

## 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