



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

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIAL CAPTURA DE VALOR EN EL NEGOCIO MINERO DE  
DIVISIÓN EL TENIENTE POR EFECTO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

JAVIERA CONSTANZA OYARCE VALDEBENITO

PROFESOR GUÍA:

JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANTONIO PINOCHET SCHWARZE

ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil de Minas  
POR: Javiera Oyarce Valdebenito  
FECHA: 02/11/2017  
PROFESOR GUÍA: Javier Cornejo González**

**ESTIMACIÓN DE LA POTENCIAL CAPTURA DE VALOR EN EL NEGOCIO MINERO DE DIVISIÓN EL TENIENTE POR EFECTO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO**

La División El Teniente de Codelco posee dentro de su cartera de proyectos el Nuevo Nivel Mina, el cual estará pre-acondicionado con fracturamiento hidráulico (FH), con el objetivo de facilitar la explotación del mineral primario (buena calidad geotécnica) y controlar el riesgo sísmico.

Uno de los principales efectos del FH, es el mejoramiento de la fragmentación de los bloques de mineral extraídos, lo que a su vez permite disminuir la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños en los puntos de extracción, reflejándose en un aumento de la disponibilidad de área abierta para producción. Además, se encuentra en estudio el efecto en la relación entre el mineral extraído y quebrado, la cual se proyecta que cambie de 1:3 a 1:5, reflejándose en una menor altura de liberación, pasando de un 30% a un 20%.

Para conocer la potencial captura de valor de la modificación de los dos parámetros anteriormente descritos, se realizó un estudio en base al sector Andes Norte del proyecto Nuevo Nivel Mina.

En primer lugar, se estimó el impacto de la fragmentación producto del FH en la disponibilidad de área, para lo cual se aplican a Andes Norte datos de un sector que actualmente está en explotación (Reservas Norte). El aumento estimado en la disponibilidad de área en quiebre es entre un 6% y 10%, y en el caso del área liberada es entre un 3% y 5 %, obteniendo un mayor impacto en la roca de buena calidad geotécnica.

Considerando el efecto estimado del FH en la disponibilidad, se evalúa la variación de este parámetro junto al de la altura de liberación (20% con FH) en diferentes estrategias de explotación basadas en el precio del cobre. Para precio alto, se evalúa un aumento en la incorporación de área con respecto al plan original, y para precio bajo se evalúan 2 estrategias; en la primera se mantiene la incorporación de área del plan original, y en la segunda se disminuye la altura económica (con el objetivo de aumentar la ley media de cobre) y se aumenta la tasa de incorporación de área para mantener el control geométrico de la cavidad dentro de los rangos de ángulo de extracción recomendados para el sector (entre 30° y 45°).

Uno de los principales resultados es el aumento entre un 12% y 20% en el ritmo de crecimiento en ramp up, sin embargo, un mayor impacto en la producción es restringido por la capacidad del sistema de manejo de materiales, principalmente del sistema de transporte intermedio, detectándose un cuello de botella estructural que debe ser gestionado a través del diseño.

La evaluación económica de las estrategias planteadas permite concluir que la agregación de valor al VAN inicial producto de la modificación de la disponibilidad de área o altura de liberación es de un 20% (aumento de 120 MUSDS\$ en el VAN), y al evaluarlas en conjunto la ganancia es de un 23% (aumento de 134 MUSDS\$ en el VAN).

## **Abstract**

Division El Teniente Codelco Chile, has within its portfolio of projects the New Mine Level, which will be pre-conditioned with hydraulic fracturing (HF) with the objective of facilitating the exploitation of the primary mineral (good geotechnical quality) and control seismic risk.

One of the main effects of HF is the improvement of the fragmentation of the extracted ore blocks, which allows to decrease the frequency of hangings and over sizes in the points of extraction, reflecting an increase in the availability of open area for production. In addition, the effect on the ratio between the extracted and broken mineral, which is projected to go from 1: 3 to 1: 5, will result in a lower release height, from 30% to 20%.

In order to know the potential value capture of the modification of the two parameters described above, a study was carried out based on the Andes Norte sector, belonging to the New Mine Level project.

First, the impact of HF fragmentation was estimated on the availability of area, for which data from a sector currently in operation (North Reserves) are applied to Andes Norte. The estimated increase in the availability of area under break is between 6% and 10%, and in the case of the released area is between 3 and 5%, obtaining a greater impact in the rock of good geotechnical quality.

Considering the estimated effect of HF on availability, the variation of this parameter is evaluated along with the release height (20% with HF) in different exploitation strategies based on the price of copper. For high price, an increase in the incorporation of area with respect to the original plan is evaluated, and for low price two strategies are evaluated; in the first case, the incorporation of the original plan area is maintained, and in the second case, the economic height (with the objective of increasing the average copper law) is maintained and the area incorporation rate is increased to maintain the geometric control of the cavity within the recommended extraction angle ranges for the sector (between 30 ° and 45 °).

One of the main results is the increase between 12% and 20% in the growth rate in ramp up, however, a greater impact on production is restricted by the capacity of the material handling system, intermediate transport system, detecting a structural bottleneck that must be managed through the design.

The economic evaluation of the strategies proposed allows us to conclude that the value added to the initial NPV resulting from the modification of the availability of area or release height is 20% (increase of 120 MUSD \$ in NPV), and when assessed them together the profit is 23% (increase of 134 MUSD \$ in the NPV).

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, quiero agradecer a lo más importante que tengo en la vida, mi familia, gracias por el apoyo incondicional que me han brindado durante estos años de estudio, sin ustedes nada de esto sería posible. Mamá, Papá y hermano, esto es por y para ustedes, me siento orgullosa y afortunada de tenerlos a mi lado.*

*A mi abuela Eliana Tapia, gracias por su infinito cariño y preocupación.*

*A Cristián Vallejos, gracias por estar siempre conmigo, brindarme de tu amistad, ayuda y buenas energías. Gracias por haber hecho que mis últimos años de universidad fueran los mejores.*

*A mis amigos Diego Canales, Gonzalo Monsalves, Tomás González, Daniel Pedraza, gracias por acompañarme en los momentos de sufrimiento, donde las maratónicas jornadas de trabajos y estudios nos hacían estar juntos casi 24/7, sin dejar de lado las juntas después de clases, en donde podíamos distraernos y pasar un buen rato. Gracias por su apoyo y compañía, no me cabe duda de que serán grandes profesionales y que seguiremos en contacto.*

*A todos mis compañeros de plan común y especialidad con los que tuve una mayor cercanía, gracias por los momentos compartidos.*

*A mis amigas de infancia Javiera Vera, Angela Núñez, Camila González y Yessenia López, gracias por sus consejos, cariño y sobre todo comprensión, por los momentos en los que no pude estar presente. Es importante para mí saber que tengo personas que siempre estarán a mi lado, acompañándome en cada una de las etapas de mi vida.*

*A mi Tutor en Codelco Antonio Pinochet, gracias por confiar en mí, darme la oportunidad de trabajar contigo y por toda la ayuda recibida durante la memoria, eres un excelente profesional y una muy buena persona.*

*A mi profesor guía Javier Cornejo, gracias por brindarme de tus conocimientos, tiempo y consejos de vida que siempre son bien recibidos, eres un gran profesional, docente y persona. Gracias a tu familia por la acogida y ayuda.*

*A Andrés Brzovic, gracias por aceptar participar en esta memoria, valoro mucho que un profesional de su nivel me haya dado parte de su atención y tiempo.*

*A la Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica de la División El Teniente de Codelco, gracias por el recibimiento y ayuda brindada durante mi estadía de casi 8 meses (práctica y memoria), me llevo la mejor imagen de cada uno de ustedes.*

*Gracias infinitas a todos los que se han cruzado en mi camino. Este es el fin de una larga etapa, pero el comienzo de otra mejor.*

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.1.	Objetivos.....	2
2.1.1.	Objetivo General .....	2
2.1.2.	Objetivos Específicos .....	2
2.2.	Alcances.....	2
3.	Antecedentes.....	3
3.1.	Codelco .....	3
3.2.	División El Teniente .....	4
3.2.3.	Proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM).....	8
4.	Revisión Bibliográfica.....	9
4.2.	Panel Caving .....	9
4.3.	Planificación Minera.....	13
4.4.	CPlanner.....	19
4.8.	Pre-acondicionamiento .....	22
4.8.1.	Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE).....	23
4.8.2.	Fracturamiento Hidráulico (FH).....	23
4.8.3.	Pre-acondicionamiento mixto (DDE + FH) .....	28
5.	Metodología.....	30
6.	Desarrollo .....	35
6.1.	Características del sector en estudio: Andes Norte del NNM .....	35
6.2.	Estimación del impacto del FH en la disponibilidad de área.....	38
6.2.1.	Análisis de datos iniciales .....	38
6.2.2.	Modelos de frecuencia de colgaduras/sobre tamaños en función de la altura de columna extraída.....	40
6.2.3.	Aplicación de modelos a sector Andes Norte.....	41
6.2.4.	Proceso y tiempos asociados a la reducción secundaria.....	45
6.2.5.	Análisis por calle .....	46
6.2.6.	Impacto del FH en la disponibilidad de área. ....	48
6.3.	Estrategias de explotación en base a parámetros modificados por FH.....	50
6.3.1.	Variación en la tasa de incorporación de área a partir de la modificación en la disponibilidad de área y/o altura de liberación.....	50
6.3.2.	Estrategia de explotación en base al precio del cobre. ....	53
6.3.3.	Evaluación económica de estrategias de explotación.....	75

7.	Conclusiones y recomendaciones .....	81
7.1.	Conclusiones .....	81
7.2.	Recomendaciones .....	82
8.	Bibliografía.....	83
9.	Anexos.....	87

## Índice de tablas

Tabla 1	Sectores en explotación DET .....	5
Tabla 2	Recursos y Reservas, División El Teniente.....	6
Tabla 3	Indicadores proyecto AN.....	35
Tabla 4 :	Velocidad de extracción en etapa de conexión AN.....	35
Tabla 5	Variación de productividad en función de la altura de columna extraída, sector RENO..	38
Tabla 6	Sistemas de clasificación Geotécnica Mina RENO, Unidades CMET Fw y Hw. ....	39
Tabla 7	Modelos de la frecuencia de colgaduras, y su coeficiente de correlación respectivo. ....	41
Tabla 8	Modelos de la frecuencia de sobre tamaños, y su coeficiente de correlación respectivo.	41
Tabla 9	Tiempo de reducción secundaria sector Dacita .....	46
Tabla 10	Aumento en disponibilidad de área (en quiebre y liberada) por FH, según modelos colg y colg+colpas.....	50
Tabla 11	Líneas de bateas a incorporar por año al variar disponibilidad de área o altura de liberación .....	51
Tabla 12	Área requerida para conexión al disminuir la altura de liberación.....	53
Tabla 13	Área requerida para conexión al disminuir la altura de liberación (tiempo de holgura + 20%) .....	53
Tabla 14	Rendimientos de constructibilidad DET. ....	54
Tabla 15	Máxima capacidad productiva (MPC) considerando mayor incorporación de área (3 bateas/mes) .....	55
Tabla 16	Duración del Plan minero -Caso adicional de Estrategia para precio Alto de Cu.....	63
Tabla 17	Resumen resultados estrategia precio alto del Cu .....	63
Tabla 18	Resumen resultados estrategia N°1 precio bajo del Cu.....	69
Tabla 19	Casos a evaluar en estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre.....	69
Tabla 20	Duración Plan Minero C1. Estrategia N°2 precio bajo del Cobre.....	70
Tabla 21	Resumen de estrategia N°2 precio bajo de cobre .....	74

Tabla 22 Parámetros económicos para cálculo de ingresos .....	75
Tabla 23 Inversión Preoperacional diferenciada según tasa de incorporación de área .....	77
Tabla 24 TIR y Payback de estrategias planteadas .....	80
Tabla 25 Producción y leyes de Cu y Mo asociadas. Plan minero Andes Norte.....	88

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Operaciones de Codelco .....	3
Ilustración 2 Ubicación División El Teniente, Codelco .....	4
Ilustración 3 Sectores actuales en operación. ....	5
Ilustración 4 Geología del yacimiento El Teniente. ....	7
Ilustración 5 Modelo litológico División El Teniente, cota 2102. ....	7
Ilustración 6 Proyecto Nuevo Nivel Mina. ....	8
Ilustración 7 Ejemplo método Panel Caving .....	9
Ilustración 8 Niveles que conforman una operación de Panel Caving. ....	10
Ilustración 9 Estado del Macizo Rocosó generado por el avance del frente de hundimiento .....	11
Ilustración 10 Secuencia constructiva PC Hundimiento Convencional .....	12
Ilustración 11 Secuencia constructiva PC hundimiento previo .....	12
Ilustración 12 Secuencia constructiva PC con hundimiento avanzado .....	13
Ilustración 13 Etapas del plan minero. ....	14
Ilustración 14 Conexión Bloque 2 Esmeralda Sur .....	14
Ilustración 15 Perfil de velocidad de extracción .....	16
Ilustración 16 ángulo de extracción.....	16
Ilustración 17 Distancias permisibles Panel Caving.....	17
Ilustración 18 Fragmentación in-situ, primaria y secundaria del mineral. ....	20
Ilustración 19 Formación de colgadura .....	21
Ilustración 20 Reducción de tamaño de colpas. ....	21
Ilustración 21 Descuelgue manual. ....	22
Ilustración 22 Jumbo Cachorrero.Sandvick.....	22
Ilustración 23 Aplicación DDE .....	23
Ilustración 24 Dispositivo de Hidro-fracturamiento .....	23
Ilustración 25 Ejes de los fragmentos generados.....	24
Ilustración 26 Orientación de fracturas dependiendo del estado de esfuerzos existentes. ....	24
Ilustración 27 FH en minería del Caving .....	24

Ilustración 28 Comparación proceso de conexión con y sin Pre-acondicionamiento. ....	26
Ilustración 29 Aumento de velocidad de extracción en quiebre por reducción de altura de liberación .....	26
Ilustración 30 Metodología general del trabajo.....	30
Ilustración 31 Metodología para estimación de impacto del FH en la disponibilidad de área.....	31
Ilustración 32 Estrategias de explotación a evaluar.....	33
Ilustración 33 Metodología para evaluar estrategias de explotación en base a beneficios del FH	34
Ilustración 34 Estrategia de conexión AN, NNM. ....	36
Ilustración 35 Secuencia de incorporación de área en plan minero de AN.....	36
Ilustración 36 Nivel de Producción Andes Norte NNM.....	36
Ilustración 37 Nivel intermedio de Transporte Andes Norte .....	37
Ilustración 38: Mes productivo 145, sector Andes Norte.....	42
Ilustración 39 Frecuencia de colgaduras en función de las baldadas del LHD. Datos sector Hw ..	42
Ilustración 40 Frecuencia de colgaduras en función de las baldadas del LHD. Datos sector Fw ..	43
Ilustración 41 Frecuencia de colgaduras en función de los días necesarios para que ocurra una colgadura. Datos sector Hw.....	44
Ilustración 42 Frecuencia de colgaduras en función de los días necesarios para que ocurra una colgadura. Datos sector Fw .....	44
Ilustración 43 Calle 10 (días/colgadura, Datos sector Hw C/FH) .....	47
Ilustración 44 Incorporación de área y aumento de velocidad de extracción para mantener ángulo de extracción entre 30° y 45° .....	51
Ilustración 45 Dirección de avance del frente .....	52
Ilustración 46 Ley de cobre diluida %, modelo de bloques para Andes Norte .....	73
Ilustración 47 Resumen de resultados de estrategias evaluadas.....	75
Ilustración 48 Sistema de manejo de materiales DET.....	87
Ilustración 49 Baldadas para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Hw) .....	89
Ilustración 50 Baldadas para que aparezca un Sobre Tamaño (Datos sector Fw).....	89
Ilustración 51 Días necesarios para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Fw).....	90
Ilustración 52 Días necesarios para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Hw) .....	90

## Índice de gráficos

Gráfico 1 Producción de Codelco año 2016 .....	4
--	---



Gráfico 2 Plan minero Andes Norte .....	37
Gráfico 3 Productividad (tonelaje/colgaduras) en función de la altura extraída sector Hw y Fw, con y sin FH.....	39
Gráfico 4 Productividad (tonelaje/sobre tamaños) en función de la altura extraída sector Hw y Fw, con y sin FH .....	40
Gráfico 5 Modelos de frecuencia de colgaduras en función de la altura extraída en un punto. ....	40
Gráfico 6 Modelos de frecuencia de sobre tamaños en función de altura extraída en un punto ...	41
Gráfico 7 Factor de mejoramiento de productividad (tonelaje/colgaduras) con y sin FH .....	45
Gráfico 8 Estimación de aumento en disponibilidad de área en quiebre (datos zona Hw) .....	48
Gráfico 9 Estimación de aumento en disponibilidad de área en quiebre (datos zona Fw).....	49
Gráfico 10 Estimación de aumento en disponibilidad de área liberada (datos zona Hw) .....	49
Gráfico 11 Estimación de aumento en disponibilidad de área liberada (datos zona Fw).....	50
Gráfico 12 Incorporación de área según el ancho del frente .....	54
Gráfico 13 Incorporación de área nueva para estrategia precio Alto Cu.....	55
Gráfico 14 Estrategia de precio alto de Cu: Máxima capacidad productiva, caso liberado .....	56
Gráfico 15 Plan minero de estrategia de precio alto de Cu .....	57
Gráfico 16 Variación ritmo de Ramp Up. Estrategia precio alto del Cu.....	57
Gráfico 17 Diferencia ritmo ramp up, casos liberados. Estrategia precio alto del cobre .....	58
Gráfico 18 Estrategia precio Alto de Cu: Casos liberados al modificar disponibilidad de área y/o altura de liberación .....	58
Gráfico 19 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación. Estrategia precio alto de Cu.....	59
Gráfico 20 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir altura de liberación. Estrategia precio alto de Cu.....	59
Gráfico 21 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia precio alto de Cu.....	59
Gráfico 22 Gráfico 20 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir altura de liberación, considerando limitaciones del SMM Estrategia precio alto de Cu.....	59
Gráfico 23 Restricciones SMM: Estrategia precio alto del Cu (Caso 20%AL 10%D).....	60
Gráfico 24 Estrategia precio alto Cu: Variación en Ramp up al aumentar la capacidad del GTI (caso +10%D 20%AL) .....	60
Gráfico 25 Restricciones SMM: Estrategia precio alto del Cu (caso 20%AL 10%D).....	61

Gráfico 26 Estrategia de explotación precio alto Cu: Incorporación de área en caso extra.....	61
Gráfico 27 Variación de ritmo Ramp up -Caso adicional de estrategia precio alto de Cu.....	62
Gráfico 28 Plan minero de caso adicional (20%AL 10%D) -Estrategia precio alto del Cu.....	62
Gráfico 29 Plan minero resultante caso 20%AL 10%D. Estrategia N°1 Precio bajo del Cu.....	65
Gráfico 30 Variación ritmo de ramp up -Estrategia N°1 Precio bajo del Cu.....	65
Gráfico 31 Diferencia en ritmo de ramp up. Estrategia N°1 precio bajo del Cu.....	66
Gráfico 32 Producción Liberada Casos estrategia N°1 Precio bajo del Cu .....	66
Gráfico 33 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación. Estrategia N°1 precio bajo de Cu .....	67
Gráfico 34 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir la altura de liberación. Estrategia N°1 precio bajo de Cu .....	67
Gráfico 35 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia N°1 precio bajo de Cu .....	67
Gráfico 36 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia N°1 precio bajo de Cu .....	67
Gráfico 37 Restricciones SMM: Estrategia N°1 precio bajo del Cu (Caso 20%AL 10%D) .....	68
Gráfico 38 Variación de ramp up al incrementar capacidad del GTI.....	68
Gráfico 39 Plan minero caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre, He:240 m..	70
Gráfico 40 Plan minero caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre. He:220 m.	71
Gráfico 41 Plan miner caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del cobre. He:200 m....	71
Gráfico 42 Variación ritmo de ramp up Estrategia N° 2 precio bajo del cobre .....	72
Gráfico 43 Ley de cobre % en casos evaluados .....	72
Gráfico 44 Restricciones SMM C1 ramp up .....	73
Gráfico 45 Restricciones SMM C2 ramp up .....	73
Gráfico 46 Restricciones SMM C3 ramp up .....	73
Gráfico 47 Restricciones SMM Caso C1 .....	74
Gráfico 48 Máxima capacidad productiva al aumentar capacidad del GTI C1.....	74
Gráfico 49 Costos fijos Andes Norte .....	76
Gráfico 50 Costos variables Andes Norte. ....	76
Gráfico 51 Inversión Preoperacional Andes Norte Caso Base.....	77
Gráfico 52 Inversión Total (ST8 + PDA) .....	78
Gráfico 53 VAN de estrategias planteadas al aumentar 10% la disponibilidad de área .....	79

Gráfico 54 VAN de estrategias planteadas al disminuir a un 20% la altura de liberación.....	79
Gráfico 55 VAN de estrategias planteadas al disminuir a un 20% la altura de liberación y aumentar en 10% la disponibilidad de área.....	79
Gráfico 56 Área promedio durante el Régimen. Estrategia precio Alto del Cu.....	91
Gráfico 57 Área promedio durante el Régimen. Estrategia N°1 precio bajo de Cu.....	91
Gráfico 58 Área promedio durante el Régimen. Estrategia N°2 precio bajo del Cu.....	92
Gráfico 59 Producción Plan PDA (caso base Andes Norte) .....	92

### **Índice de ecuaciones**

Ecuación 1 Disponibilidad de área.....	18
Ecuación 2 Tiempo requerido para incorporar una línea de bateas.....	18
Ecuación 3 Líneas de bateas a incorporar al año.....	18
Ecuación 4 Máxima capacidad productiva.....	19
Ecuación 5 Valor Actual Neto (VAN) .....	28
Ecuación 6 Tasa Interna de Retorno.....	29
Ecuación 7 Velocidad de extracción en función de la altura de primario extraída .....	43
Ecuación 8 : Cálculo de disponibilidad de área en quiebre/ liberada.....	48
Ecuación 9 Incorporación en área en función del ancho de frente.....	52
Ecuación 10 Inversión por carga base .....	78

## 1. Introducción

En Chile, la mayor parte de las minas que están en operación son de tipo a cielo abierto<sup>1</sup>, sin embargo, debido al envejecimiento de estos depósitos, la mayor profundidad del mineral y los estrictos requerimientos de sustentabilidad se ha comenzado a migrar a la explotación de tipo subterránea.

Este presente escenario genera nuevos desafíos que enfrentar, debiendo lidiar con ambientes de altas concentraciones de esfuerzos, producto de la columna litostática que se encuentra por encima de los niveles a desarrollar, y también, con mineralización primaria, la cual, dada sus características geotécnicas presenta problemas para ser explotada por métodos de hundimiento.

Esta es la situación actual de los nuevos proyectos de la División El Teniente de Codelco, de los cuales destaca el Nuevo Nivel Mina, cuyo principal objetivo es mantener la producción a mediano y largo plazo, luego del término de la vida útil de las minas que actualmente se encuentran en operación.

Con el fin de mitigar los problemas que surgen en la minería subterránea, el proyecto Nuevo Nivel Mina considera la implementación de técnicas de pre-acondicionamiento del macizo rocoso, dentro de las cuales se encuentra el fracturamiento hidráulico, el cual ha sido instaurado en El Teniente como una actividad rutinaria de los sectores en operación.

El fracturamiento hidráulico consiste en la inyección de fluidos a alta presión en una sección de perforación realizada en el macizo, generando fracturas en él y disminuyendo su calidad para facilitar la explotación, lo cual favorece el control del riesgo sísmico y permite proteger la infraestructura e integridad de los operarios.

Si bien el fracturamiento hidráulico ha dado buenos resultados en la División, su real impacto en los parámetros de planificación y el valor esperado del negocio no han sido estimados. Por lo mismo, en este trabajo se busca cuantificar el potencial aporte de valor de esta técnica de pre-acondicionamiento en los planes mineros de la División, enfocando el estudio en el sector Andes Norte del proyecto Nuevo Nivel Mina. El trabajo es desarrollado a partir la realización de sensibilizaciones de planes mineros y nuevas estrategias de explotación que permitan aprovechar al máximo las ventajas del fracturamiento hidráulico y a su vez detectar los posibles nuevos cuellos de botella que impiden un mayor impacto en la producción.

---

<sup>1</sup> Sitio Web de Minería Chilena: [www.mch.cl](http://www.mch.cl)

## **2.1. Objetivos**

### **2.1.1. Objetivo General**

- Evaluar el impacto económico de incluir en diferentes estrategias de explotación, los efectos del fracturamiento hidráulico en ciertos parámetros de planificación.

### **2.1.2. Objetivos Específicos**

- Estimar el impacto del mejoramiento en la fragmentación generado por el fracturamiento hidráulico, en la disponibilidad de área en quiebre y liberada.
- Elaborar estrategias de explotación considerando las ventajas productivas del fracturamiento hidráulico (modificación de parámetros de planificación) para diferentes escenarios de precio del cobre.
- Generar y evaluar planes mineros en el software CPlanner, a partir de las estrategias de explotación basadas en el fracturamiento hidráulico.
- Detectar factores que impiden una mayor producción (cuellos de botella) en las estrategias plantadas.
- Evaluar y comparar económicamente las estrategias propuestas.

## **2.2. Alcances**

- Los principales efectos del fracturamiento hidráulico en la fragmentación que se consideran para la estimación de la variación en la disponibilidad de área son la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños.
- El sector en estudio es Andes Norte, perteneciente al proyecto Nuevo Nivel Mina de la División El Teniente, Codelco.
- Parámetros de planificación a evaluar asociados a efectos del fracturamiento hidráulico: disponibilidad de área y la altura de liberación.
- Las estrategias de explotación planteadas tienen como base el diseño de fracturamiento hidráulico, malla de extracción y sistema de manejo de materiales utilizado para la planificación original del sector Andes Norte del proyecto Nuevo Nivel Mina de la División El Teniente.
- No se considera la potencial relación del fracturamiento hidráulico con la aparición de agua barro ni la generación de subsidencia.

### 2.3. Motivación del trabajo

Si bien en la División El Teniente el uso de fracturamiento hidráulico se ha justificado por los buenos resultados que ha dado en el control del riesgo sísmico, las estrategias de explotación no han sido adecuadas para aprovechar al máximo las ventajas que entrega el uso de fracturamiento hidráulico en la producción.

En los sectores donde es o ha sido utilizada esta técnica no se han realizado variaciones a los parámetros de planificación utilizados para generar los planes de extracción de cada uno de los proyectos. Por lo tanto, existe un potencial valor agregado del fracturamiento hidráulico que se está ignorando al no ser considerado desde un inicio en la generación de los planes de producción. Es por esto, que es necesario realizar la estimación del valor agregado de esta técnica para conocer su magnitud y saber si es conveniente o no realizar estos cambios a las estrategias tradicionales de explotación aplicadas en la división.

### 3. Antecedentes

#### 3.1. Codelco

La Corporación Nacional del Cobre (Codelco) es una empresa estatal chilena dedicada a la minería, que está compuesta por 7 divisiones: Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales, Salvador, Teniente, Andina y Gabriela Mistral, emplazadas entre la II Región de Antofagasta y la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins, además de su Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile.



Ilustración 1 Operaciones de Codelco (Codelco, 2017)

La producción alcanzada por Codelco el año 2016 fue de 1.707 KTMF de Cobre, entregando excedentes por US\$ 500 millones y aportes al Estado Chileno por US\$ 942 millones. (Codelco, 2017) La producción generada por cada División en el año 2016 es detallada en el Gráfico 1 en donde destaca El Teniente, que fue la que mayor aporte realizó a la producción total de la corporación.

### Producción Codelco años 2015-2016

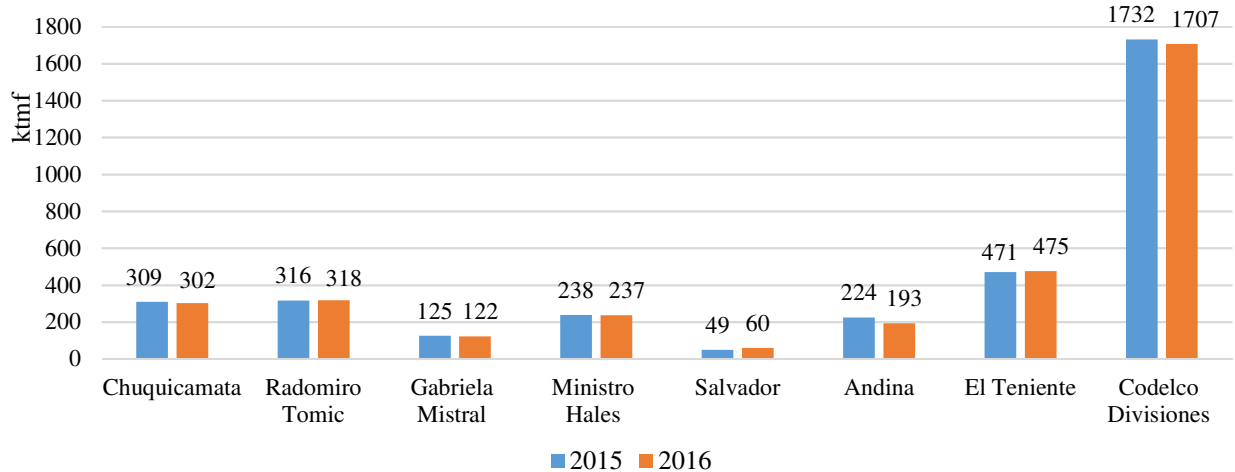


Gráfico 1 Producción de Codelco año 2016 (Codelco, 2017)

### 3.2. División El Teniente

La División El Teniente de Codelco está ubicada en la comuna de Machalí, Rancagua, capital de la VI región del Libertador Bernardo O’Higgins. La mina se encuentra emplazada en la alta Cordillera de los Andes, entre las cotas 2.000 y 2.700 msnm, a una distancia de aproximadamente 44 km al noroeste de la ciudad de Rancagua y a 80 Km al sudeste de Santiago, cuyas coordenadas específicas son 70° 21` de longitud Oeste y 34° 05` de latitud Sur.



Ilustración 2 Ubicación División El Teniente, Codelco

La División está compuesta por la mina, el concentrador (Colón) y la fundición (Caletones), de donde se obtiene su producto principal: ánodos de Cobre y también subproductos como Molibdeno y ácido sulfúrico.

Sus operaciones comenzaron el 29 de enero de 1905, a cargo de Braden Copper Company, empresa creada bajo decreto por el presidente Germán Riesco. La sociedad minera El Teniente fue constituida el 16 de Septiembre de 1966 mediante la ley 16.425 de Chilenización del Cobre.

El Teniente es la mina subterránea de cobre más grande del mundo, generando el año 2016 una producción de 475 KTMF de Cu. Actualmente tiene en operación simultánea siete minas subterráneas, además de una mina a cielo abierto, que entró en funcionamiento a fines del 2012. (BNamericas, 2017).

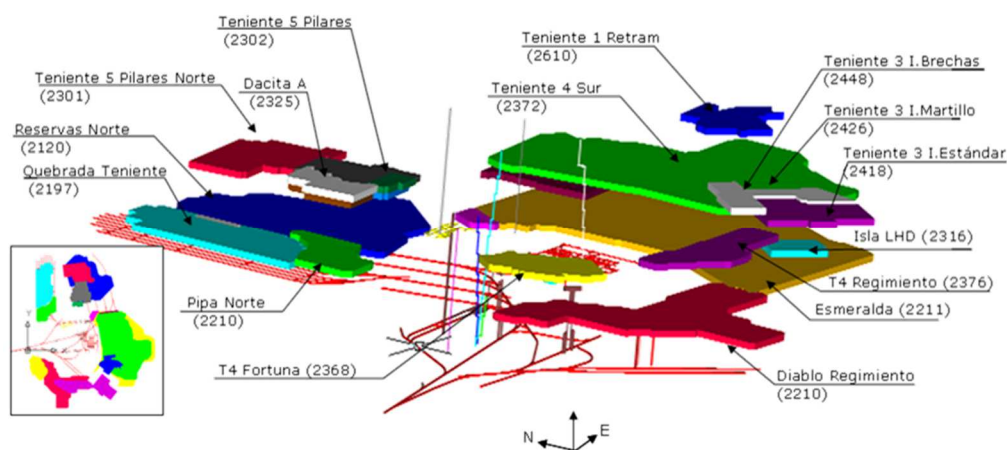


Ilustración 3 Sectores actuales en operación. Fuente: (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2016)

Las principales características de los sectores que actualmente están en operación son resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1 Sectores en explotación DET, (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo DET, 2017)

Sector	Producción Planificada año 2017 (t/d)	Ley Media de Cu (%) año 2017	Año de Termino
Rajo Sur Sewell	17.270	0.64	2021
Reservas Norte	34.285	1.06	2025
Panel Reservas Norte	2.075	0.87	2017
Corbata	931	0.97	2019
Pilar Norte	3.118	1.31	2022
Dacita	8.161	1.49	2026
Diablo Regimiento	21.221	0.87	2025
Pacifico Superior	3.237	0.88	2024
Ext. Hw Pipa Norte	3.275	0.82	2019
Ext. Norte SUAPI Norte	3.635	0.99	2018
Esmeralda Bloque 1	15.619	0.91	2028
Esmeralda Bloque 2	19.788	0.91	2030
Ext. Norte B2 Esmeralda	102	129	2025
Panel 1 Esmeralda	4.039	0.94	2018
Teniente 4 Sur	720	0.89	2017



La operación de los sectores productivos subterráneos es mecanizada, por medio de equipos LHD, sistemas de traspaso vertical (piques) y ferrocarriles que transportan el mineral hacia la planta de chancado-molienda-flotación en Colón (Espíndola, 2013). Por otro lado, el mineral extraído desde el rajo es transportado por medio de camiones y un ferrocarril hacia la planta de chancado-molienda-Sewell. Un esquema del sistema de manejo de materiales utilizado en la mina El Teniente se encuentra en el Anexo A.

La tasa de producción asociada a la División es de 140.000 tpd, con una ley de Cu del 1%. Sus recursos y Reservas se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Recursos y Reservas, División El Teniente (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo DET, 2017)

Recursos Geológicos (L <sub>C</sub> 0,2 %)				Reservas Y Recursos Minerales (LOM)			
Descripción	Mineral (Mt)	Ley Cu (%)	CuF (Mt)	Descripción	Mineral (Mt)	Ley Cu (%)	CuF (Mt)
Medidos	2.956	0,83	24,4	Reservas Probadas	743	1,06	7,9
Indicados	2.701	0,56	15,1	Reservas Probables	811	0,83	6,7
Inferidos	9.585	0,48	46,2	Recursos Minerales	2.215	0,78	17,2
Subtotal	15.242	0,56	85,8	Subtotal	3.770	0,84	31,8
Mineral Quebrado	1.478	0,72	10,7	Mineral Quebrado	482	0,54	2,6
Total	16.716	0,58	96,5	Total	4.252	0,81	34,3

Dentro de la mina existe un sistema de coordenadas específico, que se define como: Norte(N), Sur(S), Este (Fw: Footwall o Patilla) y Oeste (Hw: Head Wall o Cabeza).

### 3.2.1. Tipo de yacimiento

La mina El Teniente posee un yacimiento de tipo pórfido cuprífero, en donde la mineralización se distribuye de forma semi uniforme a través de un enrejado de vetillas (“stockwork”) en una gran masa rocosa.

El yacimiento se compone por un cuerpo central de material estéril, denominado Pipa Braden, con una sección circular y geometría similar a la de un cilindro en posición vertical. Su diámetro varía entre los 1000 m. en su parte superior (cota 2940 msnm) hasta los 600 m. en su parte inferior (cota 1740 msnm). La Pipa Braden se encuentra rodeada por distintos tipos de mineralización, que tienen una extensión radial entre los 400-800 m.

El tipo de roca predominante es Andesita, existiendo además cuerpos asociados a Dacita (Extensión Norte-Sur), Diorita (Lado Sureste) y pequeñas intrusiones de Diorita (Lado Noreste y Este).

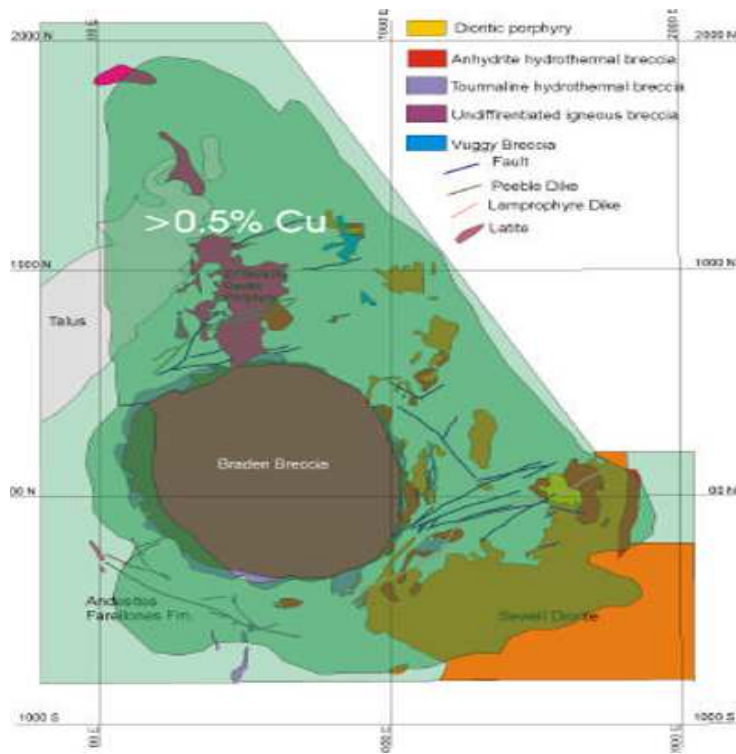


Ilustración 4 Geología del yacimiento El Teniente. (Espíndola, 2013)

### 3.2.2. Litología

La composición principal del yacimiento El Teniente es de roca tipo máfica, las cuales están intruídas por cuerpos félsicos de composición, forma y tamaño variable( Ilustración 5).

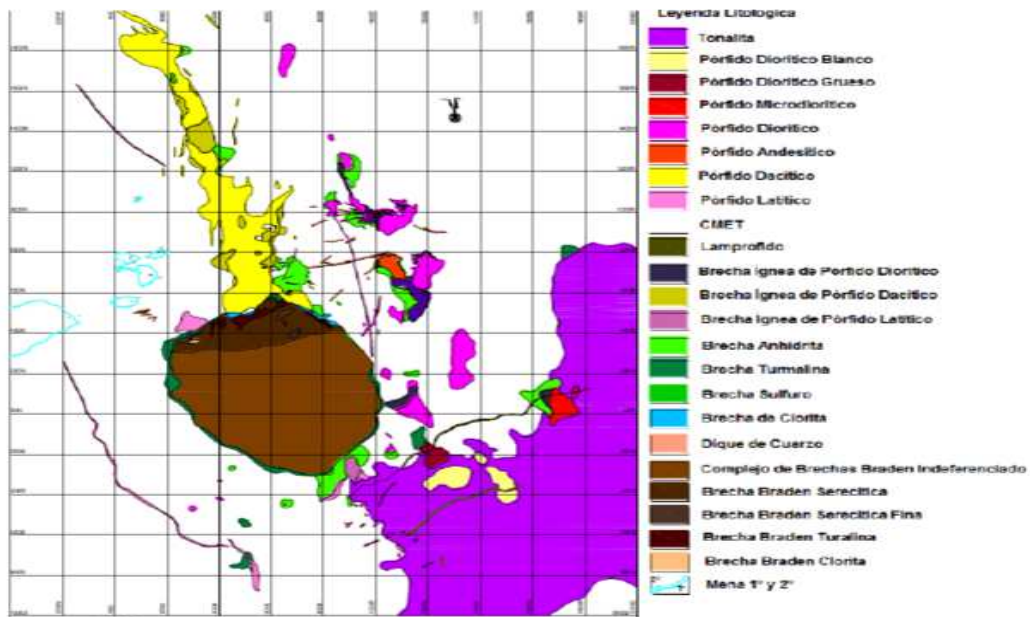


Ilustración 5 Modelo litológico División El Teniente, cota 2102. (Bustamante J. , 2014)

Las principales unidades litológicas son (División El Teniente, 2015):

- 1) **Complejo Máfico El Teniente (CMET):** Posee una extensión vertical de más de 2 km y agrupa a diabasas, gabros y pórfidos basálticos(Andesitas). Son las rocas de mayor distribución en el yacimiento y contienen el 80% de la mineralización.
- 2) **Unidades de Pórfidos Félsicos:** Poseen distintas características mineralógicas y se ubican en diferentes lugares dentro del yacimiento. Los grupos principales son Pórfido Dacítico, Tonalita, Pórfido Diorítico, Pórfido Máfico El Teniente, Pórfido Diorítico variedades, Blanco y grueso, Pórfido Microdiorítico, Pórfidos Latíticos.
- 3) **Unidades de Brechas:** generalmente se encuentran asociadas al CMET y se clasifican en los siguientes grupos: Brechas Ígneas, Brechas de Biotita, Brechas Hidrotermales, Complejo de Brechas Braden.

### 3.2.3. Proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM)

Algunos de los sectores que actualmente están en explotación en la División El Teniente (DET) pronto comenzarán a disminuir su ritmo de producción al estar acercándose al fin de su vida útil.

Ante esto, DET debe considerar la implementación de nuevos proyectos que permitan hacer frente a la baja en la producción prevista para los próximos años. Una opción que está en desarrollo es el proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM), el cual tenía contemplado comenzar con sus operaciones a fines del año 2017, sin embargo, esta fecha se pospuso por problemas de construcción relacionados con las características geomecánicas del macizo rocoso a la cota donde se quiere desarrollar el proyecto (cota 1887).

Las reservas contempladas en el NNM son del orden de 1.681 (Mt), con una ley de Cobre del 0.86% y un ritmo de producción total de 137 (ktpd) (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo DET, 2017).

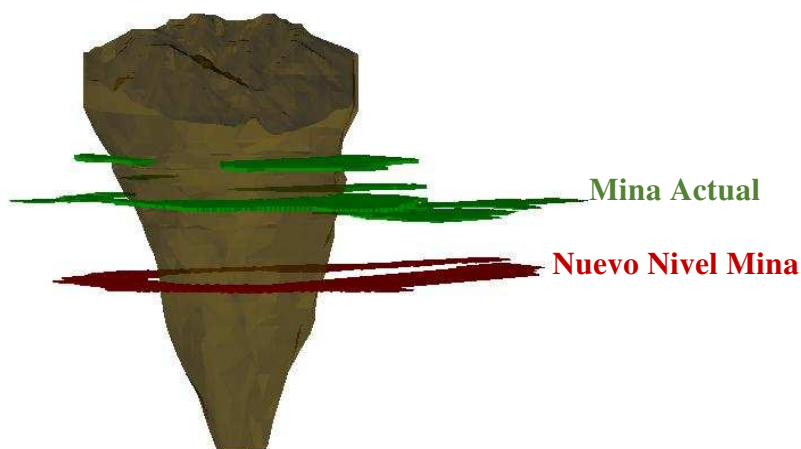


Ilustración 6 Proyecto Nuevo Nivel Mina.

## 4. Revisión Bibliográfica

### 4.1. Mineralización primaria y secundaria

La roca es un sólido formado por una asociación de cristales, granos o más minerales que componen la zona sólida de la Tierra, es decir, el manto y la corteza, y que se forman a partir de diferentes procesos que condicionan su composición, densidad, competencia y textura.

De acuerdo con su ubicación espacial y características geotécnicas, la roca puede clasificarse en primaria o secundaria. La roca primaria se caracteriza por su alta resistencia e impermeabilidad, además de carecer de discontinuidades geológicas abiertas. Si bien puede tener un número considerable de vetillas (stockwork), estas se encuentran completamente sellados por minerales competentes (Codelco, 2010)

En cuanto a la mineralización secundaria, esta se caracteriza por poseer un gran porcentaje de discontinuidades abiertas y con rellenos blandos, convirtiéndolo en un material permeable producto de procesos de lixiviación por aguas supérgenas (Codelco, 2010).

### 4.2. Panel Caving

El Panel Caving es un método de minería subterránea que consiste en la inducción de la socavación de una columna de mineral mediante la realización de un corte basal en el nivel de hundimiento ó UCL (SME, 2001) , allí se realiza la perforación y tronadura del mineral, haciendo que este se hunda y rellene el espacio vacío generado al extraer el mineral de las bateas de producción .La socavación generada , sigue propagándose hacia la parte superior del depósito a medida que se realice la extracción del mineral.

El avance horizontal de la explotación se realiza por medio de paneles a lo largo del cuerpo mineralizado, por lo que las actividades de preparación y producción se pueden realizar de forma simultánea a medida que se recorre el deposito.

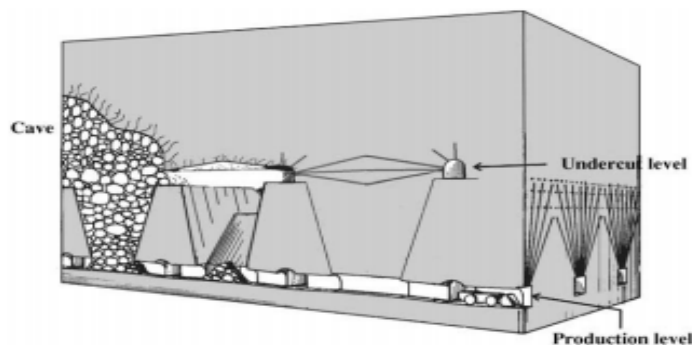


Ilustración 7 Ejemplo método Panel Caving (Trueman et al, 2002)

Para poder llevar a cabo este método de explotación, de deben habilitar una serie de niveles dentro de la mina, entre los cuales se encuentran (Vicepresidencia Corporativa de proyectos, 2013):

- **Nivel de Hundimiento (ó UCL):** Es donde se lleva a cabo la socavación del macizo rocoso, mediante perforación y tronadura.
- **Nivel de Producción:** el mineral es cargado por equipos mecanizados desde el punto de extracción hasta los piques de traspaso o vaciado.
- **Nivel de Traspaso y Chancado:** Se realiza la reducción del tamaño de los fragmentos de mineral por medio de martillos picadores o chancadores, para luego ser enviado al nivel de transporte.
- **Nivel de Transporte:** Se carga y transporta el mineral hacia el exterior de la mina para su posterior procesamiento.
- **Nivel de ventilación:** Mantiene niveles de aire y oxígeno adecuados para el personal que se encuentra realizando funciones dentro de la mina, el funcionamiento de los equipos mecanizados y la ejecución de tronaduras.

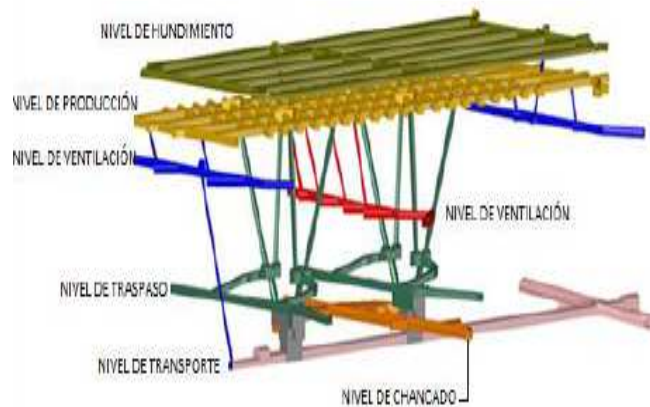


Ilustración 8 Niveles que conforman una operación de Panel Caving. (Vicepresidencia Corporativa de proyectos, 2013)

El método Panel Caving genera una modificación al estado de esfuerzos existentes en el macizo rocoso a medida que avanza el frente de hundimiento, pudiendo afectar las labores realizadas en niveles inferiores y/o delante del frente de hundimiento. Este cambio en el estado de los esfuerzos delimita 3 zonas denominadas: zona de pre-minería, de transición y de relajación.

- (a) **Zona de Pre-Minería:** Zona en donde el estado tensional y la calidad geomecánica del macizo rocoso no está afectada por la minería, ya que se encuentra alejada del área asociada al frente de hundimiento.

- (b) **Zona de Transición o Abutment Stress:** Zona del macizo rocoso afectada por la por la actividad minera, en donde los esfuerzos inducidos generan una rotación del tensor de esfuerzos, y los esfuerzos de corte pueden duplicar su magnitud (Cornejo, 2016).
- (c) **Zona de Relajación:** Zona que se encuentra bajo el área hundida y fuera del efecto provocado por el frente de hundimiento. Esta zona del macizo rocoso tiene las condiciones más favorables para el desarrollo de las operaciones mineras.

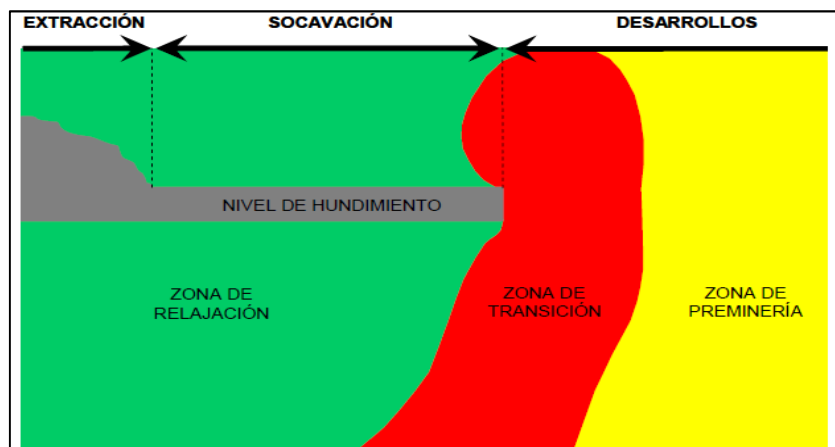


Ilustración 9 Estado del Macizo Rocosó generado por el avance del frente de hundimiento (Cornejo, 2016)

#### 4.2.1. Variantes del Panel Caving

De acuerdo con la secuencia constructiva y de socavación utilizada, el Panel Caving se puede dividir en tres categorías: Panel Caving convencional, previo o avanzado.

##### 4.2.1.1. Panel Caving con hundimiento Convencional (PCC)

En el PCC se requiere el desarrollo y construcción completa de los niveles de producción y hundimiento. La apertura de las bateas se realiza antes del paso de la socavación en el UCL. El desarrollo de las labores en el nivel de producción se realiza por delante del frente de hundimiento, zona en donde el pilar corona entre el UCL y el nivel de producción se ve sometido a una gran concentración de esfuerzos (Abutment stress) (JKMRC, 1994), traduciéndose en mayores costos en fortificación (Trueman et al, 2002).

La principal ventaja de esta variante es que permite comenzar con la producción rápidamente, debido a que los desarrollos horizontales están completamente construidos y la producción puede comenzar tan pronto como se realice la socavación en el nivel de hundimiento (Butcher, 2000)

La secuencia constructiva de este método es (Rojas et al, 2000):

- a. Desarrollo de labores en los niveles de producción y hundimiento.
- b. Apertura de las bateas de extracción.

- c. Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de hundimiento hacia las bateas abiertas.
- d. Inicio de la extracción.

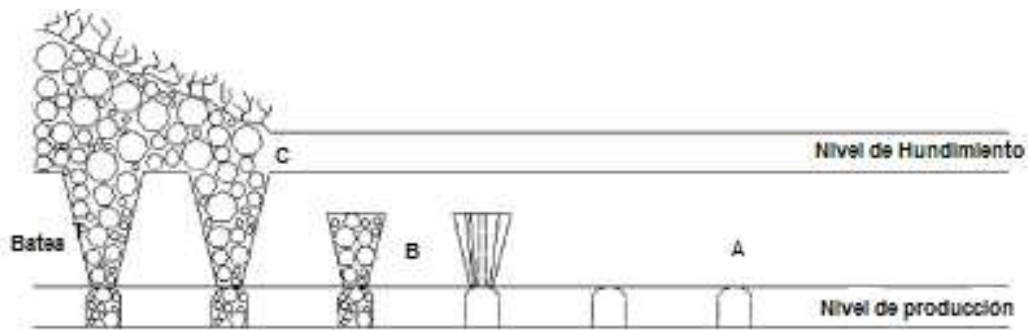


Ilustración 10 Secuencia constructiva PC Hundimiento Convencional (Trueman et al, 2002)

#### 4.2.1.2. Panel Caving con hundimiento Previo (PCP)

En el PCP la socavación en el nivel de hundimiento se realiza por delante de las labores de preparación en el nivel de producción. Esto, reduce el efecto de los esfuerzos sobre las instalaciones del nivel de producción. Se plantea que a una distancia horizontal de seguridad entre las labores del nivel de producción y el frente de hundimiento es igual (o mayor en algunos casos) que la distancia entre el nivel de hundimiento y producción (Trueman et al, 2002).

La secuencia constructiva de este método es (Rojas et al, 2000):

- a. Preparación de las labores en el nivel de hundimiento.
- b. Tronadura de socavación baja en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
- c. Preparación de labores en el nivel de producción.
- d. Apertura de bateas bajo el área socavada.
- e. Inicio de la extracción.

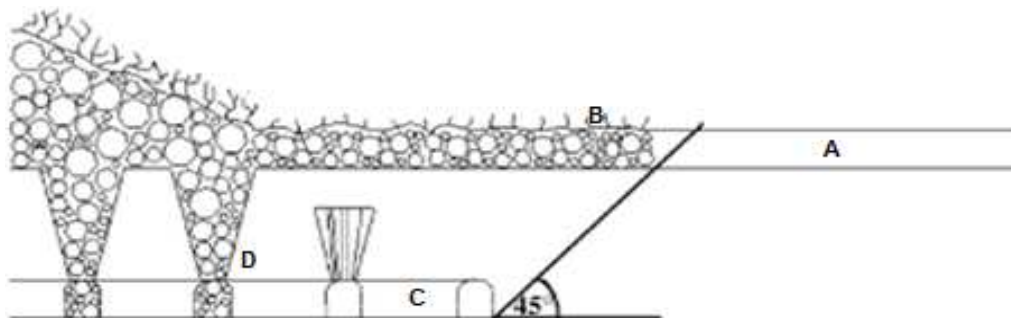


Ilustración 11 Secuencia constructiva PC hundimiento previo (Trueman et al, 2002)

#### 4.2.1.3. Panel Caving con hundimiento Avanzado (PCA)

El PCA es muy similar al de hundimiento previo, con la diferencia de que solo limita la construcción de las bateas y zanjas a la distancia horizontal de seguridad con respecto al frente de hundimiento, por lo que la construcción de calles puede ser adelantada (Brown & Brady, 1985). Las bateas son siempre preparadas detrás del frente de socavación, adheriéndose a la regla de 45° (Trueman et al,2002). Este método de hundimiento permite controlar la concentración de esfuerzos (problema del hundimiento convencional), sin perder flexibilidad.

La secuencia constructiva de este método es (Rojas et al,2000):

- a. Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento y algunas del nivel de producción (en general solo se construyen las calles de producción).
- b. Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
- c. Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector bajo el área socavada.
- d. Se realiza la apertura de bateas.
- e. Se inicia a extracción.

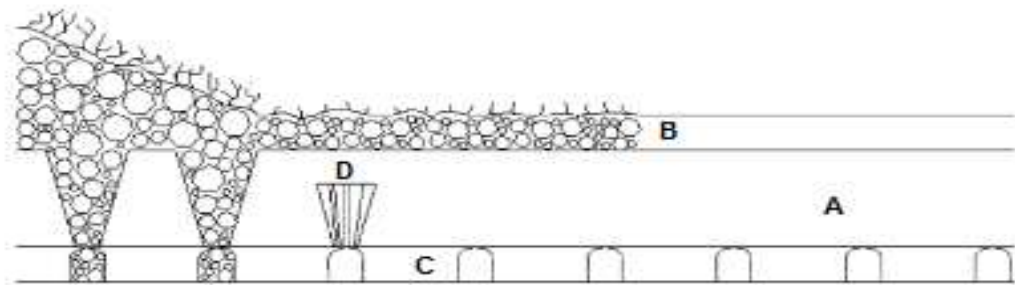


Ilustración 12 Secuencia constructiva PC con hundimiento avanzado (Trueman et al, 2002)

#### 4.3. Planificación Minera

La Planificación hace referencia a una serie de actividades que tienen como fin planear el uso eficiente de los recursos disponibles en el tiempo para cumplir con el propósito y los objetivos estratégicos definidos por la compañía (Bustamante et al, 2010).

En el caso específico minero, la planificación busca transformar recursos minerales en reservas, es decir, comprometer parte de este mineral en un plan minero-metalúrgico (Codelco, 2010). El plan es generado a partir de un análisis de cada aspecto relacionado con la producción de mineral, incluyendo inversiones, tecnologías, manejo de estéril, características de los sistemas productivos, programación de la extracción del mineral y sistema de carguío hacia la planta de procesamiento (Bustamante et al, 2010).



El horizonte de planificación puede variar desde corto, mediano a largo plazo, diferenciándose en el objetivo o meta a conseguir. La planificación de corto plazo hace referencia a los equipos y logística para cumplir con la meta que se encuentra establecida en el presupuesto de operaciones de la mina, la de mediano plazo busca obtener el presupuesto de operaciones (generalmente 1 año), y la de largo plazo tiene como objetivo definir las reservas, tamaño y vida de la mina (Rubio , 2007).

#### 4.3.1. Etapas del Plan Minero

En una explotación mediante el método Panel Caving se diferencian 3 etapas: ramp-up, régimen y ramp-down (Ovalle, 2012).

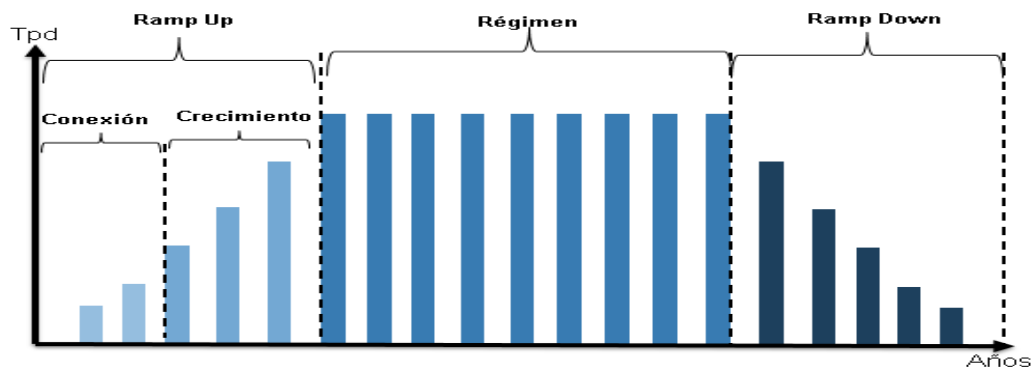


Ilustración 13 Etapas del plan minero. Fuente: (Ovalle, 2012)

La primera etapa es el ramp-up, la cual se subdivide en el proceso de conexión y el crecimiento productivo. Durante el proceso de conexión lo que se busca es hacer contacto con cavidades superiores de sectores que ya fueron explotados (Ilustración 14), y a su vez, se debe cumplir con el área abierta mínima para permitir la ocurrencia del hundimiento definida por el radio hidráulico obtenido para el sector.

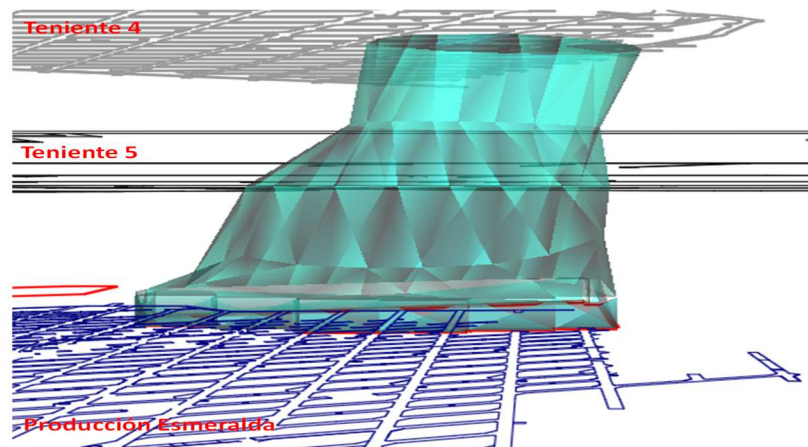


Ilustración 14 Conexión Bloque 2 Esmeralda Sur (Superintendencia de Geomecánica DET, 2014)

En la etapa de crecimiento, el ritmo de producción aumenta a tasas constantes hasta llegar a la capacidad máxima de explotación del yacimiento.

Durante el régimen se mantiene un ritmo de producción establecido por la máxima capacidad de explotación, la cual depende de limitantes técnicas como el diseño, la capacidad del sistema de manejo de materiales, la capacidad del área y restricciones geomecánicas.

En la etapa de ramp-down, la producción comienza a decrecer producto del cese de incorporación de área, y se extiende hasta la culminación de la explotación de todas las reservas contempladas en el plan.

#### **4.3.2. Parámetros y consideraciones para la Planificación minera del método Panel Caving**

Para realizar la planificación minera de un sector a explotar bajo el método Panel Caving, se deben tener en cuenta una serie de parámetros y consideraciones, entre los cuales se encuentran:

##### **a. Lineamientos geomecánicos (Tagle, 2015):**

- i. Punto de inicio de caving: debe asegurar la propagación del hundimiento en altura y permitir obtener utilidades lo más rápido posible, privilegiando las zonas con mayores leyes del elemento de interés.
- ii. Geometría basal de la cavidad: el frente de avance debe ser cóncavo en la dirección del frente de hundimiento (Brown & Brady, 1985).
- iii. Orientación del frente de hundimiento: debe ser lo más perpendicular posible a la dirección del esfuerzo principal mayor y además se debe evitar paralelismo con sistemas estructurales (Brown & Brady, 1985).
- iv. Altura de liberación: Se define como el porcentaje de columna de mineral extraído en el cual se logra el quiebre completo de la roca in-situ. El valor utilizado es el 30% de la altura de la columna de mineral primario (División El Teniente, 2014)
- v. Velocidad de extracción ( $tpd/m^2$ ): el perfil de velocidad de extracción depende de la naturaleza del sector a explotar y de la altura de columna de mineral primario extraída. En el perfil de velocidad de extracción se distinguen 2 etapas ( Ilustración 15), la primera es la etapa en quiebre que se extiende hasta que se extrae el 30% de la altura de mineral primario (Altura de Liberación), las velocidades asociadas parten desde los 0.2-0.3 ( $tpd/m^2$ ) y aumentan a medida que se extrae la columna de mineral , llegando hasta los 0.6-0.7( $tpd/m^2$ ) . La segunda etapa comienza luego de haber alcanzado la altura de liberación, momento en el cual el mineral no posee restricciones geomecánicas asociadas a su extracción por lo que en teoría se podría explotar el macizo rocoso a cualquier velocidad. En el caso de la División El

Teniente de Codelco, la velocidad de extracción liberada se limita a 1 (tpd/m<sup>2</sup>) (División El Teniente, 2014) .

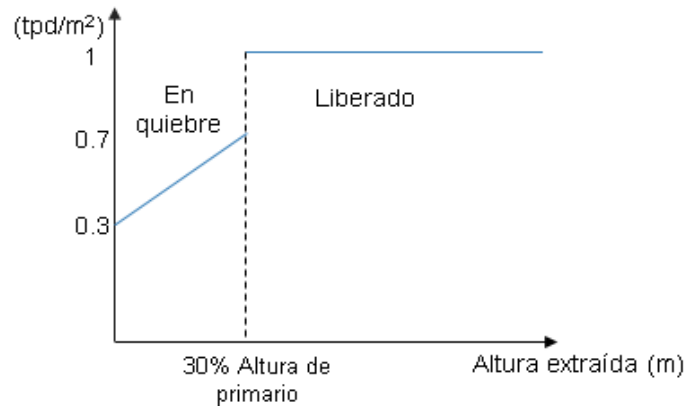


Ilustración 15 Perfil de velocidad de extracción (División El Teniente, 2014)

vi. **Ángulo de extracción:** es el ángulo formado entre la cota del nivel de hundimiento y la línea que une el centro de la próxima batea a ser incorporada (ZI) con la altura extraída en el último punto de extracción en quiebre (UQ) ( Ilustración 16). Sus valores deben mantenerse entre 30 y 45° (División El Teniente, 2014).

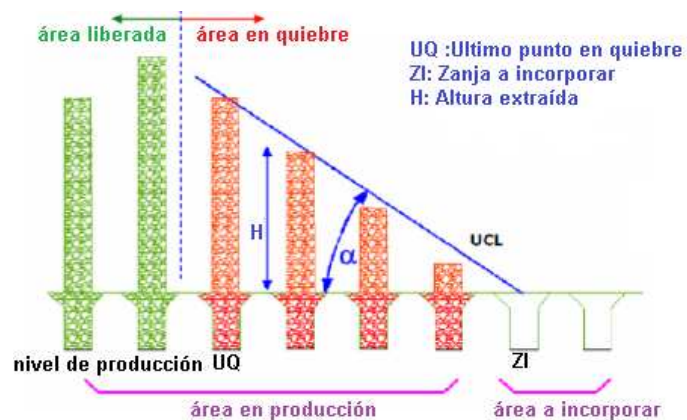


Ilustración 16 ángulo de extracción. Fuente Codelco, División El Teniente 2014.

- vii. Tasas de incorporación de área: Está ligada a la velocidad de extracción, mediante el ángulo de extracción. Generalmente varía en el tiempo dependiendo de los requerimientos productivos de un sector, la geometría y regularidad esperada de la cavidad, además de la capacidad de preparación minera.
- viii. Preparación minera: Consiste en todas las construcciones que deben realizarse antes de la explotación del mineral, tales como galerías, piques, chimeneas, accesos, redes de insumos, etc. Esta debe ser sincronizada con la extracción minera, para asegurar el cumplimiento del plan.

ix. Distancias permisibles: la actividad minera relacionada al método de explotación genera esfuerzos inducidos que se concentran principalmente delante del frente de socavación. Ante esto, es necesario establecer zonas seguras de trabajo para evitar daños a la infraestructura y operarios. Las zonas delimitadas se detallan a continuación:

- D1: Desfase de frente extracción/socavación: 0-70 m.
- D2: Franja de seguridad: 50-70 m.
- D3: Distancia relativa al frente de socavación: 20-40 m.

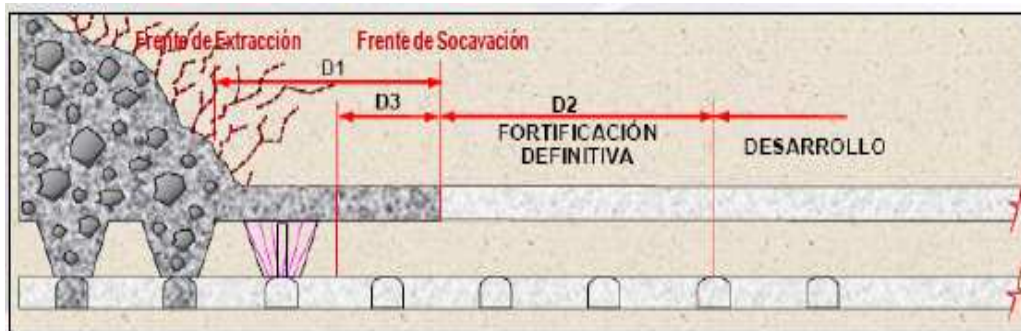


Ilustración 17 Distancias permisibles Panel Caving (Cornejo, 2016)

- Capacidad del sistema de manejo de materiales: condicionado por el tipo y cantidad de equipos utilizados, y el diseño implementado.
- Altura extraíble de mineral: Esta definida por la envolvente económica de los recursos.
- Disponibilidad de área: Se encuentra condicionada por la frecuencia de colgaduras, sobre tamaños, colapsos, estallidos de roca, ocurrencia de agua barro en los puntos de extracción y la capacidad constructiva de la infraestructura requerida.

Los parámetros nombrados anteriormente, limitan la capacidad máxima productiva de un proyecto de caving masivo, la cual en un inicio sólo depende de la altura de columna y la tasa de incorporación de nueva área productiva (Pesce et al, 2004).

#### 4.3.3. Disponibilidad de área

La disponibilidad de área es un parámetro utilizado para la elaboración de los planes mineros que se define como la razón entre el área disponible (área en condiciones de producir) y el área abierta (área incorporada que no ha sido cerrada por agotamiento) (Cerrutti C. , 2008) .

$$\text{Disponibilidad de área: } \frac{\text{Área disponible}}{\text{Área abierta}}$$

#### 4.3.4. Tasa de incorporación de área

La tasa de incorporación de área requerida para mantener los lineamientos geomecánicos dentro de los rangos establecidos por la División El Teniente, puede ser calculada a través de la Ecuación 2 (Contreras et al, 2016), la cual entrega como resultado cada cuantos días se debe incorporar una línea de bateas, lo que a su vez, permite conocer las líneas de bateas a incorporar por año (Ecuación 3).

Ecuación 2 Tiempo requerido para incorporar una línea de bateas. (Contreras et al, 2016)

$$t = \left( \frac{\rho \cdot h_q}{v_f - v_i} \right) \cdot \frac{1}{d_q} \cdot \ln(1 + \tan(\alpha) \cdot d \cdot \left( \frac{v_f - v_i}{h_q \cdot v_i} \right))$$

Ecuación 3 Líneas de bateas a incorporar al año

$$L_B = \frac{360}{t}$$

Donde:

$\rho$  : Densidad del mineral (ton/m<sup>3</sup>)

$h_q$ : Altura de liberación de la columna (m)

$v_i$ : Velocidad inicial de extracción (tpd/m<sup>2</sup>)

$v_f$ : Velocidad final de extracción (tpd/m<sup>2</sup>)

$d_q$ : Disponibilidad del punto en quiebre (%)

$\alpha$ : Ángulo de extracción (°)

$d$ : Distancia lineal dirección de crecimiento del frente al punto de extracción vecino (m)

$L_B$ : Líneas de bateas a incorporar por año

#### 4.3.5. Máxima capacidad productiva (MCP)

La máxima capacidad productiva que puede tener una explotación mediante Block/Panel Caving, está dada por la Ecuación 4 (Ovalle, 2012), la cual toma en consideración características del macizo rocoso, capacidad de constructibilidad y aspectos operacionales.

$$MCP = H \cdot V_p \cdot \rho \cdot R_o$$

Donde:

$H$ : Altura del cuerpo mineralizado (m)

$V_p$ : Velocidad de preparación ( $m^2/año$ )

$\rho$ : densidad de la mineral in-situ ( $ton/m^3$ )

$R_o$ : Recuperación operacional (fracción de 1)

#### 4.4. CPlanner

CPlanner es un software desarrollado por la Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica de la División El Teniente en conjunto con TIMINING, cuyo principal objetivo es la generación de planes mineros mensualizados para el método de explotación Panel Caving, a partir de la recreación de la extracción del mineral dentro de la envolvente de recursos económicos, aplicando restricciones geomecánicas y parámetros de planificación definidos (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos DET, 2014)

CPlanner es un software de fácil uso, ya que solo se deben agregar las entradas y luego ejecutarlo para obtener resultados en formato de hojas de cálculo y visualizaciones, además, permite mantener el control de los algoritmos de planificación con los que se genera el agendamiento y da continuidad a largo plazo de las metodologías de planificación utilizadas en Codelco (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2017)

Los principales inputs de CPlanner son:

- Modelo de bloques diluido
- Archivo Excel Xprod: contiene los parámetros que establecen las restricciones con las que debe cumplir la producción, entre los cuales se encuentran el requerimiento productivo, secuencia miento y asociación a piques de los puntos de extracción, capacidad de calles, piques y sistema de transporte intermedio, características de equipos LHD, variación de velocidad de extracción, disponibilidad de área y altura económica del punto de extracción
- Restricciones geomecánicas: contiene restricciones de la velocidad de extracción en base a la altura de la columna de mineral extraída en cada punto.

#### 4.5. Fragmentación de Roca en operaciones mineras con método de explotación Panel Caving

Durante el proceso de socavación, el mineral presenta tres niveles de fragmentación, denominadas fragmentación: in-situ, primaria y secundaria (Laubscher, 1994).

La fragmentación in-situ corresponde a los bloques que componen el macizo rocoso en su estado natural, sin haber sufrido alteraciones por la actividad minera.

La fragmentación primaria se genera al inicio del hundimiento, y se encuentra arriba de la socavación (cave back) (Ilustración 18), se produce principalmente por la redistribución de los esfuerzos en el macizo rocoso.

En cuanto a la fragmentación secundaria, esta se produce por el desprendimiento de los bloques desde el cave back y la posterior extracción del mineral por los puntos de extracción.

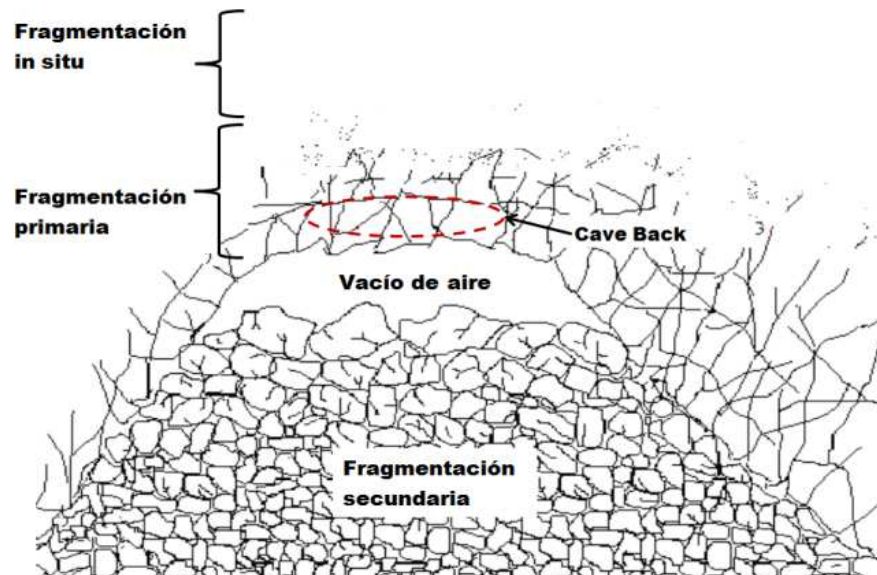


Ilustración 18 Fragmentación in-situ, primaria y secundaria del mineral. (Dorador, 2013)

#### 4.6. Interrupciones del Flujo de mineral

En operaciones mineras bajo el método Panel Caving es común que ocurran interrupciones del flujo de mineral producto de colgaduras y aparición de sobre tamaños, los cuales ocasionan perdidas productivas al inhabilitar temporalmente los puntos de extracción.

Las colgaduras se generan por el encadenamiento estable de fragmentos de roca dentro de la zanja de extracción, las que impiden el flujo normal del mineral (Maass, 2013), por lo que el punto de extracción asociado se encuentra inhabilitado para producción hasta que se realice el proceso de descuelgue de zanjas.

El origen de una colgadura puede ser por el atascamiento de una colpa de gran tamaño ( Ilustración 19.(a)), por el encadenamiento de varias rocas con sobre tamaño (Ilustración 19.(b)), o por la compactación de material fino sobre el cual los fragmentos de mayor tamaño se apoyan (Ilustración 19.(c)) (Ruiz, 2016).

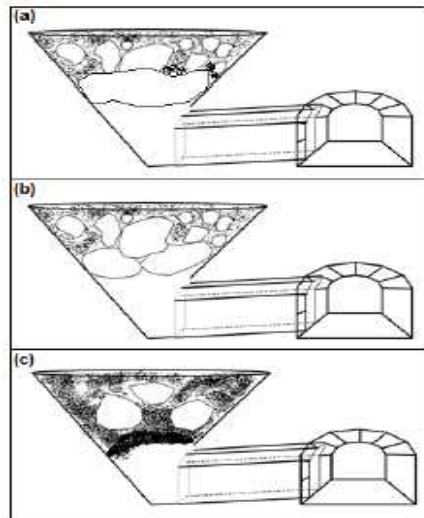


Ilustración 19 Formación de colgadura (Ruiz, 2016)

Por otro lado, los Sobre tamaños son fragmentos de roca de grandes dimensiones, que se originan en los puntos de extracción y que dependiendo de su tamaño puede generar problemas a los equipos de carguío y/o a los sistemas de traspaso de mineral.



Ilustración 20 Reducción de tamaño de colpas. (Ruiz, 2016)

#### 4.7. Métodos de reducción secundaria

La reducción secundaria o cachorreo es la actividad por medio de la cual se reduce de tamaño las colpas de mineral que estén interrumpiendo el flujo de mineral o que no tengan tamaño suficiente para ser trasladadas por los equipos LHD y/o depositadas en los puntos de vaciados(piques).



Para el caso del descuelgue de zanjias, el método más utilizado en Codelco es el descuelgue manual, el cual consiste principalmente en la colocación de explosivos en la roca colgada por medio de palos de coligüe utilizados directamente por los operadores, lo cual los expone a un alto riesgo ya que deben acercarse al punto de extracción, quedando vulnerables ante un eventual colapso del mineral.



Ilustración 21 Descuelgue manual. (Ruiz, 2016)

Para la reducción del tamaño de colpas o sobre tamaños, el método más utilizado es la realización de perforaciones en los fragmentos de mineral por medio de equipos Rikotus o Jumbos cachorreros, para luego ser rellenos con explosivos y tronados.



Ilustración 22 Jumbo Cachorrero.Sandvick

#### **4.8. Pre-acondicionamiento**

Dependiendo de las características del macizo rocoso, este impondrá distintos niveles de dificultad para su explotación. Para hacer frente a esto, se utiliza la técnica del pre-acondicionamiento, por intermedio de la cual se interviene el macizo rocoso en sus condiciones naturales de confinamiento, para debilitarlo y modificar sus características geotécnicas (Codelco, 2010)

Dentro de las técnicas de pre-acondicionamiento, destacan el Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE), el Fracturamiento Hidráulico (FH) y el pre-acondicionamiento mixto, que involucra el uso de FH y DDE a la vez.

#### 4.8.1. Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE)

El Debilitamiento Dinámico de Explosivos (DDE) consiste en la detonación de un pozo de explosivos en un ambiente sin caras libres, generando nuevas fracturas y la apertura de las estructuras presentes naturalmente en el macizo. Esto provoca una disminución en su resistencia al fracturamiento natural, haciéndolo más apto para su explotación por métodos de caving (Cerrutti C. , 2008). La tronadura es controlada por medio de detonadores electrónicos, los cuales permiten reducir los tiempos de retraso a unos pocos milisegundos y generar una tronadura más controlada, evitando daños en las zonas aledañas.

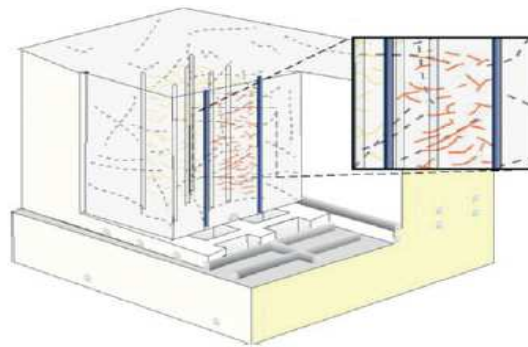


Ilustración 23 Aplicación DDE (Cerrutti C. , 2008)

#### 4.8.2. Fracturamiento Hidráulico (FH)

La técnica del Fracturamiento Hidráulico (FH) consiste en la inducción de fracturas en el macizo rocoso mediante la inyección de un fluido fracturante (agua o mezcla de agua-gel) entre dos packers inflables en una sección aislada de un sondaje (Ilustración 24).



Ilustración 24 Dispositivo de Hidro-fracturamiento (Codelco, 2010)

La presión generada por el fluido induce esfuerzos de tensión a lo largo del eje del sondaje, lo cual eventualmente excederá la resistencia a la tracción de la roca, generando fracturas que pueden alcanzar una extensión entre los 20 y 40 m. (Chacón et al, 2004).

En minería desarrollada con métodos de socavación, el FH es utilizado principalmente para mejorar el hundimiento, aumentar la fragmentación del mineral, incrementar la tasa de propagación del caving y disminuir el riesgo sísmico (Araneda et al, 2007). Su aplicación se realiza a través de una serie de pozos que cubren el volumen de roca de interés, cuyo espaciamiento influirá en el tamaño del eje menor( Ilustración 25) de la colpa formada, y por ende en el tamaño de los fragmentos generados (Superintendencia de Geología DET, 2016). El espaciamiento de las fracturas provocadas por el FH está limitado por la distancia mínima permitida por el sistema integrado de packers (espaciamiento común: 1.5 m) (Barrera et al, 2014).

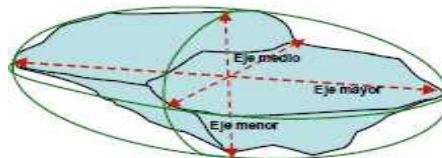


Ilustración 25 Ejes de los fragmentos generados (Superintendencia de Geología DET, 2016)

El campo de esfuerzos existente y las condiciones de la roca natural son los factores que influyen en la orientación de las fracturas generadas por el FH. Estas estructuras se propagan en el plano principal de esfuerzos ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) y se abren en la dirección del esfuerzo mínimo ( $\sigma_3$ ), sin embargo, cuando la diferencia entre el esfuerzo principal mayor y menor es mínima, la orientación de las fracturas es poco predecible y controlable (Codelco, 2010)

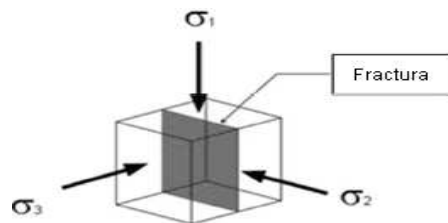


Ilustración 26 Orientación de fracturas dependiendo del estado de esfuerzos existentes. (Molina et al, 2008)

Las presiones involucradas en el proceso del fracturamiento hidráulico fluctúan en el rango de 8 a 36 MPa para el caso de la presión de ruptura y entre 8 a 33 MPa para la de propagación. El tiempo que toma la generación de cada fractura fluctúa en el rango de 15 a 20 min (Codelco, 2010).

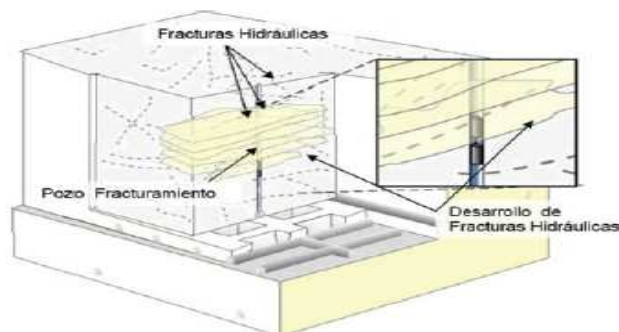


Ilustración 27 FH en minería del Caving (Cerrutti C. , 2008)

El diseño de FH se realiza en base a 3 parámetros: orientación y tamaño de las fracturas a generar, y la distancia crítica de interacción entre ellas cuyos valores dependerán de la intensidad requerida para hacer frente a la calidad del macizo rocoso que se quiere intervenir y del estado de los esfuerzos presentes en la zona.

#### **4.8.2.1. Ventajas de la aplicación de fracturamiento hidráulico**

La generación de nuevas fracturas y la apertura de las estructuras ya existentes en el macizo rocoso hacen que este se debilite mecánicamente, surgiendo potenciales ventajas para la extracción del mineral, tales como:

- Mejoramiento de la fragmentación de los bloques de mineral a extraer (Brzovic et al,2016), evitando la formación de macrobloques que puedan generar cargas puntuales sobre los pilares del nivel de producción, con el riesgo de ocasionar colapsos (Codelco, 2010), Además, genera una curva de fragmentación más acotada en cuanto a la formación de colpas de gran tamaño (Superintendencia de Geología DET, 2016) , permitiendo disminuir la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños(Salazar et al, 2016), lo que a su vez reduce los gastos incurridos en reducción secundaria y aumenta la disponibilidad de área (Cerrutti C. , 2008).
- Mayor vida útil de los puntos de extracción al existir un menor desgaste de la visera (Superintendencia de Geología DET, 2016).
- Bajo riesgo sísmico asociado al FH tras la nula activación de eventos que pudiesen causar algún tipo de daño a la infraestructura (Cerrutti C. , 2009) ,permitiendo la liberación gradual de energía acumulada mediante las fracturas inducidas previamente al macizo rocoso (Belmonte, 2008).
- Mayor quiebre de la columna de roca in situ respecto a la cantidad de material extraído (altura extraída: altura en quiebre: sin FH 1:3 y con FH 1:5), disminuyendo la altura de liberación a un 20%. Las estructuras generadas por el FH tienen una menor a nula resistencia al cizalle y la tracción, lo cual, ante la combinación de los esfuerzos inducidos y la fuerza de gravedad permite debilitar al macizo rocoso, facilitando su fallamiento progresivo y controlado, traduciéndose en una mayor velocidad de propagación del caving (Codelco, 2010) . Esta menor altura de liberación también genera una reducción en el tiempo de conexión (Ilustración 28 ) y un aumento en la velocidad de extracción en quiebre (Ilustración 29).

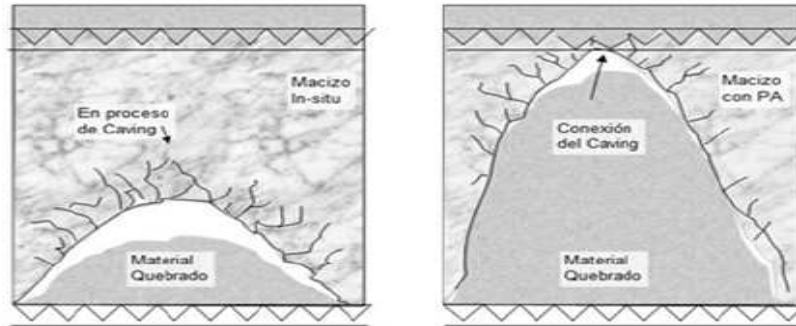


Ilustración 28 Comparación proceso de conexión con y sin Pre-acondicionamiento. (Molina et al, 2008)

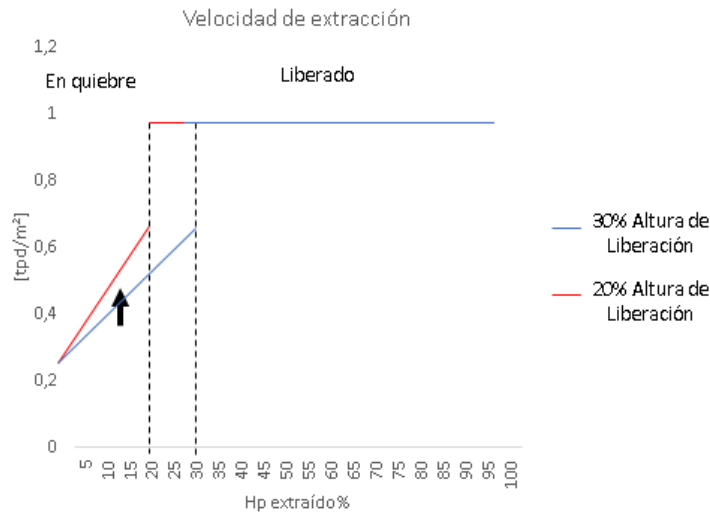


Ilustración 29 Aumento de velocidad de extracción en quiebre por reducción de altura de liberación (Codelco, 2010)

- El macizo rocoso podría colapsar con menor área abierta (Cerrutti C. , 2008).
- Reduce la probabilidad de formar arcos estables, disminuyendo los riesgos de compresiones violentas de aire (air blast) (Codelco, 2010).
- Daría mayor flexibilidad al criterio de orientación del frente ya que permite mitigar el aumento del estado tensional en la frente al incorporar nuevas fracturas, reduciendo así el efecto aislado que pueden causar las estructuras mayores en el frente de hundimiento (Codelco, 2010).
- Efecto en el dimensionamiento de mallas de extracción que permitan asegurar una mayor interactividad del flujo de mineral (Codelco, 2010)
- Las restricciones geomecánicas de extensión del frente de extracción y su forma podrían disminuir con el FH por la atenuación del efecto de abutment stress, y favorecer su constructibilidad (Codelco, 2010).

- Al mejorar la hundibilidad habrá menor posibilidad de introducción lateral de material estéril (menor dilución) (Codelco, 2010).

#### **4.10.2.2 Resultados del Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosó en Divisiones de CODELCO.**

Los principales resultados obtenidos por la implementación del pre-acondicionamiento en algunas divisiones de CODELCO (Molina et al, 2008), son resumidos a continuación:

##### **a) División Andina.**

En el año 1999 se incorpora el pre-acondicionamiento con el fin de intervenir el macizo rocoso antes de su explotación y así facilitar la aplicación de los métodos de hundimiento. Al inicio se consideró la utilización del fracturamiento hidráulico pero las condiciones in-situ del sector de prueba no eran apropiadas para la generación de las fracturas, por lo tanto, se optó por la utilización del Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE).

Los principales resultados obtenidos en esta primera etapa de estudio son:

- 1) Reducción de un 50% en el  $P_{80}$ (mejoramiento de fragmentación)
- 2) Reducción de un 35% del radio hidráulico estimado empíricamente para la generación del caving.

##### **b) División El Salvador.**

En el año 2001, se incorporó el Pre-acondicionamiento a través de la técnica del fracturamiento hidráulico, con el fin de validar el método en la División. En forma paralela, se evaluó el pre-acondicionamiento mixto (DDE+FH) con el fin de reducir la masa total a tronar a módulos.

Los principales resultados obtenidos son:

- 1) A una extracción del 30% del bloque contemplado para el estudio, se reportó una reducción del 45% en el  $P_{80}$ (mejoramiento de fragmentación).
- 2) Disminución de un 51% en la reducción secundaria
- 3) A una altura entre 5 y 12 metros de columna extraída se redujeron los eventos de colgaduras en un 84%, sobre esa altura, no se registraron colgaduras en los bloques pre-acondicionados.
- 4) El daño en los marcos de los puntos de extracción se redujo en un 44%.

##### **c) División El Teniente.**

En la División El Teniente, el uso de FH como método de pre-acondicionamiento comenzó el año 2004, con el fin de validarla en ambientes de altos esfuerzos y con roca con condiciones de alto riesgo sísmico.

El primer estudio fue realizado en el sector Diablo Regimiento, en donde los principales resultados son:

- 1) Disminución del riesgo sísmico al reducir la ocurrencia de eventos de magnitudes relevantes.
- 2) Reducción del tiempo de conexión, ya que esta ocurrió 10 meses antes de lo planificado.

Otros estudios realizados en DET muestran un mejoramiento de la fragmentación del mineral obtenido desde los puntos de extracción (Brzovic et al, 2016) lo que, a su vez, disminuye la frecuencia de colgadas y sobre tamaños, tal cual fue observado de datos históricos del sector RENO (Superintendencia de Geología DET, 2016).

#### **4.8.3. Pre-acondicionamiento mixto (DDE + FH)**

La técnica de pre-acondicionamiento mixto utiliza FH en primera instancia, y luego se aplica DDE, esto se fundamenta en el hecho de que las discontinuidades generadas por el FH sirven de superficies reflectoras para las ondas post-tronadura, concentrando el mayor efecto entre las fracturas hidráulicas (Molina et al, 2008)

#### **4.9. Evaluación económica**

La evaluación económica de un proyecto tiene por objetivo identificar las ventajas y desventajas asociadas a la inversión antes de su implementación.

Para realizar la evaluación, se utilizan diferentes indicadores económicos, que en su conjunto pueden evidenciar la alternativa más acorde al objetivo del inversionista, ya sea, tener un proyecto más robusto, con mayor ganancia, con recuperación de inversión en menor tiempo o en el mejor de los casos cumplir con todo lo anterior.

##### **4.9.1. Indicadores económicos**

Algunos de los indicadores económicos más utilizados son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el payback (Forsyth, 2004) .

##### **4.9.2. Valor Actual Neto (VAN) (CEPAL, 2005)**

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador económico que consiste en actualizar los flujos de caja de un proyecto (ingresos-costos o inversión) mediante la aplicación de una tasa de descuento específica.

Ecuación 5 Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

$F_t$  : Flujos de caja en cada periodo t

$I_0$  : Inversión inicial

$n$ : número de periodos considerados

$k$ : Tasa de descuento (%)

#### **4.9.3. Tasa Interna de Retorno (TIR) (Juhász, 2011)**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de rentabilidad que tiene una inversión, es decir, la tasa de interés máxima a la que es posible endeudarse para financiar el proyecto, sin que genere pérdidas<sup>2</sup>.

El TIR se relaciona con el VAN, ya que esta es la tasa en la cual el Valor Presente Neto se hace cero.

Ecuación 6 Tasa Interna de Retorno

$$TIR = \frac{-I_0 + \sum_{t=1}^n F_t}{\sum_{t=1}^n t \cdot F_t}$$

#### **4.9.4. Payback (Kavous, 2012)**

El payback o tasa de recuperación indica cuanto tiempo toma recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja.

---

<sup>2</sup> [www.buenosnegocios.com](http://www.buenosnegocios.com)



## 5. Metodología

Para estimar el potencial valor agregado de incluir los efectos del fracturamiento hidráulico en ciertos parámetros de planificación, se llevan a cabo dos etapas principales:

**Etapa (1)** Estimación del impacto del fracturamiento hidráulico en la disponibilidad de área, considerando su efecto en la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños en los puntos de extracción.

**Etapa (2)** Evaluación económica de diferentes estrategias de explotación en base a la modificación de dos parámetros de planificación: disponibilidad de área y altura de liberación.

En las dos etapas anteriores se tiene como caso base el plan minero del sector Andes Norte perteneciente al proyecto Nuevo Nivel Mina.

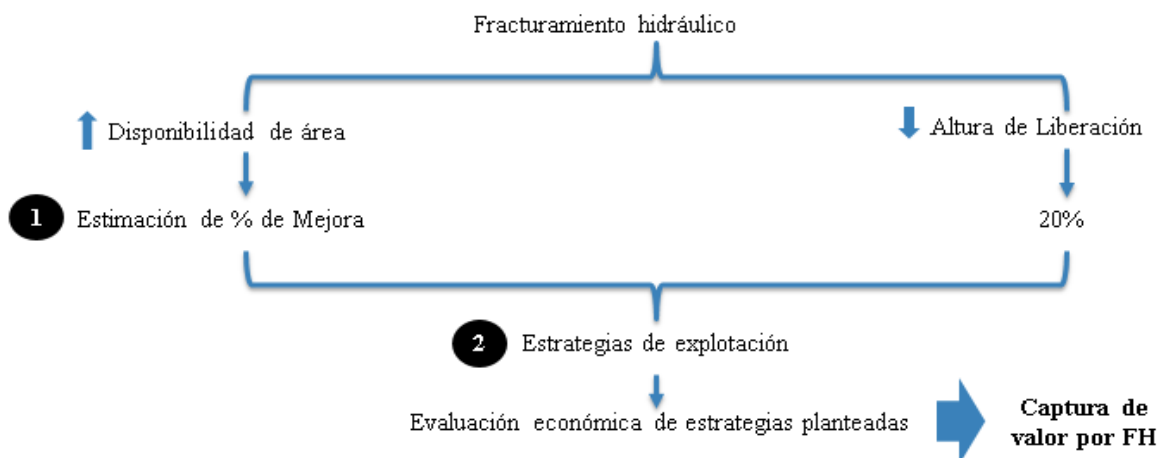


Ilustración 30 Metodología general del trabajo

### **Etapa (1): Estimación del aumento en la disponibilidad de área por efectos del fracturamiento hidráulico.**

Como esta descrito en el capítulo 4.8.2.1, uno de los principales impactos del fracturamiento hidráulico (FH) en el macizo rocoso es el mejoramiento de la fragmentación del mineral obtenido desde los puntos de extracción, lo cual provoca una disminución del área inhabilitada por concepto de colgaduras, sobre tamaños y su posterior reducción secundaria, que se puede expresar como un porcentaje de mejora en la disponibilidad de área.

Como el sector utilizado para el estudio es Andes Norte, el cual aún no inicia producción, se aplican a él datos de la mina Reservas Norte (RENO), la cual actualmente está en explotación y de la que se posee información documentada (Superintendencia de Geología DET, 2016) que permite comparar los efectos con y sin FH en la frecuencia de colgaduras y sobre tamaños en los puntos de extracción, además, se asume que Andes Norte tendrá un escenario similar de problemas generados por la fragmentación del mineral ya que su ubicación será bajo el sector RENO, por lo que la mineralización con la que tratará es semejante.

Para aplicar los datos del Sector RENO a Andes Norte se utiliza el siguiente procedimiento:

- (a) Análisis de datos iniciales: frecuencia de colgaduras y sobre tamaños con y sin FH en función de la altura de mineral extraída en un punto, perteneciente al sector RENO, zonas Patilla (Fw) y Cabeza (Hw).
- (b) Obtención de modelos que representan la información del punto (a).
- (c) Aplicación de información del punto (a) al sector en estudio Andes Norte(AN) relacionando modelos generados en el punto (b) con los resultados obtenidos a partir del programa CPlanner, en donde se detalla la altura extraída en cada punto durante el periodo productivo de AN. (Procedimiento detallado en capítulo 6.2.3)
- (d) Definición de tiempos y criterios para el proceso de reducción secundaria a considerar en el análisis.
- (e) Relacionar información del punto (c) y (d) para estimar el impacto del FH en la disponibilidad de área para sector Andes Norte.

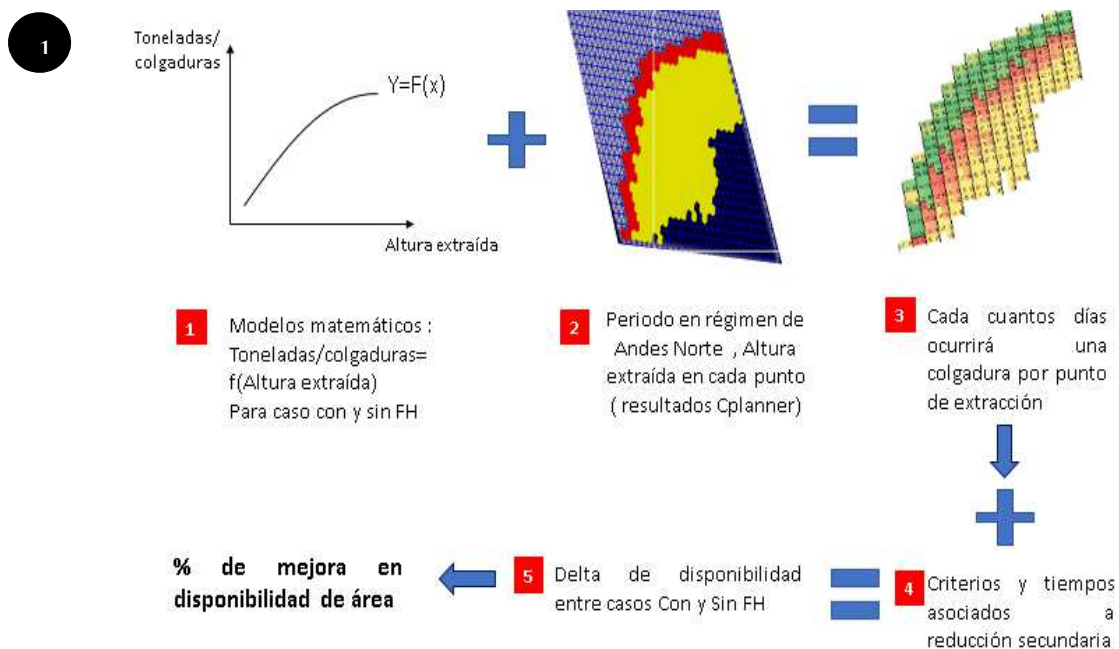


Ilustración 31 Metodología para estimación de impacto del FH en la disponibilidad de área

## **Etapla (2) Evaluación de estrategias de explotación considerando efectos del fracturamiento hidráulico en parámetros de planificación.**

Las estrategias de explotación elaboradas se diferencian con respecto al plan original de Andes Norte en los valores de dos parámetros de planificación: disponibilidad de área y altura de liberación, los cuales son modificados al considerar los efectos del fracturamiento hidráulico en la fragmentación del mineral a extraer.

El aumento en la disponibilidad de área a considerar esta dado por los resultados de la estimación realizada en la etapa (1). En cuanto a la altura de liberación, esta se establece (según revisión bibliográfica) como un 20% de la altura de columna de mineral primario.

El procedimiento empleado es detallado a continuación:

**2.a.** Estimación del efecto en la tasa de incorporación de área al considerar un aumento en la disponibilidad de área y/o disminución de la altura de liberación, con el fin de mantener los parámetros geomecánicos dentro de los rangos establecidos por la División El Teniente (División El Teniente, 2014).

**2.b.** Considerando el efecto en la tasa de incorporación de área estimado en el punto 2.a., se elaboran tres estrategias de explotación en base a diferentes escenarios del precio del cobre, una para precio alto y dos para precio bajo.

- En la estrategia de precio alto el principal objetivo es aumentar la capacidad productiva mediante un incremento de la tasa de incorporación de área, avalada por el aumento en la disponibilidad de área y/o disminución en la altura de liberación (punto 2.a). Al tener una mayor incorporación de área, la inversión preoperacional y gastos de preparación aumentan, existiendo un trade off entre el incremento de los ingresos por la mayor capacidad productiva y el aumento de gastos e inversiones.
- En la estrategia de precio bajo el principal objetivo es disminuir los costos y al mismo tiempo mantener la capacidad de producción del caso base (35.000 tpd). En la primera estrategia a evaluar se mantiene la tasa de incorporación de área del plan original, incluyendo la modificación de los parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación, con el fin de evaluar el valor agregado de estas variaciones al plan minero original.
- En la segunda estrategia en base al precio bajo del cobre, se realiza una disminución de la altura económica (aumento de la ley media de cobre) y un incremento de la velocidad de extracción efectiva (por modificación de la disponibilidad y/o altura de liberación), resultando en un cierre anticipado de los puntos de extracción, es decir, existe menor área abierta liberada que mantener y por ende menores costos de producción. Se evalúa el trade off entre la pérdida de reservas producto de la disminución de la altura económica y los ingresos por el aumento de la ley media de Cu.

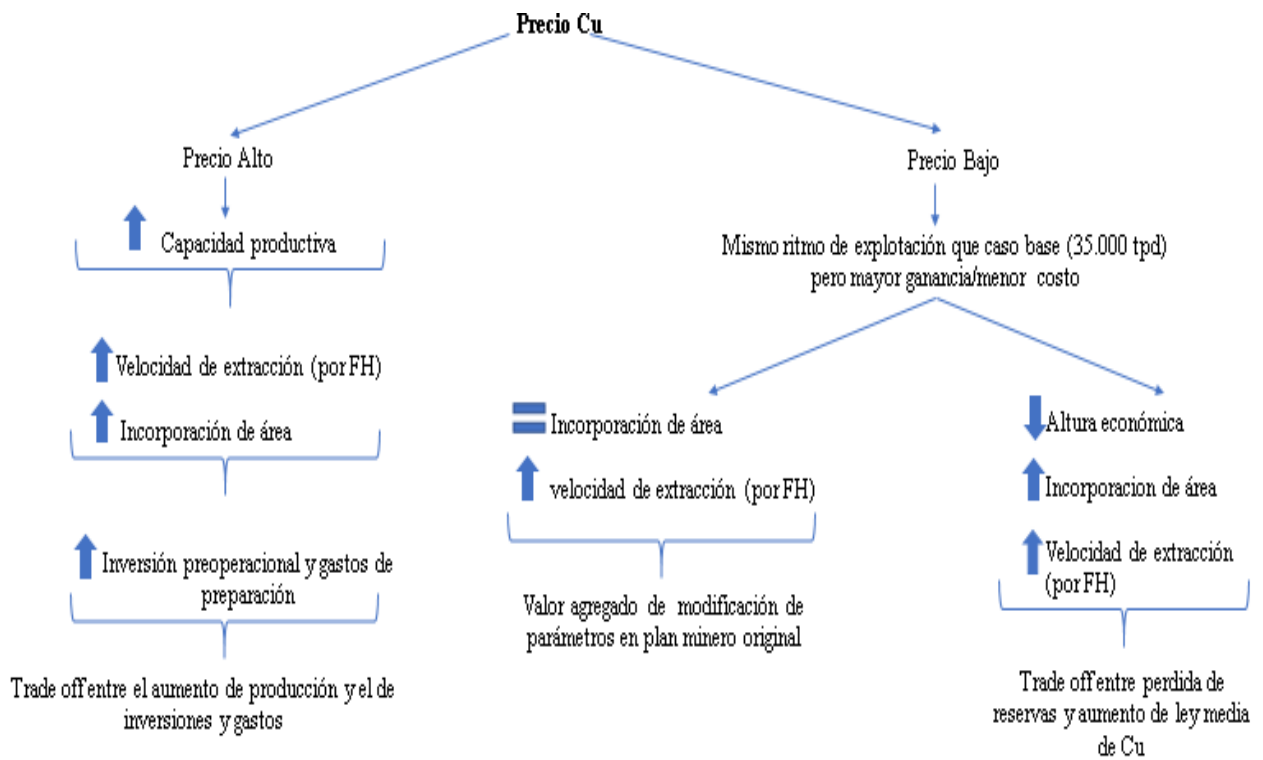


Ilustración 32 Estrategias de explotación a evaluar

**2.c.** Modificación de archivo de entrada de Cplanner del caso base (sector Andes Norte) considerando las estrategias planteadas en el punto 2.b.

**2.d.** Análisis de resultados obtenidos en 2.c., detectando los factores que impiden un mayor impacto en la producción.

**2.e.** Evaluación económica de los resultados obtenidos de Cplanner para las estrategias de explotación y el caso base, utilizando los principales indicadores económicos para la evaluación de proyectos: VAN, TIR y payback.

**2.f.** Comparación de resultados obtenidos en punto 2.e. para establecer agregación de valor de la modificación de los parámetros: disponibilidad de área y/o altura de liberación en un plan minero.

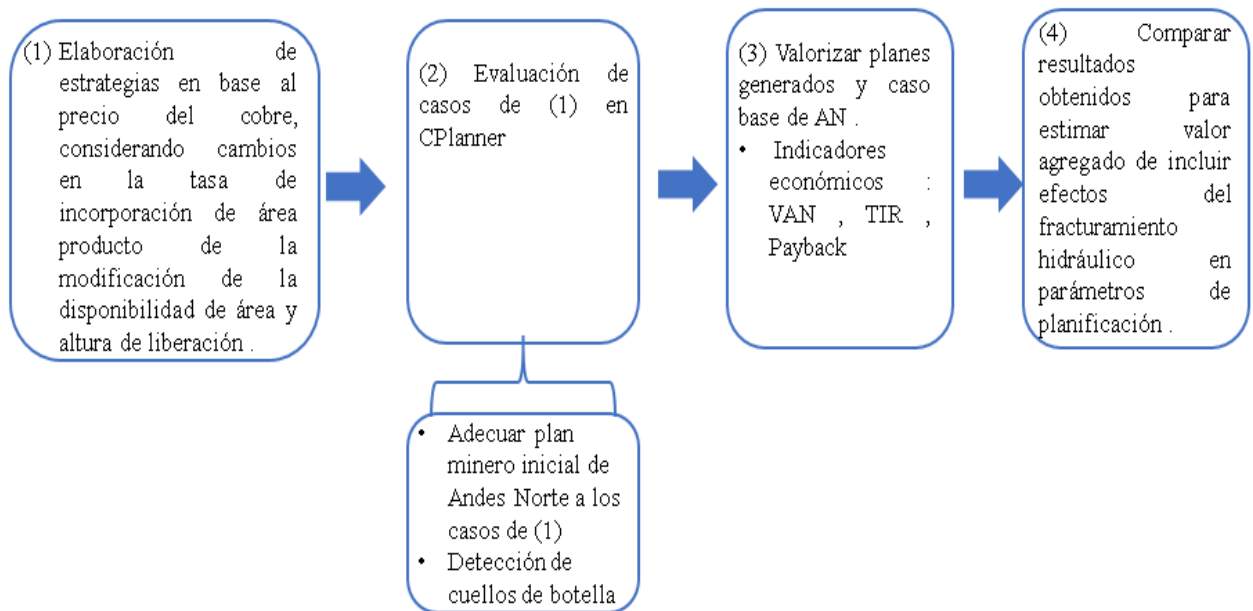


Ilustración 33 Metodología para evaluación de estrategias de explotación en base a beneficios del FH

## 6. Desarrollo

### 6.1. Características del sector en estudio: Andes Norte del NNM

El sector Andes Norte(AN) es uno de los sectores contemplados en el proyecto Nuevo Nivel Mina de la División El Teniente de Codelco, el cual se ubicará en la cota 1887 msnm, cuyas principales características se encuentran detalladas en la Tabla 3.

Tabla 3 Indicadores proyecto AN (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2017)

Reservas (Mt)	Ley Cu (%)	Ley Mo (%)	Área (m <sup>2</sup> )
375.02	1.02	0.026	514.617

Los principales parámetros utilizados para la planificación del sector son (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2017):

- Disponibilidad de área en quiebre 75% y en régimen 85%.
- Avance horizontal máximo: 2 (calle/año) ó 2 (líneas de batea/año)
- Tasa de incorporación máxima de 2 (bateas/frente)
- Criterio de liberación: 30% extracción de altura de primerio o 100 m. (lo que suceda primero)
- Tasas máximas de incorporación de área:
  - Durante periodo de conexión (3 años): 10.000 (m<sup>2</sup> /año)
  - En régimen varía entre 14.000 y 18.000 m<sup>2</sup> (promedio 16.500 m<sup>2</sup>)
- Velocidades de extracción:
  - Etapa de conexión: velocidad diferenciada según 5 zonas (Tabla 4)

Tabla 4 : Velocidad de extracción en etapa de conexión AN.

Etapa	Incorporación [m <sup>2</sup> ]	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
		Primeros 5.000 m <sup>2</sup> [tpd/m <sup>2</sup> ]	[5.000- 9.000 m <sup>2</sup> ] [tpd/m <sup>2</sup> ]	[9.000- 14.000 m <sup>2</sup> ] [tpd/m <sup>2</sup> ]	[14.000- 20.000 m <sup>2</sup> ] [tpd/m <sup>2</sup> ]	[20.000- 25.000 m <sup>2</sup> ] [tpd/m <sup>2</sup> ]
1	<5000	0,10	-	-	-	-
2	5000-9000	0,32	0,20	-	-	-
3	9000-14000	0,40	0,32	0,20	-	-
4	14000-20000	0,40	0,40	0,32	0,20	-
5	20000-25000	0,40	0,40	0,40	0,32	0,20

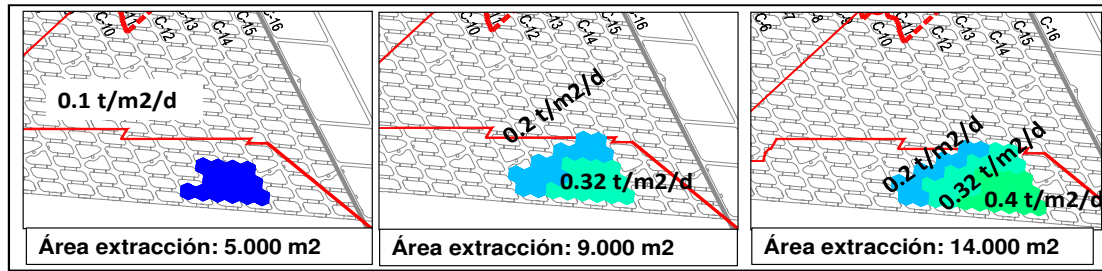


Ilustración 34 Estrategia de conexión AN, NNM.

- Posterior a conexión (25.000 m<sup>2</sup> incorporados y 8000 m<sup>2</sup> liberados): velocidad en quiebre de 0.28 a 0.65 (tpd/m<sup>2</sup>) y 1.0 (tpd/m<sup>2</sup>) liberado.
- Explotación por medio de un frente único, cuyo punto de inicio se encuentra localizado en el extremo Sureste del footprint, avanzando en dirección N50°W.

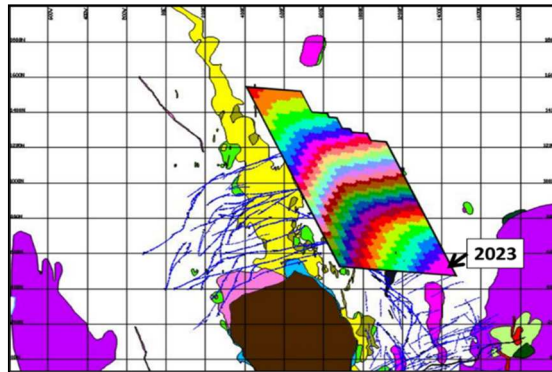


Ilustración 35 Secuencia de incorporación de área en plan minero de AN.

- Columna de mineral primario de 324 (m)
- Altura económica media: 298 (m)
- Tiempo de conexión :36 meses, de los cuales 6 (20 % tiempo de conexión) son de resguardo ante eventos que retrasen el crecimiento.

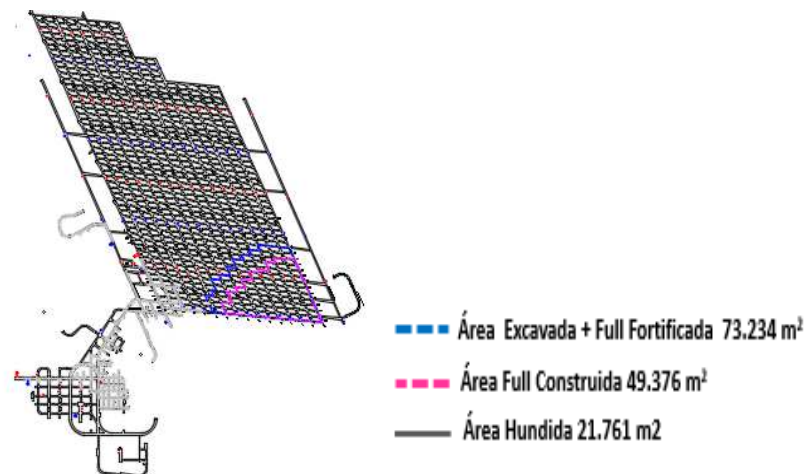


Ilustración 36 Nivel de Producción Andes Norte NNM.

El Sistema de Manejo de Materiales (SMM) de AN contempla un equipo LHD de 10 yd<sup>3</sup> por calle (capacidad de calle : 4.000 tpd) , 2 piques (OP) habilitados por calle en producción ( capacidad de pique: 3.000 tpd) y un Sistema de transporte intermedio (GTI)(Ilustración 37) en el cual operan camiones de 60 toneladas que reciben el mineral desde el nivel de producción a través de los piques ( capacidad GTI: 18.000 tpd). El mineral transportado por los camiones es depositado en una tolva de acopio sobre uno de los tres chancadores que alimentarán a la correa principal que va hacia superficie.

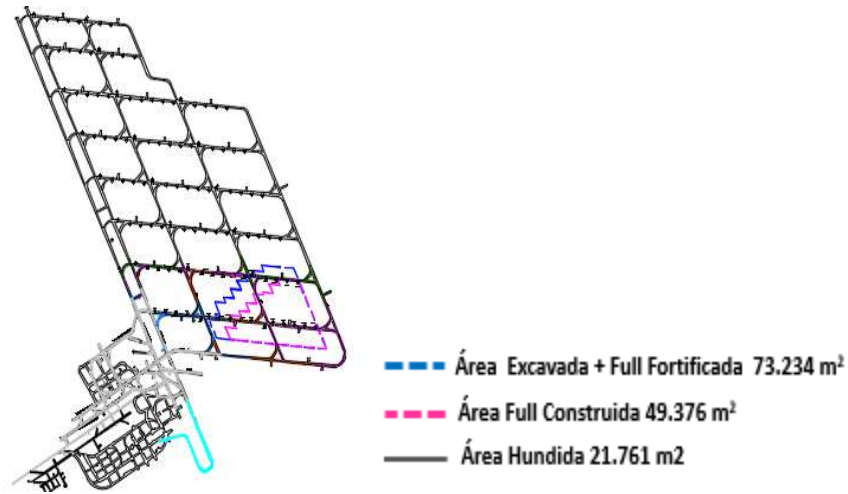


Ilustración 37 Nivel intermedio de Transporte Andes Norte

### 6.1.1. Plan minero de Andes Norte (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2017)

El plan minero de Andes Norte tiene una duración de 37 años, de los cuales 7 años pertenecen al periodo de ramp up que tiene una tasa de crecimiento de 5.000 tpd, 24 años a la etapa de régimen que posee un ritmo de explotación de 35.000 tpd y los 6 restantes pertenecen al periodo de ramp down. La producción y las leyes de cobre y molibdeno por año se encuentran detalladas en el Anexo B.

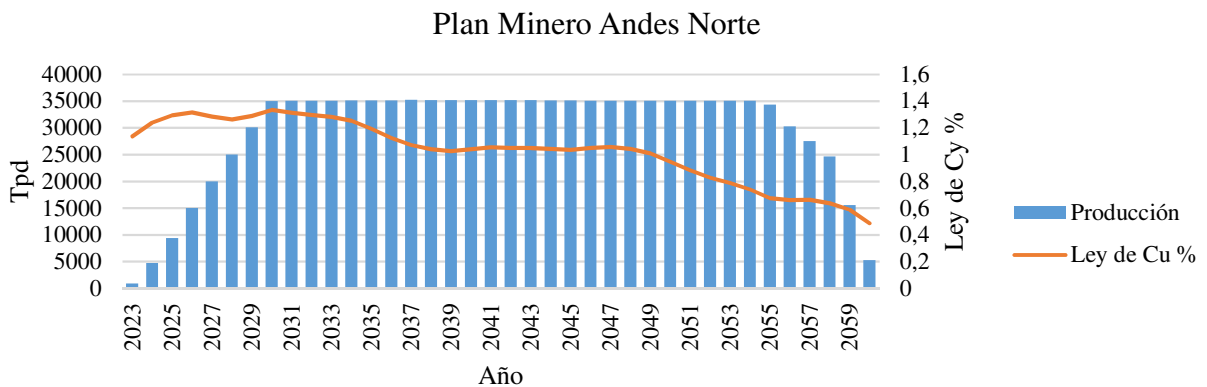


Gráfico 2 Plan minero Andes Norte (Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET, 2017)



## 6.2. Estimación del impacto del FH en la disponibilidad de área

Como fue descrito en la metodología, la estimación del impacto del fracturamiento hidráulico en la disponibilidad de área se divide en 6 partes:

- (a) Análisis de datos iniciales (frecuencia de colgadas y sobre tamaños con y sin fracturamiento hidráulico en sector Reservas Norte, actualmente en producción)
- (b) Modelos de información del punto (a)
- (c) Aplicación de datos iniciales a sector Andes Norte, utilizando modelos del punto(b)
- (d) Descripción del proceso de reducción secundaria
- (e) Análisis de una calle del sector Andes Norte en un mes productivo perteneciente al régimen.
- (f) Estimación del impacto el fracturamiento hidráulico en la disponibilidad de área.

El desarrollo de cada una de estas etapas y sus resultados asociados son detallados a continuación.

### 6.2.1. Análisis de datos iniciales

Para la estimación del cambio en la disponibilidad de área producto del FH se consideran datos del Sector Reservas Norte (RENO) recopilados por la Gerencia Mina de la División El Teniente (Salazar et al, 2016). La información detalla la frecuencia de colgadas y sobre tamaños en función de la altura de mineral extraída en un punto, diferenciada por zona Patilla (Fw) y Cabeza(Hw) (Tabla 5).

Tabla 5 Variación de productividad en función de la altura de columna extraída, sector RENO. Fuente: (Superintendencia de Geología DET, 2015)

Altura de extracción (m)	Productividad (ton/colgadas)				Productividad (ton/sobre tamaños)				
	S/FH		C/FH		C/FH		Altura de extracción (m)	S/FH	
	Hw	Fw	Hw	Fw	Hw	Fw		HW	Fw
20	218	247	1058	1269	501	676	25	197	341
40	336	472	1505	1295	576	544	50	357	360
60	648	830	2085	1215	793	416	75	575	501
80	913	1258	2443	1644	1139	792	100	485	449
100	883	607	2704	2286	1474	852	125	639	577
120	835	461	2880	2032	1459	769	150	462	635
140	958	1273	2761	2049	1285	1324	175	849	1251
160	1315	905	3166	2157	1155	1272	200	550	695
180	1034	746	1849	2676	857	984			
200	1412	882		2203					

La separación entre la información del sector Hw y Fw se justifica por dos razones (Hurtado et al,2007):

- 1) Existe un arreglo estructural de tipo “stockwork” diferente para cada zona. En el caso de la zona Este o Patilla (Fw) corresponde a un arreglo dado por un “Ambiente Hidrotermal “y en la zona Oeste o Cabeza (Hw) es por un “Ambiente Hidrotermal Tardío”.
- 2) El sector Hw ha tenido a lo largo de su historia una gran irregularidad en el tiraje producida principalmente por colapsos, puntos cerrados por agua o barro y extracción irregular o excesiva en algunos puntos. En cambio, el sector Fw tiene un tiraje más bien regular.

Además, las dos zonas presentan roca con distintas características geotécnicas, las cuales son detalladas en la tabla a continuación.

Tabla 6 Sistemas de clasificación Geotécnica Mina RENO, Unidades CMET Fw y Hw. (Hurtado et al, 2007)

Unidad Geotécnica	IRMR <sub>Laubscher &amp; Jakubec 2001</sub>	RMR <sub>Bieniawski 1989</sub>	Q <sub>Barton et al. 1974</sub>	GSI <sub>Hoek, 1994</sub>
CMET Fw	52-58	66-71	4.3	70-80
CMET Hw	53-65	66-75	5.5	75-90

Al comparar la tendencia en la frecuencia de colgaduras para las zonas Fw y Hw con FH (Gráfico 3), se tiene que el sector Hw presenta una clara tendencia a la disminución de la frecuencia de colgaduras a medida que aumenta la altura de mineral extraída (a excepción de lo que ocurre a una altura de extracción mayor a 160 m. en donde aumenta la frecuencia atribuido a una mala calidad de la información registrada en ese tramo). En cambio, en el caso del sector Fw, a pesar que igualmente tiene una tendencia general a la disminución de la frecuencia de colgaduras, esta no es continua ya que fluctúa a medida que aumenta la altura de mineral extraída. El comportamiento descrito anteriormente se replica en el caso con FH de la frecuencia de sobre tamaños, considerando la tendencia de decrecimiento constante del sector Hw hasta los 120 m. (Gráfico 4).

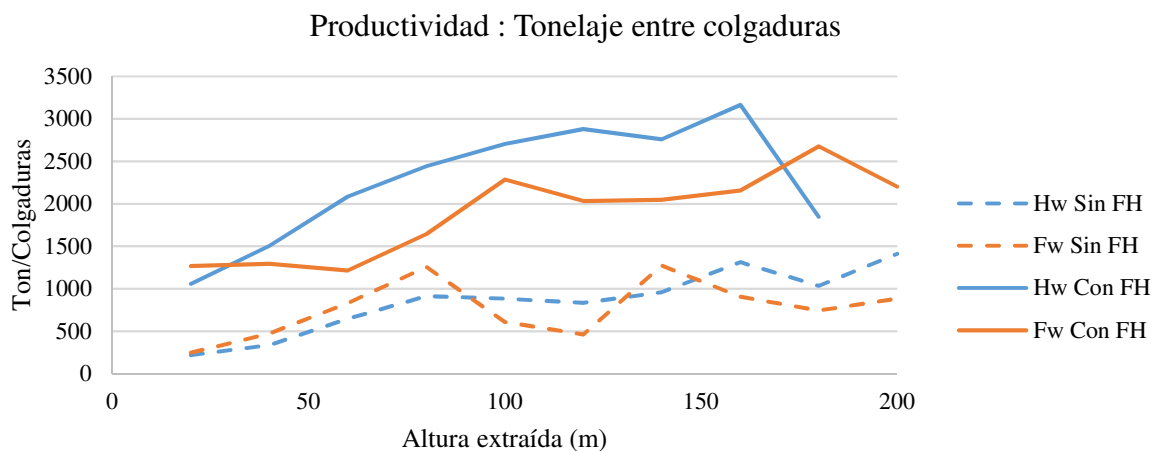


Gráfico 3 Productividad (tonelaje/colgaduras) en función de la altura extraída sector Hw y Fw, con y sin FH

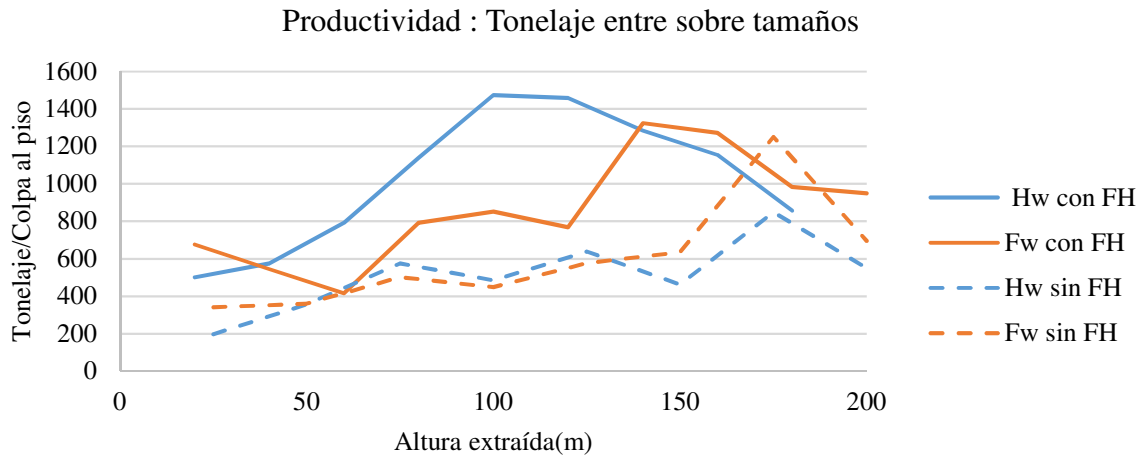


Gráfico 4 Productividad (tonelaje/sobre tamaños) en función de la altura extraída sector Hw y Fw, con y sin FH

Al comparar el efecto del FH en cada sector, se tiene que a pesar de tener frecuencias similares en los casos sin FH para las colgaduras y sobre tamaños en ambos sectores, el efecto generado por el FH es diferente, siendo mayor en el sector Hw.

Las diferencias descritas anteriormente, se pueden asociar al tipo de roca que existe en cada uno de los sectores, en el caso Hw la roca presenta una mayor competencia (andesita) que en sector Fw (brechas) y, por ende, las fracturas generadas por el FH se extienden de forma distinta.

### 6.2.2. Modelos de frecuencia de colgaduras/sobre tamaños en función de la altura de columna extraída

A partir de los datos de la Tabla 5, se generan 8 modelos que relacionan la altura de mineral extraída en un punto con la frecuencia de colgaduras que tendrá, diferenciadas por sector Hw y Fw. Las fórmulas y coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de los modelos se encuentran detallados en la Tabla 7 y Tabla 8.

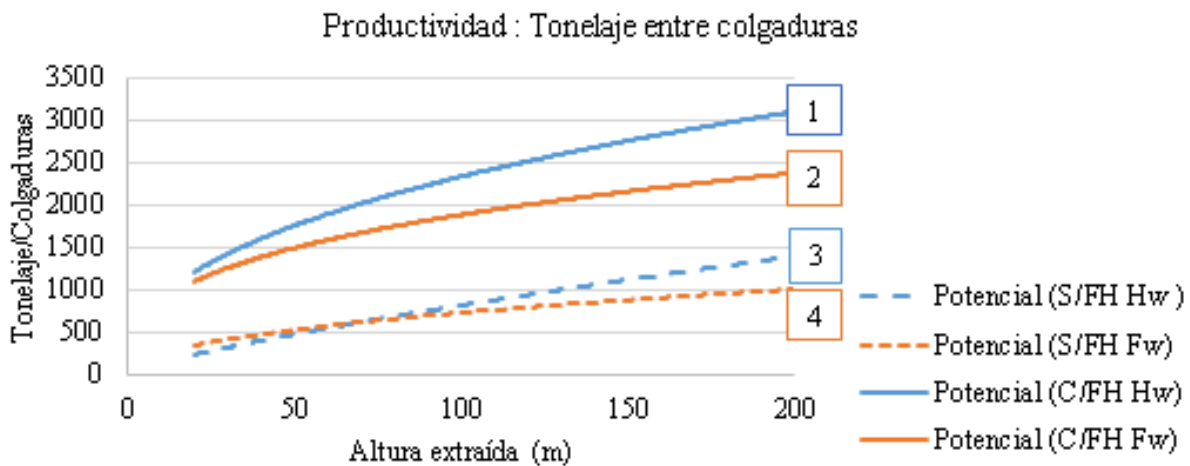


Gráfico 5 Modelos de frecuencia de colgaduras en función de la altura extraída en un punto. (Datos: RENO)

Tabla 7 Modelos de la frecuencia de colgadas, y su coeficiente de correlación respectivo. (Datos: RENO)

Sector	Condición (con o sin FH)	Modelo	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Hw	S/FH (3)	$y = 22.8 \cdot x^{0.8}$	0.9
	C/FH (1)	$y = 354.3 \cdot x^{0.4}$	0.7
Fw	S/FH (4)	$y = 84.9 \cdot x^{0.5}$	0.6
	C/FH (2)	$y = 402.2 \cdot x^{0.3}$	0.8

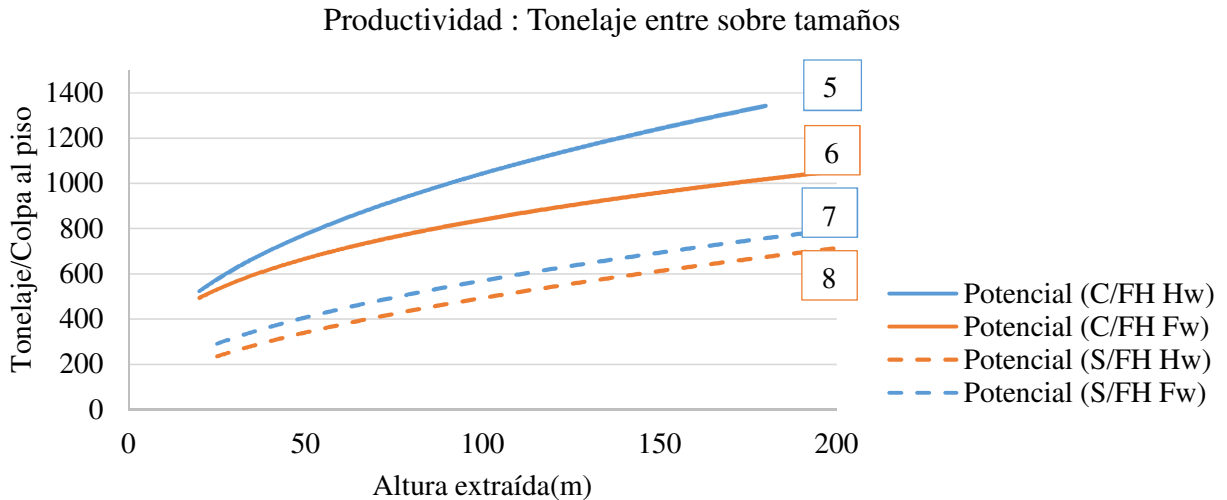


Gráfico 6 Modelos de frecuencia de sobre tamaños en función de la altura extraída en un punto. (datos RENO).

Tabla 8 Modelos de la frecuencia de sobre tamaños, y su coeficiente de correlación respectivo. (Datos: RENO)

Sector	Condición (con o sin FH)	Modelo	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Hw	S/FH (7)	$y = 61.3 \cdot x^{0.5}$	0.7
	C/FH (5)	$y = 144.9 \cdot x^{0.4}$	0.6
Fw	S/FH (8)	$y = 183.6 \cdot x^{0.3}$	0.8
	C/FH (6)	$y = 42.3 \cdot x^{0.5}$	0.6

### 6.2.3. Aplicación de modelos a sector Andes Norte

Los modelos generados en el capítulo 6.2.2 en base a datos del sector RENO, se aplican al sector Andes Norte(AN) que es sector en el que se basa el estudio. Para esto, se consideran datos del programa CPlanner, el cual entrega la altura de mineral extraída en cada punto asociado a un mes de producción de AN. En este caso, se considera el mes 145, el cual pertenece a la etapa de régimen que es en donde se tiene la mayor área abierta. En el mes 145 se tienen 348 puntos abiertos, de los cuales 234 están liberados y 114 en quiebre.

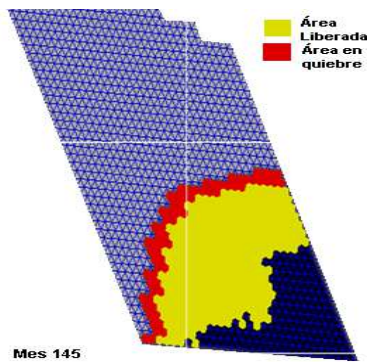


Ilustración 38: Mes productivo 145, sector Andes Norte. Fuente: CPlanner.

Conociendo la altura de columna de primario extraída en cada punto (%Hp), se obtiene, a partir de los modelos generados (Tabla 7 y Tabla 8), la frecuencia de colgaduras/sobre tamaños asociada a cada uno de ellos, la cual se asume constante durante el periodo de evaluación, ya que la diferencia de altura extraída entre un mes y otro varía de 2 a 10 metros, provocando un cambio mínimo en la frecuencia de colgaduras/sobre tamaños asociada.

La frecuencia obtenida se puede representar como baldadas necesarias para que ocurra una colgadura/bolón, para los casos con y sin FH (caso colgaduras, sector Hw: Ilustración 39, sector Fw: Ilustración 40). Estas son calculadas considerando un equipo LHD de capacidad de 10 yd<sup>3</sup> y una densidad del mineral de 2.7 ton/m<sup>3</sup>. Análogamente, las ilustraciones asociadas a la frecuencia de sobre tamaños se encuentran en el Anexo C.

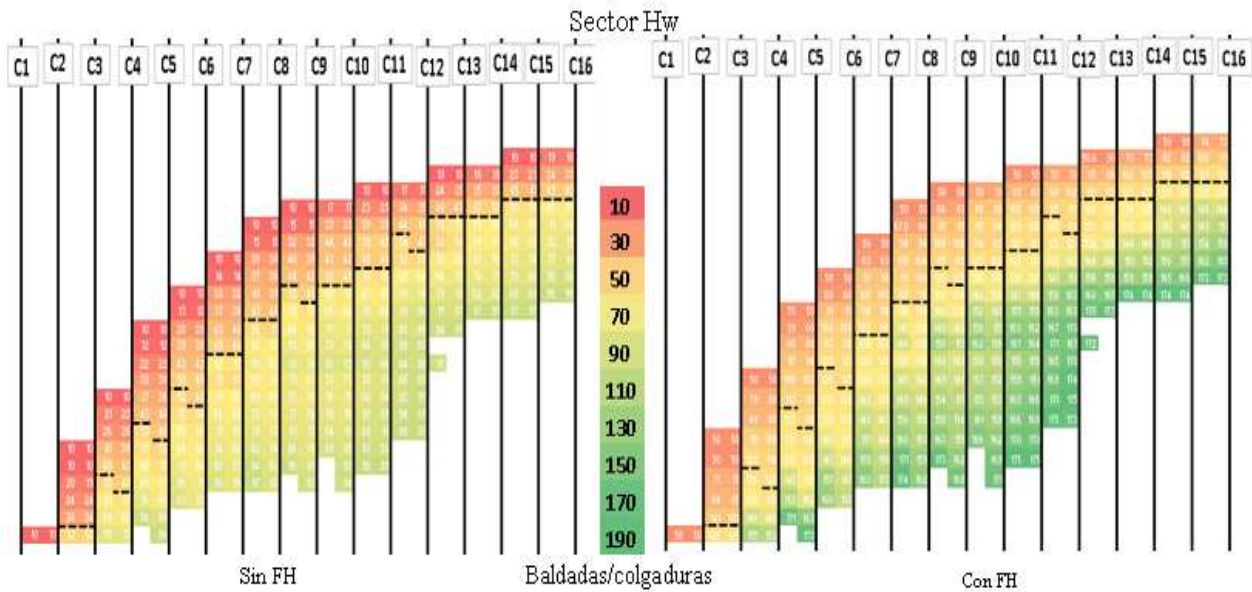


Ilustración 39 Frecuencia de colgaduras en función de las baldadas del equipo LHD. Datos sector Hw

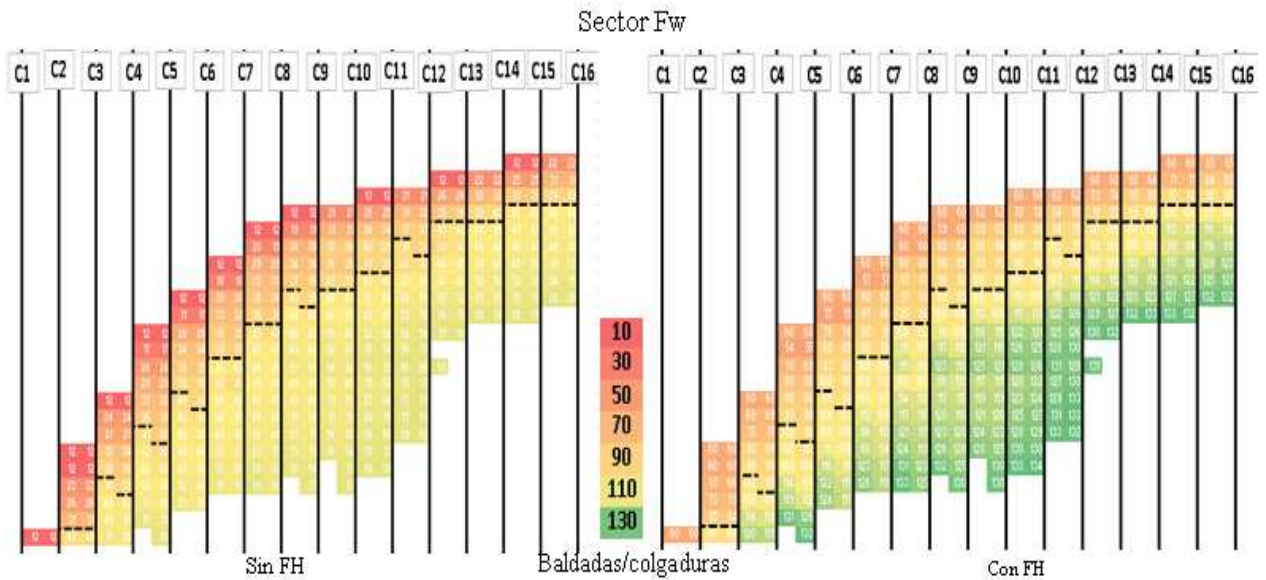


Ilustración 40 Frecuencia de colgaduras en función de las baldadas del equipo LHD. Datos sector Fw

En las ilustraciones anteriores se observa que en la zona en quiebre es donde se requiere una menor extracción de mineral para que ocurra una colgadura. Al considerar los efectos del FH se tiene que tanto en la zona en quiebre como en la liberada aumentan las baldadas requeridas para que ocurra una colgadura. Si esta frecuencia (baldadas/colgadura) se transforma a días necesarios para que ocurra una colgadura a partir de la velocidad de extracción asociada a cada punto según la Ecuación 7, se tiene como resultado para el caso de las colgaduras, lo expuesto en la Ilustración 41 (sector Hw) e Ilustración 42 (sector Fw), y en el caso de los sobre tamaños, las ilustraciones asociadas se encuentran en el Anexo D.

Ecuación 7 Velocidad de extracción en función de la altura de primario extraída

$$V_q = \%Hp * 0.013 + 0.28$$

$$\text{Si } \%Hp > 30\%, \bar{V}_L = 1 \text{ (tpd/m}^2\text{)}$$

Donde:

$V_q$ : Velocidad en punto en quiebre (tpd/m<sup>2</sup>)

$V_L$  Velocidad en punto liberado (tpd/m<sup>2</sup>)

$\% Hp$  : Altura de primario extraída (m)



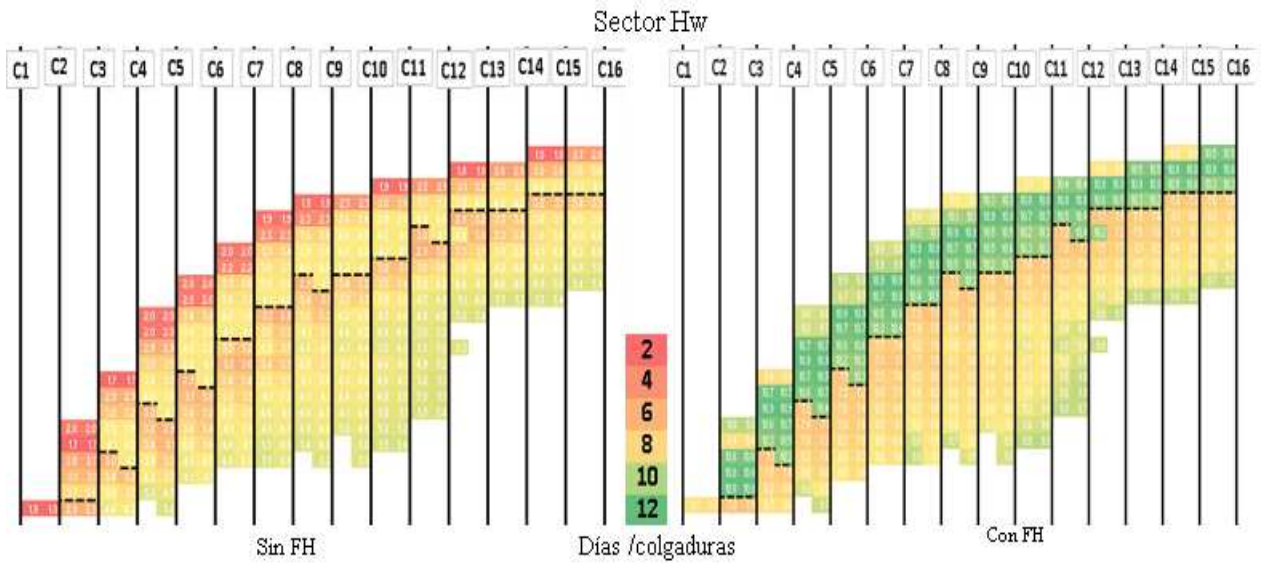


Ilustración 41 Frecuencia de colgaduras en función de los días necesarios para que ocurra una colgadura. Datos sector Hw

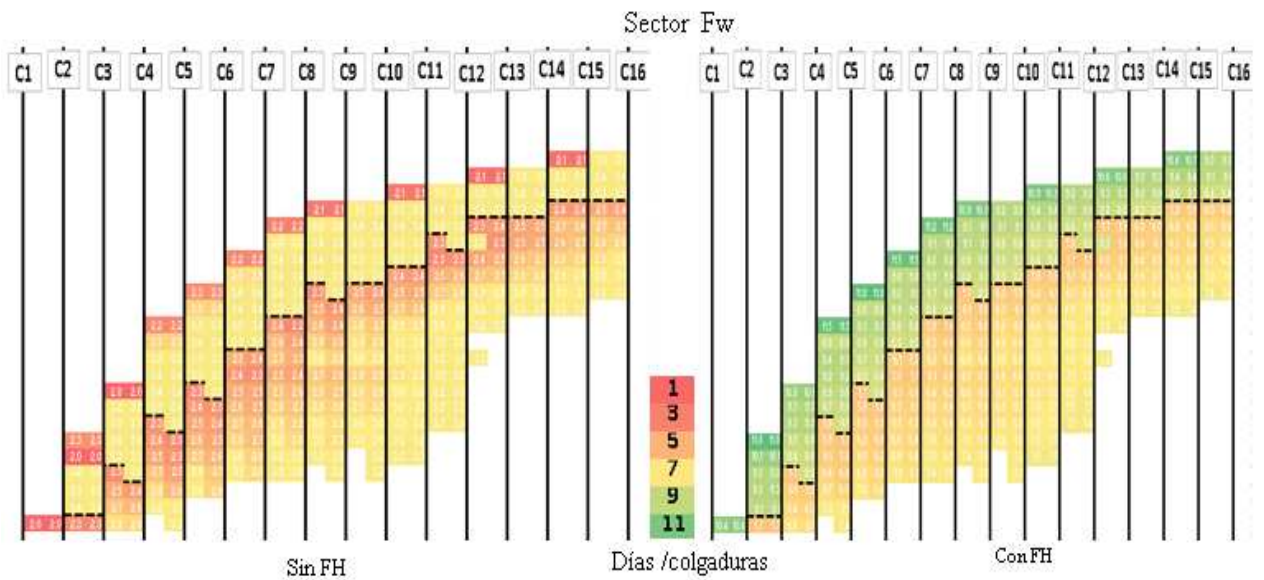


Ilustración 42 Frecuencia de colgaduras en función de los días necesarios para que ocurra una colgadura. Datos sector Fw

Al comparar los resultados obtenidos, se tiene que en el caso sin FH ocurrirán colgaduras más frecuentemente en los puntos ubicados al borde del frente de producción y en los puntos liberados cercanos a la zona en quiebre (zona de transición quiebre-liberado). Sin embargo, al considerar el efecto del FH en el tiempo necesario para que ocurra una colgadura, se tiene que la tendencia anterior se revierte en la zona en quiebre, es decir, se requerirán más días transcurridos para que ocurra una colgadura en comparación con el tiempo necesario en la zona liberada.

Otra diferencia entre los resultados obtenidos al considerar la velocidad de extracción en la frecuencia de colgaduras es lo que ocurre en el caso con FH en el área en quiebre para ambas zonas, en el sector Fw se tiene que los puntos que están en el frente de producción necesitaran más días

transcurridos para que ocurra una colgadura, versus los puntos que se encuentran entre el frente y la zona de transición (quiebre-liberado) que requieren menos tiempo para que ocurra un evento.

En el sector Hw ocurre lo contrario, es decir, los puntos del frente de extracción requieren menor tiempo para que ocurra una colgadura en comparación con los otros puntos que conforman la zona en quiebre.

El comportamiento anterior se debe al factor de mejoramiento en la productividad (frecuencia con FH/ frecuencia sin FH) para el caso de las colgaduras, representado en el Gráfico 7. En el sector Hw este factor decrece a medida que aumentan los metros de columna extraída, pero en el caso del sector Fw la tendencia en el factor de mejoramiento no es tan clara, ya que fluctúa entre los valores 1 y 5 provocando el cambio de tendencia entre el frente de producción y la zona de transición de quiebre a liberado descrito en los párrafos anteriores.

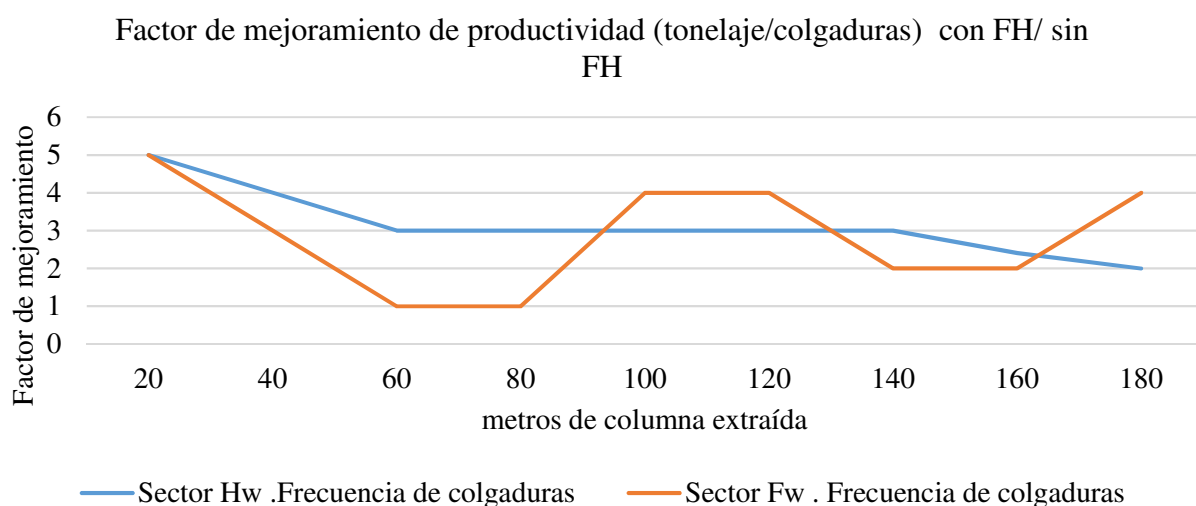


Gráfico 7 Factor de mejoramiento de productividad (tonelaje/colgaduras) con y sin FH

#### 6.2.4. Proceso y tiempos asociados a la reducción secundaria

En el momento que ocurre una colgadura o aparece un bolón en un punto de extracción, se realizan estrategias operacionales diferentes para disminuir su impacto en la producción.

En el caso de las colgaduras, un punto al ser declarado en ese estado es inhabilitado para producción, y sólo es descolgado en el momento que la calle a la cual está asociado tenga un 40% de puntos en esa misma condición (Superintendencia de Geología DET, 2017). Al cumplirse este requerimiento la calle completa es inhabilitada y se comienza con el proceso de descuelgue y reducción secundaria de los puntos involucrados.

El tratamiento que se le da a los sobre tamaños es diferente al de las colgaduras, ya que su aparición no siempre genera la inhabilitación del punto de extracción, esto depende del tamaño del fragmento de mineral y si presenta problemas para ser cargado por el LHD o transportado por los sistemas de traspaso vertical. Es común que se practique el “pasilleo” de sobre tamaños, es decir, en el momento que uno de estos aparece en un punto de extracción, es arrastrado por el LHD hasta un costado de



la zanja o a puntos de extracción que se encuentren colgados y se continua con la extracción normal del mineral desde el punto involucrado, luego , su reducción secundaria se realiza a la par con el proceso de descuelgue de zanjas .Sin embargo , existen momentos en los que no hay más espacio para acumular estos sobre tamaños por lo que en ese instante se requiere la entrada de la cuadrilla de cachorro para la realización de la reducción secundaria , inhabilitando la calle para producción.

En cuanto al tiempo utilizado en la reducción secundaria, se consideran datos recolectados del sector RENO-Dacita (Superintendencia de Geología DET, 2017) , en los cuales , el tiempo empleado en el proceso de descuelgue de 11 puntos en una calle es de 77 minutos y se desglosa según lo detallado en la Tabla 9.

Tabla 9 Tiempo de reducción secundaria sector Dacita (Superintendencia de Geología DET, 2017)

Labor	Tiempo (min)
Carguío de zanjas(a)	55.8
Tte. 7(b)	8.5
Entrega-quemada(c)	12.97
<b>Total, cachorro</b>	<b>77.27</b>

(a)Carguío de zanjas: tiempo desde la aislación de la calle a trabajar hasta finalizado el carguío de las zanjas y pedida de quemada al coordinador del nivel.

(b)Tiempo Tte. 7: Tiempo entre la solicitud de la quemada hasta que nivel Teniente 7 se encuentre aislado de acuerdo con la ubicación del cachorro.

(c)Tiempo entrega quemada: tiempo entre la confirmación de la aislación de Tte. 7 hasta la realización de la quemada.

A los 77 minutos anteriores, se le agregan 30 minutos asociados a la ventilación post tronadura. Es decir, el tiempo total asociado al proceso de reducción secundaria es de 107 minutos = 0.1 días

### 6.2.5. Análisis por calle

La calle seleccionada para el análisis es la que posee más puntos de extracción habilitados en el mes 145 de producción de Andes Norte, es decir, la calle 10(Ilustración 43) en esta hay 34 puntos abiertos, de los cuales 10 se encuentran en la zona en quiebre y 24 en la liberada.

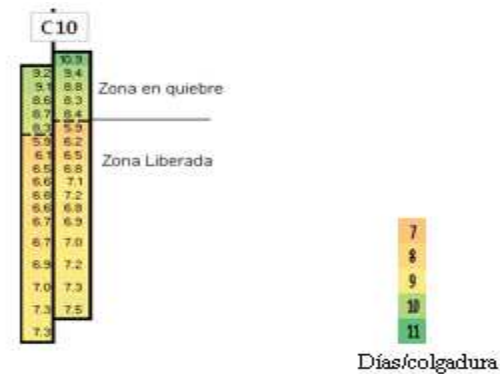


Ilustración 43Calle 10 (días/colgadura, Datos sector Hw C/FH)

Como el impacto que tiene una colgadura y/o un sobre tamaño en el área disponible es diferente, se evalúan 2 casos:

- (1) Impacto de la frecuencia de colgaduras en la disponibilidad de área, considerando que los sobre tamaños no generan inhabilitación de puntos de extracción
- (2) Con el fin de agregar el efecto del fracturamiento hidráulico en los sobre tamaños para el cálculo de la disponibilidad de área, se escalan las curvas de los sobre tamaños( Gráfico 4) en un factor 5 para hacerlas equivalentes al de las colgaduras, es decir, la aparición de 5 sobre tamaños se considera como 1 colgadura.

### Consideraciones:

- (a) El tiempo que un punto permanece colgado cuenta desde que este se cuelga hasta que termina el cachorreo de la calle completa.
- (b) El tiempo empleado en el proceso de cachorreo se pondera por la cantidad de puntos que se encuentren colgados (40% o más de los puntos de la calle), según la siguiente relación, obtenida a partir de los tiempos medidos en el sector RENO-Dacita (Tabla 9):

Tiempo cachorreo para 11 puntos = 0.1 días

Tiempo cachorreo para X puntos =  $X \cdot 0.01$  días

- (c) Cada vez que ocurre un proceso de cachorreo por calle, el día en que ocurrirá una nueva colgadura en cada punto de extracción se actualiza y se vuelve a calcular el momento en que 40% o más puntos estén colgados para inhabilitar nuevamente la calle y comenzar la reducción secundaria.
- (d) Para el cálculo de la disponibilidad de área en cada caso (con y sin FH) se utiliza la Ecuación 8.

$$D_{Q,L} = 100 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N \left( (A \cdot (T_{CA} + T_{CB} + T_{CC} + \dots + T_{CZ})) + A_{Q,L} \cdot T_{cachorro,i} \right)}{A_{Q,L} \cdot T_T} \right) \cdot 100 \quad \%$$

Ecuación 8 : Cálculo de disponibilidad de área en quiebre/ liberada

Donde:

A: área asociada a un punto de extracción (300 m<sup>2</sup>)

A<sub>Q,L</sub>: área total asociada a la zona en quiebre/liberado de la calle (quiebre :3.000 m<sup>2</sup>, liberada :7.200 m<sup>2</sup>)

T<sub>T</sub>: Tiempo total de análisis (días)

T<sub>cachorro,i</sub>: Tiempo de cachorreo de la calle completa en el día i (función del número de puntos colgados)

T<sub>CA</sub>: Tiempo entre que el punto A se cuelga hasta que comienza el cachorreo de la calle completa el día i.

(e) El tiempo de análisis considerado para el cálculo de la disponibilidad de área depende de cada caso, y se define como el instante en que la desviación estándar de los valores obtenidos sea cero.

### 6.2.6. Impacto del FH en la disponibilidad de área.

El aumento en la disponibilidad de área en quiebre producto del fracturamiento hidráulico, varía entre un 8-10% para los datos del sector Hw, y entre un 6-8% para los del sector Fw. Este aumento de disponibilidad de área permitirá mantener un mayor control y regularidad de los principales lineamientos geomecánicos ya que gran parte de ellos dependen de lo que ocurra en el área en quiebre.

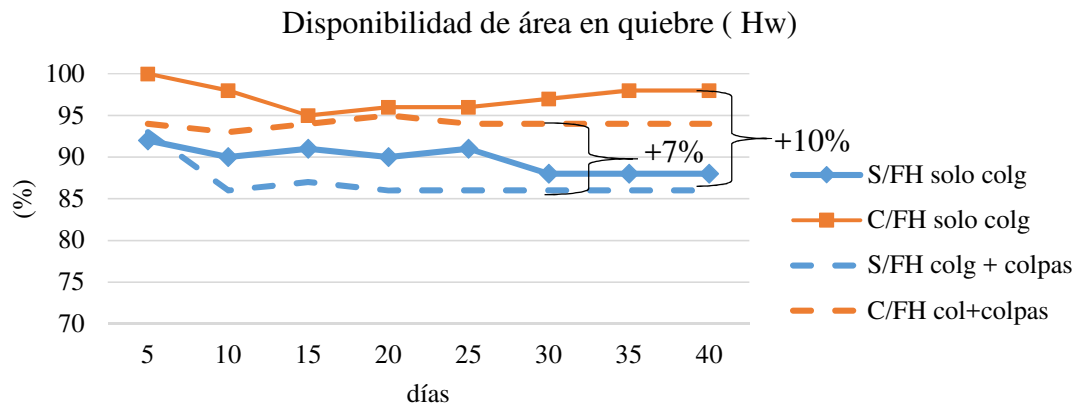


Gráfico 8 Estimación de aumento en disponibilidad de área en quiebre (datos zona Hw)

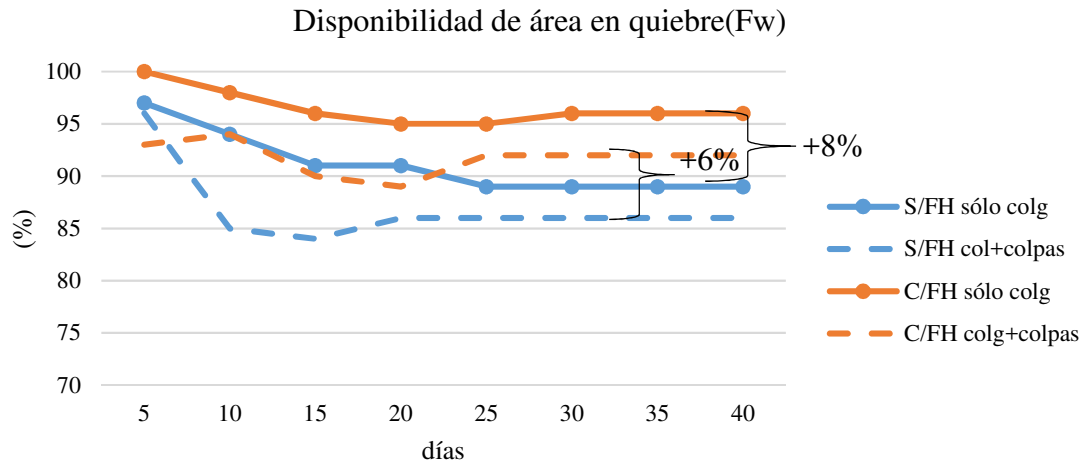


Gráfico 9 Estimación de aumento en disponibilidad de área en quiebre (datos zona Fw)

Para el caso de la disponibilidad de área liberada, esta aumenta entre un 4-5% para los datos de la zona Hw y entre un 3-4% para los de la zona Fw. A pesar de que el impacto es mayor en la zona en quiebre, el aumento en la disponibilidad de área liberada tendrá un mayor efecto en los costos asociados a reducción secundaria, debido a que el efecto de las colgaduras en la disponibilidad de área es mayor en dicha zona (gráficos de disponibilidad de área liberada se encuentran desplazados hacia valores más bajos que los gráficos asociados a la disponibilidad de área en quiebre).

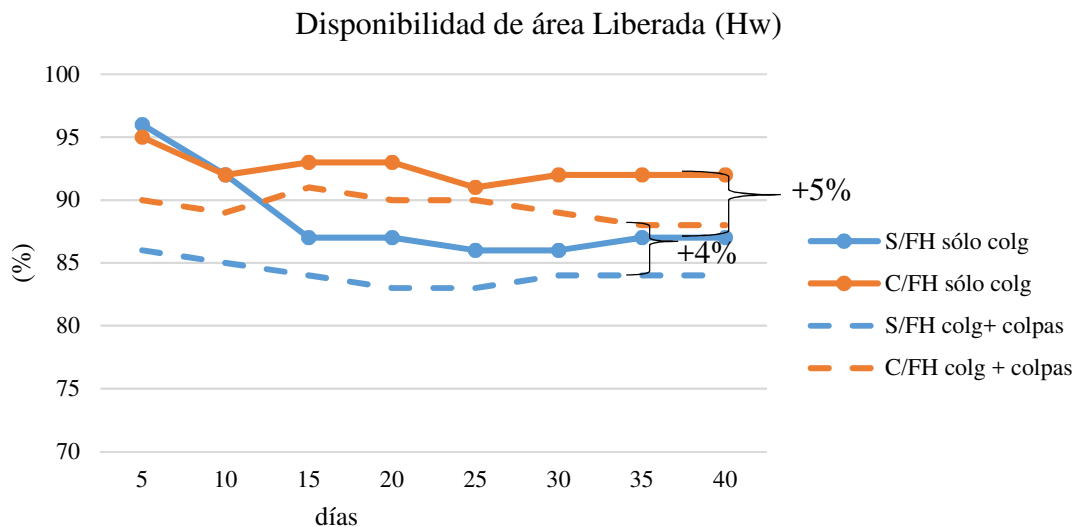


Gráfico 10 Estimación de aumento en disponibilidad de área liberada (datos zona Hw)

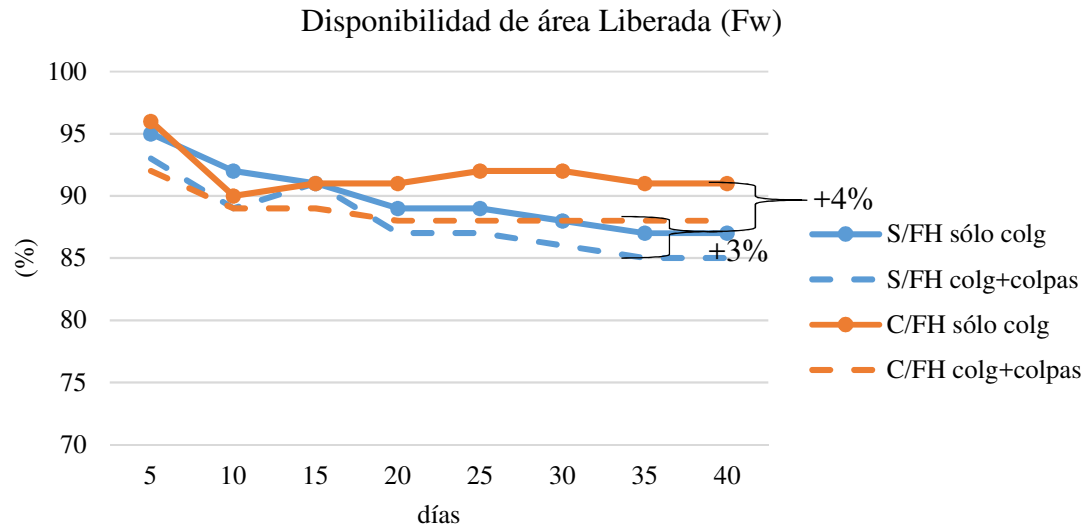


Gráfico 11 Estimación de aumento en disponibilidad de área liberada (datos zona Fw)

En el caso en el que se incluyen los sobre tamaños como colgaduras (colg + colpas) se castiga en mayor porcentaje la disponibilidad de área ya que se está aumentando la frecuencia de colgaduras que se tenía al considerar solo ese ítem en la evaluación, y el impacto que tiene el FH en la frecuencia de sobre tamaños es menor a la que se tiene en la de colgaduras, por lo tanto, las colgaduras agregadas por sobre tamaños tendrán un menor porcentaje de mejora en la disponibilidad.

El aumento en la disponibilidad de área producto del FH está ligado fuertemente al tipo de roca en el cual se aplica, en este caso, considerando un mismo diseño de FH, el mayor aumento de disponibilidad se obtiene con los datos del sector Hw, el cual posee roca más competente y de tipo Andesita versus el tipo de roca que se tiene en el sector Fw, que es menos competente y dominan las brechas.

Tabla 10 Aumento en disponibilidad de área (en quiebre y liberada) por FH, según modelos colg y colg+colpas

		Aumento en Disponibilidad	
		Área en quiebre	Área liberada
Hw	colg	+10%	+5%
	colg+colpas	+7%	+4%
Fw	colg	+8%	+4%
	colg+colpas	+6%	+3%

### 6.3. Estrategias de explotación en base a parámetros modificados por FH

#### 6.3.1. Variación en la tasa de incorporación de área a partir de la modificación en la disponibilidad de área y/o altura de liberación

Un aumento de la disponibilidad de área producto del FH quiere decir que un punto estará más tiempo disponible para la producción, por lo que el tonelaje que se puede extraer de él es mayor,

incrementando la velocidad efectiva de extracción. Por otro lado, como esta descrito en el capítulo 4.8.2.1 , uno de los efectos de la disminución de la altura de liberación es el aumento en el perfil de velocidad de la etapa en quiebre de la columna de mineral( Ilustración 29).

El incremento en la velocidad de extracción provocado por el aumento de la disponibilidad de área y/o disminución en la altura de liberación genera un mayor crecimiento de la columna de mineral extraída en quiebre, lo que a su vez incrementa el ángulo de extracción , por lo que para mantenerlo dentro de los rangos establecidos para el sector , es decir , entre 30° y 45° (División El Teniente, 2014) , este cambio debe ir acompañado de un aumento en la tasa de incorporación de área( Ilustración 44).

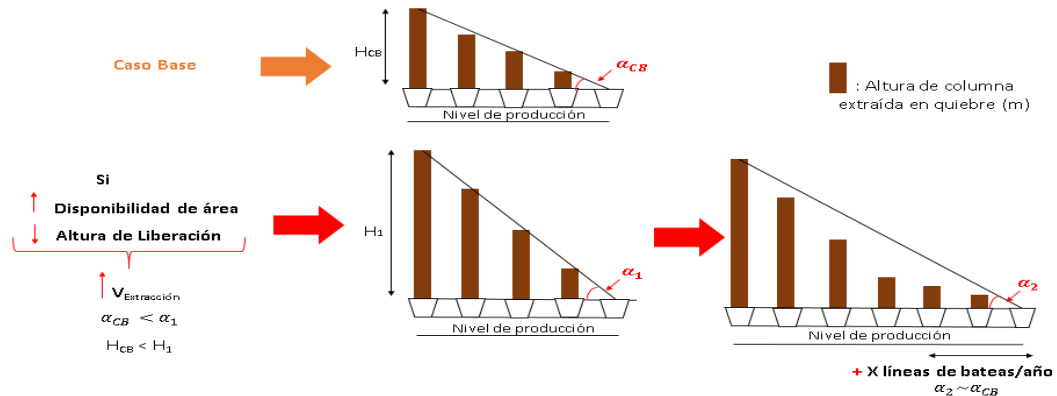


Ilustración 44 Incorporación de área y aumento de velocidad de extracción para mantener ángulo de extracción entre 30° y 45°.

El aumento requerido en la tasa de incorporación de área está dado por la Ecuación 3 , a partir de la cual se establece que las líneas de bateas a incorporar por año al aumentar en un 10% la disponibilidad de área y/o disminuir a un 20% la altura de liberación varía entre 2 a 3 líneas de bateas, según sea el caso (Tabla 11).

Tabla 11 Líneas de bateas a incorporar por año al variar disponibilidad de área o altura de liberación

Ángulo de Extracción (°)	Altura de Primario (m)	Altura de Liberación(AL)		Disponibilidad (D)				Mixto			
								D 80%		D 85%	
		20%	25%	30%	75 %	80 %	85 %	AL 20%	AL 25%	AL 20%	AL 25%
30	330	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3
45	330	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2

La incorporación de una línea de bateas al año equivale a cierto número de bateas que incorporar al mes, lo cual dependerá principalmente del ancho del frente. Para conocer el número exacto de bateas para el sector en estudio, se utiliza la Ecuación 9 , la cual es obtenida a partir de cálculos basados en la geometría del footprint y considerando un avance constante del frente de extracción en la dirección N55°W ( Ilustración 45) . Esta ecuación permite obtener el número de bateas a incorporar al año en función de los valores detallados en la Tabla 11 y el ancho del frente.

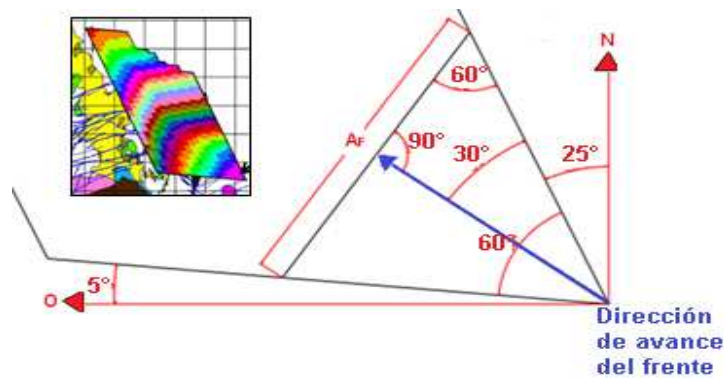


Ilustración 45 Dirección de avance del frente

Ecuación 9 Incorporación en área en función del ancho de frente

$$N^{\circ}Bateas_{año} = \frac{\left( \frac{A_F}{2 \cdot \sin 30 \cdot d_{cparalelaz}} + 1 \right) \cdot L_B}{A_{batea}}$$

Donde:

$A_F$ : Ancho del frente

$d_{c//z}$ : Distancia entre calles paralelas a la zanja (40 m)

$L_B$ : Líneas de bateas a incorporar por año

$A_{batea}$ : Área asociada a una batea (748 m<sup>2</sup>)

La Ecuación 9 permite estimar la incorporación de bateas luego del término del periodo de conexión, ya que en el sector Andes Norte durante esta primera etapa productiva se utiliza un tasa de incorporación constante de 10.000 m<sup>2</sup> (1bateas/mes), con velocidades de extracción diferenciadas según el área abierta existente (Tabla 4). Esta es una etapa crítica del plan minero, en donde se debe asegurar la conexión con la cavidad superior y por lo mismo no se realizan modificaciones a las tasas de incorporación de área, ni a las velocidades de extracción establecidas en el caso base (plan minero original).

Sin embargo, reducir la altura de liberación, pasando de un 30%(caso base) a un 20%, genera una disminución en el tiempo de conexión, permitiendo adelantar la mayor tasa de incorporación de área obtenida con la Ecuación 9.

La disminución en el tiempo de conexión implica un menor requerimiento de área abierta para asegurar el éxito de esta etapa. La nueva área necesaria para hacer conexión al mismo tiempo debe asegurar la generación del caving en el macizo rocoso, por lo que considerando que el radio hidráulico contemplado para el Nuevo Nivel Mina es de 33 metros (Vicepresidencia Corporativa de proyectos, 2009), se tiene que el área mínima para asegurar el hundimiento es de 17,424 m<sup>2</sup>.

Realizando una sensibilización del plan minero a partir de la variación de la altura de liberación, pasando de un 30% a un 20% con pasos intermedios de 2%, se tiene que para los casos de altura de liberación entre un 26 y 30% el área requerida para hacer conexión es mayor que la necesaria para asegurar la propagación del caving (Tabla 12), por lo que se cumple con la condición mínima para la generación del hundimiento.

En cambio, en los casos con altura de liberación entre un 20 y 24% el área necesaria para realizar conexión es menor que la requerida para generar el caving (Tabla 12), por lo que en primera instancia no es factible incluirlos en la evaluación.

Tabla 12 Área requerida para conexión al disminuir la altura de liberación

% liberación	Altura por alcanzar(m)	tiempo en que se alcanza (meses)	Nº puntos incorporados	m <sup>2</sup> incorporados
20	65	23	52	15600
22	71	24	56	16800
24	78	26	60	18000
26	84	27	62	18600
28	91	28	64	19200
30	97	30	70	21000

Sin embargo, ante posibles problemas operacionales se toma un tiempo de holgura de un 20% con respecto a los obtenidos en un inicio (Tabla 12), para que de esta forma se asegure la conexión con cavidad superior y a su vez, la propagación del caving. Considerando esta holgura de tiempo, se tiene que todos los casos evaluados en la sensibilización cumplen con el área mínima requerida para generar el hundimiento, por lo que pueden ser evaluados en las estrategias de explotación a plantear. La mayor disminución del tiempo de conexión se alcanza con una altura de liberación del 20%, la cual permite reducir en 8 meses el proceso de conexión con respecto al caso base.

Tabla 13 Área requerida para conexión al disminuir la altura de liberación (tiempo de holgura + 20%)

% liberación	m <sup>2</sup> incorporados	+20% tiempo de holgura(meses)	Nº puntos incorporados	m <sup>2</sup> incorporados
20	15600	28	64	19200
22	16800	29	66	19800
24	18000	31	72	21600
26	18600	32	74	22200
28	19200	34	78	23400
30	21000	36	84	25200

### 6.3.2. Estrategia de explotación en base al precio del cobre.

Con el fin de estimar la ganancia de valor al incluir un aumento en la disponibilidad de área y/o disminución de la altura de liberación en el plan minero original de Andes Norte, se evalúan 3



estrategias en base al precio del cobre, cuyas descripciones y resultados son detallados a continuación.

### 6.3.2.1. Estrategia precio Alto del cobre

En el caso de precio alto del cobre, el principal objetivo es maximizar la producción y así obtener la mayor ganancia posible. Una forma de lograr el incremento en la capacidad productiva es aumentar la tasa de incorporación de área, para que, de esta forma, se tengan más puntos disponibles para realizar extracción de mineral.

Este aumento en la incorporación de área debe estar acompañado por un aumento en la velocidad de extracción, con el fin de mantener el ángulo de extracción en rangos acordes al sector en estudio: 30-45°. El aumento en la velocidad de extracción se puede obtener al aumentar la disponibilidad de área y/o disminuir la altura de liberación, tal cual fue descrito en el capítulo 6.3.1.

Según la Tabla 11, la incorporación en el plan minero original es de una a dos líneas de bateas al año, pero en el caso de modificar la disponibilidad de área y/o la altura de liberación se requieren incorporar entre dos a tres líneas de bateas al año. Para maximizar la capacidad productiva se selecciona incorporar tres líneas de bateas y así mantener el ángulo de extracción cercano a 30°. En términos de área (m<sup>2</sup>/año), la incorporación de tres líneas de bateas al año en función del ancho de frente se encuentra representada en el Gráfico 12 .

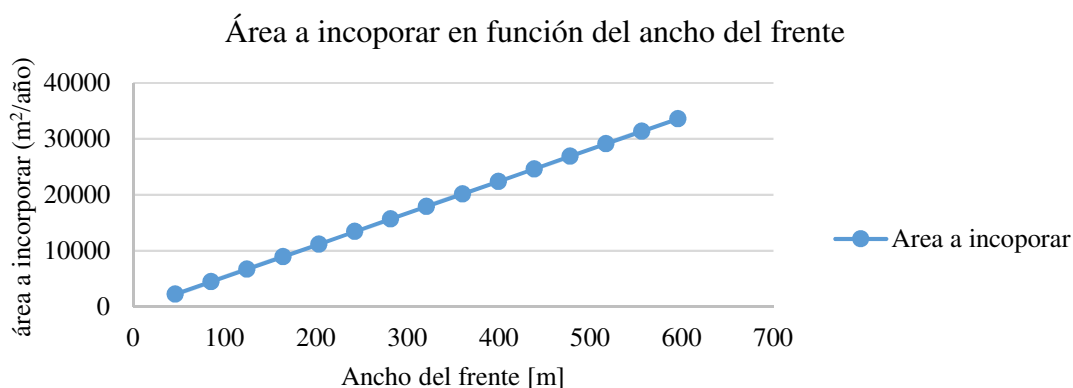


Gráfico 12 Incorporación de área según el ancho del frente

En el caso de Andes Norte, el ancho de frente llega a una extensión mayor a 600 metros ,ante lo cual se requieren incorporar 35.000 m<sup>2</sup> de área nueva al año(según Ecuación 9), lo que equivale a 47 bateas , es decir ,a 4 bateas/mes .La incorporación de área a considerar para la estrategia de precio alto debe concordar con los rendimientos de constructibilidad históricos que ha tenido la División El Teniente, los cuales son detallados en la Tabla 14.

Tabla 14 Rendimientos de constructibilidad DET.Fuente: (Vicepresidencia de proyectos DET , 2017)

		Pesimista	Promedio	Optimista
Perforación Batea	unidades/mes	2	3	4
Tronadura Batea	unidades/mes	2	3	4

Si bien en DET la incorporación de 4 bateas por mes se ha logrado en algunos sectores productivos, la capacidad máxima de incorporación de área a utilizar para la estrategia de explotación planteada es de 3 (bateas /mes), es decir, 27.000 m<sup>2</sup>, ya que este representa un valor promedio que no genera sub o sobre estimaciones del aumento de capacidad productiva a evaluar.

La incorporación de área del Gráfico 12 es acotada a partir de la capacidad máxima constructiva impuesta (3 bateas /mes), por lo que la nueva incorporación de área a evaluar (junto a la modificación de la disponibilidad de área y altura de liberación) es detallada en el Gráfico 13.

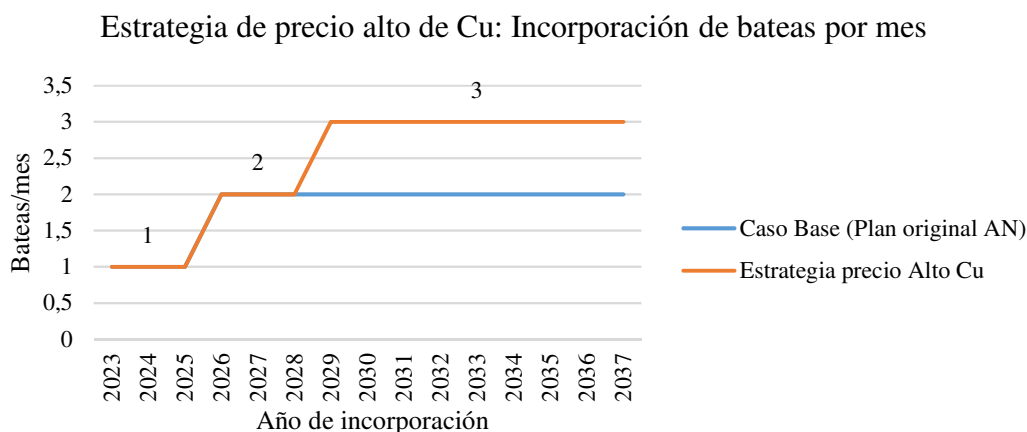


Gráfico 13 Incorporación de área nueva para estrategia precio Alto Cu.

Si bien el acotar la incorporación de área calculada con la Ecuación 9 hace que las líneas de bateas a incorporar a partir del año 7 sea menor a 3, aún se mantiene el ángulo de extracción acorde a los rangos establecidos, ya que como se muestra en la Tabla 11, la incorporación de líneas de bateas para los parámetros de planificación a evaluar puede ser entre 2 a 3 líneas al año.

Considerando la nueva incorporación de área y la Ecuación 4, se tiene que la máxima capacidad de producción a la que se puede llegar es de 55.000 tpd (Tabla 15), lo cual se comprueba con la evaluación de la producción liberada en el programa CPlanner(Gráfico 14), es decir, el resultado obtenido es la real capacidad de producción, sin imponer ritmos productivos.

Tabla 15 Máxima capacidad productiva (MPC) considerando mayor incorporación de área (3 bateas/mes)

Parámetro	Valor
Altura económica (m)	302.9
Velocidad de preparación (m <sup>2</sup> /año)	26,928
Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	2.7
Recuperación operacional (%)	90
Caso mayor incop. de área (ton/año)	19,793,775
Caso mayor incop. de área (ton/día)	<b>54,983</b>

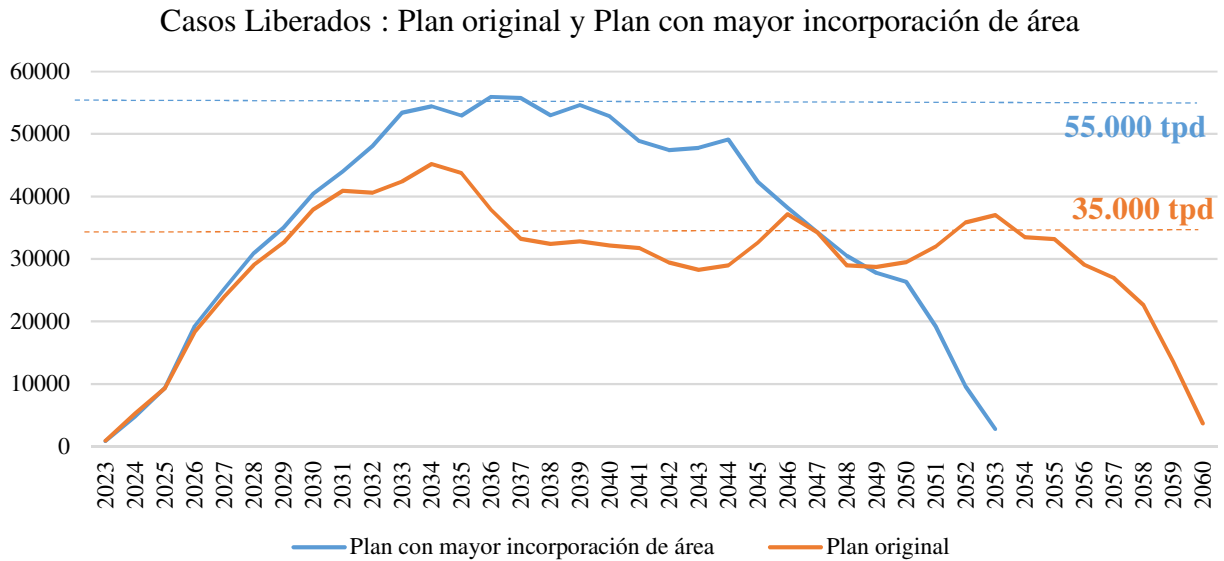


Gráfico 14 Estrategia de precio alto de Cu: Máxima capacidad productiva, caso liberado

Como se expuso anteriormente, este aumento en la incorporación de área debe ir acompañado de un aumento en la velocidad de extracción, lo cual se logra con un aumento en la disponibilidad de área y/o disminución en la altura de liberación. Para realizar una comparación del valor agregado a la producción que produce la variación de cada uno de estos parámetros, se evalúan los siguientes casos:

- (a) Mayor incorporación de área + Aumento de la disponibilidad de área
- (b) Mayor incorporación de área + Disminución de la altura de liberación
- (c) Mayor incorporación de área + Aumento de la disponibilidad de área + Disminución de la altura de liberación

La nomenclatura utilizada en cada caso se define como:

X%AL: Altura de liberación de un X%

Y%D: Aumento de un Y% en la disponibilidad de área

X%AL Y%D: altura de liberación de un X% y aumento de un Y% en la disponibilidad de área.

En la estrategia de explotación planteada se evalúan 2 aspectos fundamentales:

- 1) Variación en ritmo de explotación en ramp up y régimen
- 2) Limitantes de producción

Se considera como caso base el plan original de Andes Norte, es decir, sin considerar el aumento de incorporación de área ni la variación en los parámetros de planificación seleccionados.

### 6.3.2.1.1. Resultados de Estrategia precio alto Cu

#### Plan minero

El aumento en la incorporación de área y la modificación de la disponibilidad de área y/o altura de liberación generan un plan minero con una duración total de 31 años, de los cuales 11 años son de ramp up, 7 años de régimen y 13 años de ramp down.

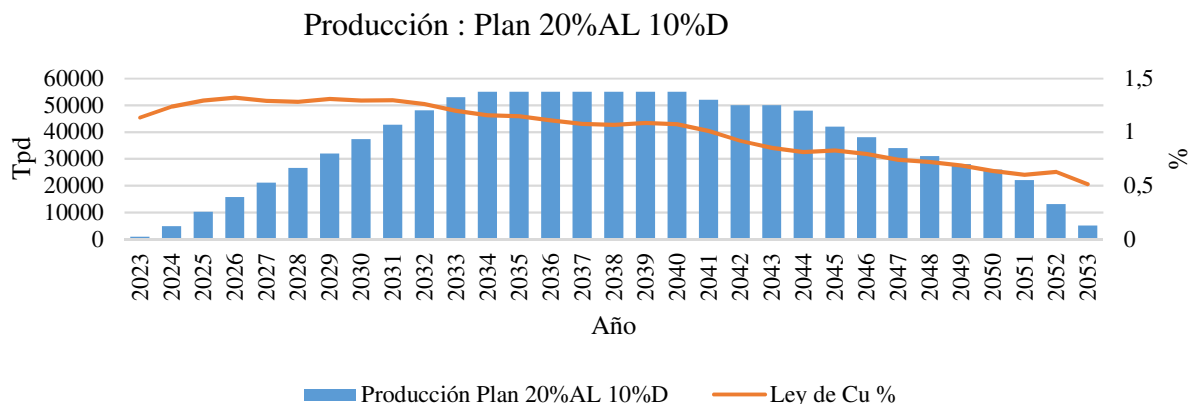


Gráfico 15 Plan minero de estrategia de precio alto de Cu

La variación del área en quiebre, liberada y abierta en cada caso evaluado se encuentra en un gráfico del Anexo E, en el cual se detalla el área promedio durante la etapa de régimen.

#### Ritmo de producción en ramp up

En los casos evaluados, el ritmo de ramp up aumenta entre un 8% y 10% con respecto al plan minero original (5.000 tpd). Las diferencias obtenidas entre los ritmos productivos en cada caso (modificación de AL y D) es sólo de 100 tpd (Gráfico 16), por lo tanto, los parámetros modificados tienen un impacto similar en el plan. Sin embargo, el que mayor variación genera es el aumento en la disponibilidad de área (casos 10%D, 10%D 20%AL, 10%D 25%AL), siendo indiferente la disminución en la altura de liberación.

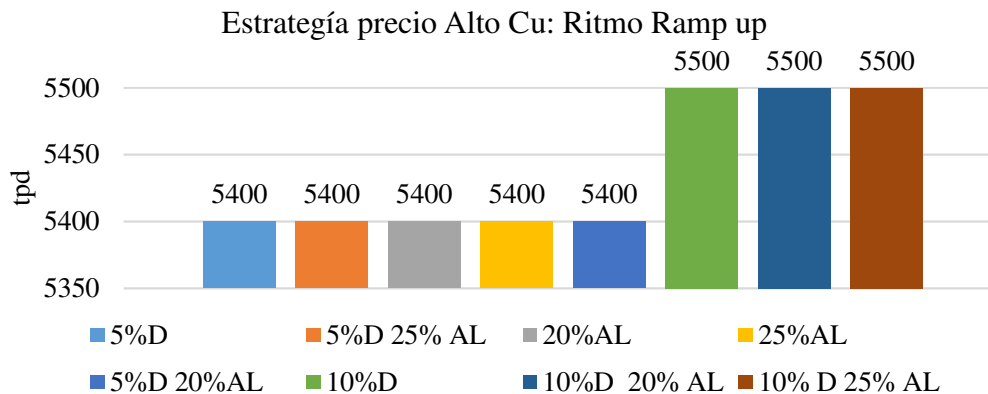


Gráfico 16 Variación ritmo de Ramp Up. Estrategia precio alto del Cu

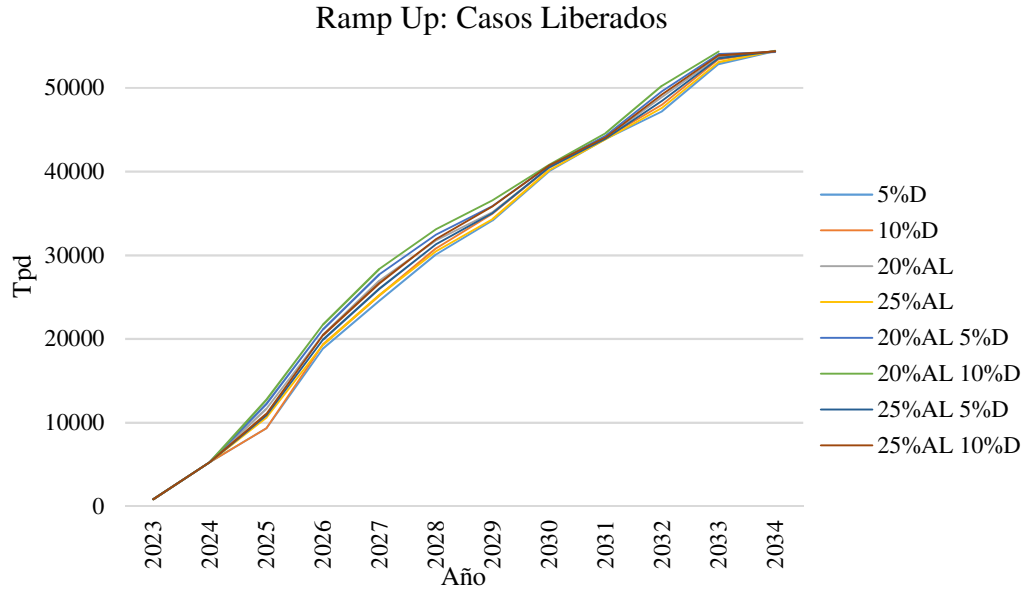


Gráfico 17 Diferencia ritmo ramp up, casos liberados. Estrategia precio alto del cobre

### Ritmo de producción en régimen

La máxima capacidad de producción se mantiene en los 55.000 tpd, es decir, la modificación de la disponibilidad de área o altura de liberación no varía la capacidad de producción en esta etapa del plan minero, sino que sólo hace viable el aumento en la incorporación de área al mantener los parámetros geomecánicos dentro de los límites establecidos (ángulo de extracción 30-45°).

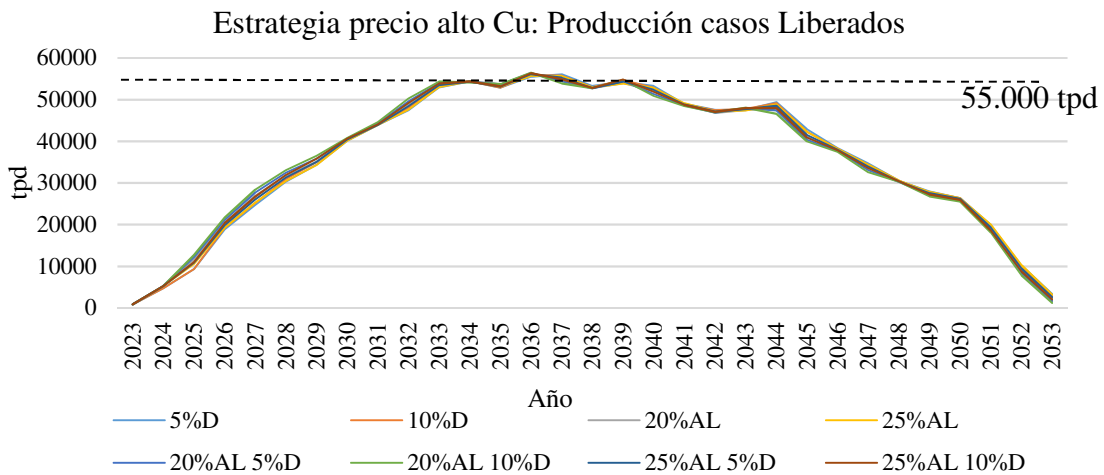


Gráfico 18 Estrategia precio Alto de Cu: Casos liberados al modificar disponibilidad de área y/o altura de liberación

### Limitantes de producción

Uno de los principales factores que impide obtener una mayor producción en la estrategia planteada es el sistema de manejo de materiales (SMM), el cual, dada su capacidad, solo podrá transportar cierto tonelaje de mineral al día.

Si sólo se evalúa la capacidad productiva del área, se tiene que el mayor impacto en la producción se produce en los casos mixtos, es decir, al aumentar la disponibilidad de área y disminuir la altura de liberación. Por el lado contrario, el que menor impacto se da con una disminución de un 5% en la altura de liberación.

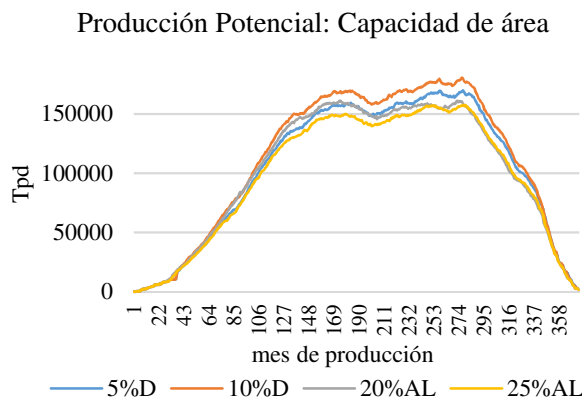


Gráfico 19 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación. Estrategia precio alto de Cu

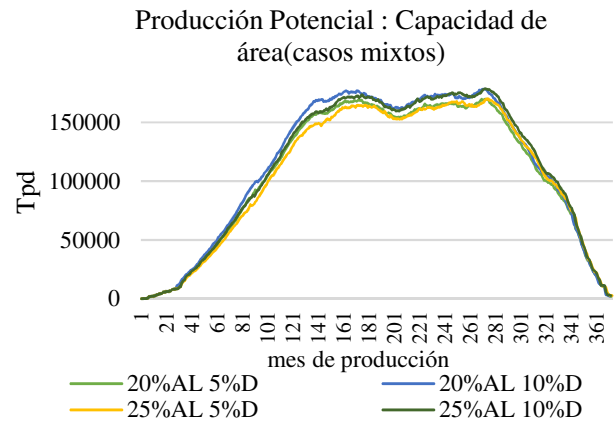


Gráfico 20 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir altura de liberación. Estrategia precio alto de Cu

Sin embargo, al limitar la capacidad productiva del área con las restricciones impuestas en el sistema de manejo de materiales (SMM) se obtiene una producción muy similar en todos los casos, por lo tanto, el SMM es el principal cuello de botella que impide obtener diferencias entre los casos evaluados con mayor disponibilidad y/o menor altura de liberación y por ende un mayor ritmo productivo.

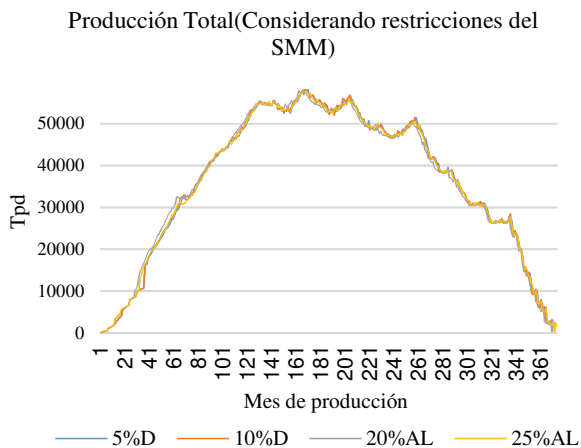


Gráfico 21 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia precio alto de Cu

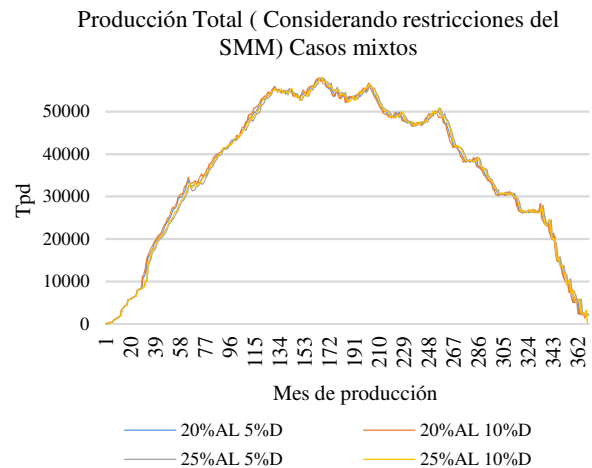


Gráfico 22 Gráfico 20 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir altura de liberación, considerando limitaciones del SMM Estrategia precio alto de Cu

Cada uno de los componentes del sistema de manejo de materiales (calle, pique, sistema de transporte intermedio (GTI)) posee una capacidad máxima de transporte de mineral, la cual limitará en distinta proporción la capacidad de producción del área, dependiendo de la configuración utilizada de estos elementos. Al evaluar cada componente por separado, con el fin de detectar cual

es el que genera una mayor restricción a la producción, se obtiene que el principal cuello de botella es el Sistema de transporte intermedio (GTI).

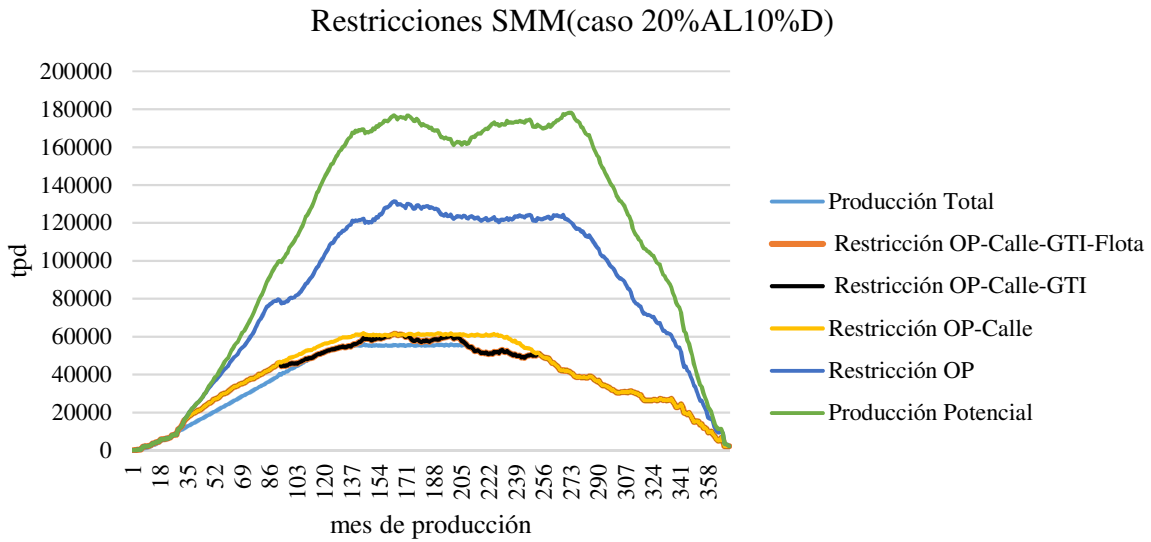


Gráfico 23 Restricciones SMM: Estrategia precio alto del Cu (Caso 20%AL 10%D)

Para conocer la capacidad asociada al GTI que permite que este deje de ser cuello de botella, se evalúan incrementos de 2.000 tpd en su capacidad, iniciando en 18.000 tpd (capacidad caso base) hasta llegar a 24.000 tpd, tomando como caso de evaluación el plan en el que se aumenta un 10% la disponibilidad de área y se fija una altura de liberación del 20%(al no existir mayores diferencias entre los casos evaluados).

Como resultado, el aumento de la capacidad del GTI incrementa la tasa de crecimiento en Ramp up entre un 12% a un 20% con respecto al caso base (5.000 tpd).

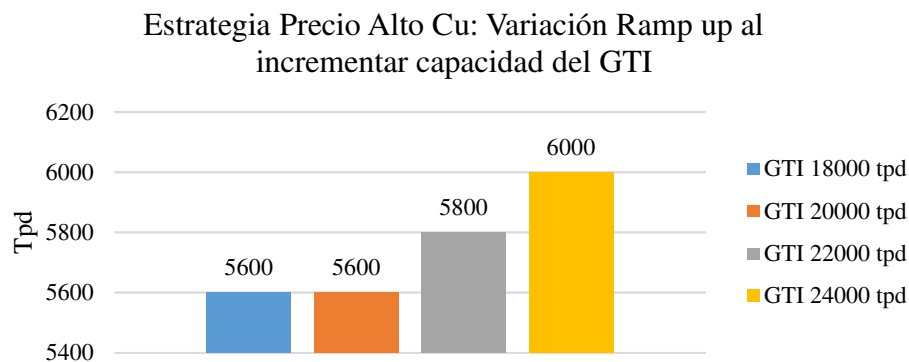


Gráfico 24 Estrategia precio alto Cu: Variación en Ramp up al aumentar la capacidad del GTI (caso +10%D 20%AL)

En cuanto a la producción en régimen, un GTI con capacidad entre 18.000 y 22.000 tpd no modifica la capacidad máxima productiva, sin embargo, un GTI con capacidad de 24.000 tpd permite llegar a una producción en régimen de 60.000 tpd, en cuyo caso el nuevo cuello de botella que surge es la capacidad máxima de la calle.

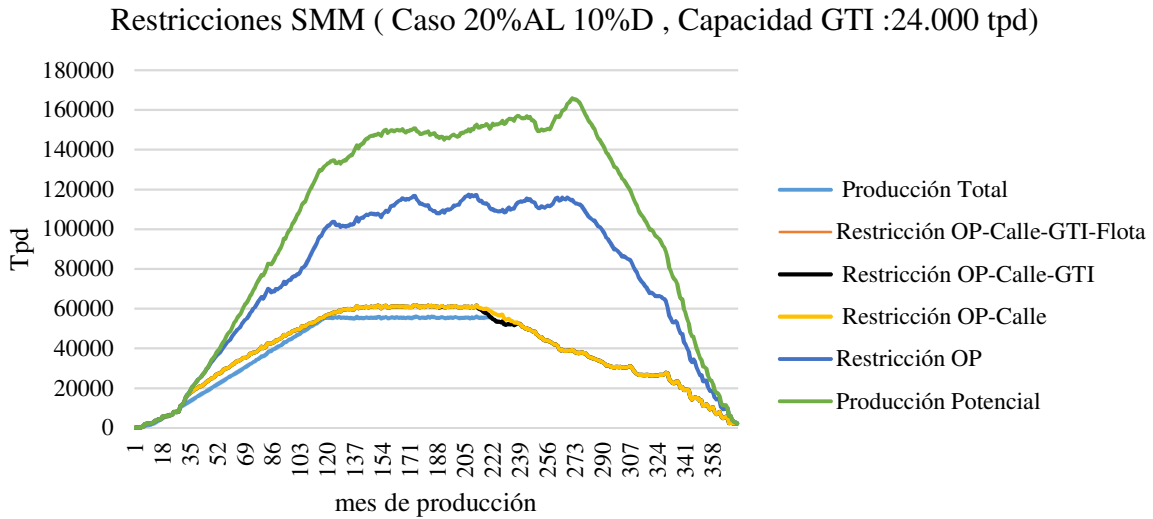


Gráfico 25 Restricciones SMM: Estrategia precio alto del Cu (caso 20%AL 10%D)

### Caso Adicional

Se evalúa un caso adicional en el cual se fuerzan al máximo cada una de las variables involucradas en la estrategia planteada, es decir, la incorporación de área se aumenta una tasa mayor, se modifica la capacidad de ciertos elementos del SMM, se aumenta la disponibilidad de área y/o se disminuye la altura de liberación.

### Nueva incorporación de área

Los casos evaluados en los puntos anteriores consideran una capacidad máxima constructiva de 3 bateas/mes, la cual fue impuesta a partir de los registros históricos promedio de constructibilidad de la división, pero existen sectores en los cuales se ha llegado a incorporar 4 (bateas /mes), lo cual es factible de realizar en este caso, por el ancho de frente que puede llegar a tener AN (mayor a 600 metros). Al considerar esta nueva restricción de constructibilidad, la tasa de incorporación de bateas con respecto al ancho del frente en cada año productivo es el presentado en el Gráfico 26.

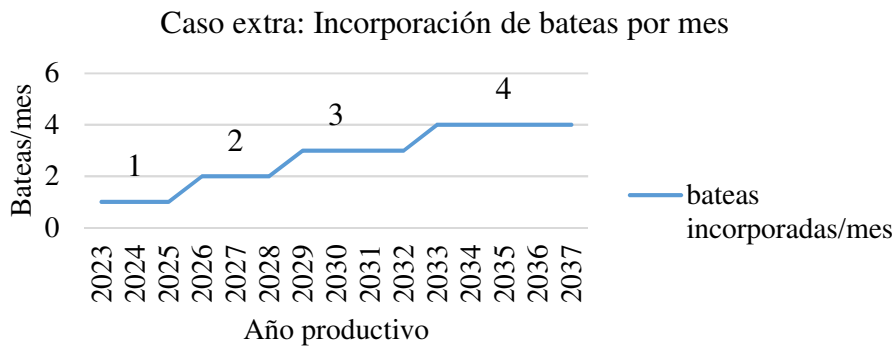


Gráfico 26 Estrategia de explotación precio alto Cu: Incorporación de área en caso extra



## Nueva capacidad del SMM

En el caso de la capacidad de la calle, el valor utilizado en el caso base es impuesto en base a 11 horas efectivas de operación, sin embargo, para el proyecto Nuevo Nivel Mina se aspira llegar a 15 horas efectivas, por lo que la nueva capacidad por calle a considerar en este caso es de 4.500 tpd.

En cuanto al GTI, se aumenta su capacidad a 24.000 tpd, ya que como se constató anteriormente, a esa capacidad deja de ser cuello de botella para la producción.

## Resultados Caso Adicional

Se obtienen planes mineros con ritmos de ramp up entre 6.100 y 6.500 tpd (dependiendo del parámetro de planificación modificado (Gráfico 27) y un ritmo en régimen de 60.000 tpd (Gráfico 28).

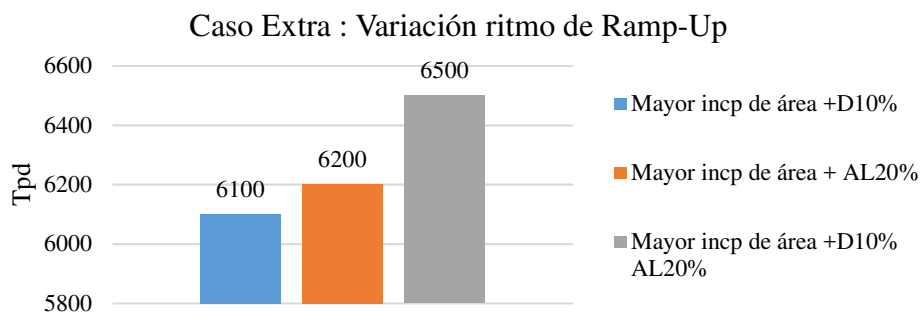


Gráfico 27 Variación de ritmo Ramp up -Caso adicional de estrategia precio alto de Cu.

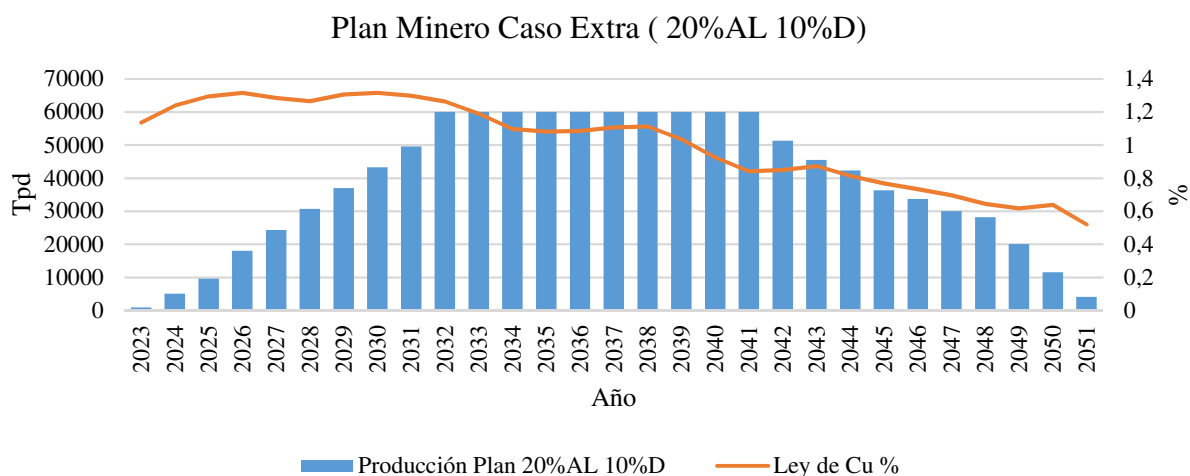


Gráfico 28 Plan minero de caso adicional (20%AL 10%D) -Estrategia precio alto del Cu

La duración del plan minero varía dependiendo del parámetro de planificación modificado, tal como lo expone la Tabla 16.

Tabla 16 Duración del Plan minero -Caso adicional de Estrategia para precio Alto de Cu

Parámetro modificado	ramp up	régimen	ramp down	LOM
10%D ó 20%AL	10 años	9 años	10 años	29 años
20%AL y 10%D	9 años	10 años	9 años	28 años

### Resumen de Resultados estrategia de precio alto del Cu

Un resumen de los resultados obtenidos en la estrategia de precio alto del cobre se expone en la Tabla 17.

Tabla 17 Resumen resultados estrategia precio alto del Cu

Inc. de área ( $\frac{\text{Lineas de bateas}}{\text{año}}$ )	SMM (ktpd)	Ritmo régimen (ktpd)	Caso	Duración(años)			
				ramp up	régimen	ramp down	LOM
3 (limite: $3 \frac{\text{bateas}}{\text{mes}}$ )	Calle:4 OP: 3 GTI: 18	55	10%D	11	7	13	31
			20%AL				
			20%AL 10%D				
3 (limite: $4 \frac{\text{bateas}}{\text{mes}}$ ) (caso adicional)	Calle:4.5 OP: 3 GTI: 24	60	10%D	10	9	10	29
			20%AL				
			20%AL 10%D				

De la tabla anterior se puede observar que utilizando la capacidad del SMM del caso base y aumentando la tasa de incorporación de área a 3 líneas de bateas por año se obtienen los mismos resultados al aumentar la disponibilidad de área, disminuir la altura de liberación o al evaluar ambas modificaciones juntas. Además, no se distingue mayor diferencia entre los casos evaluados producto de la limitación de producción impuesta por el SMM.

Si se aumenta la capacidad del GTI a 24.000 tpd y el de la calle a 4.500 tpd se logra una producción máxima de 60.000 tpd en régimen, distinguiendo una mayor diferencia entre los casos 10%D ó 20%AL y los mixtos, notándose principalmente en el ritmo de crecimiento de ramp up.

Por lo tanto, en la estrategia de explotación de precio alto del cobre, la modificación de la disponibilidad de área y/o altura de liberación da valor agregado a la producción principalmente en la etapa de ramp up, además permiten incorporar más área al año al contribuir en la mantención del ángulo de extracción acorde a los valores establecido en las reglas del caving (30°-45°) y esta mayor incorporación de área es la que permite el aumento de la capacidad de producción de 35ktpd a 55ktpd.

#### 6.3.2.2. Estrategia Precio Bajo del Cobre

El principal objetivo de las estrategias para precio bajo de cobre es mantener la producción en régimen del caso base, es decir, 35.000 tpd y a su vez disminuir los costos de producción. Para esto, se toma como base el cálculo de requerimiento de área al modificar la disponibilidad de área

y/o disminuir la altura de liberación detallado en la Tabla 11, en donde se establece que para mantener el ángulo de extracción entre 30° y 45° se deben incorporar entre 2-3 líneas de bateas.

Los dos casos por evaluar son los siguientes:

- 1) Mantener incorporación de área del caso base (2 líneas de bateas al año) y modificar parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación.
- 2) Disminuir altura económica (aumento de ley media de cobre), aumentar incorporación de área (mantenerla entre 2-3 líneas de bateas/año), modificar parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación.

#### **6.3.2.2.1. Estrategia N°1 Precio Bajo del Cobre**

Como el requerimiento de incorporación de área para mantener el ángulo entre 30-45° al aumentar 10% la disponibilidad de área y/o disminuir a un 20% la altura de liberación va entre 2 a 3 líneas de bateas por año, en esta estrategia se opta por conservar la incorporación realizada en el caso base (2 líneas de bateas) y a la vez modificar los parámetros: disponibilidad de área y/o altura de liberación, es decir, se forzará al sistema a mantener un ángulo de extracción cercano a 45°.

En este caso, se evalúan 3 opciones:

- a) Incorporación de 2 líneas de bateas al año + Aumento de disponibilidad de área
- b) Incorporación de 2 líneas de bateas al año + Disminución de altura de liberación
- c) Incorporación de 2 líneas de bateas al año + Aumento de disponibilidad de área + Disminución de altura de liberación

En cada caso se realizan sensibilizaciones y la evaluación de 2 aspectos fundamentales:

- 1) Variación en ritmo de ramp up y régimen.
- 2) Limitantes de producción

Se considera como caso base el plan original de Andes Norte, es decir, sin considerar el aumento de incorporación de área ni la variación en los parámetros de planificación seleccionados.

##### **6.3.2.2.1.1. Resultados Estrategia N°1 Precio bajo del Cobre**

#### **Plan minero**

Al incorporar la modificación de los parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación al plan minero original (incorporación de 2 líneas de bateas por año), se obtiene un plan minero con un LOM de 37 años, de los cuales 6 pertenecen a la etapa de ramp up, 26 al régimen y 5 al ramp down.

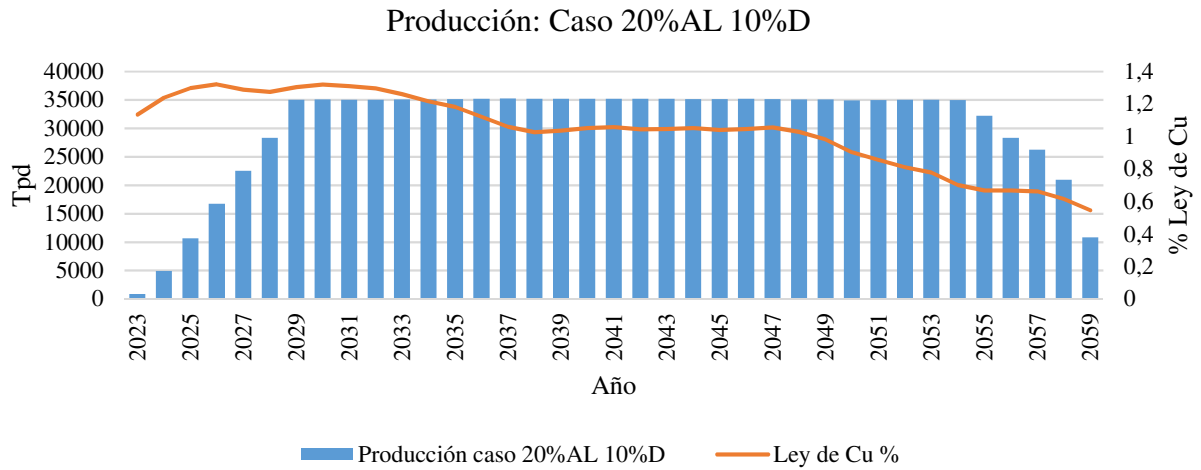


Gráfico 29 Plan minero resultante caso 20%AL 10%D. Estrategia N°1 Precio bajo del Cu

La variación del área en quiebre, liberada y abierta en cada caso evaluado se encuentra en un gráfico del Anexo F, en el cual se detalla el área promedio durante la etapa de régimen.

### Ritmo de ramp up

Existe una diferencia en el ritmo de crecimiento de la etapa de ramp up entre los casos evaluados la cual depende del parámetro de planificación modificado (Gráfico 30). La tasa de crecimiento obtenida varía entre 5.600 tpd y 5.800 tpd, es decir, el ritmo en ramp up aumenta entre un 12% y 16% con respecto al caso base (5.000 tpd).

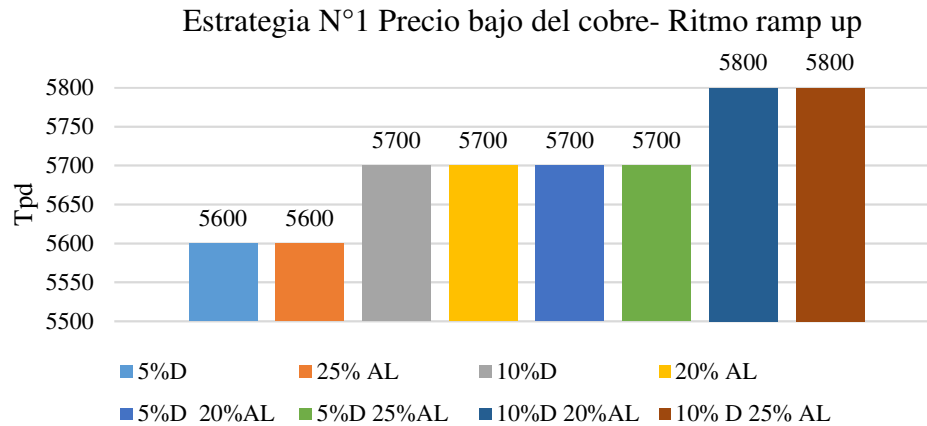


Gráfico 30 Variación ritmo de ramp up -Estrategia N°1 Precio bajo del Cu

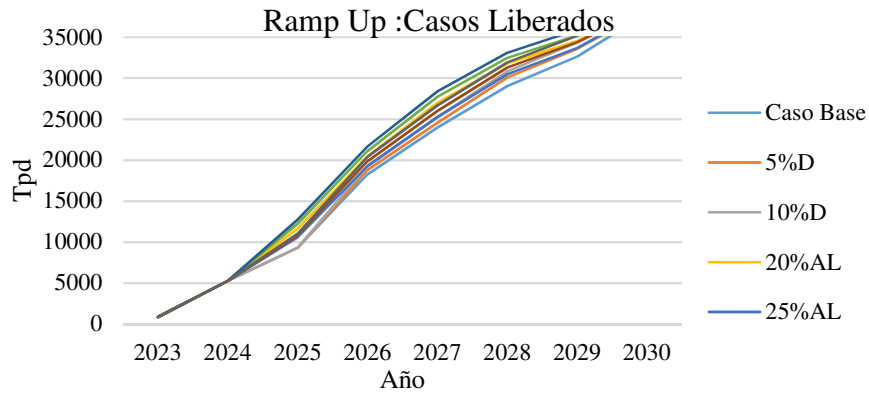


Gráfico 31 Diferencia en ritmo de ramp up. Estrategia N°1 precio bajo del Cu

### Ritmo en régimen

El ritmo máximo de producción en régimen se mantiene en torno a los 35.000 tpd, al igual que en el caso base, por lo tanto, la variación de los parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación no generan cambios en el ritmo de explotación en régimen.

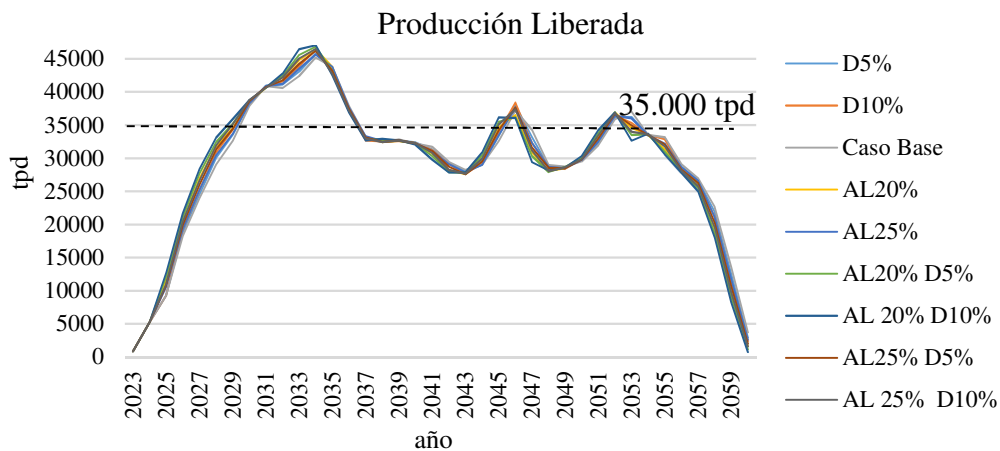


Gráfico 32 Producción Liberada Casos estrategia N°1 Precio bajo del Cu

### Limitantes de producción

Para evaluar los cuellos de botella que impiden un mayor impacto en el plan minero, se compara en todos los casos la producción potencial, es decir, la producción que el área es capaz de dar, y luego se agregan las restricciones asociadas al SMM (capacidad máxima de transporte del mineral).

Al evaluar la producción potencial de área, se distingue que existe un gran potencial en los primeros y últimos años de producción, la cual varía dependiendo del parámetro de planificación modificado. La mayor producción se produce con el aumento de un 10% de la disponibilidad de área (en los casos individuales) y en el que al caso anterior se le agrega la disminución de la altura de liberación (20%AL 10%D).

Sin embargo, en la producción potencial concentrada en los años de la mitad del plan (mes de producción 163 al 298), no se distingue mayor diferencia entre los casos evaluados, por lo tanto, la

modificación de los parámetros (disponibilidad de área y/o altura de liberación) permite variar la producción al inicio y final del plan, es decir, aumentar el ritmo de ramp up y extender la duración de la etapa en régimen.

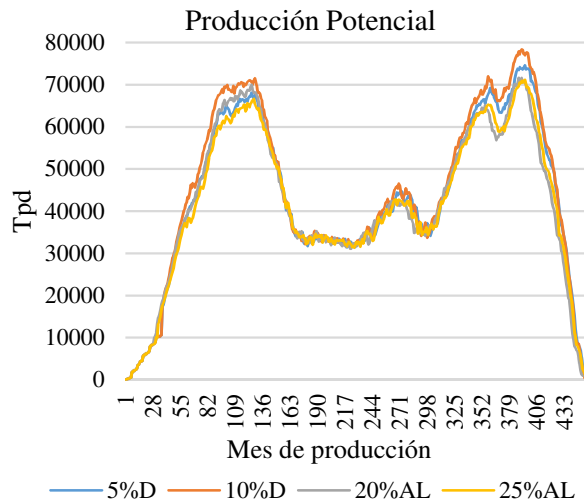


Gráfico 33 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación. Estrategia N°1 precio bajo de Cu

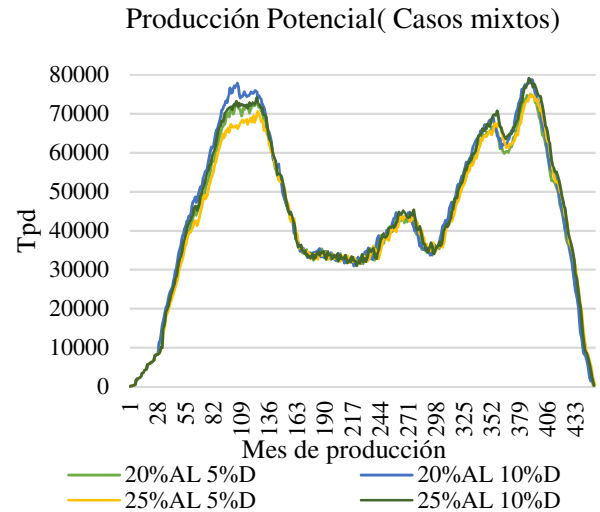


Gráfico 34 Producción Potencial al aumentar disponibilidad de área y disminuir la altura de liberación. Estrategia N°1 precio bajo de Cu

Si a la producción potencial del área se le agregan las restricciones asociadas al sistema de manejo de materiales, se tiene lo expuesto en el Gráfico 35 y Gráfico 36. En donde se distingue una disminución de la producción en los primeros y últimos años del plan, en cambio en los años intermedios la producción varía levemente, por lo que el SMM no hace mayores modificaciones a la producción obtenida durante los años pertenecientes al régimen.

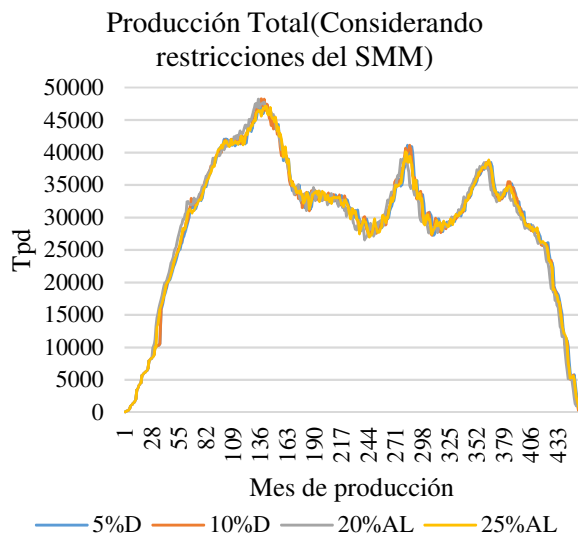


Gráfico 35 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia N°1 precio bajo de Cu

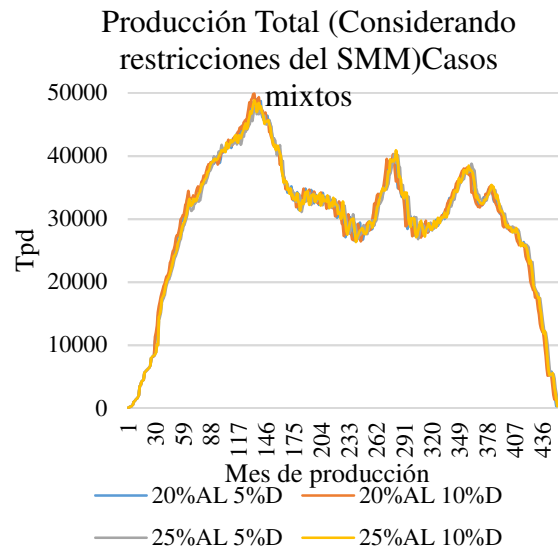


Gráfico 36 Producción total al aumentar disponibilidad de área o disminuir la altura de liberación, considerando limitaciones del SMM. Estrategia N°1 precio bajo de Cu

De lo anterior, se concluye que el SMM restringe la producción principalmente en la etapa de ramp up y ramp down. En cambio, en régimen, su impacto es leve ya que en esta depende principalmente de la capacidad de producción del área.

Al evaluar cada elemento que compone el SMM por separado, es decir, la calle, pique y sistema de transporte intermedio (GTI) se obtiene que el principal cuello de botella es el GTI.

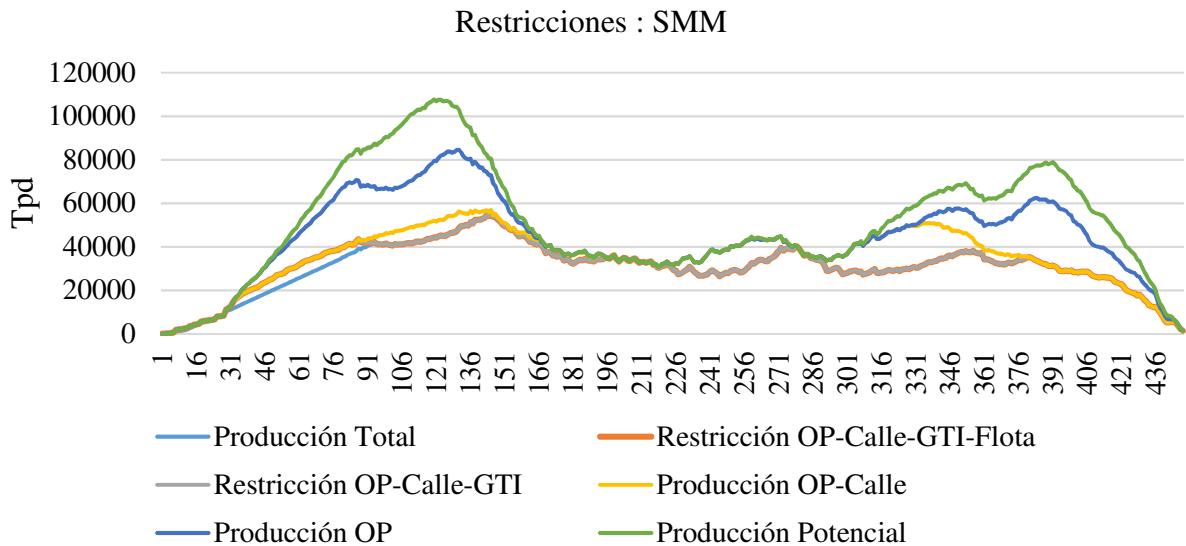


Gráfico 37 Restricciones SMM: Estrategia N°1 precio bajo del Cu (Caso 20%AL 10%D)

Al realizar una sensibilización en base a la capacidad de GTI, se obtiene que este deja de ser cuello de botella en el ramp up al ser evaluado con una capacidad de 20.000 tpd, permitiendo aumentar el ritmo de crecimiento de producción en un 34% con respecto al plan original y por ende llegar 1 año antes al régimen.

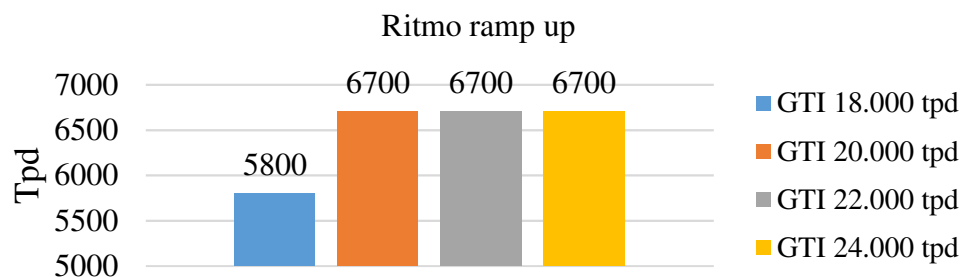


Gráfico 38 Variación de ramp up al incrementar capacidad del GTI

### Resumen de Resultados estrategia N°1 precio bajo del Cu

Un resumen de los resultados obtenidos en la estrategia N°1 de precio bajo del Cobre se expone en la Tabla 18, en donde todos los casos evaluados tienen como un ritmo de producción de 35 ktpd en régimen.

Tabla 18 Resumen resultados estrategia N°1 precio bajo del Cu

Inc. de área( $\frac{\text{bateas}}{\text{mes}}$ )	SMM(ktpd)	Caso	Duración (años)			
			ramp up	régimen	ramp down	LOM
2	Calle: 4 OP: 3 GTI: 18	10%D	6.7	26	5	37
		20%AL				
		20%AL 10%D				
	Calle: 4 OP: 3 GTI: 20	20%AL 10%D	6	26	5	37

El aumento de la disponibilidad de área y/o disminución en la altura de liberación en el plan original genera un incremento en el ritmo de crecimiento en ramp up, siendo levemente mayor en los casos mixtos y en los que se aumenta un 10% la disponibilidad de área, por lo tanto, este último es el parámetro que mayor impacto tiene en la producción. Sin embargo, este aumento en el ritmo productivo de la primera etapa del plan minero podría ser aún mayor si la capacidad del GTI se incrementa, ya que este elemento del SMM es el principal cuello de botella en los primeros años de producción.

En cuanto a la etapa en régimen, la producción está limitada principalmente por la capacidad del área abierta, por lo tanto, un incremento en las capacidades de los elementos del SMM no genera mayor efecto en los resultados obtenidos.

#### 6.3.2.2.2. Estrategia N°2 Precio Bajo del cobre

Como la variación de los parámetros: disponibilidad de área y/o altura de liberación debe acompañarse con una incorporación de área entre 2 a 3 líneas de bateas (Tabla 11), en esta estrategia se evalúan tres ritmos de incorporación de área, que varían entre 21.000 m<sup>2</sup>/año (2 líneas de bateas/año) y 27.000 m<sup>2</sup>/año (3 líneas de bateas/año). Con el fin de mantener el ritmo de producción del caso base, es decir, 35.000 tpd, este aumento en la incorporación de área debe ir acompañado con una disminución en la altura económica (Ecuación 4), lo que a su vez permite mantener un ángulo de extracción en valores aceptables (30°-45) y teóricamente aumentar la ley media de cobre.

Los ritmos de incorporación de área y las alturas económicas evaluadas son detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 19 Casos a evaluar en estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre

Caso	Tasa de incorporación de área: m <sup>2</sup> /año	Altura económica (m)	Reservas (Mton)	% Reservas c/r Caso base (398 Mton)
C1	21.000	240	315	79%
C2	24.000	220	285	72%
C3	27.000	200	257	64%

En esta nueva estrategia de explotación se consideran los siguientes casos



- 1) Mayor incorporación de área +Disminución de altura económica + Disponibilidad de área (+10%)
- 2) Mayor incorporación de área +Disminución de altura económica + Altura de liberación de 20%.
- 3) Mayor incorporación de área + Disminución de altura económica + Aumento de disponibilidad de área (+10%)+ Altura de liberación del 20%

De cada caso se evalúa la variación en el ritmo productivo (ramp up y régimen) además de las principales limitantes de producción.

### 6.3.2.2.1. Resultados de estrategia N°2 Precio bajo del cobre

#### Plan minero

Los planes mineros obtenidos para el Caso 1 (C1: 21.000 m<sup>2</sup>/año, H<sub>e</sub>:240 m.) tienen distinta duración, dependiendo del parámetro de planificación modificado (Tabla 20).

Tabla 20 Duración Plan Minero C1. Estrategia N°2 precio bajo del Cobre

Parámetro	Duración (años)			
	ramp up	régimen	ramp down	LOM
10%D	7	19	6	32
20%AL				
20%AL 10%D	6	19	5	30

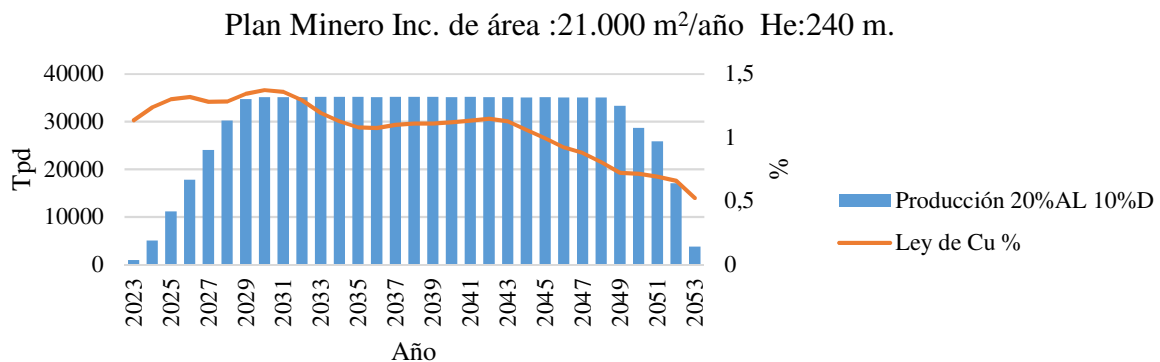


Gráfico 39 Plan minero resultante caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre, He:240 m.

Para el Caso 2 (C2: 24.000 m<sup>2</sup>/año, H<sub>e</sub>: 220 m.) los planes mineros obtenidos tienen una duración de 28 años (LOM), de los cuales 7 pertenecen al ramp up, 17 al régimen y 4 al ramp down.

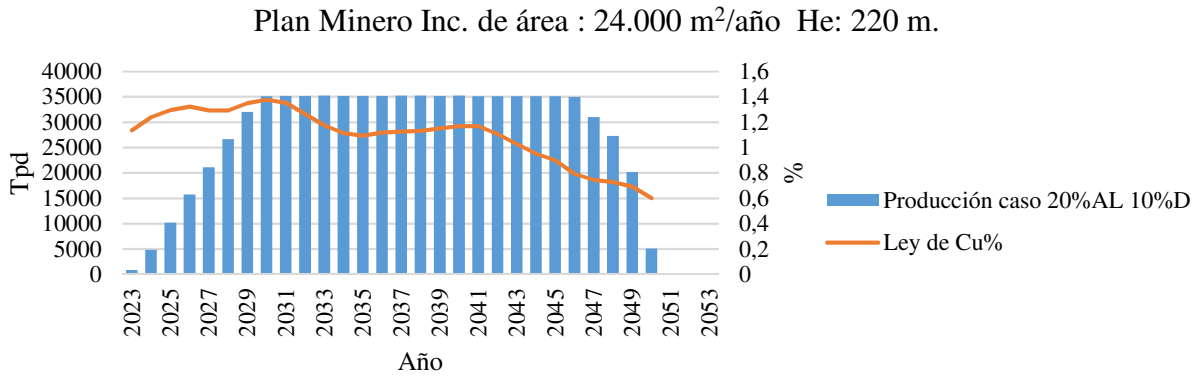


Gráfico 40 Plan minero resultante caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del Cobre. He:220 m.

Para el Caso 3 (C2: 27.000 m<sup>2</sup>/año, H<sub>e</sub>: 200 m.) los planes mineros obtenidos tienen una duración de 26 años (LOM), de los cuales 8 pertenecen al ramp up, 14 al régimen y 4 al ramp down.

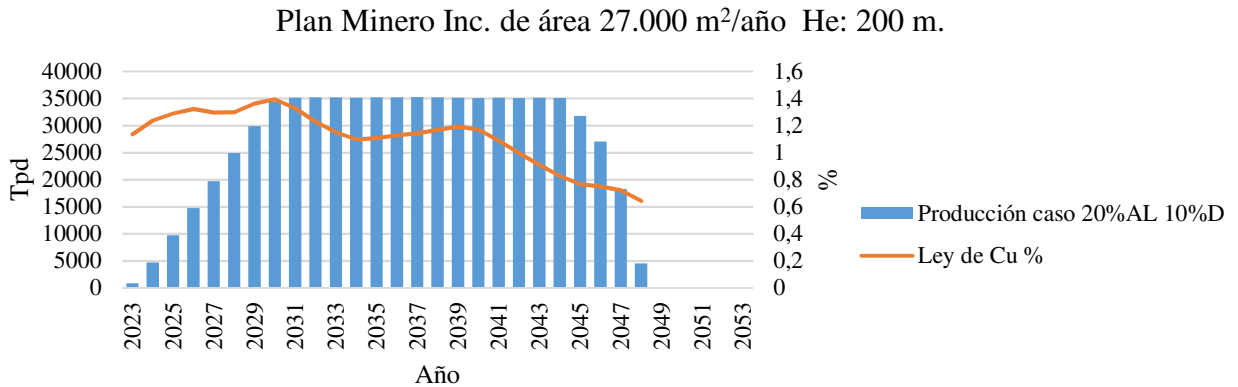


Gráfico 41 Plan minero resultante caso 20%AL 10%D. Estrategia N°2 Precio Bajo del cobre. He:200 m.

La variación del área en quiebre, liberada y abierta en cada caso evaluado se encuentra en un gráfico del Anexo G, en el cual se detalla el área promedio durante la etapa de régimen.

### Ritmo ramp up

El mayor aumento en el ritmo de ramp up se da en los casos mixtos, es decir, en los que la disponibilidad de área aumenta un 10% y la altura de liberación es un 20%. Además, en los casos donde la tasa de incorporación de área es mayor (menor altura económica), el aumento en el ritmo de ramp up y la diferencia entre los resultados obtenidos (20%AL, 10%D y 20%AL 10%D) es menor, debiéndose principalmente a los diferentes cuellos de botella que dominan en cada caso, los cuales son detallados más adelante.

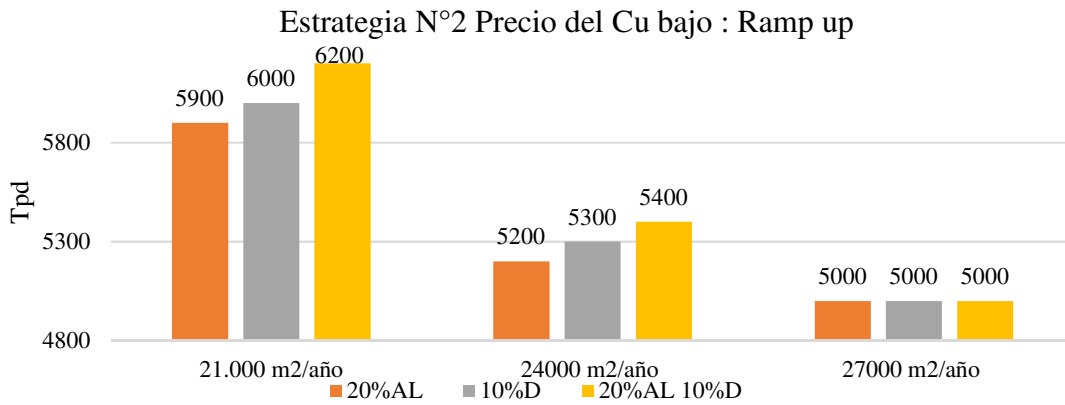


Gráfico 42 Variación ritmo de ramp up Estrategia N° 2 precio bajo del cobre

### Variación ritmo en régimen

Como la tasa de incorporación de área y a altura económica utilizadas son calculadas para obtener un ritmo productivo en régimen de 35.000 tpd, esta será la máxima capacidad productiva que se alcanza en los casos evaluados.

### Variación de ley media de cobre

En los casos evaluados existe un tramo del periodo productivo (años 2031 y 2036) en los que la ley media de cobre de los casos planteados es menor que la del plan minero original (Gráfico 43).

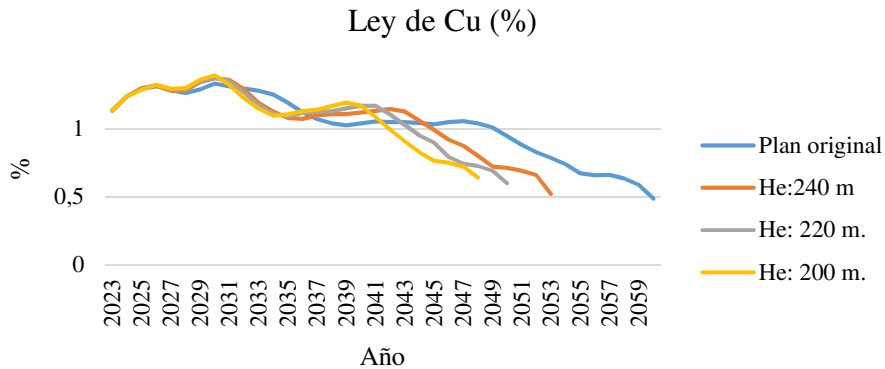


Gráfico 43 Ley de cobre % en casos evaluados

Lo anterior ocurre por la distribución de leyes que posee el sector Andes Norte, ya que hay zonas que poseen altas leyes a mayores alturas de columna que las planteadas en los casos C1(He:240 m.), C2(He:220 m.) y C3 (He:200 m.) (Ilustración 46), por lo que dejar fuera estas reservas generan la disminución de la ley media de cobre detectada.

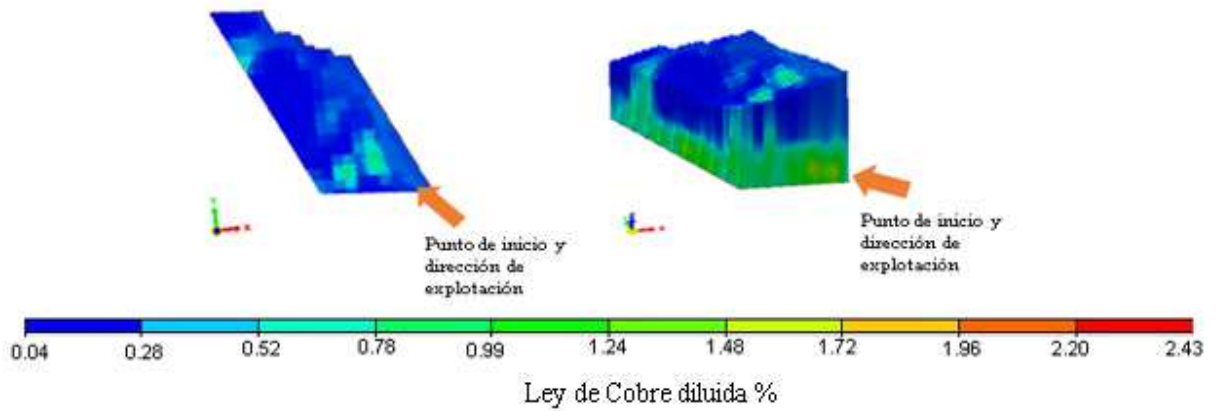


Ilustración 46 Ley de cobre diluida %, modelo de bloques para Andes Norte

### Limitantes de producción

El menor incremento en el ramp up y la poca diferencia entre los resultados obtenidos al modificar los parámetros de planificación considerados (10%D, 20%AL y 20%AL 10%D) al incrementar la tasa de incorporación de área junto con la disminución de la altura económica se debe a los diferentes cuellos de botella que aparecen en cada caso , ya que para el C1 ( 21.000 m<sup>2</sup>/año , He: 240m.) el cuello de botella es la calle y en el caso C2 (24.000 m<sup>2</sup>/año , He: 220 m. ) y C3 ( 27.000 m<sup>2</sup>/año , He:200 m. ) es principalmente la capacidad del área.

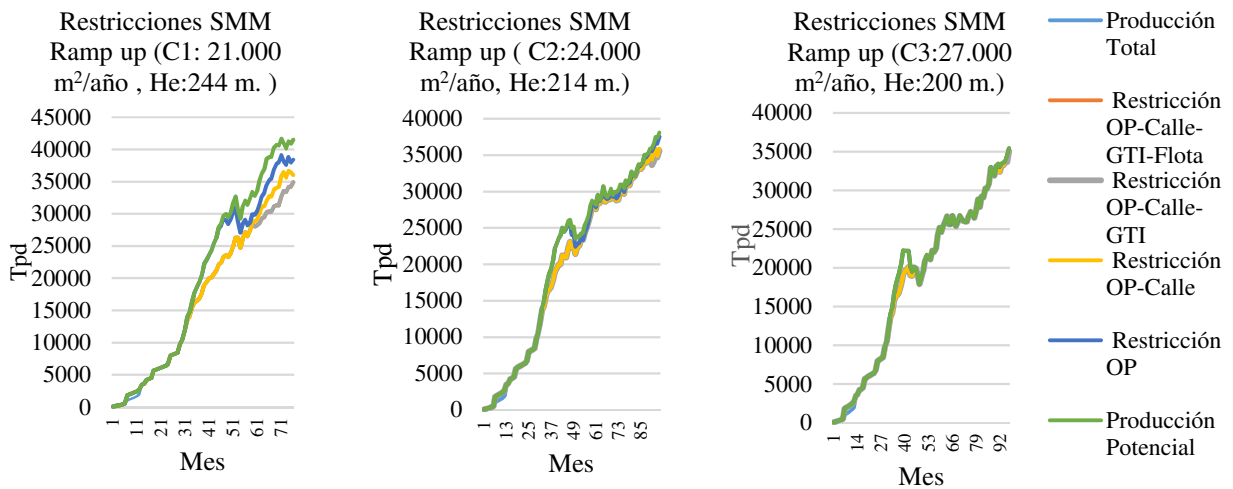
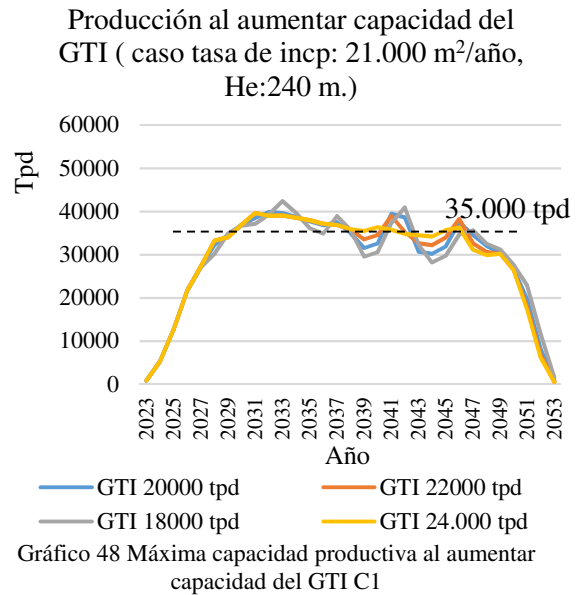
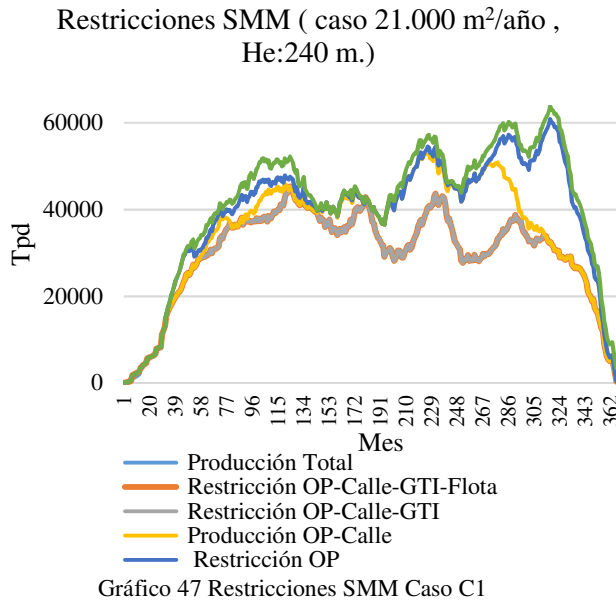


Gráfico 44 Restricciones SMM C1 ramp up

Gráfico 45 Restricciones SMM C2 ramp up

Gráfico 46 Restricciones SMM C3 ramp up

En los 3 casos planteados el principal cuello de botella en la etapa de régimen es el sistema de transporte intermedio (GTI). A pesar de esto, si la capacidad del GTI es aumentada, el efecto que esto tiene en la producción es poco ya que la capacidad máxima que tiene el área no permite aumentar de sobre manera la producción



## Resumen Resultados Estrategia N°2 precio bajo del cobre

Una tabla resumen con los resultados obtenidos en la estrategia de explotación N°2 para precio bajo del cobre se detalla en la tabla a continuación:

Tabla 21 Resumen de estrategia N°2 precio bajo de cobre

Caso	Incorporación de área (m <sup>2</sup> /año)	Altura económica (m)	Parámetro	Duración (años)			
				ramp up	régimen	ramp down	LOM
C1	21.000	240	10%D	7	19	6	32
			20%AL				
			20%AL 10%D				
C2	24.000	220	10%D	7	17	4	28
			20%AL				
			20%AL 10%D				
C3	7.000	200	10%D	8	14	4	26
			20%AL				
			20%AL 10%D				

La modificación de la altura de liberación y/o disponibilidad de área produce un aumento en la tasa de crecimiento de la producción en la etapa de ramp up, siendo levemente mayor en el caso mixto (20%AL 10%D) seguido del evaluado con un aumento del 10% en la disponibilidad (10%D) y por último el de menor altura de liberación (20%AL). La disminución de ley media de cobre y las menores reservas contempladas en los casos evaluados, no permitirán obtener mayores ganancias que el plan minero original.

## Resumen de estrategias en base al precio del Cu

Los principales resultados obtenidos en las estrategias evaluadas son:

- 1) Aumento entre un 10% y 24% en ritmo de crecimiento en etapa de ramp up, siendo mayor en los casos que consideran un aumento del 10% en la disponibilidad de área (caso aislado (10%D) y caso mixto (X%AL 10%D)).
- 2) Producción en régimen está limitada (según sea el caso) por la capacidad del área abierta o del sistema de manejo de materiales, principalmente del sistema de transporte intermedio (GTI).

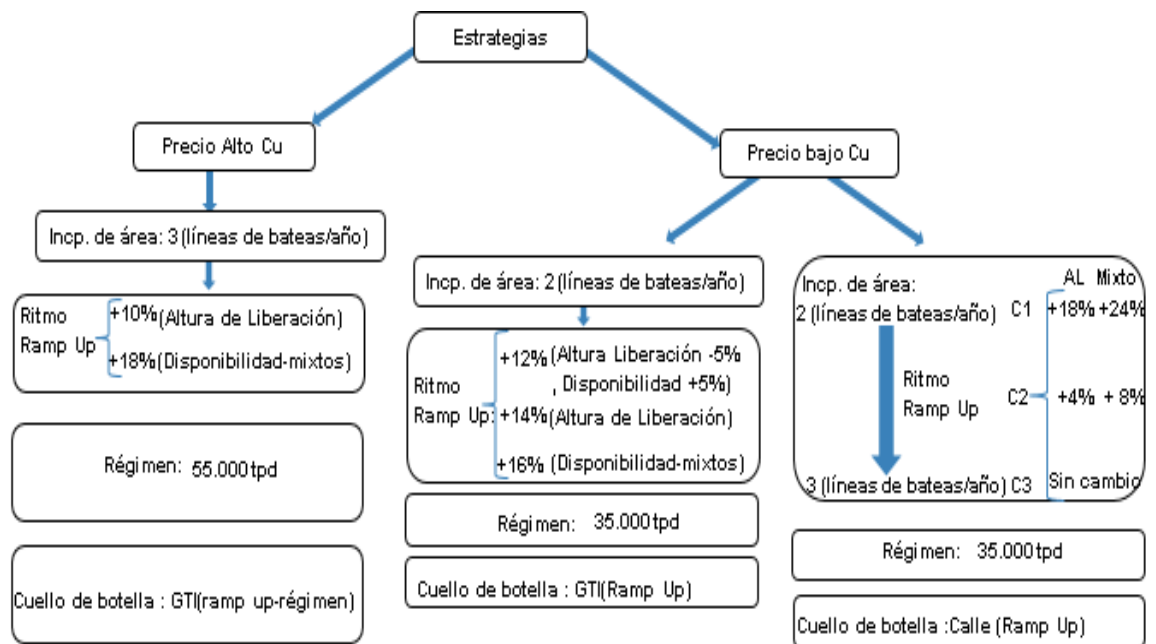


Ilustración 47 Resumen de resultados de estrategias evaluadas

### 6.3.3. Evaluación económica de estrategias de explotación

La evaluación económica del cobre y molibdeno se hace en base a concentrado. Los parámetros económicos utilizados para el cálculo de los ingresos son los detallados en la Tabla 22.

Tabla 22 Parámetros económicos para cálculo de ingresos (División El Teniente, 2017)

Parámetro	Valor
Precio del Cu (cUSD\$/lb)	287
Precio del Mo (USD\$/kg)	22
Recuperación de Cu (%)	88
Recuperación de Mo (%)	67
Descuento Cu (cUSD\$/lb)	48.2
Descuento Mo (USD\$/kg)	3.8

En el caso de los gastos, existen 3 grupos:

- 1) Gastos de preparación: Costo de incorporación de área es de 3.704 (USD\$/m<sup>2</sup>) (División El Teniente , 2017)
- 2) Gasto Mina: Costos de extracción del mineral + gastos generales, estos se dividen en costos fijos y costos variables, los cuales varían con el tiempo según lo expuesto en el Gráfico 49 y Gráfico 50.

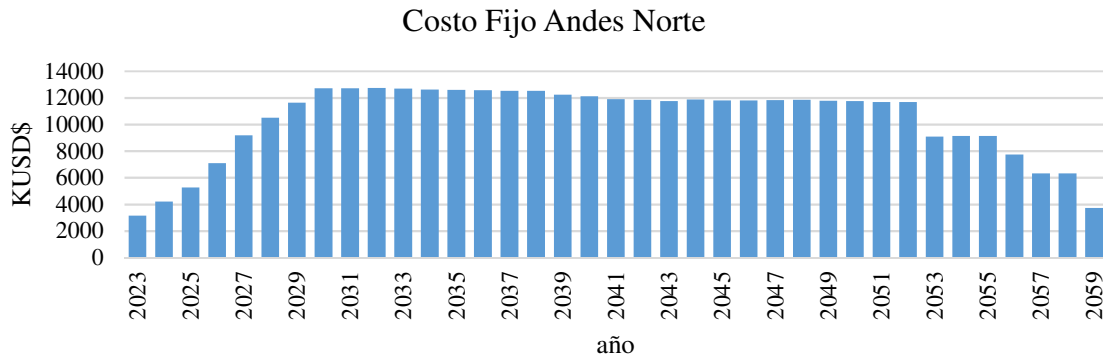


Gráfico 49 Costos fijos Andes Norte (División El Teniente , 2017)

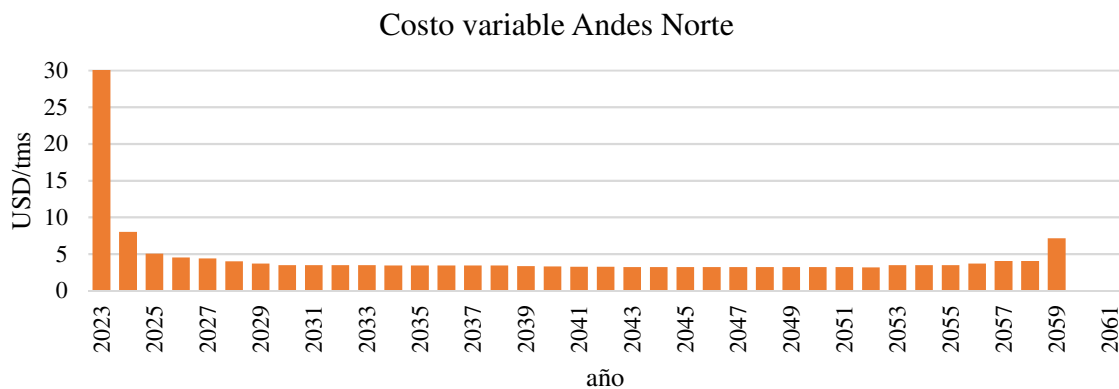


Gráfico 50 Costos variables Andes Norte. (División El Teniente , 2017)

- 3) Gastos de Planta: Gasto en que se incurre para transformar el mineral a concentrado para su posterior comercialización. En este caso se considera un costo de 8.6 (USD\$/tms) (División El Teniente, 2017).

En el plan minero original de Andes Norte, la inversión preoperacional requerida es de 1.900 (MUSD\$), la cual se divide en los ítems detallados en el Gráfico 51.

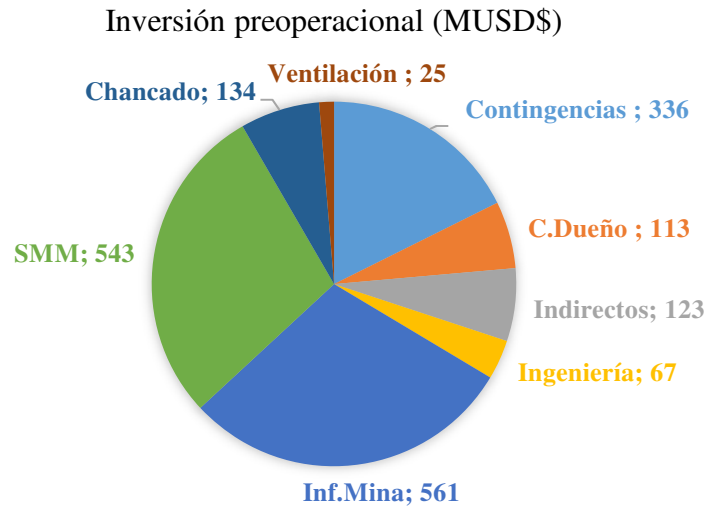


Gráfico 51 Inversión Preoperacional Andes Norte Caso Base. (División El Teniente , 2017)

Como las estrategias de explotación planteadas se diferencian principalmente en la tasa de incorporación de área (además de la modificación de la disponibilidad de área y altura de liberación), la inversión preoperacional considerada en cada caso depende de que tan rápida sea esta tasa de incorporación, ya que en los casos en que esta sea mayor a la del plan minero original, la inversión necesaria se incrementa al requerir mayor infraestructura habilitada.

Con el fin de diferenciar la inversión preoperacional según la tasa de incorporación de área de cada plan evaluado, el monto del caso base, es decir, 1.900 MUSD\$ es incrementado en el mismo porcentaje que se diferencia la tasa de incorporación evaluada versus la del plan minero base.

Tabla 23 Inversión Preoperacional diferenciada según tasa de incorporación de área

Tasa de incorporación de área	MUSD\$
CB: 18.000 m <sup>2</sup> /año	1.900
21.000 m <sup>2</sup> /año	2.200
24.000 m <sup>2</sup> /año	2.400
27.000 m <sup>2</sup> /año	2.700

Además de la inversión preoperacional, se agrega al flujo de caja una carga base proveniente de otras infraestructuras comunes a habilitar para diferentes sectores en cotas superiores a Andes Norte (ST8) y los nuevos proyectos contemplados en el plan de desarrollo alternativo (PDA), que contiene sectores que permitirán en el mediano y largo plazo mantener la producción de la División El Teniente. La porción del total de las inversiones (Gráfico 52) que se carga al sector Andes Norte depende de su producción, según la Ecuación 10.



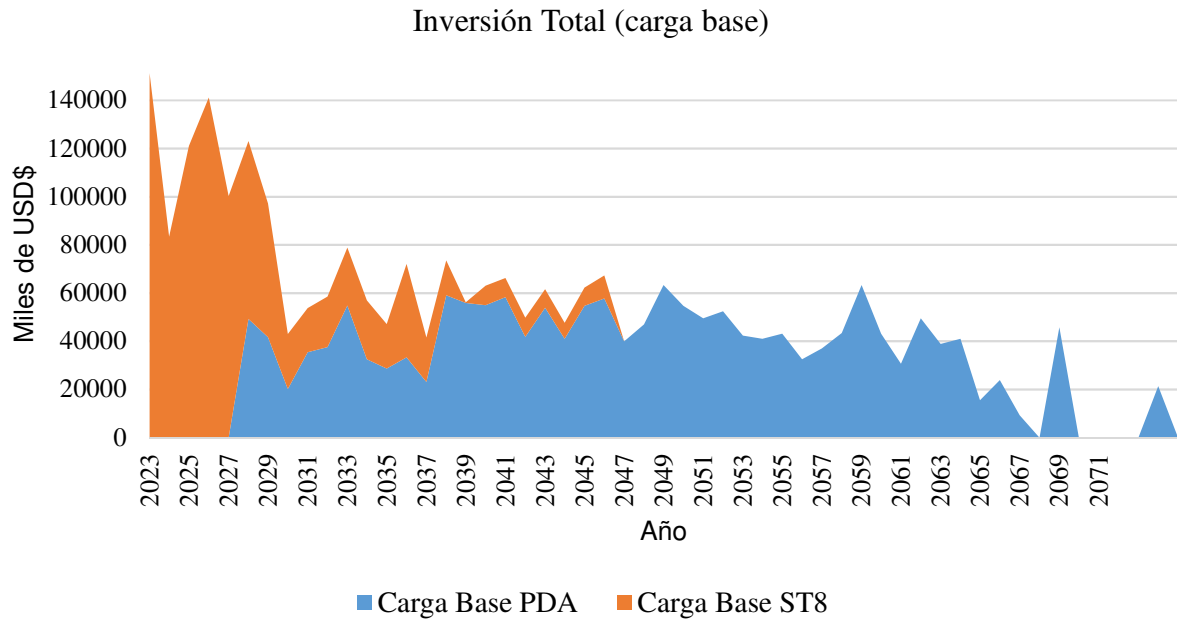


Gráfico 52 Inversión Total (ST8 + PDA) (División El Teniente , 2017)

Ecuación 10 Inversión por carga base

$$Inversión_{carga\ base} = Carga\ base_{PDA+ST8,i} \cdot \left( \frac{Producción_{AN,i}}{Producción_{ST8,i} + Producción_{PDA,i}} \right)$$

Donde  $i$  es un año de producción

La producción considerada en el caso base para el Nuevo Nivel Mina y los sectores que actualmente están en explotación (ST8-ST7 y rajo sur), es detallada en el Anexo H. La producción del NNM cambia dependiendo de la estrategia de explotación a evaluar (variación en ritmo de explotación de Andes Norte).

### 6.3.3.1. Indicadores económicos

Para el cálculo del VAN se utiliza una tasa de descuento del 8% y todos los gastos e ingresos descritos anteriormente.

En todas las estrategias evaluadas, la que presenta un mayor VAN es la del precio alto del cobre, es decir, en la que se aumenta la incorporación de área a 3 líneas de bateas por año. Ahora, si se compara la agregación de valor de la variación de los parámetros: disponibilidad de área y/o altura de liberación en esa estrategia, el mayor VAN se da en el caso en que se considera el cambio de estos dos parámetros simultáneamente (20%AL 10%D), el cual se incrementa en un 24% con respecto al caso base.

La estrategia que presenta peor VAN es en la que se disminuye la altura económica, aun cuando se modifique ambos parámetros de planificación en estudio. Esto se produce principalmente por la distribución de leyes que posee el sector Andes Norte, la cual tiene zonas con altas leyes de cobre

a alturas mayores de las consideradas en las estrategias (He: 240 m., He: 220 m., He: 200 m.) por lo que dejar fuera estas reservas impactan la ley media de cobre obtenida.

Si se compara la agregación de valor por separado del aumento de un 10% de la disponibilidad y la disminución de la altura de liberación a un 20%, se tiene que, aunque la diferencia entre ellos es pequeña, en todas las estrategias evaluadas el mayor VAN se da en los casos en que se modificó la disponibilidad de área.

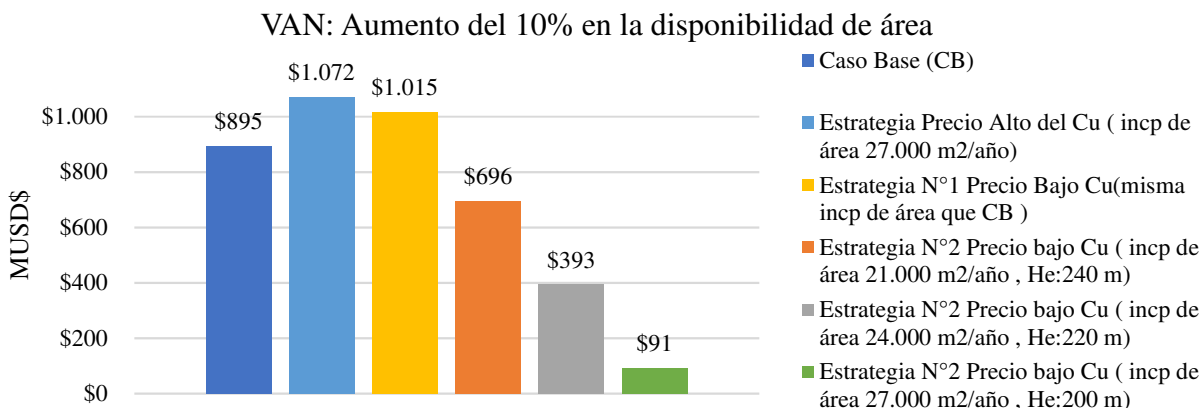


Gráfico 53 VAN de estrategias planteadas al aumentar 10% la disponibilidad de área

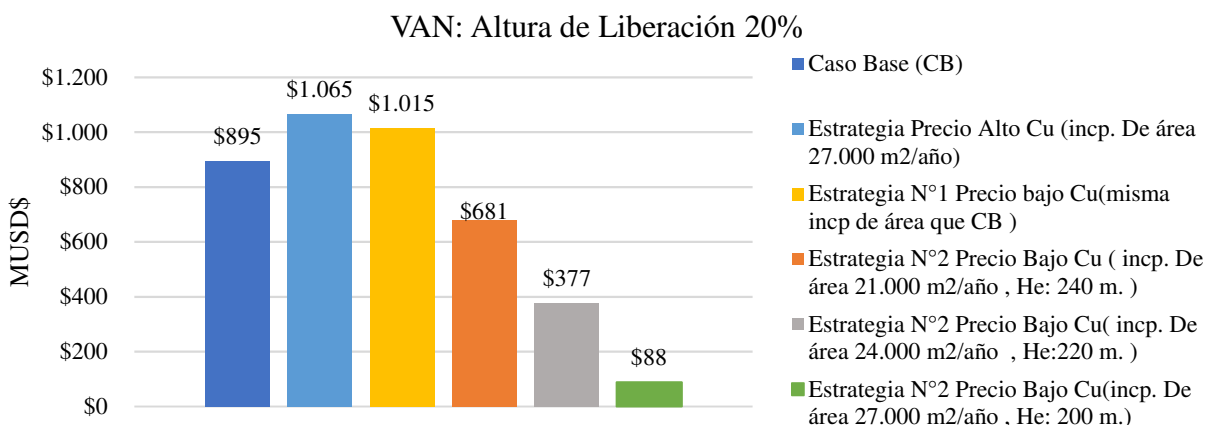


Gráfico 54 VAN de estrategias planteadas al disminuir a un 20% la altura de liberación

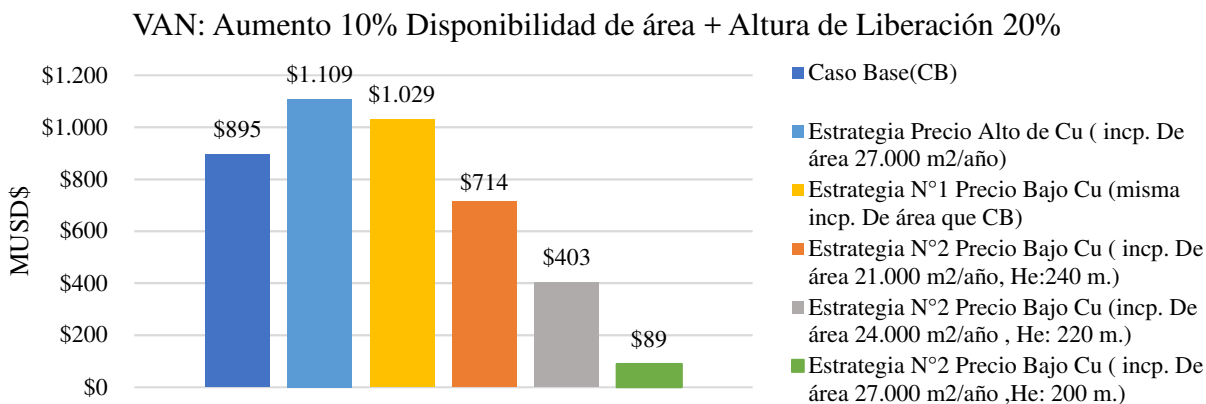


Gráfico 55 VAN de estrategias planteadas al disminuir a un 20% la altura de liberación y aumentar en 10% la disponibilidad de área

El TIR y Payback asociado a cada estrategia se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 24 TIR y Payback de estrategias planteadas

		TIR (%)	Payback(años)
Caso Base(CB)		13	14
Estrategia Precio alto del cobre		13-14	15
Estrategia Precio Bajo cobre	N°1 Misma incp. de área que CB	14	14
	N°2 incp de área 21.000 m <sup>2</sup> /año, He: 240 m	12-13	14-15
	N°2 incp de área 24.000 m <sup>2</sup> /año, He: 220 m	11-12	15
	N°2 incp de área 27.000 m <sup>2</sup> /año, He: 200 m	10	16

Según lo expuesto en la Tabla 24, las estrategias con mayor tasa interna de retorno (TIR) son la de precio alto de cobre y la estrategia N°1 del precio bajo del cobre, es decir, en la que se mantiene la tasa de incorporación de área del caso base.

En cuanto al tiempo de retorno de la inversión, se tiene que la única estrategia que genera un payback igual al caso base es en la N°1 de precio del Cu bajo (misma incorporación de área que el plan original). Las demás, poseen un tiempo de retorno mayor producto del aumento en la inversión inicial impuesto en función de la tasa de incorporación de área de cada estrategia evaluada.

Tomando en consideración los tres indicadores económicos descritos anteriormente, se tiene que la estrategia que genera un mayor retorno es la que incluye una mayor tasa de incorporación de área (Estrategia de precio alto del cobre), sin embargo, la que presenta mayor solidez ante cambios en la tasa de descuento y genera en menor tiempo el retorno de la inversión inicial es la estrategia en la que se mantiene la tasa de incorporación del plan original y se agrega la modificación de los parámetros de disponibilidad de área y/o altura de liberación, es decir, la estrategia N°1 del precio bajo del cobre.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

Al incluir en el plan minero de Andes Norte un aumento en la disponibilidad de área o disminución de la altura de liberación se genera una ganancia de VAN de 120 MUSD\$ con respecto al plan original, sin embargo, este impacto es mayor en los casos mixtos, es decir, en los que ambas modificaciones son evaluadas en conjunto (mayor disponibilidad y menor altura de liberación), obteniéndose una ganancia de 134 MUSD\$.

A pesar de lo anterior, el parámetro que puede comprometer de forma concreta una mayor ganancia de valor en un plan minero es el aumento en la disponibilidad de área, ya que de este efecto existen más evidencias y estudios que lo respaldan basados en el mejoramiento de la fragmentación del mineral ((Brzovic et al,2015), (Brzovic et al,2016), (Superintendencia de Geología DET, 2016)), en comparación con la disminución en la altura de liberación, que si bien existen mediciones que comprueban la eficacia del fracturamiento hidráulico para su modificación ((Araya, 2017),(Molina et al,2008)), aún no hay estudios científicos concretos que lo respalden.

Al comparar las estrategias de explotación planteadas para el sector Andes Norte, se concluye que la que genera una mayor ganancia económica es la elaborada en base al precio alto del cobre, es decir, en la que se aumenta la tasa de incorporación de área, gracias a la holgura generada por el incremento en la disponibilidad de área y/o disminución de la altura de liberación. Además, si se logra liberar la restricción de producción impuesta por la capacidad del sistema de transporte intermedio(GTI) se podría alcanzar un ritmo de producción de hasta 60 ktpd.

En parte, esta ganancia de VAN se genera por el aumento entre un 10% y 20% del ritmo de crecimiento en ramp up (dependiendo de la estrategia evaluada y el parámetro modificado: disponibilidad y/o altura de liberación), lo que permite reducir el tiempo necesario para alcanzar el régimen.

Si bien existe un potencial para incrementar la producción en régimen al generarse un aumento en el área liberada, esta no es captada en su totalidad por las limitantes existentes, siendo la principal la capacidad del sistema de manejo de materiales (SMM). Por lo mismo, el diseño del SMM debe considerar desde un inicio los beneficios que se podrían capturar con el fracturamiento hidráulico ya que, de lo contrario, solo se tendrán mejoras en el control de los parámetros geomecánicos y no en el ritmo de producción.

La estrategia de explotación que entrega peores resultados económicos es en la que se disminuye la altura económica, sin embargo, esto no implica que no pueda generar mejores resultados en otros sectores ya que su efectividad depende directamente de la distribución de leyes que posea cada zona en específico.

En cuanto al impacto del fracturamiento hidráulico en la disponibilidad de área, se tienen diferentes resultados en el área en quiebre y liberada. En el primer caso, el aumento en la disponibilidad de los puntos liberados varía entre un 3% y 5%, lo cual podría contribuir a una mayor regularidad en el avance y forma del cave back al disminuir la práctica de sobre extracción en puntos aledaños

para cumplir con las metas productivas, lo que a su vez disminuye la formación de bloques de gran tamaño que pudiesen obstruir los puntos de extracción. Además, permitirá una mayor efectividad del equipo de carguío (LHD) al reducir los ciclos empleados para el traslado de sobre tamaños a zonas donde no inhabiliten el punto de extracción.

En el caso del área en quiebre, el impacto del fracturamiento hidráulico es mayor, generando un aumento entre un 6% y 10%, esto se debe a que el pre-acondicionamiento se implementa en los primeros metros de columna de mineral y por lo tanto el mayor efecto se tendrá en los bloques extraídos al inicio de cada punto de extracción. Este efecto en el área en quiebre, permite tener un mayor control y regularidad de los parámetros geomecánicos como el ángulo y velocidad de extracción, además de brindar un avance continuo del frente de hundimiento y cumplir con la incorporación de área planificada, evitando atrasos en la producción.

Además del efecto diferenciado del fracturamiento hidráulico en la disponibilidad de área en quiebre y liberada, también se produce una variación de los resultados obtenidos según las características de la roca pre-acondicionada, por lo tanto, su diseño debiese diferenciarse según el tipo de roca a tratar y el valor del parámetro disponibilidad de área comprometido en un plan, lo cual se traduce en gastos diferenciados para una misma unidad de área pre-acondicionada, pero a la larga permitirá tener un porcentaje de disponibilidad de área similar en todo el sector productivo y disminuir costos asociados.

## **7.2. Recomendaciones**

A partir del trabajo desarrollado, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Estimar impacto del mejoramiento de la fragmentación del mineral por el fracturamiento hidráulico, en la capacidad efectiva del equipo LHD para ser incluido dentro de la restricción máxima establecida para la calle en los planes mineros.
- Innovar en los sistemas de manejo de materiales utilizados, para evitar que estos sean limitantes en la producción.
- Implementar fracturamiento hidráulico a mayor altura de columna de mineral, realizando un trade off entre el aumento de costos y el potencial incremento en la producción debido a la mayor disponibilidad de área en los puntos liberados.
- Realizar diseño de fracturamiento hidráulico de acuerdo con el tipo de roca a tratar.

## 8. Bibliografía

- Araneda, O., Morales, R., Rojas, E., Henríquez, J., & Molina, R. (2007). *Rock Preconditioning application in virgin caving condition in a panel caving mine*. División El Teniente. Codelco.
- Araya, P. (2017). *Análisis de la explotación de los Bloques 1 y 2 de Esmeralda*. Nota interna de División El Teniente, Codelco.
- Barrera, V., Valderrama, C., Lara, P., Arancibia, E., Báez, F., & Molina, E. (2014). *Caving propagation and dilution control through the pre-conditioning technology*. En *Caving 2014* (págs. 532-537). Santiago, Chile.
- Belmonte, A. (2008). *Monitoreo Micro-Sísmico de Pruebas de Hidrofracturamiento*. GeoBlast S.A.
- BNamericas. (2017). *Codelco-División El Teniente*. Obtenido de <https://www.bnamericas.com/company-profile/es/codelco-division-el-teniente-codelco-division-el-teniente>.
- Brown, E., & Brady, B. (1985). *Rock Mechanics for underground mining*. Springer.
- Brzovic, A., Rogers, S., Webb, G., Hurtado, J., Marin, N., Schachter, P., Alvarez, J., Barahona, K. (2015). *Discrete fracture network modelling to quantify rock mass pre-conditioning at the El Teniente Mine*. Paper, División El Teniente. Codelco.
- Brzovic, A., Vallejos, J., Arancibia, E., Burgos, L., Gaete, M., Delonca, A., & Barrera, V. (2016). *Analysis and Modelling of the Fragmentation Process – Case Studies at El Teniente Mine*.
- Bustamante, D., Constanzo, H., & Larrain, M. (2010). *Mine Planning at el Teniente*.
- Bustamante, J. (2014). *Ingeniería de rocas en la planificación minera de la mina El Teniente*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Santiago de Chile.
- CEPAL. (2005). *Metodología general de identificación, preparación y evaluación de proyectos de inversión pública*. Santiago, Chile: Manual 39.
- Cerrutti, C. (2008). *Guía preliminar de criterios de diseño y parámetros de planificación con pre-acondicionamiento*. Informe IM2 P 45-07-IP-004-V0. Codelco Chile.
- Cerrutti, C. (2009). *Estudio de la respuesta sísmica de macizos rocosos pre-acondicionados*. Informe IM2 P 76/08-IP-003, Codelco Chile.
- Chacón, E., Jeffrey, R., & Van As, A. (2004). *Hydraulic fracturing used to precondition ore and reduce fragment size for Block Caving*. En *Massmin 2014* (págs. 529-534). Santiago, Chile
- Codelco (2010). *Libro del pre-acondicionamiento del macizo rocoso*.

- Codelco. (2010). *Informe de requerimientos .Criterio de Diseño , Modelo de Planificación Minera V4D . Etapa de Factibilidad.*
- Codelco (2017). *Operaciones.* Obtenido de [https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/edic/base/port/operaciones.html](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/operaciones.html)
- Codelco (2017). Estados Financieros y Memorias: *Resultados 2016.* Obtenido de [https://www.codelco.com/resultados-2016/prontus\\_codelco/2016-05-27/125443.html](https://www.codelco.com/resultados-2016/prontus_codelco/2016-05-27/125443.html)
- Cornejo, J. (2016). *Variantes de Hundimiento y preparación minera (Power Point). Clase del curso MI5073 Planificación Minera. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile .* Obtenido de <http://www.u-cursos.cl>.
- Contreras, J., Cornejo, J., & Caviedes, C. (2016). *Metodología para estimación de la tasa de incorporación de área en panel caving, Codelco –División El Teniente.* Santiago,Chile: UMining 2016.
- División El Teniente (2014). *Lineamientos geomecánicos de planificación PQ-2014.* Nota Interna .Codelco.
- División El Teniente (2015). *Plan de negocios y desarrollo 2015: Proyecto Dacita.* Nota Interna .Codelco.
- División El Teniente. (2017). *Antecedentes económicos y comerciales para planificación 2018.* Codelco.
- División El Teniente (2017). *Evaluación económica PDA.* Planilla de Microsoft Excel.Codelco
- Dorador, L. (2013). *Alternativas de predicción de fragmentación secundaria en minería de hundimiento masivo (Block/Panel Caving).* Canada: Golder Associates Ltd. Burnaby BC.
- Espíndola.J (2013). *Efectos del fracturamiento hidráulico sobre una explotación por Panel Caving , mina Reservas Norte de División El Teniente , Codelco.*Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Santiago de Chile.
- Forsyth, J. (2004). *Finanzas empresariales: Rentabilidad y Valor.* Lima , Perú: Crosland.
- Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo DET (2017). *Informe del proceso de planificación Anual.*Codelco.
- Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollos DET (2014). *Etapas en el proceso de planificación - CPlanner .*Codelco.
- Hurtado, J., Pereira, J., & Campos, R. (2007). *BackAnalysis de fragmentación , minas :Diablo Regimiento , RENO,Teniente 4 Sur Tonalita.* Área de Geología , División El Teniente.Codelco.
- JKMRC. (1994). *Proyecto P93E.* División El Teniente .Codelco.
- Juhász, L. (2011). *Net Present Value versus Internal Rate of Return .* Recent issues in economic development.

- Kavous, A. (2012). *Payback Period and NPV: Their Different Cash Flows*. Journal of economics and finance education .
- Laubscher, D. (1994). *Cave Mining-the state of the art*. . The journal of the south African Institute of Mining and Metallurgy.
- Maass, S. (2013). *Alternativas tecnológicas para descuelgue de zanjas*. Memoria para optar al título de Magister en Minería. Universidad de Chile .
- Molina, R., Cerrutti, C., Henriquez, J., Morales, R., & Apablaza, R. (2008). *Preconditioning implementation on rock bulks in Codelco Chile and its results*. Massmin.
- Ovalle, A. (2012). Mass Caving Maximum Production Capacity. MassMin . Sudbury, Ontario , Canada: Canadian Institute of Mining , Metallurgy and Petroleum.
- Pesce, J., Ovalle, A., & Metálica Consultores S.A. (2004). Production capacity of a mass caving. En *Massmin* (págs. 75-78). Santiago, Chile .
- Rojas, E., Molina, R., & Constanzo, H. (2000). The Pre-Undercut Caving Methods at the Teniente mine,Codelco, Chile. En *Massmin* (págs. 261-266). Brisbane , Australia.
- Rubio, E. (2007). *Horizontes de Planificación (Power Point). Clase del curso MI75E-1 Tópicos Avanzados en Planificación Minera* . Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Obtenido de <http://www.u-cursos.cl>
- Ruiz, H. (2016). *Propuesta de diseño para procesos de reducción secundaria en proyecto mina Chuquicamata subterránea*.Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial.Universidad de Chile.
- Salazar, M., Ramirez, M., & Brzovic, A. (2016). *Análisis de productividad y Colgaduras en puntos de extracción , validación entre fuentes de información GMIN y GRMD*. Informe interno Superintendencia de Geología.División El Teniente . Codelco.
- SME (2001). Underground Mining Methods ,Capitulo 51: *Preundercut Caving in El Teniente Mine , Chile*. Editado por Hustrulid W. y Bullock R.
- Superintendencia de Geología DET (2015). *INF-0025 Análisis de productividad y colgaduras en puntos de extracción. Validación entre fuentes de información GMIN y GRMD* . División El Teniente , Codelco.
- Superintendencia de Geología DET (2016). *Fracturamiento Hidráulico para la gestión de la fragmentación de la roca primaria en mina El Teniente*. División El Teniente. Codelco.
- Superintendencia de Geología DET (2017). *Análisis de reducción secundaria y fragmentación ,Sector RENO-Dacita*. División El Teniente. Codelco.
- Superintendencia de Geomecánica DET (2014). *Back análisis conexión de bloque 2 , Mina Esmeralda Sur*. Codelco.
- Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET (2016). *Presentación interna* Codelco.



- Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET (2017). *Herramienta de Planificación Minera CPlanner*. Codelco.
- Superintendencia de Planificación Minero-Metalúrgica DET (2017). *Planificación Minera Proyecto Andes Norte 35 Ktpd*. División El Teniente, Codelco.
- Tagle, D. (2015). *Análisis retrospectivo de efecto en planes de producción de lineamientos geomecánicos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Santiago de Chile .
- Trueman, R., Pierce, M., & Wattimena, R. (2002). *Quantifying stresses and support requirements in the undercut and panel caving mines*. Pergamon.
- Vicepresidencia Corporativa de proyectos. (2009). *Proyecto Nuevo Nivel Mina-Punto de inicio RENO -DR-Esmeralda*. Codelco.
- Vicepresidencia Corporativa de proyectos (2013). *Filosofía operacional integrada PMCHS*. Santiago.Codelco.
- Vicepresidencia de proyectos DET (2017). *Análisis de constructibilidad PNNM -Andes Norte 35 ktpd (P.de inicio Fw)*. División El Teniente. Codelco.

# 9. Anexos

## Anexo A

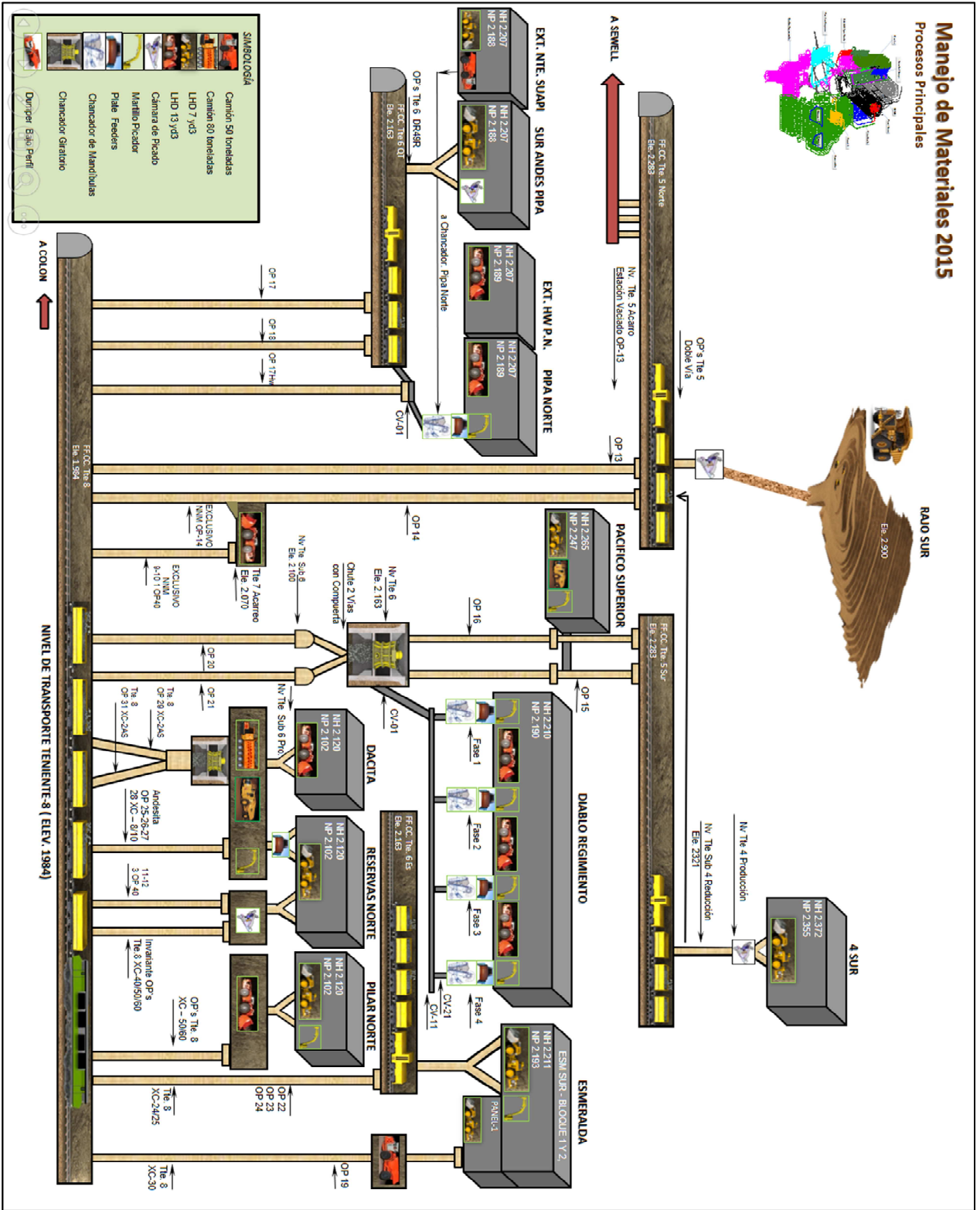


Ilustración 48 Sistema de manejo de materiales DET. Fuente: PND 2015

## Anexo B

Tabla 25 Producción y leyes de Cu y Mo asociadas. Plan minero Andes Norte

Año	Ritmo de Producción	Ley de Cu%	Ley de Mo %
2023	1000	1.14	0.02
2024	5000	1.24	0.02
2025	10000	1.29	0.02
2026	15000	1.32	0.03
2027	20000	1.28	0.03
2028	25000	1.26	0.03
2029	30000	1.29	0.03
2030	35000	1.33	0.03
2031	35000	1.31	0.03
2032	35000	1.30	0.03
2033	35000	1.28	0.03
2034	35000	1.25	0.03
2035	35000	1.19	0.03
2036	35000	1.12	0.03
2037	35000	1.07	0.03
2038	35000	1.04	0.03
2039	35000	1.03	0.03
2040	35000	1.04	0.03
2041	35000	1.06	0.03
2042	35000	1.05	0.03
2043	35000	1.05	0.03
2044	35000	1.04	0.03
2045	35000	1.03	0.03
2046	35000	1.05	0.03
2047	35000	1.06	0.03
2048	35000	1.04	0.03
2049	35000	1.01	0.03
2050	35000	0.95	0.02
2051	35000	0.88	0.02
2052	35000	0.83	0.02
2053	35000	0.79	0.02
2054	35000	0.74	0.02
2055	34000	0.67	0.02
2056	30000	0.66	0.02
2057	27000	0.66	0.02
2058	24000	0.64	0.02
2059	15000	0.59	0.02
2060	5000	0.49	0.02

## Anexo C

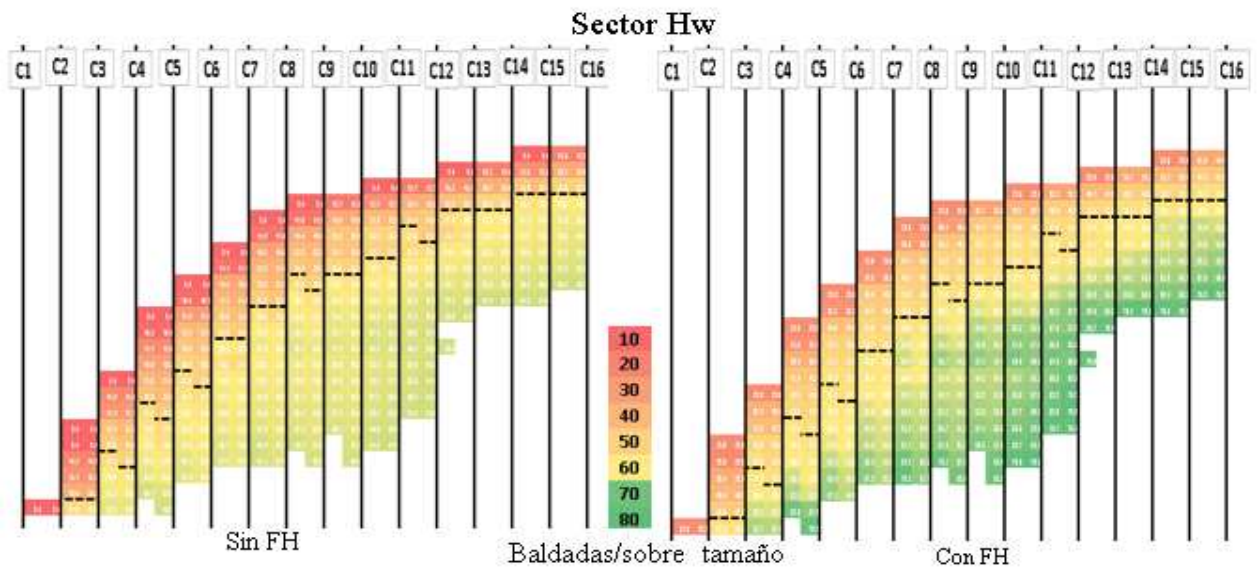


Ilustración 49 Baldadas para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Hw)

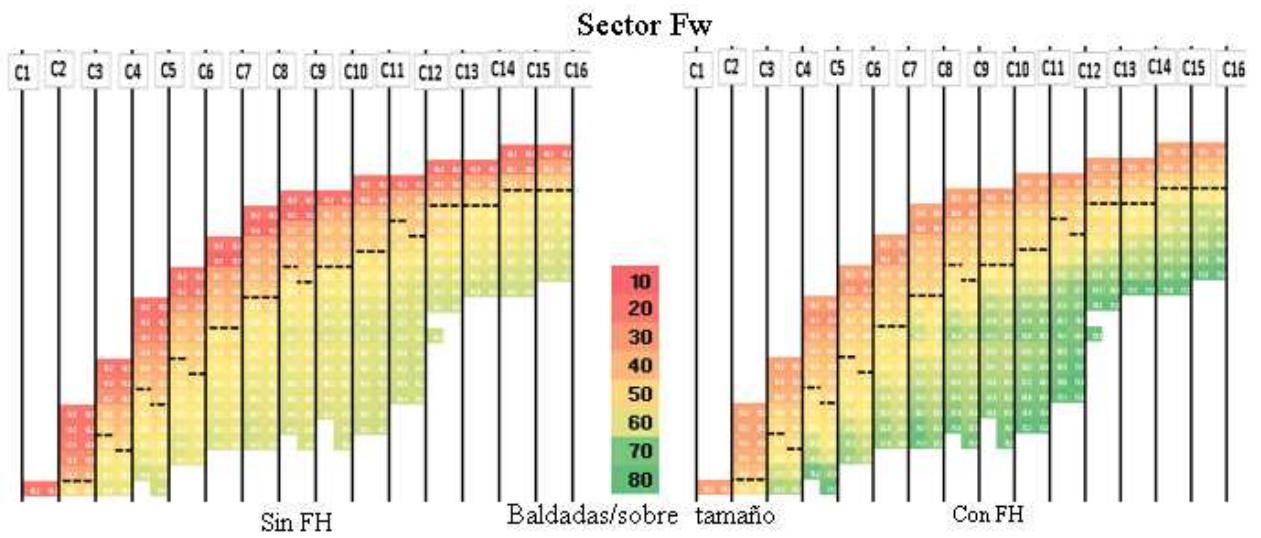


Ilustración 50 Baldadas para que aparezca un Sobre Tamaño (Datos sector Fw)

## Anexo D

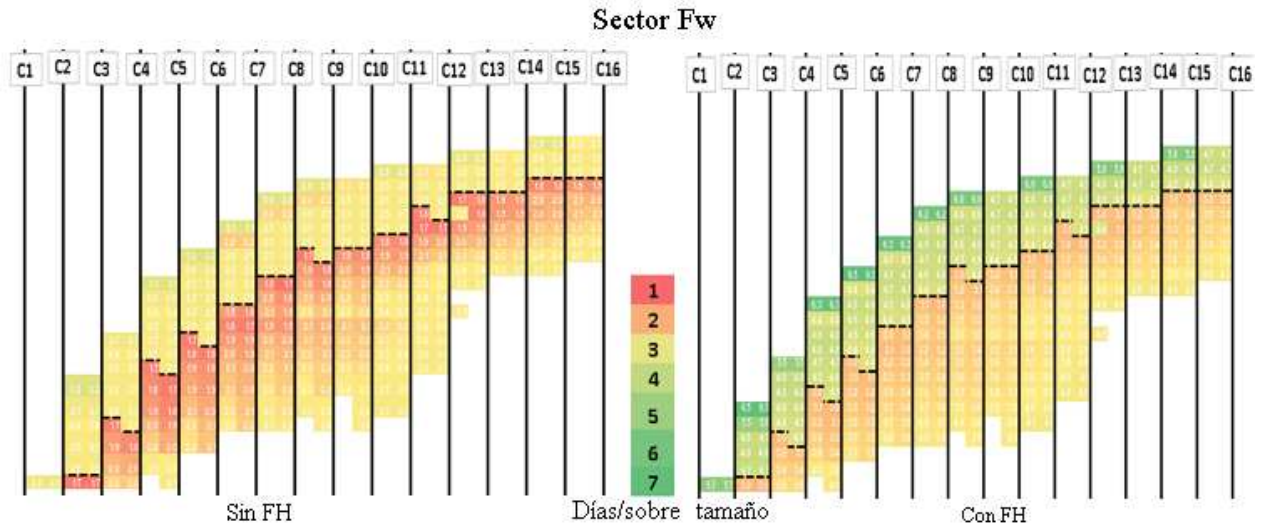


Ilustración 51 Días necesarios para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Fw)

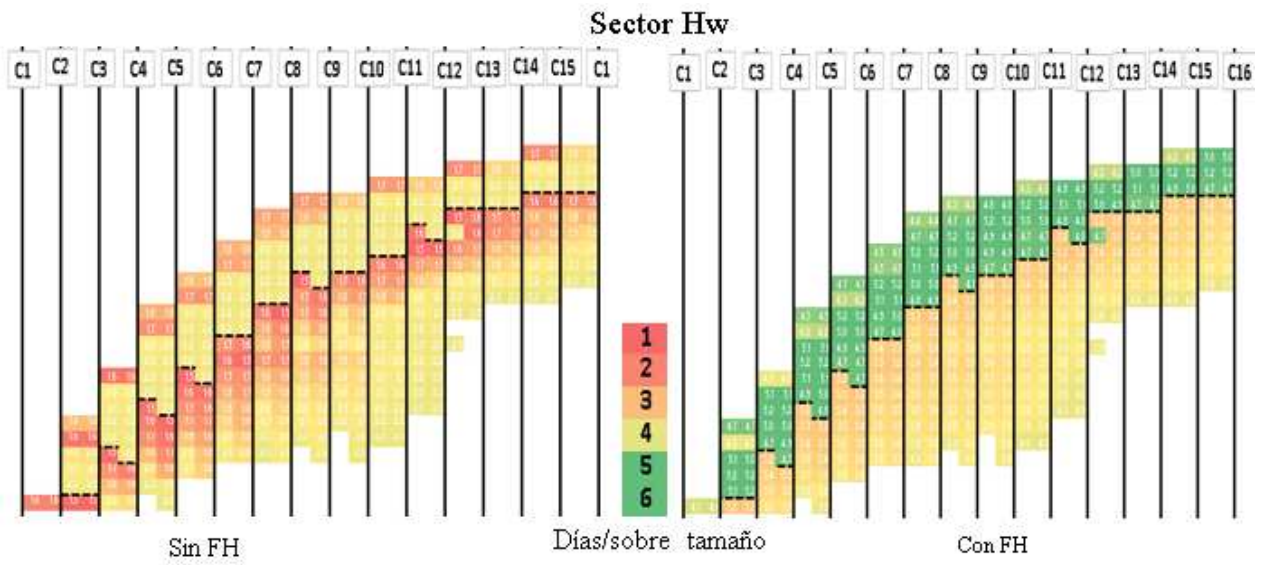


Ilustración 52 Días necesarios para que aparezca un Sobre tamaño (Datos sector Hw)

## Anexo E

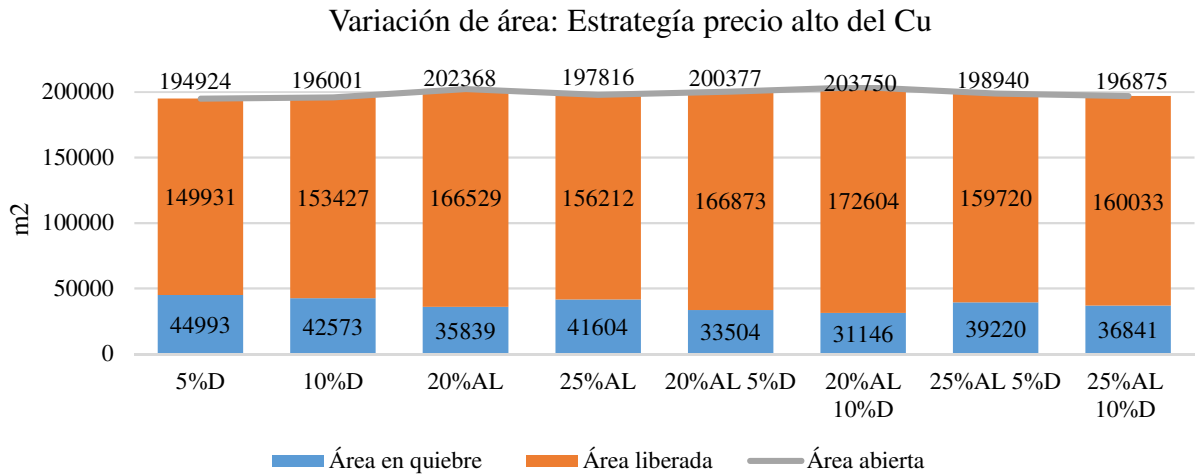


Gráfico 56 Promedio de área (quiebre, liberada, abierta) durante el Régimen. Estrategia precio Alto del Cu

## Anexo F

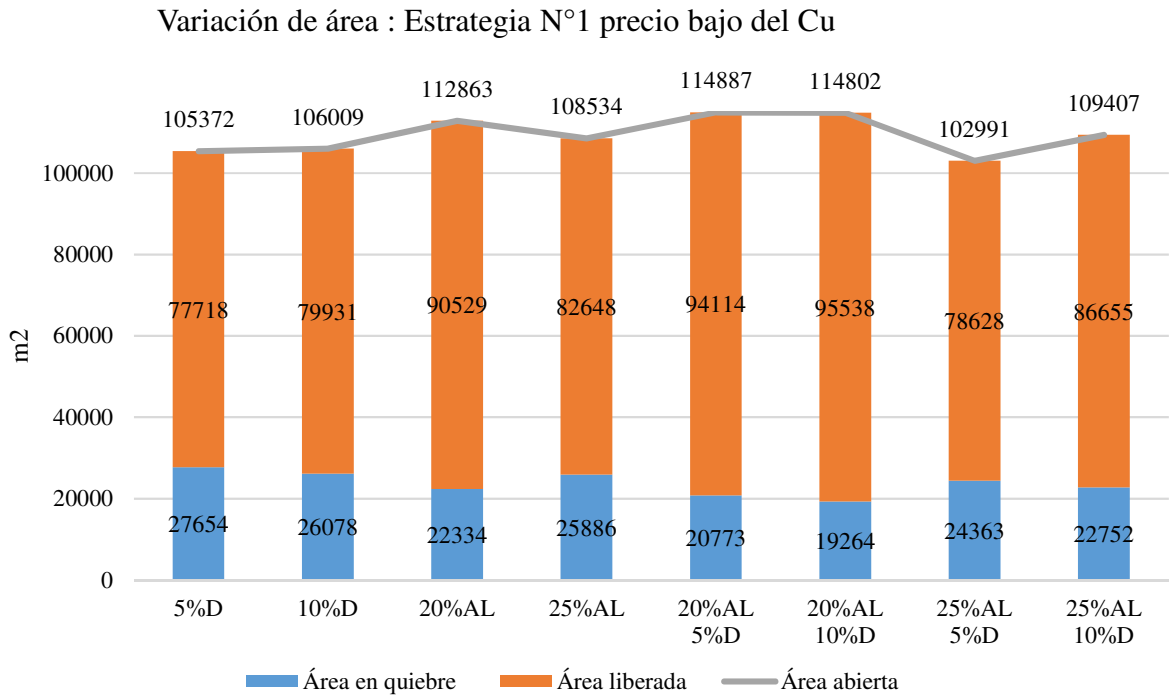


Gráfico 57 Promedio de área (quiebre, liberada, abierta) durante el Régimen. Estrategia N°1 precio bajo de Cu

## Anexo G

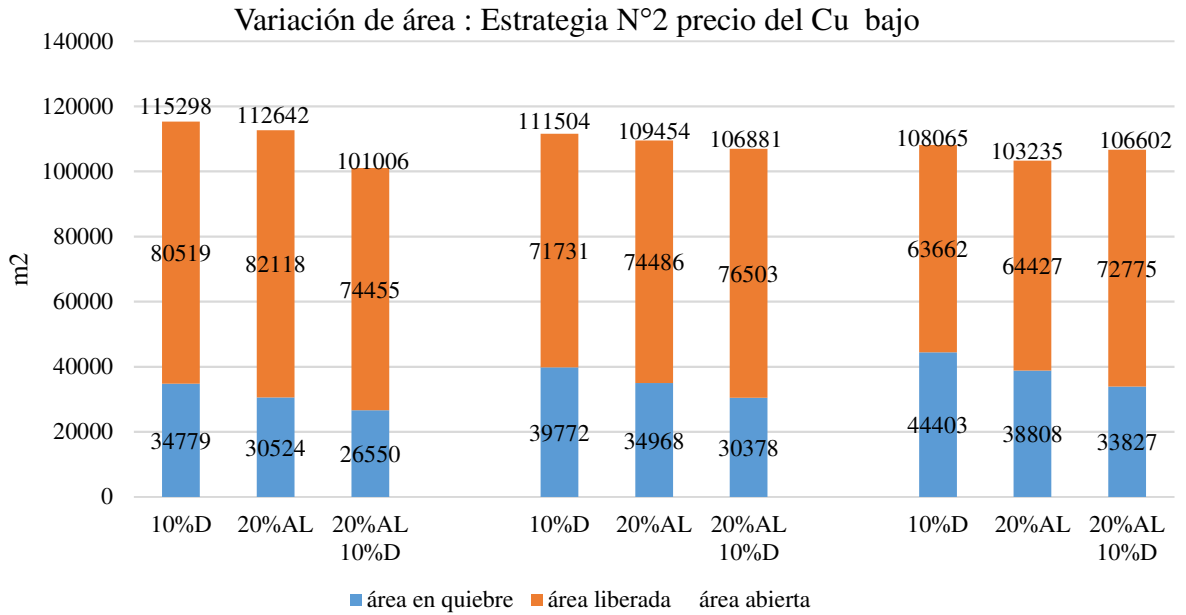


Gráfico 58 Promedio de área (quiebre, liberada, abierta) durante el Régimen. Estrategia N°2 precio bajo del Cu

## Anexo H

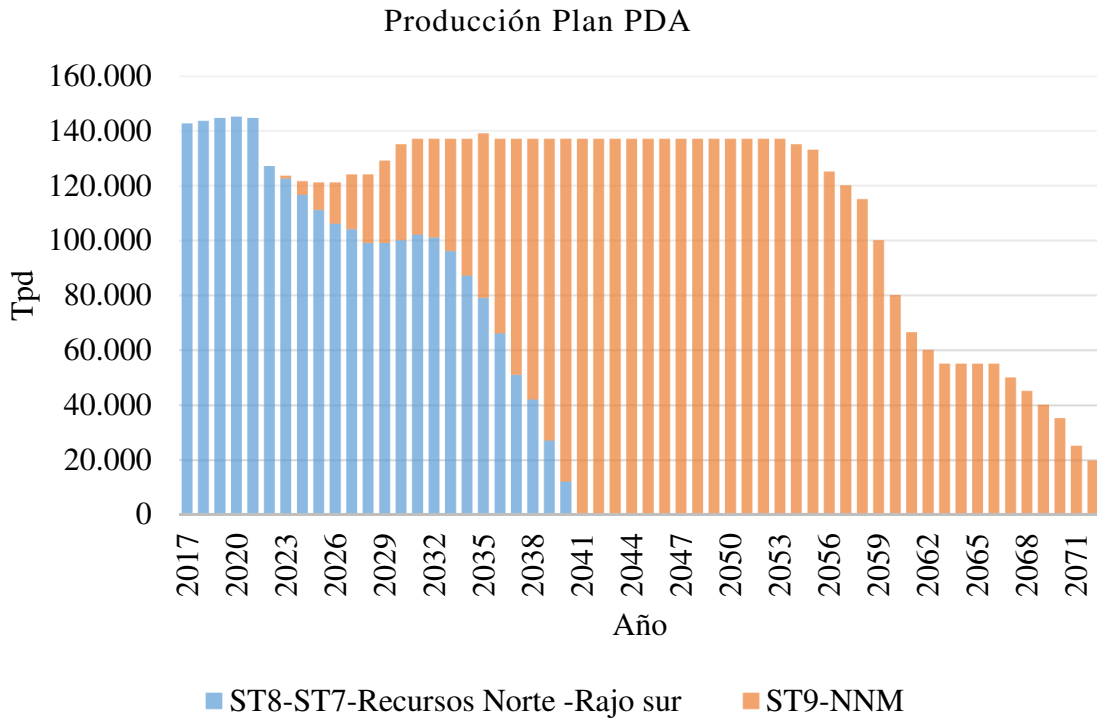


Gráfico 59 Producción Plan PDA (caso base Andes Norte)