lado, el modelo de Pakalnis & Vongpaisal (caso 3) es un modelo empírico y, dado que fue alimentado con datos sólo de una mina, está sujeto a mayores márgenes de error al ser aplicado en minas con distintas condiciones geotécnicas y operacionales. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el caso 2 poseen mayor confiabilidad.

Tabla 16: Variación de la ley por caserón para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.

	cas 4-4 i	cas 4-3 i	cas 4-2 i	cas 4-1 i	cas 4-4 d	cas 4-3 d	cas 4-2 d	cas 4-1 d
Caso 1	5.73	4.15	4.48	6.63	7.97	6.70	4.47	7.32
Caso 2	5.72	4.14	4.47	6.61	7.95	6.68	4.46	7.30
Caso 3	5.56	4.03	4.35	6.44	7.74	6.50	4.34	7.10

	cas 3-4 i	cas 3-3 i	cas 3-2 i	cas 3-1 i	cas 3-4 d	cas 3-3 d	cas 3-2 d	cas 3-1 d
Caso 1	7.85	6.21	4.86	7.49	4.09	5.14	5.77	6.19
Caso 2	7.83	6.19	4.85	7.47	4.08	5.13	5.75	6.18
Caso 3	7.62	6.02	4.72	7.27	3.97	4.99	5.59	6.01

	cas 2-4 i	cas 2-3 i	cas 2-2 i	cas 2-1 i	cas 2-4 d	cas 2-3 d	cas 2-2 d	cas 2-1 d
Caso 1	4.22	5.68	6.81	5.31	4.22	6.34	4.67	5.90
Caso 2	4.21	5.67	6.79	5.29	4.21	6.33	4.66	5.89
Caso 3	4.09	5.51	6.61	5.15	4.09	6.15	4.53	5.73

	cas 1-4 i	cas 1-3 i	cas 1-2 i	cas 1-1 i	cas 1-4 d	cas 1-3 d	cas 1-2 d	cas 1-1 d
Caso 1	7.85	6.09	7.27	4.21	5.08	7.02	5.36	6.18
Caso 2	7.83	6.08	7.25	4.20	5.07	7.01	5.35	6.16
Caso 3	7.61	5.92	7.05	4.09	4.93	6.81	5.20	6.00

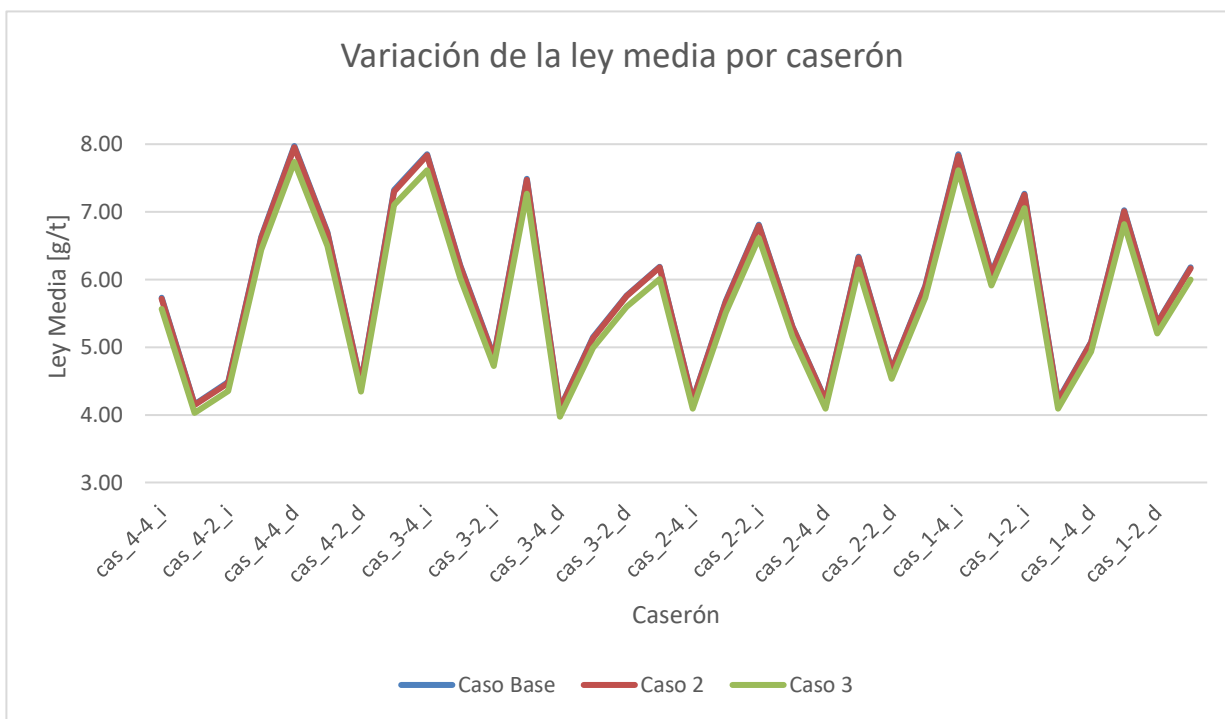


Figura 32: Variación de la ley media por caserón para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.

La Tabla 17 muestra el VAN obtenido para cada uno de los casos analizados. Se puede observar que el VAN del caso 2 disminuye menos del 1% con respecto al caso base, mientras que el VAN del caso 3 disminuye cerca de un 4% con respecto al caso base. Si bien existen diferencias entre cada uno de los casos, nuevamente se puede decir que son diferencias marginales, por lo que realizar un análisis comparativo entre los VAN obtenidos no es concluyente con respecto a si existe o no una ventaja incluir modelos de dilución dentro del proceso de planificación.

Tabla 17: Comparación de resultados para casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
VAN [MUSD]	56,607,083.2	56,602,088.9	54,538,829.4
Diferencia Porcentual Casos 1 y 2	0.009%		
Diferencia Porcentual Casos 1 y 3	3.7%		

UDESS entrega una secuencia óptima maximizando una función objetivo, en este caso, el VAN, en cada uno de los tres casos estudiados, entonces cualquier otra secuencia utilizada para generar los planes de los casos 2 y 3 debería reportar un VAN menor al entregado por el *software*. Para verificar esto y al igual que en el caso anterior, se realiza una validación cruzada de los planes, es decir, se utiliza la secuencia del caso base para generar el plan de producción y el correspondiente VAN de los casos 2 y 3. La Tabla 18 muestra los resultados de esta validación, donde queda en evidencia que, tanto la secuencia como el VAN reportados por el *software* son efectivamente un óptimo para cada uno de los casos y que, al reemplazar la secuencia del caso base en los casos 2 y 3, se obtienen un VAN aún más golpeado por la inclusión del modelo de dilución dentro del proceso. Por lo tanto, los cambios en la secuencia de extracción en los casos 2 y 3 se explican por el cambio en las condiciones de tonelaje y ley introducido por los modelos de dilución.

Tabla 18: Validación para casos 2 y 3, Bench & Fill.

	VAN UDESS	VAN Validación	Dif. porcentual con respecto a la validación	Dif. porcentual con respecto al caso base
Caso Base	56,607,083.2	-	-	-
Caso 2	56,602,088.9	37,010,207.8	34.6%	34.6%
Caso 3	54,538,829.4	33,472,549.1	38.6%	40.9%

La Tabla 19 muestra el orden de las primeras 8 actividades realizadas para los casos base, 2 y 3. Aquí puede apreciarse que la secuencia de extracción de los casos 2 y 3 cambian en las actividades marcadas en rojo, con respecto al caso base. En la sección Anexos se puede encontrar una versión completa de esta tabla, además de las secuencias de extracción por período. Por otro lado, en la Figura 33 se puede observar la secuencia óptima de extracción obtenida por UDESS para los tres casos estudiados, donde se puede notar diferencias, aproximadamente, desde el tercer período.

Tabla 19: Comparación de la secuencia de extracción para los casos 1, 2 y 3, Bench & Fill.

Secuencia de Extracción								
Caso Base	cas_1-4_i	r_cas_1-4_i	cas_1-4_d	r_cas_1-4_d	cas_1-3_i	cas_1-3_d	r_cas_1-3_d	r_cas_1-3_i
Caso 2	cas_1-4_i	r_cas_1-4_i	cas_1-4_d	cas_1-3_i	r_cas_1-3_i	r_cas_1-4_d	cas_1-2_i	cas_1-3_d
Caso 3	cas_1-4_i	r_cas_1-4_i	cas_1-4_d	cas_1-3_i	r_cas_1-3_i	cas_1-2_i	r_cas_1-4_d	r_cas_1-2_i

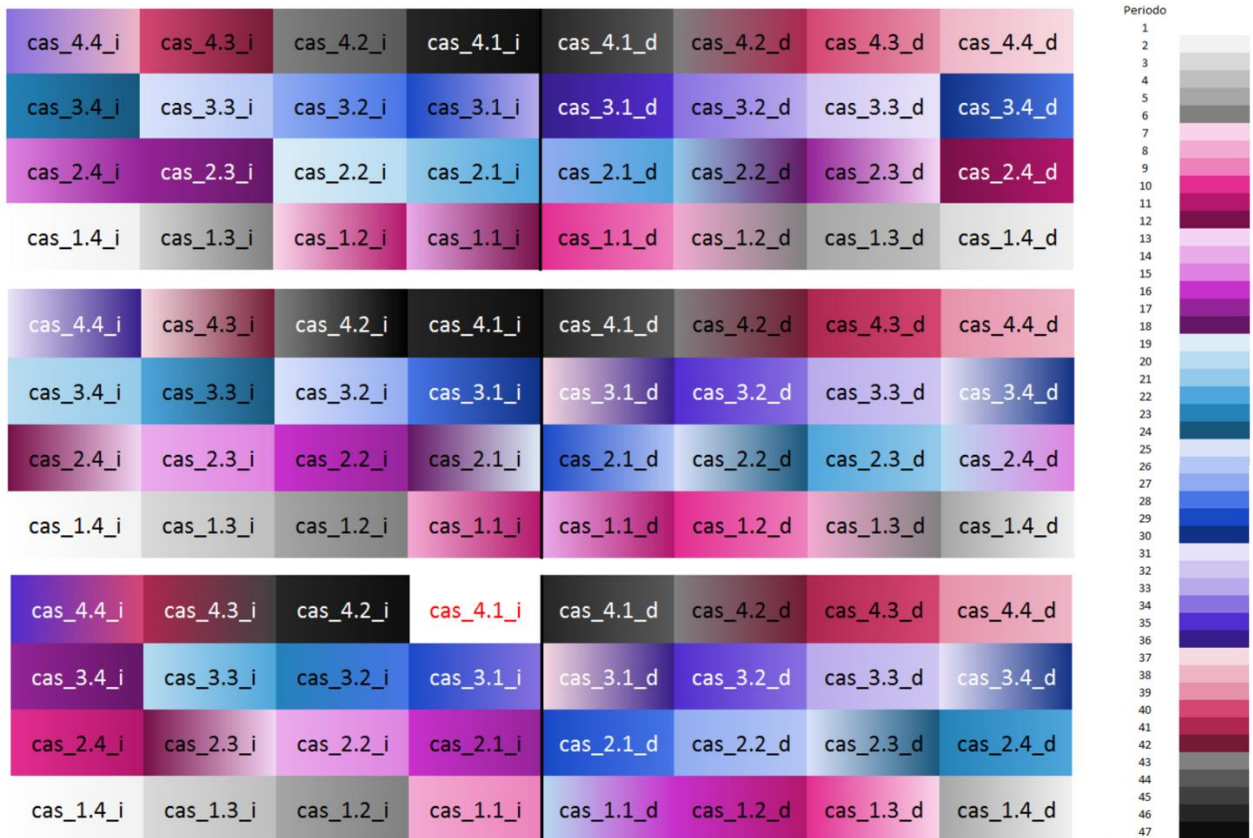


Figura 33: Secuencia de extracción caso base (arriba), caso 2 (al medio) y caso 3 (abajo), Bench & Fill, caso de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior, es posible concluir que incluir los modelos de dilución en el proceso de planificación producen una perturbación en la secuencia de extracción y en los planes de producción que, si bien se ve reflejada de manera marginal en el VAN, incluir estos modelos permite desarrollar estrategias de extracción en base a una mayor cantidad de información alimentando el proceso, lo que finalmente entrega un plan de producción más confiable y realista.

5 Caso de estudio

A continuación, se realiza la descripción y desarrollo del caso de estudio. En primer lugar, se entregan los antecedentes más relevantes, como la descripción general del proyecto y la descripción del método de explotación. Posteriormente, se describe la preparación de los datos para la aplicación de la metodología y el uso del *software* y, finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos para los tres escenarios estudiados.

5.1 Antecedentes generales

Los datos utilizados en el desarrollo del caso de estudio fueron facilitados por una empresa de ingeniería, la cual no será mencionada en este trabajo por acuerdos de confidencialidad. Los datos corresponden al estudio de prefactibilidad desarrollado por la empresa en el año 2014, el cual abarca desde la geostatística hasta el análisis económico final. El proyecto, desde ahora “Proyecto B”, corresponde a una mina de oro y plata como productos principales, cuyo método de explotación corresponde a un Bench & Fill.

El proyecto está situado en un país de América del Sur, a 75 kilómetros de una importante ciudad. El área es una región montañosa, con elevaciones que varían desde los 600 msnm hasta los 2,200 msnm. El clima es tropical, con temperaturas que varían entre los 17°C y los 26°C, con precipitaciones durante todo el año, sin embargo, estas características climáticas no afectan el desarrollo de una posible operación.

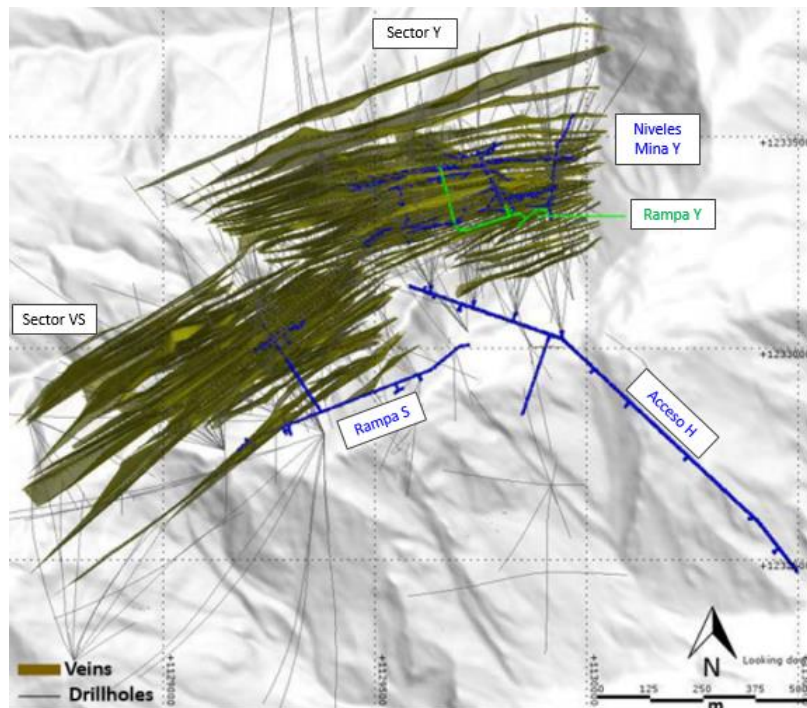


Figura 34: Vista en planta del depósito epitermal.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

La zona mineralizada corresponde a un depósito epitermal de oro, plata y metales base, donde se distinguen dos sectores principales: el sector Y, parcialmente desarrollado, y el sector VS, sin ningún desarrollo. Una vista en planta del depósito puede observarse en la Figura 34. La mineralización corresponde a un sistema de vetas y brechas, alojados en un intrusivo de composición intermedia.

El modelo de bloques corresponde a un modelo regular, cada bloque de dimensiones 5 metros de alto, 5 metros de largo y 1 metro de ancho, el que posteriormente fue rebloqueado, para una mejor estimación del volumen total de mineralización, a bloques de 2.5 metros de alto, 2.5 metros de largo y 0.25 metros de ancho. Los bloques sobre la topografía se dejaron fuera de la estimación. La Figura 35 muestra las curvas tonelaje-ley para los recursos estimados, medidos e inferidos, tanto para el sector Y como para el sector VS.

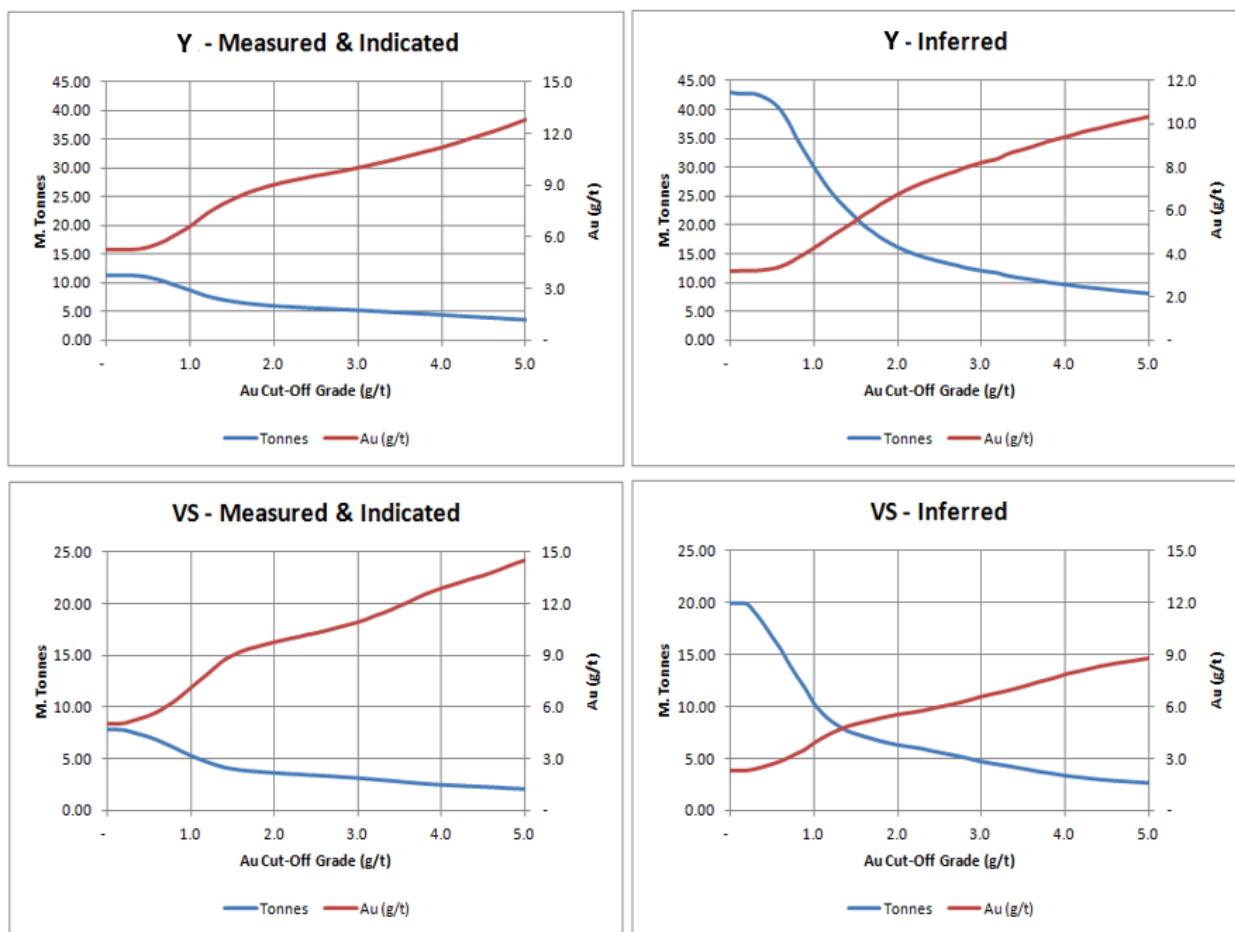


Figura 35: Curva tonelaje-ley para sectores Y y VS.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

Los recursos minerales estimados, para el sector VS y el sector Y, son de 25 [Mt], con una ley media de 9.1 [g/t] de oro equivalente².

Como ya se mencionó, el método de explotación seleccionado es Bench & Fill, y el layout propuesto considera los siguientes criterios y restricciones:

- La mina estará dividida en tres zonas de explotación: *Mina Y este*, *Mina Y oeste* y la *Mina VS*. Cada una de estas zonas tiene su propia rampa de acceso, la cual estará ubicada de acuerdo a la distribución y morfología del yacimiento.
- Se tendrán dos niveles de transporte principal:
 - En el nivel 1,487 m, cuyo acceso se realiza a través del portal ubicado a 1,525 m.
 - En el nivel 1,175 m, cuyo acceso se realiza a través del portal ubicado a 1,155 m.
- El mineral extraído será enviado a los niveles de transporte principal a través de piques de traspaso desde los distintos niveles de producción.
- Los niveles de producción estarán separados cada 12 metros verticalmente, los cuales tendrán un drift principal para conectar los cruzados que permiten el acceso a los drifts de extracción, tal como se observa en la Figura 36.
- Los desarrollos presentes serán considerados en el diseño final.

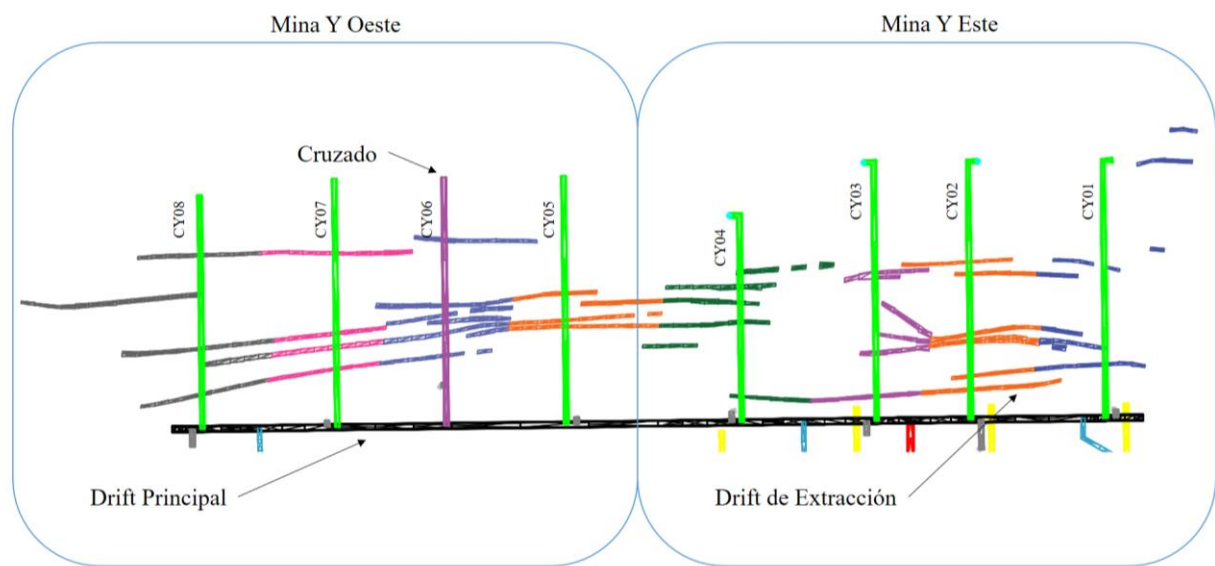


Figura 36: Vista en planta nivel 1,175 m, *Mina Y*.

Fuente: Archivos CAD, Proyecto B.

Es necesario mencionar que, desde el nivel 1,187 m hasta el nivel 1,475 m, existe un drift principal que conecta dos niveles consecutivos a través de galerías llamadas pivotes, como se muestra en la Figura 37. Desde el nivel 1,487 m hasta el nivel 1,691 m, se tiene un drift principal por cada nivel, es decir, no existen pivotes a partir del nivel 1,487 m. Además, los niveles 1,175 m y 1,487 m son

² AuEq = Au + Ag/50

los únicos niveles cuyo drift principal conecta las minas este y oeste, ya que corresponde al nivel de transporte principal.

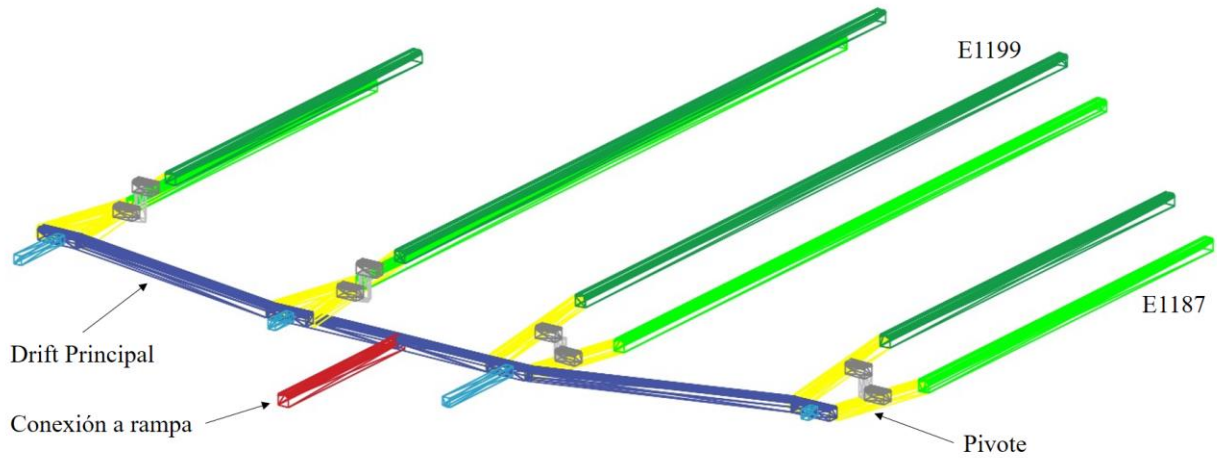


Figura 37: Vista isométrica niveles 1187 y 1199, Mina Y Este.

Fuente: Archivos CAD, Proyecto B.

La Figura 38 muestra el layout final de la mina según los criterios descritos anteriormente. Los recuadros negros muestran y delimitan, de izquierda a derecha, los tres sectores de trabajo: *Mina VS*, *Mina Y Oeste* y *Mina Y Este*. Las zonas en amarillo y rojo, por debajo del nivel 1,155 m, no son consideradas dentro de la planificación.

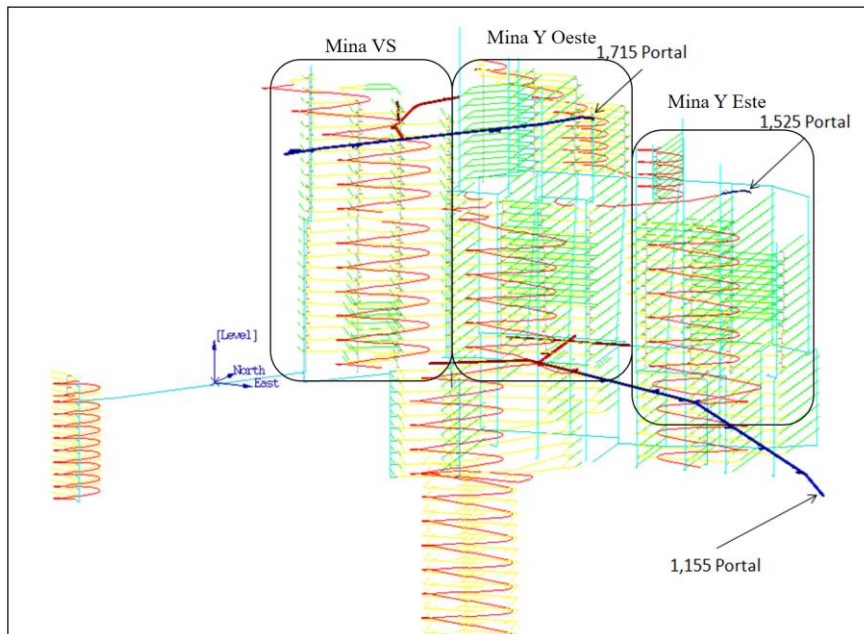


Figura 38: Vista isométrica, layout final.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

5.1.1 Alcances

Considerando que en el sector VS no existen desarrollos y, que en el mismo plan de producción de la Figura 39 se puede observar que el tonelaje de mineral producido proviene principalmente del sector Y, se decidió realizar el estudio solo para la mina en el sector Y, desde ahora *Mina Y*. Los sectores proyectados por debajo de la elevación 1,175 m tampoco serán considerados.

Además, se consideran 2 períodos de inversión y 18 períodos de producción, cada uno de 14 meses, lo que equivalen a 21 años de producción. Se decidió trabajar con períodos de 12 meses para hablar indistintamente de años y períodos.

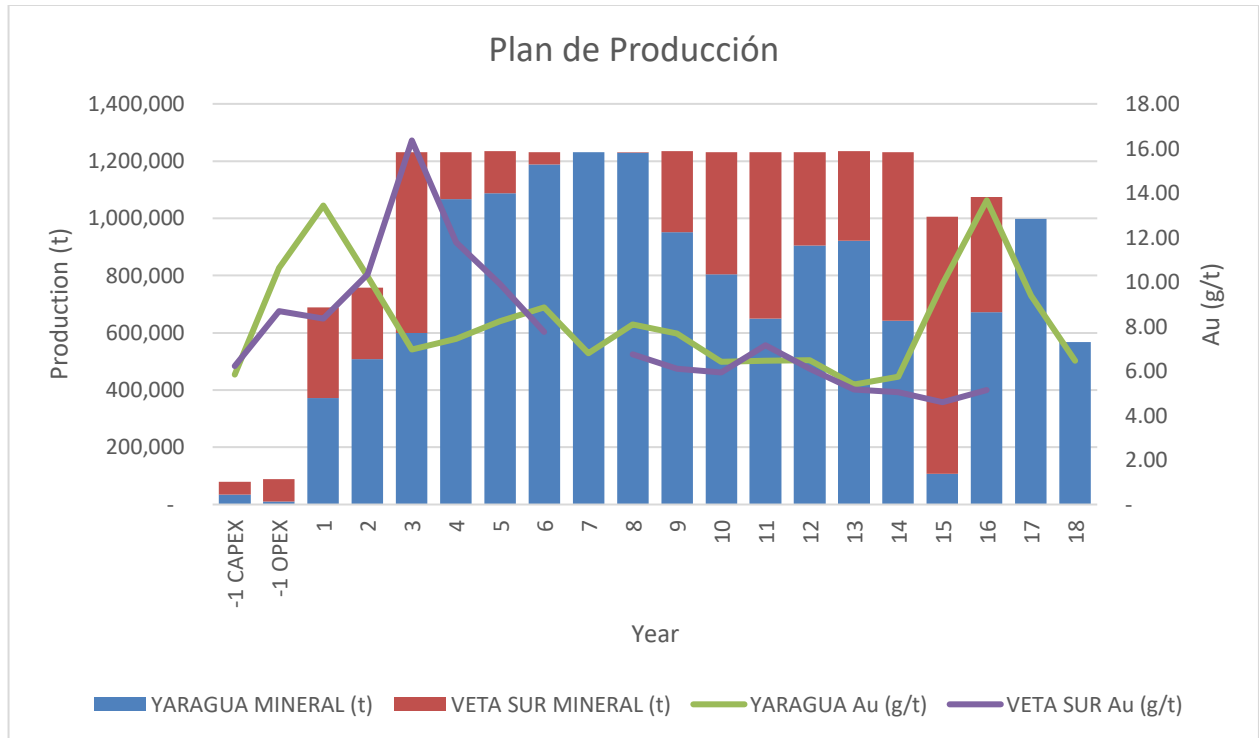


Figura 39: Plan de producción Proyecto B desarrollado por empresa de ingeniería.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

Este trabajo se centra en el proceso de planificación en el largo plazo de la *Mina Y*, por lo que todo lo relativo a la geoestadística, selección del método de explotación, geomecánica, selección de flota y planificación a nivel operacional, se consideran como datos provenientes del estudio de prefactibilidad.

5.1.2 Método de Explotación

Dadas las condiciones geotécnicas presentes en el yacimiento, la explotación a través del método Bench & Fill, con banqueo de hasta 24 metros de altura, es aplicable de manera segura y efectiva. Para seleccionar la altura de banqueo, se compararon tres alternativas, las cuales se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Alternativas de altura de banqueo.

Altura [m]	Parámetros		Recuperación (Recursos > 3.1 [g/t])	
	ELOS [m]	Ley de corte [g/t]	Tonelaje	Au Oz
4	0.2	2.9	42%	59%
12	0.3	3.1	46%	62%
24	0.5	3.5	46%	62%

La opción escogida en el estudio fue la de 12 metros, con un ELOS permisible de 0.3 metros desde ambos lados del caserón, y una ley de corte de 3.1 g/t.

El diseño de los caserones se realizó siguiendo el sentido de las vetas, por lo que cada unidad tiene alto y largo fijo, mientras que el ancho es variable ya que depende del ancho de la estructura. La Figura 40 muestra una vista en planta con el diseño de las unidades de explotación y una vista isométrica de las mismas, incluyendo sus medidas de ancho (a), largo (10 metros) y alto (12 metros).

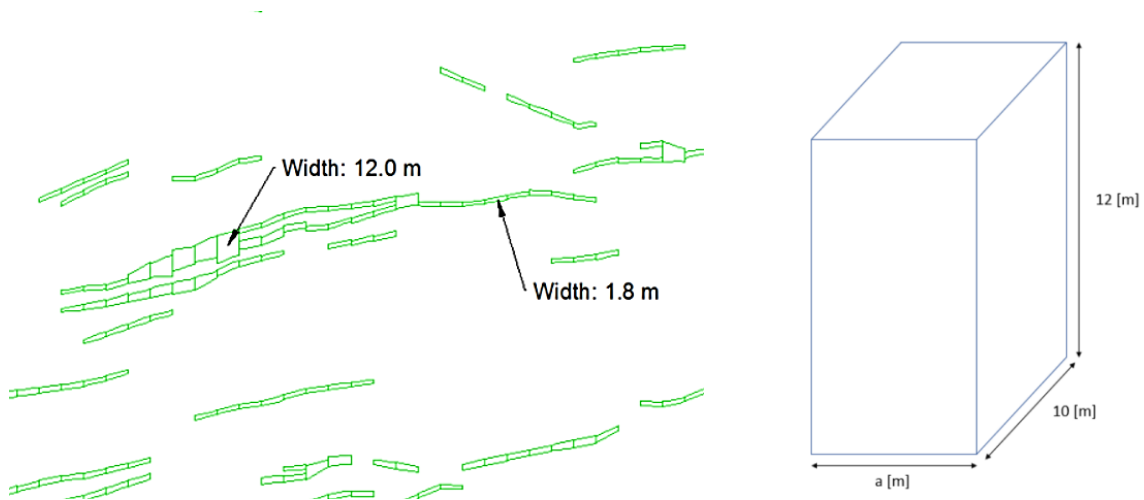


Figura 40: Vista en planta de diseño de caserones (izquierda) y diseño de caserones viste isométrica (derecha).

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

Como ya se mencionó anteriormente, la mina está separada en dos sectores de explotación, los cuales llamaremos *Mina Y Este* y *Mina Y Oeste*. El método consiste en rampas espirales que permiten el acceso a los distintos niveles de la mina, donde se considera el tránsito en ambos sentidos, tanto para camiones llenos como vacíos, perforadoras y equipos auxiliares.

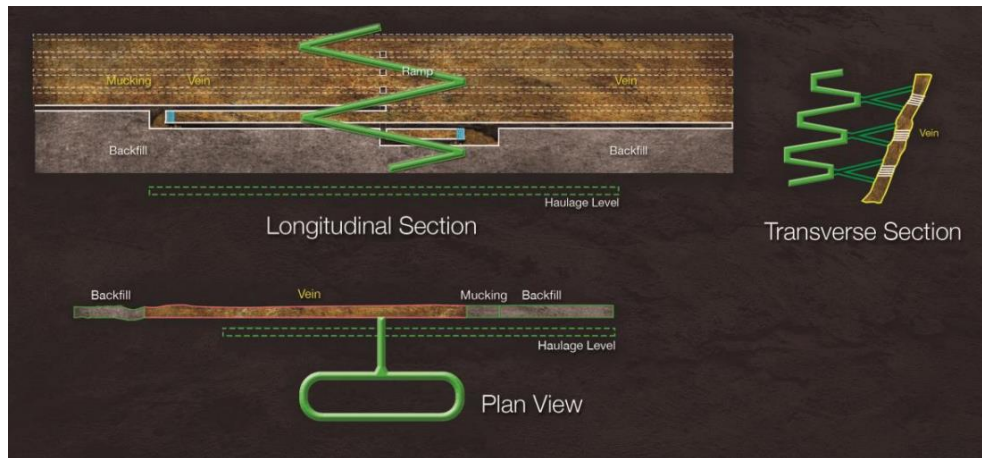


Figura 41: Bench & Fill - Mining method.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

En términos generales, y como se observa en la Figura 41 en la vista longitudinal, la secuencia de extracción es de forma ascendente, es decir, se realiza en la medida que los niveles inferiores van siendo rellenados y se ocupan como piso para la extracción de los niveles superiores. En la misma Figura 41 en la vista en planta, se puede observar que en los drifts de extracción esta se realiza en retroceso. La vista transversal muestra el esquema de disposición de las vetas con respecto a la rampa y al drift principal, conectados por los pivotes.

Para los niveles desde el nivel 1,175 m hasta el nivel 1,475 m, el diseño considera que, desde la rampa, salen drifts de acceso cada 24 metros verticales, los cuales permiten acceder a dos niveles separados por 12 metros verticales a través de drifts inclinados llamados pivotes, tal como se muestra en la Figura 37.

Para los niveles comprendidos entre la elevación 1,487 m hasta la elevación 1,691 m, se tienen rampas independientes para los sectores este y oeste, sin embargo, la disposición de las vetas se va haciendo más angosta, por lo que en esta zona el número de cruzados presentes es menor y, por ende, hay menor número de caserones.

La secuencia de explotación consiste en 4 etapas, las cuales son descritas a continuación, suponiendo la extracción de un nivel i .

1. Desarrollo de cruzados: Para comenzar con los desarrollos de los drifts de extracción, los desarrollos de los cruzados correspondientes deben estar completos. Una vez finalizado el cruzado, se puede comenzar con el desarrollo de los drifts de extracción. Esto debe ocurrir tanto en el nivel i como en el nivel $i+1$, ya que es desde el nivel inmediatamente superior que se realiza el banqueo del caserón.
2. Desarrollo de drifts de extracción: Como se muestra en la Figura 42, los drifts de extracción son perforados de manera frontal siguiendo el sentido de las vetas, por lo que, durante el desarrollo de esta actividad, se extraerá material estéril (gris) y mineral (café), el cual debe ser considerado en la planificación. Además, se debe considerar que, en el nivel superior, se debe

realizar la construcción del drift para realizar el banqueo. Ambos drifts deben estar terminados para poder realizar la extracción en retroceso, es decir, desde el fondo del drift hacia el cruzado.

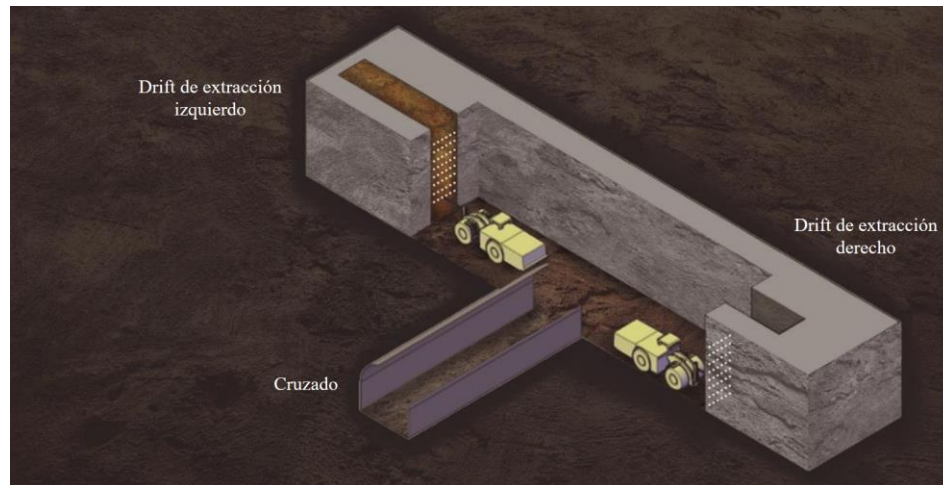


Figura 42: Bench & Fill - Split blasting.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

3. Extracción: La extracción del mineral a través del drift se realiza en retroceso. Por el drift en el nivel $i+1$ se realiza el banqueo, mientras que por el drift paralelo ubicado en el nivel i , se realiza el carguío y transporte del mineral quebrado, como se observa en la Figura 43.

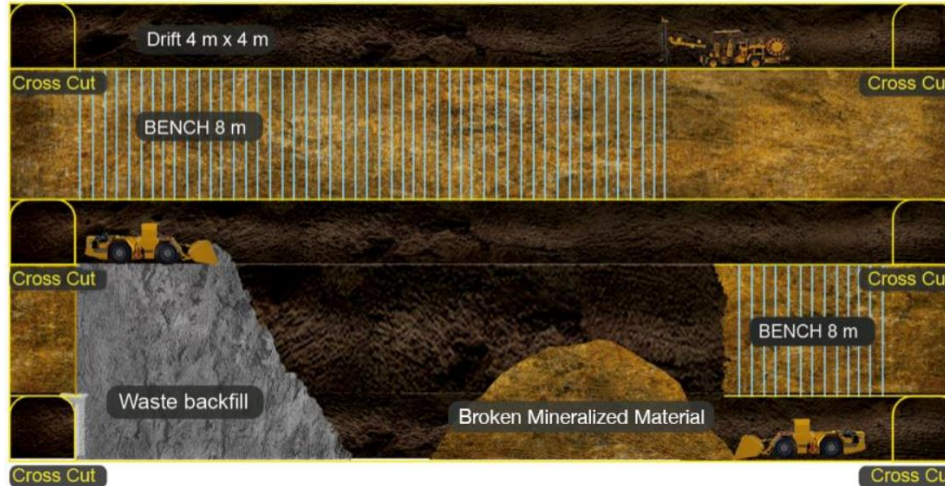


Figura 43: Bench & Fill - Sequence.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

4. Relleno: En la medida que la extracción en retroceso avanza, se procede a realizar el relleno de los caserones que ya han sido extraídos. En el caso de la *Mina Y*, el relleno es realizado con material estéril, como se observa en la Figura 43.

5.1.3 Consideraciones operacionales y económicas

A continuación, se exponen las consideraciones operacionales y económicas para el desarrollo del presente trabajo, las cuales fueron consultados en el informe de prefactibilidad del Proyecto B.

- Se asume que las condiciones geotécnicas tanto de la roca caja como de las zonas mineralizadas son las adecuadas para la aplicación del método de explotación Bench & Fill.
- El diseño contempla pilares de al menos 2 metros de ancho, ubicados entre caserones paralelos.
- La secuencia global de extracción es ascendente, desde el nivel 1,175 m y 1,487 m de manera simultánea.
- La tasa de avance considerada para los desarrollos horizontales es de 75 [m/mes].
- La tasa de avance considerada para las actividades de banqueo es de 90 [m/mes].
- La tasa de movimiento de material estéril para el relleno es de 2,000 [tpd]. Se considera la densidad del material estéril como 2.8 [t/m³].
- La capacidad de extracción de la *Mina Y* es de 2,000 [tpd]. De manera aproximada, se tiene que la producción proveniente de los caserones es de 1,100 [tpd] y la producción proveniente de los desarrollos horizontales es de 900 [tpd].
- El ELOS máximo admisible es de 0.3 metros.
- El RMR promedio de los sectores mineralizados (vetas) es de 55.
- Dado que todos los caserones tienen las mismas dimensiones de alto y largo, el radio hidráulico de la pared colgante es 2.73 [m].
- La cantidad de caserones que se pueden extraer de manera simultánea son 6 (3 en la parte inferior de la mina y 3 en la parte superior).
- La densidad de la roca mineralizada es de 3.1 [t/m³].

La Tabla 21 muestra los parámetros económicos considerados en este trabajo.

Tabla 21: Parámetros económicos para Proyecto B.

Parámetros Económicos	
Precio Au ³ [US\$/t oz]	1,190.4
Costo Venta Au [US\$/t oz]	42.62
Recuperación Au	0.93
Costo Mina [US\$/t]	54
Costo Planta [US\$/t]	34.84
Costos de G&A [US\$/t]	16.32
Costo de desarrollos horizontales [US\$/m]	1,100.0
Costo relleno [US\$/t]	4.36
Tasa de descuento mensual	10%

³ Dato de mayo de 2016. Fuente: Diario Financiero (www.df.cl)

5.2 Modelamiento de Bench & Fill

En base a la descripción realizada del método de explotación y, considerando también el modelamiento realizado en los casos de prueba, se realiza el modelamiento del caso de estudio, correspondiente a una mina explotada por Bench & Fill. La Tabla 22 muestra un resumen del modelo, como el número total de actividades y restricciones.

Tabla 22: Resumen modelamiento caso de estudio.

Resumen Modelo Bench & Fill	
Número de actividades	4,105
Número de restricciones de precedencia	9,341
Ritmo de extracción [tpd]	2,000
Capacidad de relleno [tpd]	2,000

A continuación, se describe brevemente la construcción de las actividades y precedencias consideradas en el modelo.

5.2.1 Actividades

Para la *Mina Y* se identificaron distintas actividades, las cuales fueron clasificadas en tres tipos:

1. Desarrollos horizontales, tales como rampas, drifts principales, drifts de extracción, pivotes y cruzados. Los atributos considerados para valorizar estas actividades son los metros totales, el costo por metro de desarrollo y la tasa de avance mensual considerada.
2. Actividades de extracción, donde se considera todo el ciclo desde la perforación del banqueo hasta el carguío del mineral en el drift. Los atributos considerados para valorizar estas actividades son el ingreso percibido por cada caserón, el costo total por caserón y la tasa de avance mensual.
3. Actividades de relleno, donde se considera todo el ciclo del movimiento de estéril, desde su carguío hasta el depósito en los caserones ya vacíos. Los atributos considerados para valorizar estas actividades son el del relleno por tonelada, las toneladas de material necesarias para rellenar el caserón y la tasa de avance mensual.

Considerando lo anterior, se construye el archivo de actividades que será leído por UDESS. La Tabla 23 muestra el encabezado del archivo de actividades y sus cinco primeras filas.

Tabla 23: Archivo de actividades, Mina Y.

id actividad	metros desarrollos	ton extraccion	ton desarrollos	ton total	ton relleno	ley eq	ingreso	costo	max_rate
TUNELHE1175	1,139.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	999,999.00
E1175DRIFTY0	164.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	181,283.30	0.46
RAMPA1175E	312.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	343,855.25	0.48
RAMPA1175O1	342.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	377,023.46	0.44
RAMPA1175O2	98.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108,418.87	1.52

La *Mina Y* posee cerca de 280 mil caserones, lo que implicaría tener 280 mil actividades sólo de extracción, lo que implica tener tiempos de resolución muy grandes. Con el fin de reducir el número de actividades totales y obtener soluciones en tiempos razonables, se realiza un empaquetamiento o agrupamiento de caserones. El criterio utilizado es empaquetar caserones según su ubicación, es decir, de acuerdo al nivel y al cruzado correspondiente. A modo de ejemplo, consideremos el primer nivel de la mina, la elevación 1,175 m. En la Figura 44, se puede ver la parte este de la mina con los cruzados del 1 al 4. Considerando los caserones que se extraen desde el cruzado 2 (en naranja) podemos agruparlos en una sola unidad de extracción compuesta por 45 caserones llamada E1175CY02CAS. Este procedimiento de empaquetamiento se realizó para los 43 niveles de la *Mina Y*, para cada uno de sus cruzados.

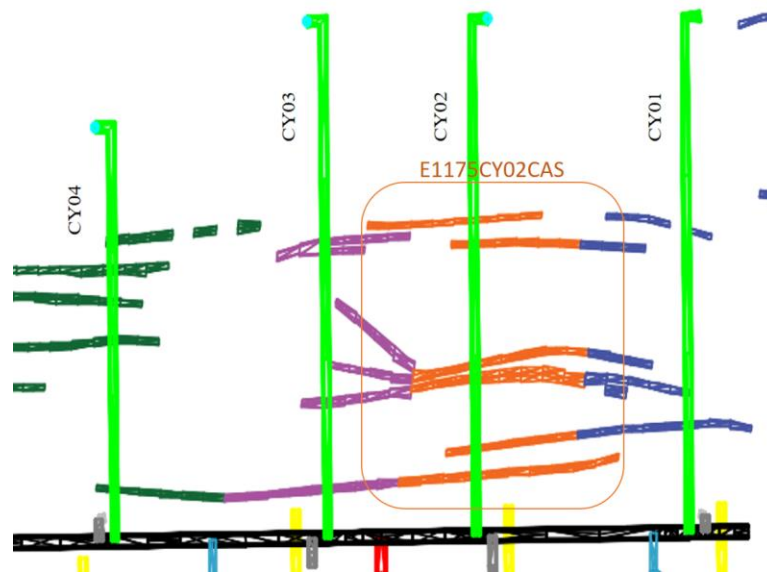


Figura 44: Empaquetamiento de caserones, elevación 1,175 m este.

Fuente: Informe técnico Proyecto B.

5.2.2 Precedencias

El orden en que se realizan las actividades determina las restricciones de precedencia. En términos simples, como lo muestra la Figura 45, primero se deben realizar las actividades de desarrollo horizontal, que incluyen los accesos y drifts de banqueo y extracción. Posteriormente, se realiza la actividad de extracción de los caserones, que incluye las operaciones de perforación, tronadura y movimiento de material, y finalmente, la actividad de relleno, necesaria para la extracción de niveles superiores.

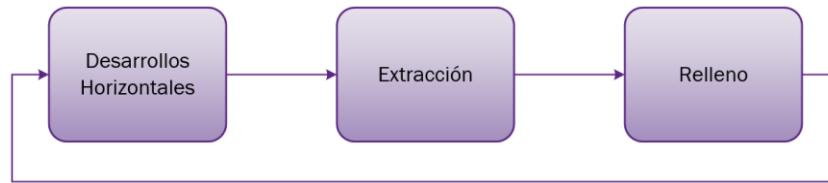


Figura 45: Actividades.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las actividades y a la descripción del método de explotación, se tienen cinco tipos de restricciones de precedencia, las cuales fueron agrupadas según sus características, como lo muestra la Figura 46.

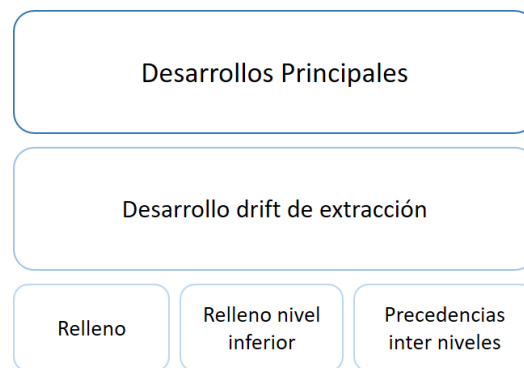


Figura 46: Clasificación de precedencias *Mina Y*.

Fuente: Elaboración propia.

Las precedencias de desarrollos principales determinan el orden de los desarrollos de rampas, drift principales, cruzados y pivotes dentro de un mismo nivel, así como también inter niveles.

Las precedencias de desarrollo de drift de extracción determinan en qué momento pueden ser desarrollados los drift de extracción. En este caso, no se puede comenzar el desarrollo de un drift sin que el cruzado correspondiente esté completamente terminado.

Las precedencias interniveles plantean que, para extraer un caserón (o paquete) debe estar construido tanto el drift del nivel correspondiente como el drift en el nivel superior (que es desde donde se realiza el banqueo).

Las precedencias de relleno de nivel inferior plantean que, para la extracción de un caserón, ubicado en un cierto nivel y en un cruzado j , el caserón ubicado exactamente en el nivel inferior, en el cruzado j , debe estar completamente relleno.

Finalmente, las restricciones de relleno post extracción plantean que, para comenzar la actividad de relleno de un determinado caserón, este debe haber sido totalmente extraído.

5.3 Resultados

A continuación, se muestran los resultados del modelamiento de la planificación de largo plazo de la *Mina Y*, explotada por Bench & Fill, utilizando el *software* UDESS. Se realizan tres escenarios para un posterior análisis:

- Caso base, sin incluir dilución.
- Caso incluyendo dilución a través del modelo de Clark & Pakalnis.
- Caso incluyendo dilución a través del modelo de Pakalnis & Vongpaisal.

5.3.1 Plan de producción (Enfoque tradicional)

Para la realización del caso base se considera el enfoque tradicional de planificación, el cual considera la planificación sólo de las reservas, a un período de 20 años, sin incluir ningún tipo de parámetro que afecte el proceso.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input, para los cuales se obtiene el plan de producción mensual que se observa en la Figura 47, donde se puede distinguir entre el mineral proveniente de los desarrollos y el mineral extraído desde los caserones.

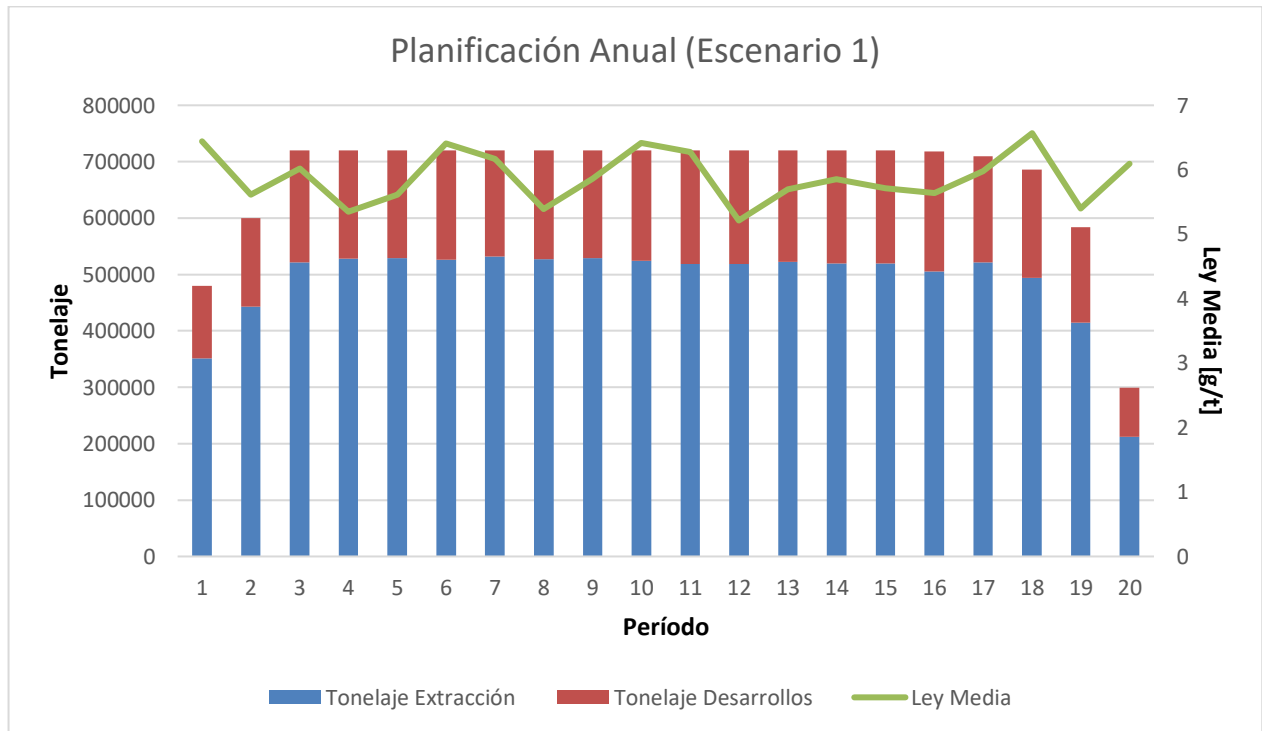


Figura 47: Plan de producción anual, caso 1.

La Figura 48 muestra la secuencia de extracción óptima encontrada por UDESS para veinte períodos. Este esquema corresponde a una vista en perfil de la mina, donde la fila superior indica el cruzado correspondiente (de 1 a 8) y la primera fila a la izquierda representa los niveles o la elevación de la mina. Así, por ejemplo, en la elevación 1,691 m sólo se encuentran caserones en

los cruzados 3 y 4, mientras que en la elevación 1,295 m existen caserones en todos los cruzados. Las zonas achuradas no contienen desarrollos. La escala de colores corresponde al período de extracción.

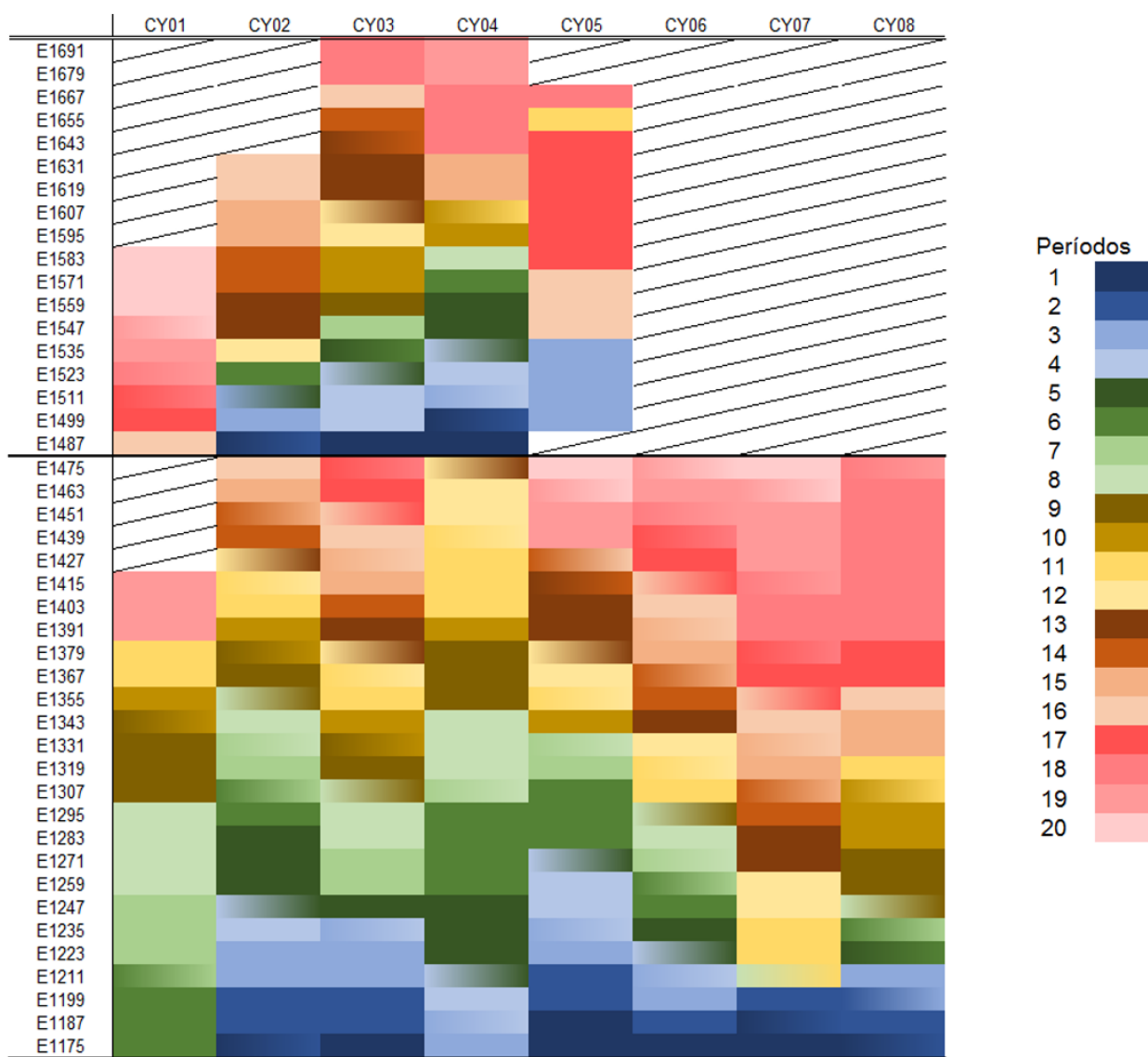


Figura 48: Secuencia de extracción *Mina Y*, escenario 1.

La secuencia de extracción y plan de producción óptimos obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 14,190 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 2,351 segundos.

5.3.2 Plan de producción considerando dilución a través de ELOS (Enfoque integrado)

Considerando una dilución del 0.1%, obtenida en base al modelo de dilución de Clark & Pakalnis, a través de un ELOS máximo permisible de 0.3 metros, definido en el diseño del proyecto, se realiza la planificación de las reservas a un período de 20 años.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input, para los cuales se obtiene el plan de producción anual que se observa en la Figura 49, donde se puede distinguir entre el mineral proveniente de los desarrollos y el mineral extraído desde los caserones.

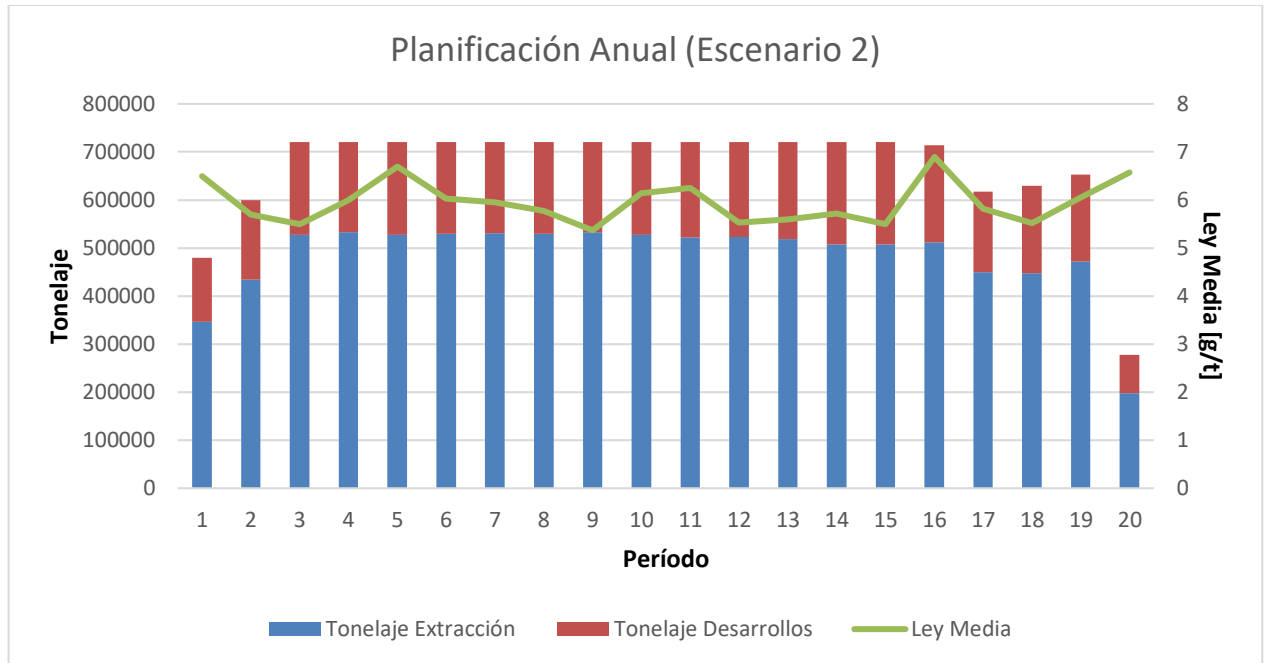


Figura 49: Plan de producción anual, caso 2.

Al igual que en el escenario anterior, la Figura 50 corresponde a una vista en perfil de la mina, donde se muestra la secuencia de extracción óptima encontrada por UDESS para veinte períodos. En los niveles superiores (desde 1,619 m hasta 1,691 m) se puede observar algunos caserones marcados con asterisco, para destacar que no fueron extraídos dentro del horizonte de planificación del modelo.

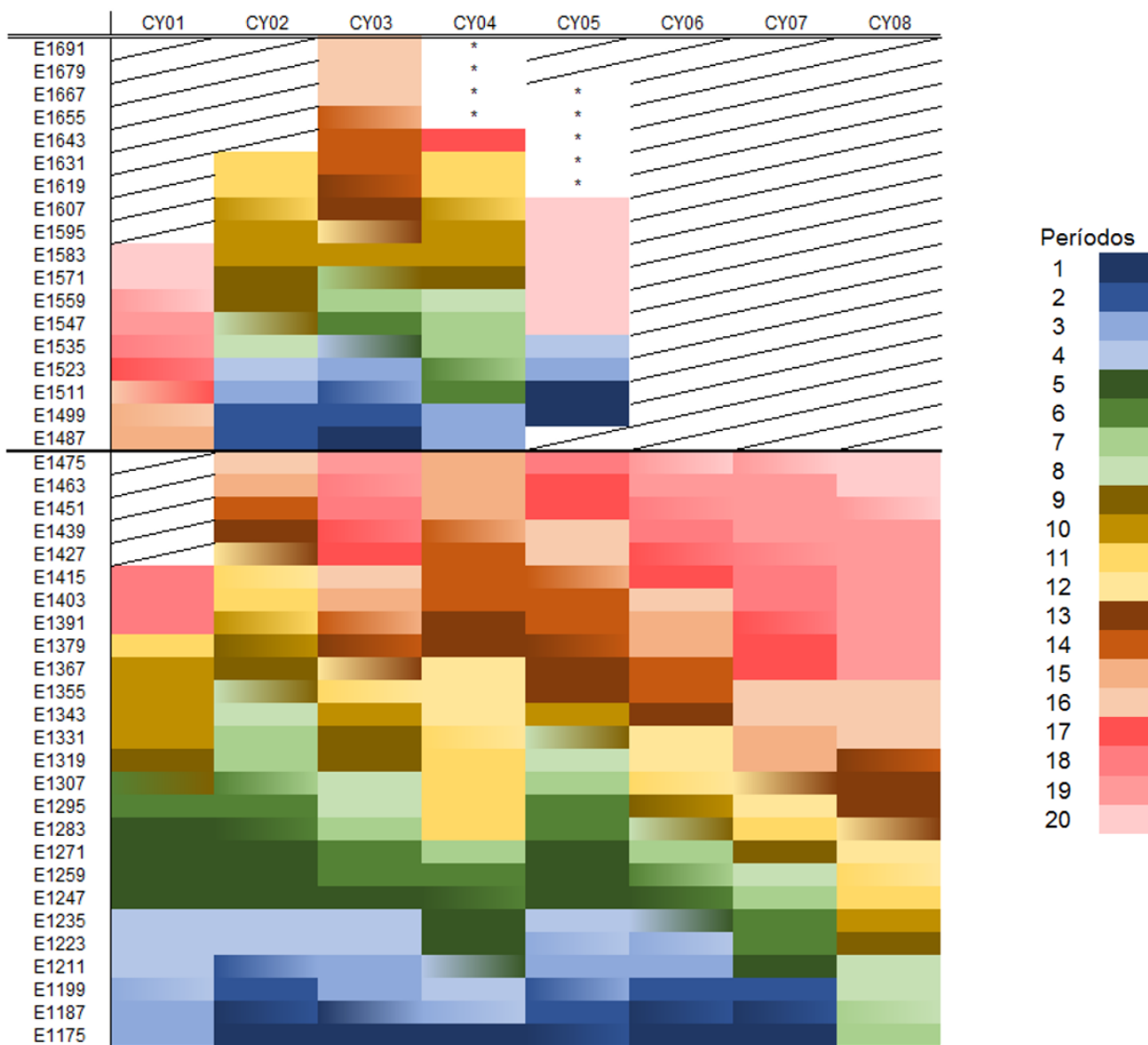


Figura 50: Secuencia de extracción *Mina Y*, escenario 2.

La secuencia de extracción y plan de producción óptimos obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 14,003 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 2,825 segundos.

5.3.3 Plan de producción considerando dilución a través de la razón de exposición (Enfoque integrado)

Considerando una dilución promedio del 3.13%, obtenida en base al modelo de dilución de Pakalnis & Vongpaisal, se realiza la planificación de las reservas a un período de 20 años, en base a las ecuaciones descritas en el capítulo de Antecedentes.

Tomando en cuenta los parámetros económicos y operacionales descritos anteriormente, se generan los archivos de actividades y precedencias que requiere UDESS como input, para los cuales se obtiene el plan de producción anual que se observa en la Figura 51, donde se puede distinguir entre el mineral proveniente de los desarrollos y el mineral extraído desde los caserones.

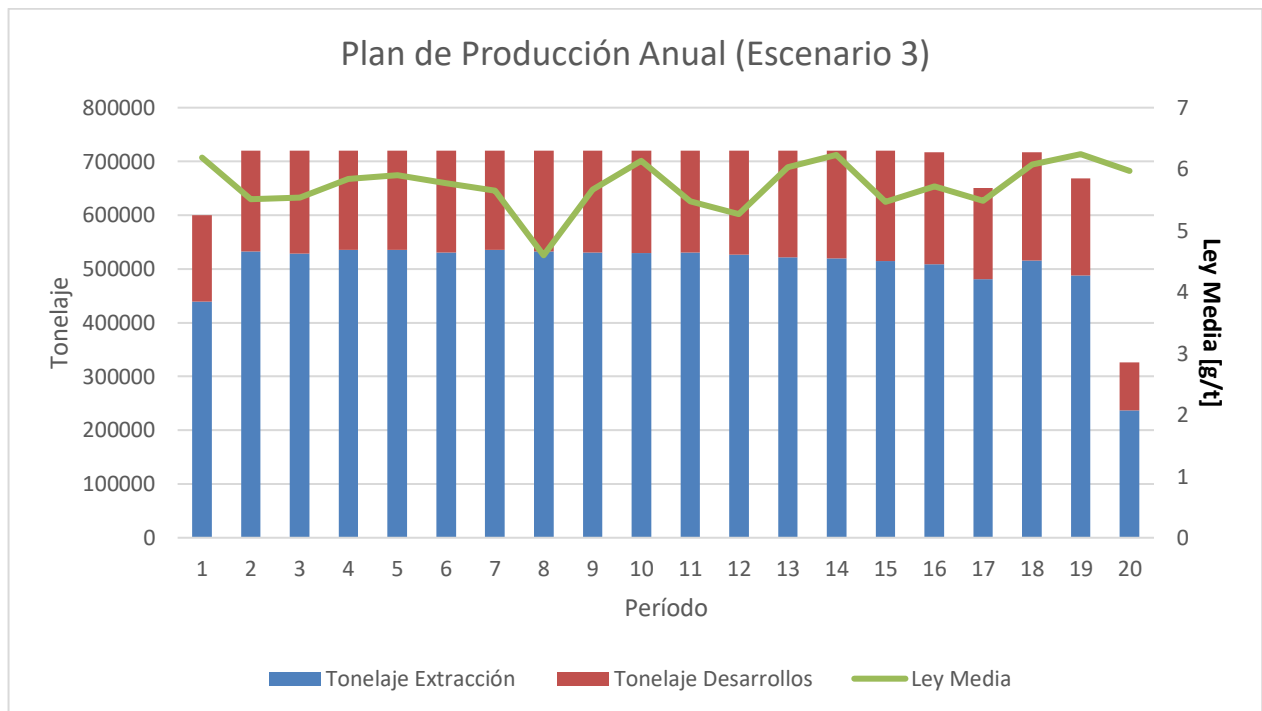


Figura 51: Plan de producción anual, escenario 3.

Al igual que en el escenario anterior, la Figura 52 muestra la secuencia de extracción óptima encontrada por UDESS para veinte períodos. A diferencia del escenario dos, los caserones son extraídos en su totalidad.

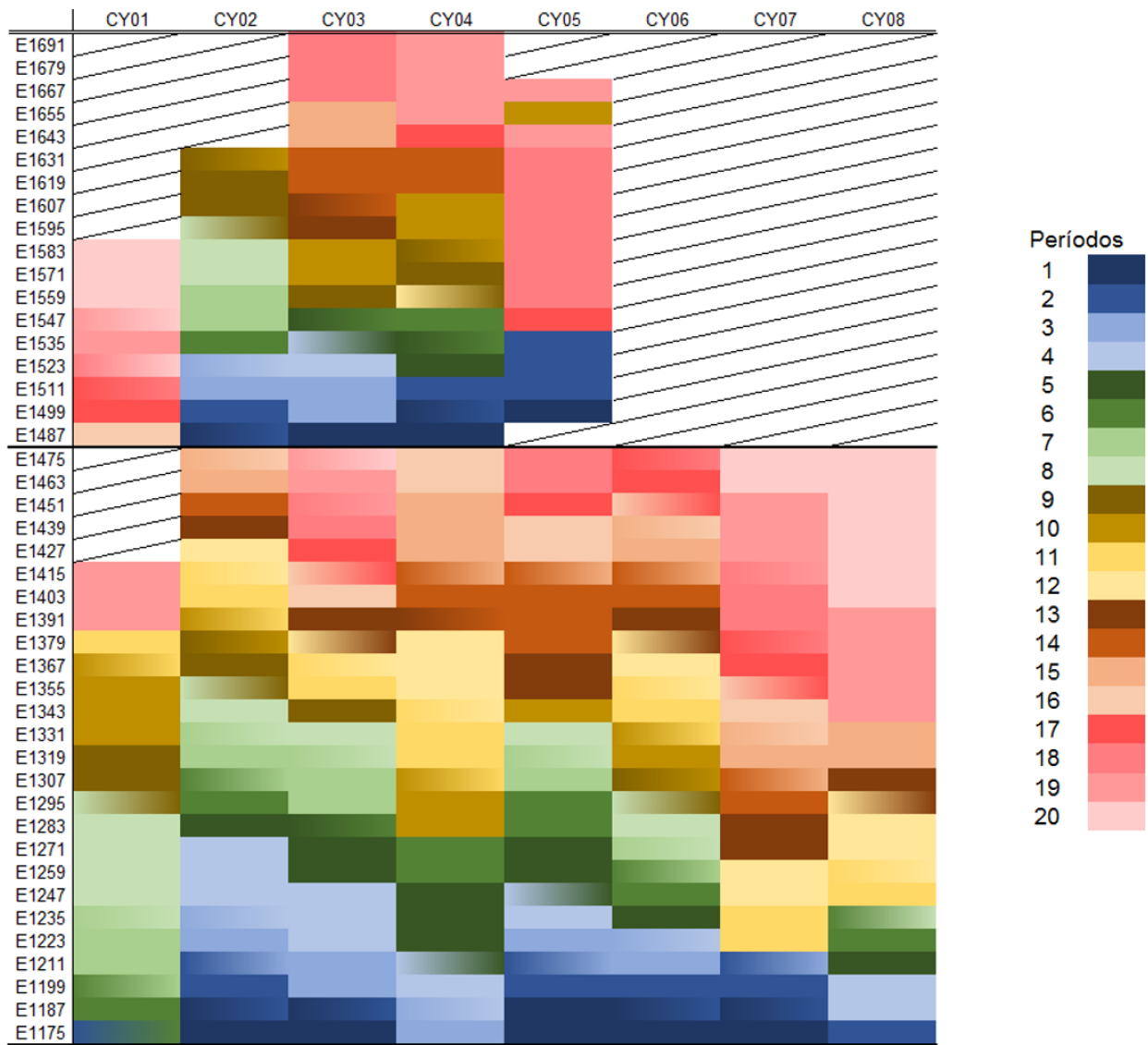


Figura 52: Secuencia de extracción *Mina Y*, escenario 3.

La secuencia de extracción y plan de producción óptimos obtenidos a través de UDESS reportan un VAN de 14,141 [MUSD], con un tiempo de ejecución de 3,834 segundos.

5.3.4 Análisis de resultados

Como se observa en el resumen de la Tabla 24, el tonelaje total en los escenarios 2 y 3 es mayor al total en el escenario 1, esto debido a que, al incluir los modelos de dilución, se está considerando más material por caserón. Sin embargo, el tonelaje total extraído en el escenario 2 disminuye con respecto al total extraído en los escenarios 1 y 3, debido a que en el escenario 2 no son extraídos todos los caserones, dejando un total de 8 caserones sin extraer. Al observar la secuencia de extracción en la Figura 50, se puede notar que estos caserones no alcanzan a salir en el tiempo de explotación. Al aumentar el número de períodos de explotación a la planificación, se podría asegurar la extracción de estas unidades, sin embargo, este escenario no sería comparable con el resto por el factor tiempo.

Tabla 24: Descripción para escenarios 1, 2 y 3, caso de estudio.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Dilución	-	0.1%	3.13%
Tonelaje total [Mton]	13.44	13.45	13.75
Tonelaje total extraído [Mton]	13.44	13.32	13.75
N° de paquetes de caserones extraídos	276	267	276

Para el escenario 2, se consideró un ELOS máximo admisible de 0.3 [m], lo que resulta en una dilución del 0.13%, es decir, un aumento de 17,824.7 [t] en total. Esto significa que la sobre excavación de las paredes tendrá, en promedio, 0.3 [m] de profundidad, factor que proviene netamente del diseño de los caserones (ver ecuaciones en capítulo de Antecedentes). Por otro lado, el modelo de dilución utilizado en el escenario 3 no depende sólo del diseño de los caserones, sino que también de las cualidades geotécnicas del macizo rocoso a través del parámetro RMR, y del ritmo de explotación a través de la razón de exposición de la pared colgante. La dilución obtenida para este modelo es, en promedio, de 3.13%, lo que resulta en un aumento de 310,346.4 [t].

Debido a la incorporación de la dilución, se puede observar que entre los escenarios 1 y 2, la ley prácticamente se mantiene invariable, esto debido a que la dilución es menor al 1%. Por otro lado, la variación de la ley entre el caso base y el caso 3 es a lo más 0.3 [g/t]. Estas variaciones se pueden observar en la Figura 53.

Del mismo modo que ocurre en los casos de prueba, las diferencias en tonelaje y ley por caserón radican en los modelos de dilución utilizados. El modelo de Clark & Pakalnis (escenario 2) es un modelo teórico, que considera aspectos sólo de diseño como el ancho del caserón, por lo que se generan menos distorsiones en los resultados. Por otro lado, el modelo de Pakalnis & Vongpaisal (escenario 3) es un modelo empírico y, dado que fue alimentado con datos sólo de una mina, está sujeto a mayores márgenes de error al ser aplicado en minas con distintas condiciones geotécnicas y operacionales. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el escenario poseen mayor confiabilidad.

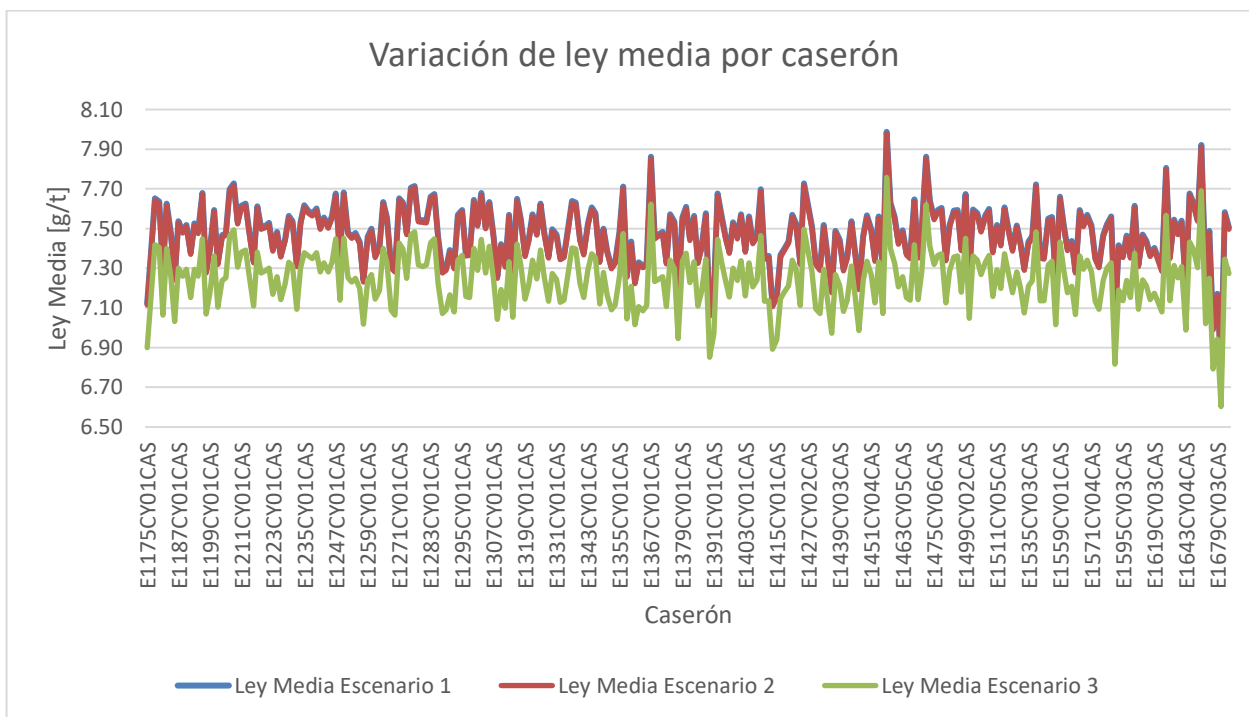


Figura 53: Variación de ley media por caserón, escenarios 1, 2 y 3.

Con respecto al valor del VAN, este disminuye al realizar un enfoque de planificación integrada con respecto al valor obtenido al realizar un enfoque tradicional. Como se muestra en la Tabla 25, la variación porcentual del VAN de los escenarios 2 y 3 con respecto al escenario 1 es menor al 1%, es decir, el VAN disminuye de manera marginal y, por ende, podría decirse que los planes son iguales. Por otro lado, en el escenario 2, como se vio anteriormente, se dejaron caserones sin explotar en los niveles superiores, lo que podría explicar que el VAN del escenario 2 sea menor al escenario 3, a pesar de tener menor dilución.

Tabla 25: Comparación de resultados de los tres enfoques, caso de estudio.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
VAN [MUSD]	14,190	14,003	14,141
Diferencia Porcentual escenarios 1 y 2		1.318%	
Diferencia Porcentual escenarios 1 y 3		0.345%	

UDESS entrega una secuencia óptima maximizando una función objetivo, en este caso, el VAN, en cada uno de los tres casos estudiados, entonces cualquier otra secuencia utilizada para generar los planes de los escenarios 2 y 3 debería reportar un VAN menor al entregado por el *software*. Para verificar esto, se realiza una validación cruzada de los planes, es decir, se utiliza la secuencia del caso base para generar el plan de producción y el correspondiente VAN de los casos 2 y 3. La Tabla 26 muestra los resultados de esta validación, donde queda en evidencia que, tanto la secuencia como el VAN reportados por el *software* son efectivamente un óptimo para cada uno de los casos y que, al reemplazar la secuencia del caso base en los casos 2 y 3, se obtienen un VAN aún más golpeado por la inclusión del modelo de dilución dentro del proceso. Por lo tanto, los

cambios en la secuencia de extracción en los casos 2 y 3 se explican por el cambio en las condiciones de tonelaje y ley introducido por los modelos de dilución.

Tabla 26: Validación para escenarios 2 y 3, caso de estudio.

	VAN UDESS	VAN Validación	Dif. porcentual con respecto a la validación	Dif. porcentual con respecto al caso base
Caso Base	14,190	-	-	-
Caso 2	14,003	13,921	0.586%	1.896%
Caso 3	14,141	13,662	3.387%	3.721%

Si bien el valor del VAN es prácticamente igual para los tres escenarios y, de esa forma, se puede concluir que los planes son iguales, existe una diferencia entre ellos que no ha sido discutida y es la secuencia de extracción. En la Figura 54 se puede observar la secuencia óptima de extracción obtenida por UDESS para los tres casos estudiados. Se puede notar que, si bien el orden de extracción de los primeros caserones varía muy poco en los tres escenarios, existen cambios en la secuencia que son notorios a simple vista por la escala de colores.

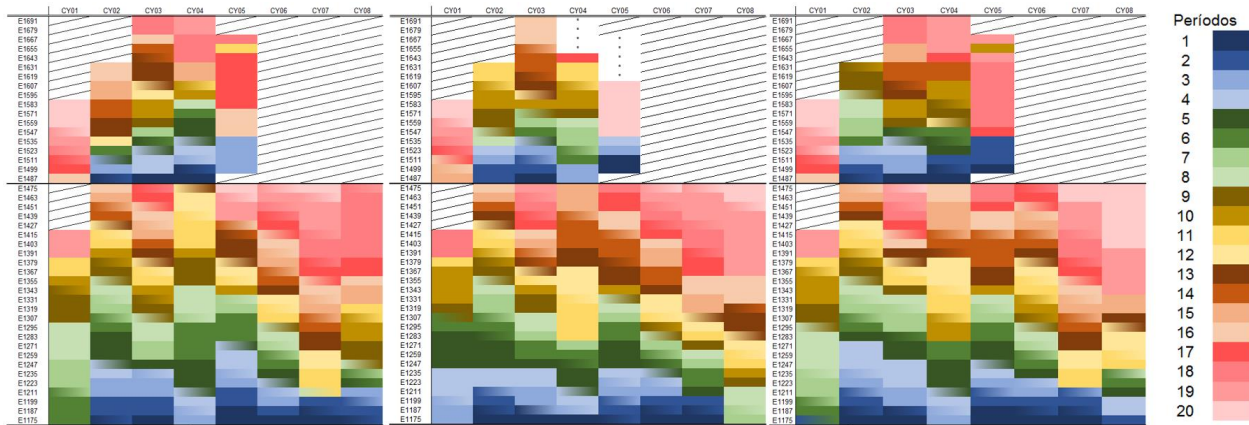


Figura 54: Secuencia de extracción *Mina Y*, escenario 1 (izquierda), escenario 2 (centro) y escenario 3 (derecha).

La Figura 55 muestra una vista en perfil de la mina, donde se pueden observar los cambios en la secuencia de extracción de los escenarios 2 y 3 con respecto al escenario 1. Cada uno de los caserones de la mina contiene un número, el cual puede ser positivo, si la extracción de dicho caserón se adelantó con respecto a su extracción en la secuencia del escenario 1; negativo, si la extracción de dicho caserón se retrasó con respecto a su extracción en la secuencia del escenario 1; o bien puede ser cero si su extracción se mantiene en el mismo período de tiempo. Para el escenario 2 se tiene que 214 caserones cambian su período de extracción con respecto al escenario 1, de los cuales 88 adelantan su extracción, 117 se retrasan y 62 mantienen el mismo período de extracción. Del mismo modo, para el escenario 3 se tiene que 176 caserones cambian su período de extracción con respecto al escenario 1, de los cuales 75 adelantan su extracción, 101 se retrasan y 100 mantienen el mismo período de extracción. De este análisis se puede concluir que, si bien el VAN de los tres escenarios es prácticamente el mismo, la secuencia de extracción sufre cambios significativos al incluir los modelos de dilución.

	CY01	CY02	CY03	CY04	CY05	CY06	CY07	CY08		CY01	CY02	CY03	CY04	CY05	CY06	CY07	CY08
E1691			2	*					E1691			0	0				
E1679			2	*					E1679			0	0				
E1667			0	*	*				E1667			-2	-1	-1			
E1655			-0.5	*	*				E1655			-1	-1	1			
E1643			-0.5	1	*				E1643			-2	1	-2			
E1631		5	-1	4	*				E1631		7	-1	1	-1			
E1619		5	-0.5	4	*				E1619		7	-1	1	-1			
E1607		5	-0.5	0	-3				E1607		6	-1	0.5	-1			
E1595		5	-0.5	0	-3				E1595		7	-1	0	-1			
E1583	0	4	0	-2	-3				E1583	0	6	0	-1	-1			
E1571	0	5	3	-3	-4				E1571	0	6	0	-3	-2			
E1559	0.5	4	2	-3	-4				E1559	0	6	0	-3	-2			
E1547	0.5	5	1	-2	-4				E1547	0	6	2	-1	11			
E1535	0.5	4	1	-3	-1				E1535	0	6	1	-1	1			
E1523	1	2	1	-2	0				E1523	0	3	0.5	-1	1			
E1511	1	0	2	-3	2				E1511	0	0	1	1	1			
E1499	2	1	2	-2	2				E1499	0	1	1	0	2			
E1487	1	-1	0	-2					E1487	0	-0.5	0	0				
E1475		0	-2	-3	2	0	0.5	-2	E1475		0.5	-2	-4	2	2	0	-2
E1463		0	-1	-3	2	0	0.5	-2	E1463		0	-2	-4	1	2	-0.5	-2
E1451		0.5	-2	-3	2	0	0	-1	E1451		0.5	-2	-3	2	2	0	-2
E1439		1	-1	-3	3	-0.5	0	-1	E1439		1	-2	-4	3	2	0	-2
E1427		0	-2	-3	-2	-0.5	0.5	-1	E1427		0.5	-2	-4	-2	2	0	-2
E1415	1	0	-1	-3	-1	-0.5	0.5	-1	E1415	0	0	-1	-3	-1	-2	0	-2
E1403	1	0	-1	-3	-1	0	0	-1	E1403	0	0	-2	-3	-1	2	0	-2
E1391	1	-0.5	-1	-3	-1	-0.5	0.5	-1	E1391	0	-0.5	0	-3	-1	2	0	-1
E1379	0	0	-1	-4	-1	0	0.5	-2	E1379	0	0	0	-3	-2	3	0	-2
E1367	1	0	-1	-3	-1	0.5	0	-2	E1367	0.5	0	0	-3	-1	2	0	-2
E1355	0	0	-0.5	-3	-2	0	0.5	0	E1355	0	0	0	-3	-2	3	0	-3
E1343	-0.5	0	0	-4	0	0	0	-1	E1343	-0.5	0	1	-3	0	2	0	-4
E1331	-1	0.5	0.5	-3	-1	0	0.5	-1	E1331	-1	0	1	-3	-0.5	2	0	0
E1319	-0.5	0	0	-3	-1	-0.5	0	-2	E1319	0	0	2	-3	-0.5	1	0	-4
E1307	3	0	0.5	-4	-1	-0.5	2	-3	E1307	0	0	1	-3	-1	2	0	-3
E1295	2	0	0	-5	0	-1	2	-3	E1295	-0.5	0	1	-4	0	0	0	-2
E1283	3	-0.5	1	-5	0	-0.5	2	-2	E1283	0	0	3	-4	0	0	0.5	-2
E1271	3	0	1	-1	-0.5	0.5	4	-3	E1271	0	1	2	0	-0.5	0	0	-3
E1259	3	0	1	0	-1	0	4	-2	E1259	0	1	2	0	-1	0	0	-2
E1247	2	-0.5	0	-0.5	-1	0.5	5	-3	E1247	-1	0.5	1	0	-0.5	0	0	-3
E1235	3	0	-0.5	0	-0.5	0.5	5	-4	E1235	-0.5	0.5	-0.5	0	-0.5	0	0	0.5
E1223	3	-1	-1	0	-0.5	1	5	-4	E1223	0	0	-1	0	0	1	0	-0.5
E1211	2	0.5	0	0	-1	0.5	3	-5	E1211	-0.5	0.5	0	0	-0.5	0.5	6	-2
E1199	3	0	-1	0	-0.5	-1	0	-5	E1199	-0.5	0	-1	0	0	1	0	-2
E1187	-3	0.5	0.5	0	-1	0.5	0	-5	E1187	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0	-2
E1175	3	0.5	0	2	-0.5	0	0	-5	E1175	4	0.5	0	0	0	0	0	-0.5

Figura 55: Vista en perfil de los cambios en la secuencia de extracción *Mina Y*, para escenario 2 (izquierda) y escenario 3 (derecha) con respecto al escenario 1.

En la Figura 56 se muestran los planes de producción para los tres escenarios estudiados. En estos, se puede apreciar un cambio en el ramp up, en el ramp down y en el número de períodos que se opera en régimen. En el caso del escenario 1, el plan considera 2 años de ramp up, 16 años de régimen y 2 años de ramp down. En el caso del escenario 2, se tienen 2 años de ramp up, 14 años de régimen y 4 años de ramp down, con una leve alza en la producción en el período 19. Finalmente, para el escenario 3, se tiene 1 año de ramp up, 17 años de régimen y 2 años de ramp down, con una leve baja en la producción en el período 17.

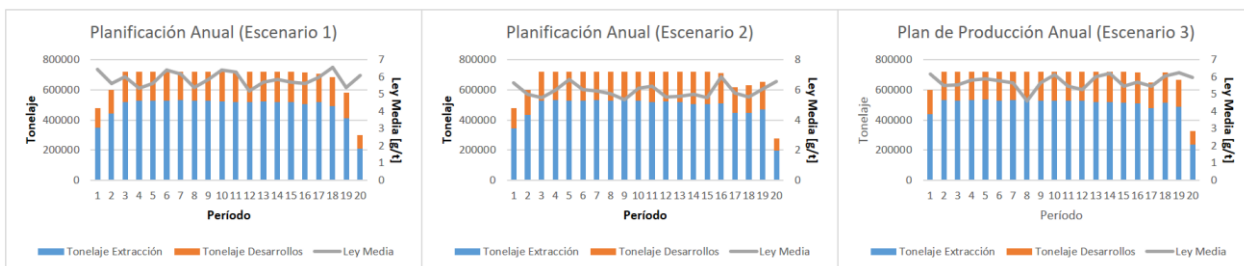


Figura 56: Planes de producción, escenarios 1, 2 y 3.

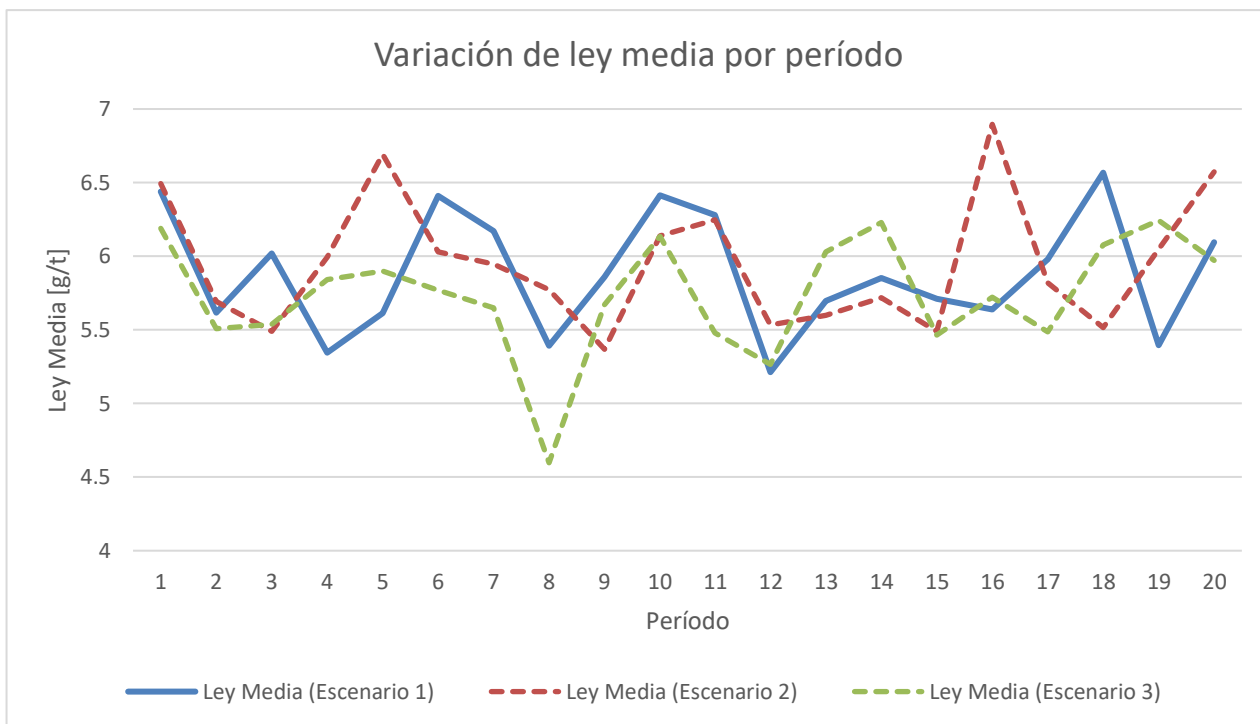


Figura 57: Variación de ley media por período, escenarios 1, 2 y 3.

La Figura 57 muestra cómo varía la ley media durante cada uno de los períodos de explotación de la *Mina Y*, es decir, nos entrega información de la estrategia de extracción utilizada por UDESS al maximizar la función objetivo que, en este caso, es el VAN. Como se observa en el gráfico, para el período 1, la ley media en todos los escenarios es bastante similar, lo que se explica a través del diseño, el método de explotación y las restricciones de inicio de extracción. En otras palabras, sólo existe la opción de comenzar la extracción en los niveles 1,175 m y 1,487 m de manera simultánea. Una vez construida la infraestructura necesaria para la operación, la secuencia de extracción cambia

y, por lo tanto, cambia la ley media de los caserones extraídos. Las leyes medias del escenario 1 y 2 son muy similares, esto debido a que el porcentaje de dilución considerado es muy bajo (0.1%), lo que prácticamente no diluye las leyes. Puede notarse que las leyes medias del escenario 2 nunca son menores que en el escenario 1, sin embargo, se tienen leyes medias más altas, como en los períodos 5 y 16, que son extraídas antes en comparación a los máximos del escenario 1, los cuales son extraídos durante los períodos 6 y 18. Si se compara ahora las leyes de los escenarios 1 y 3, se puede observar que, a diferencia del escenario 2, las leyes en general son más bajas que en el escenario 1, lo que se explica por el mayor porcentaje de dilución considerado en este escenario (3.5%) lo que diluye las leyes presentes.

De todo lo anterior, es posible concluir que la incorporación de los modelos de dilución en el proceso de planificación produce una perturbación en la secuencia de extracción y en los planes de producción que, si bien se ve reflejada de manera marginal en el VAN, permite desarrollar estrategias de extracción en base a una mayor cantidad de información alimentando el proceso, lo que finalmente entrega un plan de producción más confiable y realista.

6 Conclusiones

El proceso de planificación es donde se busca maximizar el valor de un proyecto minero, a través de la mejor estrategia de extracción del mineral, en un período de tiempo determinado y considerando las distintas restricciones que, en general, agregan alta complejidad al problema y dificultan la tarea del planificador de encontrar, o incluso acercarse, a una solución óptima. La metodología que se plantea en este trabajo permite encontrar una secuencia óptima de extracción, maximizando el VAN, sujeto a una serie de restricciones de precedencia y de recursos, para cualquier enfoque de planificación realizado.

Con respecto a los casos de prueba y el caso de estudio realizados, se obtuvieron conclusiones similares en lo que respecta a los modelos de dilución incorporados, y cómo estos afectan la secuencia de extracción, el plan de producción y el VAN.

El primer impacto observable que produce la incorporación de la dilución es en la secuencia de extracción. Tanto en los casos de prueba como en el caso de estudio, se pueden observar dos tipos de situaciones con respecto a la secuencia de extracción: aquellas donde el *software* decide posponer o adelantar la extracción de ciertos caserones, o bien, aquellas donde el *software* decide no realizar modificaciones (con respecto al caso base, sin dilución). La explicación del criterio de decisión del *software* yace en el objetivo principal de UDESS: maximizar la función objetivo (VAN) sujeto a las restricciones y precedencias del problema.

El efecto de incorporar la dilución es observable también en el VAN entregado por el *software* en cada uno de los casos estudiados. Considerando que, para cada uno de los casos, el *software* encuentra una secuencia de extracción óptima maximizando el VAN, la disminución de este con respecto al VAN del caso base (sin dilución) es marginal. Sin embargo, al utilizar la secuencia del caso base incorporando los modelos de dilución, la disminución en el VAN es más acentuada y se comprueba que la secuencia entregada por el *software* es la mejor posible y que, la optimización realizada por este, permite que el impacto sobre el valor del VAN no sea significativo.

Los resultados de los casos donde se incorpora la dilución a través del modelo de Clark & Pakalnis, permiten concluir que, para caserones de un mismo ancho, a mayores valores de ELOS o sobre excavación, se tendrán mayores valores de dilución. Sin embargo, como el modelo fue aplicado con un valor de ELOS fijo, la cantidad de dilución que entra a los caserones depende del ancho de estos. Así, para caserones de gran ancho, la dilución será menor que para aquellos caserones de ancho menor. Por otro lado, los resultados de los casos donde se incorpora la dilución a través del modelo de dilución de Pakalnis & Vongpaisal, permiten concluir que, a mayores valores de la razón de exposición de la pared colgante (ER), se tienen diluciones menores. Esto debido a que, para mayores valores de ER, se tienen caserones de menor ancho, lo que implica una mayor selectividad y, por ende, menor dilución. Por otro lado, a menores valores de ER, se tienen caserones de mayor ancho, lo que implica una menor selectividad y, por ende, mayor dilución.

Con respecto a las diferencias en tonelaje y ley por caserón, se pudo observar que estas se explican por los modelos de dilución utilizados, y dependen fuertemente de estos. El modelo de Clark & Pakalnis (caso 2 y escenario 2) es un modelo teórico, que considera aspectos sólo de diseño, como el ancho del caserón, por lo que se generan menos distorsiones en los resultados. Por otro lado, el modelo de Pakalnis & Vongpaisal (caso 3 y escenario 3) es un modelo empírico construido en base

a observaciones realizadas sólo en una mina (ubicada en Canadá), está sujeto a mayores márgenes de error al ser aplicado en minas con distintas condiciones geotécnicas y operacionales. Por lo tanto, los resultados obtenidos aplicando el modelo de dilución de Clark & Pakalnis poseen mayor nivel de confiabilidad.

Con respecto al *software* UDESS, es posible concluir que es una herramienta altamente competente, robusta, eficiente y de fácil uso. Al trabajar con modelos que contienen más de cuatro mil actividades y más de 9 mil restricciones, el *software* entregó resultados en tiempos de ejecución del orden de 1 hora, lo que para los estándares de la industria minera son tiempos cortos en comparación a los tiempos que toman, en general, las tareas del proceso de planificación. Si bien los archivos que el *software* utiliza como input deben ser preparados por el usuario, es posible facilitar la elaboración de estos a través de herramientas de programación, como Python o Visual Basic, lo que reduce aún más el tiempo que toma el proceso de planificación completo.

El proceso de planificación abordado con el uso de herramientas computacionales adecuadas, si bien posee complicaciones, resulta en un proceso más abordable y que toma menor tiempo en ser ejecutado. Las herramientas utilizadas en la elaboración de este trabajo demostraron ser aplicables en la minería subterránea selectiva que, como se mencionó anteriormente, representa gran parte de la pequeña y mediana minería presente en Chile, por lo que es recomendable que se incluya su uso en la planificación de estas faenas.

Es posible concluir que el efecto de la incorporación de los modelos de dilución en el proceso de planificación produce una perturbación en la secuencia de extracción y en los planes de producción que, si bien se ve reflejada de manera marginal en el VAN, permite desarrollar estrategias de extracción en base a una mayor cantidad de información alimentando el proceso, lo que finalmente entrega un plan de producción más confiable y realista, más cercano a la realidad operacional.

Finalmente, y de acuerdo a los resultados obtenidos tanto en los casos de prueba como en el caso de estudio, se puede concluir que la incorporación de la dilución como parámetro geomecánico impacta de manera directa los planes de producción, la secuencia de extracción y el VAN, permitiendo la obtención de resultados más cercanos a la realidad operacional y menos susceptibles a cambios en etapas posteriores de la planificación minera.

7 Recomendaciones y trabajo futuro

A continuación, se describen algunas recomendaciones y trabajos futuros que se pueden realizar para complementar los resultados obtenidos en este trabajo de título.

Dado que este trabajo contempla la planificación en el largo plazo, un posible trabajo futuro es considerar la planificación para el mediano plazo, es decir, ir al detalle de producción mensual para analizar más en profundidad el impacto que tiene el cambio de enfoque de la planificación en el plan de producción y, posiblemente, analizar el impacto a nivel operacional.

Este trabajo se centró en la planificación sólo de un sector productivo del proyecto B, por lo que sería aconsejable realizar la planificación incorporando el resto de los sectores productivos, como la Mina VS y los sectores proyectados por debajo de la elevación 1,175 m.

A modo de simplificación, sólo se incluyeron las actividades de desarrollos horizontales de infraestructuras relacionadas con las actividades de extracción. Una posible extensión de este trabajo sería incluir en el ciclo de actividades aquellas relacionadas con los desarrollos de la infraestructura de la ventilación y las actividades relacionadas con la fortificación. Esto aumentaría el número de actividades a ser valorizadas, así como también el número de restricciones de precedencia involucradas en el ciclo productivo.

Con respecto al método de explotación, sería adecuado aplicar esta metodología a otros métodos subterráneos selectivos, como Room & Pillar, Sublevel Stopping o cualquier variación de estos, ya que tanto la metodología como el *software* UDESS han probado ser robustos en la planificación y secuenciamiento de métodos selectivos.

Con respecto a la razón de exposición de la pared colgante, se podrían considerar valores opcionales por caserón, por ejemplo, que cada caserón tuviera asociado 3 valores de razón de exposición (un valor bajo, otro medio y otro alto), para dejar que el *software* escoja el valor más adecuado en pos de maximizar la función objetivo. Esto, con el objetivo de analizar el comportamiento o criterio de elección del *software*. Además, otra extensión de este trabajo sería considerar otras variables geomecánicas complementarias a la dilución.

UDESS ha probado ser una herramienta robusta para la planificación y secuenciamiento, por lo que es recomendada su aplicación a otros tipos de métodos de explotación, como métodos de Caving o minería a cielo abierto. Otra aplicación interesante sería en las tareas de desarrollos previos a la explotación de la mina.

Finalmente, este trabajo considera el proceso de planificación como un proceso determinístico, por lo que incluir variabilidad en la metodología sería interesante de analizar como un trabajo futuro.

Bibliografía

- Alford, C., Brazil, M., Lee, D. (2007). *Optimisation in Underground Mining*.
- Castro, C. (2015). *Modelamiento numérico de la dilución por sobre excavación en minería subterránea explotada por Sublevel Stopping* (Magíster en Minería). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Cepuritis, P. M. & Villaescusa, E. (2006) *Comprehensive back analysis techniques for assesing factors affecting open stope performance*. Rock Mechanics in Underground Construction ISRM International Symposium.
- Clark, L. (1998) *Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting*. University of British Columbia.
- Clark, L. & Pakalnis, R. (1997) *An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls*. 99th Annual AGM-CIM conference, Vancouver.
- Cochilco, Dirección de Estudios (2013). *Monitoreo de la mediana y pequeña minería chilena*.
- Dunne, K. & Pakalnis, R. C. (1996). *Dilution aspects of a sublevel retreat stope at detour lake mine*. Rock mechanics. Balkema, Rotterdam., 305 - 313.
- Gómez, A. (2015). *Secuenciamiento Multicriterio para Minería Subterránea Selectiva*. (Magíster en Minería). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Hartman, H. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. Second edition, Volume 1, 643 – 645.
- Jorquera, M. (2015). *Método de explotación Bench & Fill y su aplicación en Minera Michilla*. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Luxford, J. (2000). *Reflections of a Mine Scheduler*. MassMin 2000, 119 – 126.
- Moreno, C. (2015). *Manual de Usuario UDESS*. Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile.
- Newman, A., Kuchta, M. (2004). *Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine*. European Journal of Operational Research 176 (2007), 1205 – 1218.
- Ortiz, J. (2008). *Apuntes de curso Explotación de Minas*. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- Pakalnis, R. C. & Vongpaisal, S. (1993) *Mine design an empirical approach*. B. A. Archibal (Ed.) Innovative mine design for the 21st century. Balkema, Rotterdam.

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.

Scoble, M. J. & Moss, A. (1994) Dilution in underground bulk mining: Implications for production management. Geological Society, London, Special Publications, 79(1), 95-108.

Trout, P. (1995). Underground Mine Production Scheduling Using Mixed Integer Programming. APCOM XXV 1995 Conference, 395 - 400.

Villaescusa, E. (2003). Global Extraction Sequences in Sublevel Stoping. MPES 2003 Conference, Kalgoorlie, Australia.

Yarmuch, J., Ortiz, J. (2011) A Novel Approach to Estimate the Gap Between the Middle and Short-term Plans. 35th Apcom Symposium / Wollongong, New South Wales.

.

Anexos

A1. Casos de prueba

A.1.1 Room & Pillar

A continuación, se muestran las secuencias de extracción obtenidas para cada uno de los casos estudiados.

A.1.1.1 Caso Base

La Carta Gantt de la secuencia de extracción obtenida para el caso base se muestra en la Tabla 27, mientras que la Figura 58 muestra una vista en planta con la secuencia de extracción en escala de colores.

Tabla 27: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 1.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C1	100%													
C2	80%	20%												
C8		100%												
C7		61%	39%											
C6			100%											
C12			41%	59%										
C16				100%										
C22				21%	79%									
C17					100%									
C13					1%	99%								
C18						82%	18%							
C23							100%							
C19							62%	38%						
C20								100%						
C15								42%	58%					
C24									100%					
C9									23%	77%				
C10										100%				
C11										3%	97%			
C14											83%	17%		
C3												100%		
C4												63%	37%	
C21													100%	
C5													44%	56%

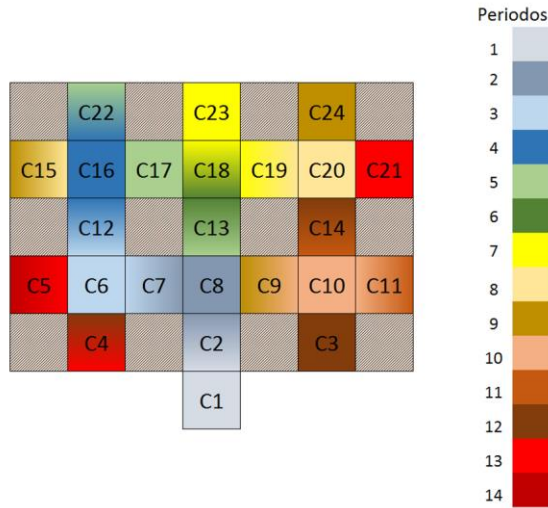


Figura 58: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 1.

A.1.1.2 Caso 2

La Carta Gantt de la secuencia de extracción obtenida para el caso 2 se muestra en la Tabla 28, mientras que la Figura 59 muestra una vista en planta con la secuencia de extracción en escala de colores.

Tabla 28: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 2.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C1	100%													
C2	80%	20%												
C8		100%												
C7		60%	40%											
C6			100%											
C12			40%	60%										
C16				100%										
C22				20%	60%		20%							
C13					100%									
C18					20%	80%								
C19						100%								
C20							100%							
C23							60%	40%						
C17								100%						
C15								39%	61%					
C24									99%					
C9									20%	80%				
C10										100%				
C11											100%			
C14											80%	20%		
C3												100%		
C4												59%	41%	
C21													100%	
C5													39%	61%

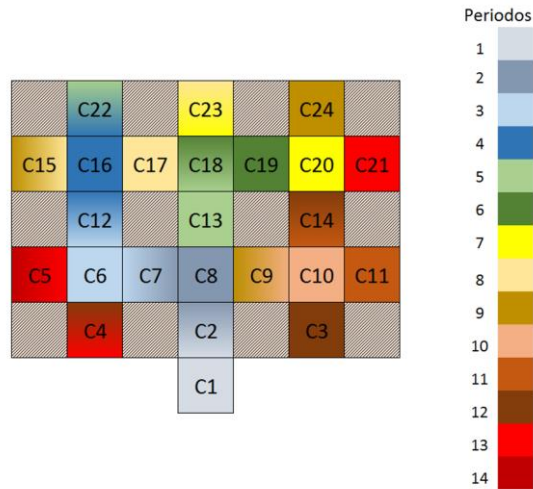


Figura 59: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 2.

A.1.1.3 Caso 3

La Carta Gantt de la secuencia de extracción obtenida para el caso 3 se muestra en la Tabla 29, mientras que la Figura 60 muestra una vista en planta con la secuencia de extracción en escala de colores.

Tabla 29: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 3.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
C1	100%														
C2	74%	26%													
C8		100%													
C7		49%	51%												
C6			100%												
C12			23%	77%											
C16				97%	3%										
C22					100%										
C13					72%	28%									
C18						100%									
C19						46%		54%							
C17							100%								
C23							74%	26%							
C20								95%	5%						
C15									100%						
C24									69%	31%					
C9										100%					
C21											43%		23%	34%	
C10												100%			
C4												74%	26%		
C11													100%		
C14													74%	26%	
C3														100%	
C5															100%

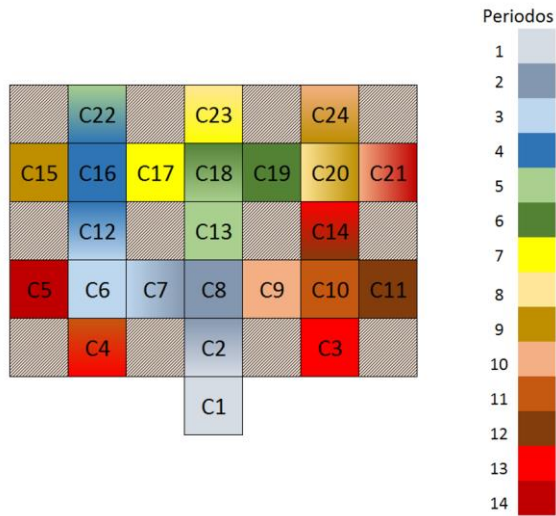


Figura 60: Secuencia de extracción Room & Pillar, caso 3.

A.1.2 Bench & Fill

A continuación, se muestran las secuencias de extracción obtenidas para cada uno de los casos estudiados.

A.1.2.1 Caso 1

Tabla 30: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 1.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
cas_1-4_i	68%	32%																				
r_cas_1-4_i		33%	67%																			
cas_1-4_d		36%	64%																			
r_cas_1-4_d			39%	61%																		
cas_1-3_i			6%		37%	57%																
cas_1-3_d				68%	32%																	
r_cas_1-3_d					64%	36%																
r_cas_1-3_i						63%	37%															
cas_1-2_d						12%	21%	67%														
cas_1-2_i							47%		37%		15%											
r_cas_1-2_d								52%	48%													
cas_1-1_d									31%	69%												
r_cas_1-1_d										61%	39%											
r_cas_1-2_i											34%	66%										
cas_2-4_d											53%	47%										
r_cas_2-4_d												55%	45%									
cas_1-1_i												21%	11%	68%								
cas_2-3_d													57%		37%		6%					
r_cas_1-1_i														36%	64%							
cas_2-4_i															31%	69%						
r_cas_2-4_i																38%	62%					
r_cas_2-3_d																	35%	65%				
cas_2-3_i																	62%	38%				
r_cas_2-3_i																		64%	36%			
cas_2-2_d																			30%		38%	32%

Activity	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
cas_2-2_i	69%	31%																		
r_cas_2-2_i		35%	65%																	
r_cas_2-2_d			33%	67%																
cas_2-1_i			37%	63%																
r_cas_2-1_i				39%	61%															
cas_2-1_d				6%		36%		36%	22%											
cas_3-4_i					68%	32%														
r_cas_3-4_i						64%	36%													
cas_3-3_i							68%	32%												
r_cas_3-3_i								64%	36%											
r_cas_2-1_d									66%	34%										
cas_3-2_i									47%	53%										
r_cas_3-2_i										63%	37%									
cas_3-4_d										16%	16%	68%								
cas_3-1_i											52%		36%		11%					
r_cas_3-4_d												36%	64%							
cas_3-3_d													32%	68%						
r_cas_3-3_d														38%	62%					
r_cas_3-1_i															34%	66%				
cas_3-2_d															57%	43%				
cas_4-4_i																25%		38%		37%
r_cas_3-2_d																40%	60%			
cas_3-1_d																	69%	31%		
r_cas_3-1_d																		39%	61%	
cas_4-4_d																			68%	32%

Activity	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	
r_cas_4-4_d											40%	60%									
r_cas_4-4_i												69%	31%								
cas_4-3_d												67%	33%								
r_cas_4-3_d													64%	36%							
cas_4-3_i													35%		65%						
cas_4-2_d														69%	3%	28%					
r_cas_4-3_i															37%	63%					
r_cas_4-2_d																58%	42%				
cas_4-2_i																41%	59%				
r_cas_4-2_i																	32%	68%			
cas_4-1_d																	9%	68%	24%		
cas_4-1_i																				45%	55%
r_cas_4-1_d																					
r_cas_4-1_i																					

A.1.2.2 Caso 2

Tabla 31: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 2.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
cas_1-4_i	67%	33%																		
r_cas_1-4_i		41%	59%																	
cas_1-4_d		36%		39%	25%															
cas_1-3_i			69%	31%																
r_cas_1-3_i				65%	35%															
r_cas_1-4_d					32%	68%														
cas_1-2_i					43%	57%														
cas_1-3_d						11%	68%	21%												
r_cas_1-2_i							37%	63%												
r_cas_1-3_d								66%	34%											
cas_1-1_i								47%		35%	17%									
cas_1-2_d									67%	33%										
r_cas_1-2_d										63%	37%									
r_cas_1-1_i											66%	34%								
cas_1-1_d											51%	37%		12%						
cas_2-4_i												32%	68%							
r_cas_2-4_i													60%	40%						
r_cas_1-1_d														68%	32%					
cas_2-3_i														56%	44%					
r_cas_2-3_i															63%	37%				
cas_2-4_d															24%		38%		38%	1%
cas_2-2_i																69%	31%			
r_cas_2-2_i																	65%	35%		
cas_2-1_i																		69%	31%	
r_cas_2-1_i																			39%	61%

Activity	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
r_cas_2-4_d	36%	64%																	
cas_3-4_i	66%	34%																	
r_cas_3-4_i		40%	60%																
cas_2-3_d		34%	66%																
r_cas_2-3_d			61%		39%														
cas_3-3_i			2%	68%	31%														
r_cas_3-3_i					33%	67%													
cas_2-2_d					37%	63%													
r_cas_2-2_d						61%	39%												
cas_3-2_i						6%	25%	69%											
cas_2-1_d							43%			57%									
r_cas_3-2_i								61%	39%										
cas_3-1_i									69%	12%	20%								
r_cas_2-1_d										37%	63%								
cas_3-4_d											48%	52%							
r_cas_3-1_i											33%	67%							
cas_4-4_i												16%	36%			36%	12%		
r_cas_3-4_d												36%	64%						
cas_3-3_d													32%	68%					
r_cas_3-3_d														40%	60%				
cas_3-2_d															68%	32%			
r_cas_3-2_d																38%	62%		
cas_3-1_d																	57%	43%	
r_cas_4-4_i																	35%	65%	
r_cas_3-1_d																		64%	36%

Activity	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
cas_4-3_i										25%		36%		35%	3%					
cas_4-4_d											68%	32%								
r_cas_4-4_d												64%	36%							
cas_4-3_d													67%	33%						
r_cas_4-3_d														40%	60%					
cas_4-2_d															66%	34%				
r_cas_4-3_i															68%	32%				
cas_4-2_i																34%		66%		
r_cas_4-2_d																65%	35%			
cas_4-1_d																	67%	2%	31%	
r_cas_4-2_i																		53%	47%	
cas_4-1_i																			38%	62%
r_cas_4-1_d																				
r_cas_4-1_i																				

A.1.2.3 Caso 3

Tabla 32: Secuencia de extracción Bench & Fill, caso 3.

Activity	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
cas_1-4_i	66%	34%																		
r_cas_1-4_i		42%	58%																	
cas_1-4_d		32%		35%	33%															
cas_1-3_i			68%	32%																
r_cas_1-3_i				40%	60%															
cas_1-2_i					34%	66%														
r_cas_1-4_d					33%	67%														
r_cas_1-2_i						59%		41%												
cas_1-3_d							66%	33%		1%										
cas_1-1_i								34%	66%											
r_cas_1-1_i									41%	59%										
cas_2-4_i										66%	34%									
r_cas_1-3_d										66%	34%									
r_cas_2-4_i											41%	59%								
cas_1-2_d											32%		31%		34%	3%				
cas_2-3_i												66%	34%							
r_cas_2-3_i													62%	38%						
cas_2-2_i														67%	33%					
r_cas_2-2_i															40%	60%				
cas_2-1_i																64%	36%			
r_cas_1-2_d																38%	62%			
r_cas_2-1_i																	40%	60%		
cas_1-1_d																	31%		32%	37%
cas_3-4_i																		66%	34%	
r_cas_3-4_i																			38%	62%

Activity	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
r_cas_1-1_d	63%	37%																			
cas_3-3_i	30%	66%	5%																		
cas_2-4_d			61%	39%																	
r_cas_3-3_i			37%	63%																	
r_cas_2-4_d				41%	59%																
cas_3-2_i				28%		32%	33%		7%												
cas_2-3_d					66%	34%															
r_cas_2-3_d						62%	38%														
cas_2-2_d							34%	66%													
r_cas_2-2_d								59%	41%												
r_cas_3-2_i									66%	34%											
cas_2-1_d									59%	41%											
r_cas_2-1_d										37%	63%										
cas_3-1_i										26%	32%		32%		9%						
cas_3-4_d											34%	66%									
r_cas_3-4_d												38%	62%								
cas_3-3_d													34%	66%							
r_cas_3-3_d														40%	60%						
r_cas_3-1_i															66%	34%					
cas_3-2_d															57%	43%					
r_cas_3-2_d																61%	39%				
cas_4-4_i																23%		34%		33%	11%
cas_3-1_d																	67%	33%			
r_cas_3-1_d																		63%	37%		
cas_4-4_d																			66%	34%	

Activity	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
r_cas_4-4_d												40%	60%							
r_cas_4-4_i													65%	35%						
cas_4-3_d													55%	45%						
r_cas_4-3_d														42%	58%					
cas_4-3_i														21%		34%		45%		
cas_4-2_d															67%	33%				
r_cas_4-2_d																63%	37%			
cas_4-1_d																	66%	21%	14%	
r_cas_4-3_i																		61%	39%	
cas_4-2_i																			52%	48%
cas_4-1_i																				
r_cas_4-1_d																				
r_cas_4-1_i																				
r_cas_4-2_i																				