



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PROPUESTA DE DISEÑO PARA PROCESOS DE REDUCCIÓN  
SECUNDARIA EN PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
INDUSTRIAL**

**HANS PATRICIO RUIZ GONZÁLEZ**

**PROFESOR GUÍA:  
MANUEL REYES JARA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODOLFO URRUTIA URIBE  
WINSTON ROCHER ANDA**

**SANTIAGO DE CHILE  
2016**

## **PROPUESTA DE DISEÑO PARA PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA EN PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

En la actualidad, el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) es uno de los pilares para el futuro de la Corporación del Cobre de Chile (CODELCO), el cual contempla la construcción de una mina subterránea masiva bajo el rajo actual, explotada por hundimiento de bloques, para extraer alrededor de 1.760 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley media<sup>1</sup> de 0,71%.

Si bien es cierto, el proyecto contempla el uso de varias tecnologías que tienen como objetivo aumentar la eficiencia de la mina, las características intrínsecas del método de extracción provocarán la aparición de interferencias que mermarán la producción. Por lo mismo, en esta memoria se evaluó el uso de alternativas que puedan ser implementadas en los procesos de reducción secundaria, los cuales darán solución a las interferencias que causarán mayores pérdidas productivas y serán altamente riesgosas para los operadores. Estos procesos corresponden al descuelgue de zanjas y a la fragmentación de rocas con sobre tamaño. El objetivo del trabajo fue diseñar estos procesos en pos de aumentar la productividad y minimizar tanto los costos operacionales como el riesgo al cual se expondrán los operarios.

La metodología consistió en recopilar, construir y detallar un set de potenciales alternativas para ambos procesos de reducción. Luego, se procedió a realizar una evaluación cualitativa, con la ayuda de expertos en el tema, con el objetivo de determinar cuáles son los criterios de mayor importancia a la hora de definir los procedimientos de reducción secundaria. Tras ello, las alternativas fueron evaluadas cuantitativamente a través de un método de comparación económico, considerando costos de capital y operacionales.

Con las evaluaciones anteriores, se propone el uso de descolgadores telescópicos y martillos móviles para la reducción secundaria, pues son opciones que muestran altos niveles de seguridad y los mejores indicadores económicos, con costos de 14,02 [cUS\$/kton] y 4,09 [cUS\$/kton] respectivamente. Para ambas alternativas, se logró proponer un diseño de procesos, detallando los procedimientos y responsables de cada actividad, cumpliendo con los objetivos propuestos al inicio del trabajo. Finalmente, este análisis servirá como antecedente para la elaboración de los procedimientos definitivos que serán usados en la mina.

---

<sup>1</sup> Porcentaje de cobre presente en una determinada muestra de material.

*A mi madre,  
nada sería de mí sin su amor incondicional.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, quien me ha apoyado y motivado a lo largo de mi vida. Sin duda, nada de esto sería posible sin tus consejos y enseñanzas. Todo este trabajo es en tu nombre, espero que te sientas orgullosa de mis logros, porque gran parte de ellos han sido gracias a ti.

A Tania, el amor de mi vida y con quién quiero seguir logrando metas por el resto de nuestras vidas. Gracias por todo el amor y alegría que me has entregado y por acompañarme en esta última etapa dándome tu apoyo y cariño día a día. Estoy inmensamente feliz de que estés a mi lado al final de este ciclo, siempre lo soñé de esta manera. Te amo por siempre.

A mi familia, quienes me aguantaron durante los 6 años de carrera y me recibieron como un integrante más de la casa. No puedo dejar de agradecerles su apoyo y paciencia a mi tío Manuel, mis primos Camila, Herman y Sibelle, y especialmente a mi abuela Marta y mi tía Marta, quienes me entregaron su amor incondicional en toda esta etapa.

A mis amigos de toda la vida, quienes siempre estuvieron para darme un consejo o para pasar un momento de relax en mis viajes a Talcahuano. Espero que sigamos compartiendo nuestras alegrías con el paso de los años.

A los grandes personajes que conocí en la Universidad, Andrés, Felipe, Benjamín, Sergio y Pedro, entre muchos otros. Espero que estos años hayan sido el comienzo de una amistad duradera.

A quienes me brindaron ayuda en la Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO. Nicolás, Pablo, Francisco, José, entre otros. Gracias por compartir sus experiencias y conocimientos.

Finalmente, a mi Universidad de Chile y a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, mi segundo hogar. Por siempre estaré agradecido de la formación que me entregaron. Estoy orgulloso de pertenecer a la universidad más prestigiosa del país.

## TABLA DE CONTENIDO

PROPUESTA DE DISEÑO PARA PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA EN PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	III
TABLA DE CONTENIDO .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Problema .....	2
1.2. Proyecto de Memoria .....	7
1.3. Objetivos .....	7
1.3.1. Objetivo General .....	7
1.3.2. Objetivos Específicos .....	7
1.4. Alcances .....	8
1.5. Metodología .....	9
2. MARCO TEORICO .....	10
2.1. Métodos de Comparación .....	10
2.1.1. Métodos Cualitativos .....	10
2.1.2. Métodos Cuantitativos .....	12
2.1.3. Métodos Mixtos .....	13
2.1.4. Metodología a Utilizar .....	14
2.2. Hundimiento por Bloques .....	16
2.3. Fragmentación de Roca en Hundimiento por Bloques .....	18
2.4. Sistema Minero .....	19
2.5. Explosivos y Accesorios de Tronadura .....	20
3. ANTECEDENTES GENERALES PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA .....	24
3.1. Ubicación y Dimensiones .....	24
3.2. Reseña Histórica .....	25
3.3. Situación Actual y Proyecto .....	25
3.4. Método de Extracción y Programa de Producción .....	27
3.5. Filosofía Operacional .....	28
3.6. Subnivel de Extracción .....	30

3.6.1.	Equipos .....	31
3.6.2.	Definición del Uso del Tiempo .....	33
3.7.	Sistema Semiautónomo del Equipo Load Haul Dump (LHD) .....	35
3.7.1.	Arquitectura del Sistema de Operación .....	35
3.7.2.	Sistemas en el CIO&G .....	36
3.7.3.	Sistemas a Bordo del equipo LHD .....	39
3.7.4.	Zona de Transición .....	40
4.	INTERRUPCIONES DEL FLUJO DE MINERAL .....	41
4.1.	Clasificación de Interrupciones .....	41
4.1.1.	Bolones .....	41
4.1.2.	Colgaduras .....	42
4.2.	Estadísticas .....	43
4.2.1.	Mina Inca Central Oeste, División Salvador .....	44
4.2.2.	Mina Rio Blanco, División Andina .....	45
4.2.3.	Reservas Norte, División El Teniente .....	46
4.3.	Estimaciones Chuquicamata Subterránea .....	48
5.	LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA REDUCCIÓN SECUNDARIA .....	51
5.1.	Descuelgue de zanjas de producción .....	51
5.1.1.	Cargas propulsadas por cañón .....	51
5.1.2.	Cañón de Agua .....	53
5.1.3.	Descolgador Telescópico .....	54
5.1.4.	Descuelgue Manual .....	56
5.1.5.	Descuelgue Manual con Bolsa Expansiva .....	57
5.1.6.	Jumbo de Descuelgue .....	58
5.1.7.	Resumen de Alternativas para el Descuelgue de Zanjas .....	60
5.2.	Reducción de bolones en puntos de extracción .....	61
5.2.1.	Dumbo Cachorrero .....	61
5.2.2.	Equipo Hidrofracturador .....	62
5.2.3.	Jumbo Cachorrero .....	63
5.2.4.	Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica .....	64
5.2.5.	Martillo Móvil .....	65
5.2.6.	Parche Explosivo .....	66

5.2.7.	Resumen de Alternativas para la Reducción de Bolones .....	67
6.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	68
6.1.	Metodología de Selección.....	68
6.2.	Criterios de Decisión.....	69
6.3.	Evaluación de Alternativas .....	71
6.3.1.	Descuelgue de zanjas de producción .....	71
6.3.2.	Reducción de bolones en puntos de extracción .....	73
6.4.	Alternativas Seleccionadas .....	74
7.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	75
7.1.	Modelo de Simulación.....	75
7.1.1.	Consideraciones del modelo .....	76
7.1.2.	Inputs y outputs del modelo.....	77
7.1.3.	Resultados.....	77
7.2.	Descuelgue de Zanjas de Producción .....	78
7.2.1.	Caso Base: Descuelgue Manual .....	78
7.2.2.	Alternativas de Descuelgue .....	80
7.3.	Reducción de Bolones en Puntos de Extracción .....	85
7.3.1.	Caso Base: Jumbo Cachorrero.....	85
7.3.2.	Alternativas de Reducción .....	87
7.4.	Selección de Alternativas .....	91
7.4.1.	Criterios de Selección.....	91
7.4.2.	Descuelgue de Zanjas de Producción .....	91
7.4.3.	Reducción de Bolones en Punto de Extracción .....	92
8.	DISEÑO DE PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA .....	94
8.1.	Descuelgue de Zanjas de Producción .....	94
8.1.1.	Descripción de la Actividad.....	94
8.1.2.	Responsabilidades .....	96
8.1.3.	Procedimiento .....	99
8.1.4.	Flujograma del Proceso .....	102
8.2.	Reducción de Bolones en Puntos de Producción.....	103
8.2.1.	Descripción de la Actividad.....	103
8.2.2.	Responsabilidades .....	105

8.2.3. Procedimiento .....	107
8.2.4. Flujograma del Proceso .....	110
9. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	111
10. GLOSARIO.....	113
11. BIBLIOGRAFÍA.....	118
12. ANEXOS.....	120
Anexo A. Tiempos de Proceso y Productividad Equipos LHD.....	120
Anexo B. Producción por Semi Calle de Extracción.....	121
Anexo C. Matriz de Comparación de Pares.....	122
Anexo D. Evaluación de Alternativas de Reducción Secundaria. ....	123
Anexo E. Frecuencia Estimada de Colgaduras.....	125
Anexo F. Frecuencia Estimada de Sobre Tamaños.....	127
Anexo G. Distribución Burr. ....	129
Anexo H. Cotización Equipos MacLean. ....	130



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Demoras y pérdidas productivas estimadas por inspecciones. ....	3
Tabla 2. Frecuencia y tiempos de reparación estimados en subnivel de producción. ....	3
Tabla 3. Estimación de la producción perdida por reparaciones en el subnivel de producción. ....	3
Tabla 4. Estimación de la producción perdida por descuelgue de zanjas. ....	4
Tabla 5. Estimación de la producción perdida por reducción secundaria. ....	4
Tabla 6. Estimación del tiempo utilizado en traslado de equipos LHD. ....	5
Tabla 7. Estimación de la producción perdida por traslado de equipos. ....	5
Tabla 8. Resumen de pérdidas productivas estimadas interferencias operacionales. ....	5
Tabla 9. Métodos de comparación. ....	15
Tabla 10. Resumen de clasificación de colgaduras. ....	43
Tabla 11. Porcentaje medido de colgaduras según su altura. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO. ....	49
Tabla 12. Análisis de productividad. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO. ....	50
Tabla 13. Cargas propulsadas con cañón – Principales Características. ....	52
Tabla 14. Cañón de agua – Principales características. ....	54
Tabla 15. Descolgador Telescópico – Principales características. ....	56
Tabla 16. Procedimiento manual de descuelgue – Principales características. ....	57
Tabla 17. Procedimiento manual de descuelgue con bolsa expansiva – Principales características. ....	58
Tabla 18. Jumbo Descolgador – Principales características. ....	60
Tabla 19. Resumen de alternativas de descuelgue de zanjas. ....	60
Tabla 20. Dumbo Cachorrero – Principales características. ....	61
Tabla 21. Jumbo Hidrofracturador – Principales características. ....	63
Tabla 22. Jumbo Cachorrero – Características principales. ....	64
Tabla 23. Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica – Principales características. ....	65
Tabla 24. Martillo Móvil – Principales características. ....	66
Tabla 25. Procedimiento de reducción con parche explosivo – Principales características. ....	67
Tabla 26. Resumen de alternativas de reducción de bolones. ....	67
Tabla 27. Ponderadores para evaluación de alternativas. ....	70
Tabla 28. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue. ....	71
Tabla 29. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones. ....	73
Tabla 30. Alternativas seleccionadas para la etapa de evaluación cuantitativa. ....	74
Tabla 31. Resultados de simulación. ....	77
Tabla 32. Tiempos estimados del proceso de descuelgue manual. ....	78
Tabla 33. Indicadores productivos descuelgue manual (resultados de simulación). ....	78
Tabla 34. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero. ....	79
Tabla 35. Parámetros mano de obra. ....	79
Tabla 36. Costo de combustible Jumbo Cachorrero. ....	79

Tabla 37. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero. ....	79
Tabla 38. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Descuelgue Manual. ....	79
Tabla 39. Costos totales estimados – Descuelgue Manual. ....	80
Tabla 40. Indicadores productivos (resultados de simulación) - Descuelgue Manual. ....	80
Tabla 41. Tiempos estimados de proceso de alternativas de descuelgue. ....	81
Tabla 42. Indicadores productivos alternativas de descuelgue (resultados de simulación). ....	81
Tabla 43. Costo de adquisición Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua. ....	81
Tabla 44. Costo de adquisición Descolgador Telescópico. ....	82
Tabla 45. Costos de combustible Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua. ....	82
Tabla 46. Costo de energía eléctrica Descolgador Telescópico. ....	83
Tabla 47. Costo de mantenimiento alternativas de descuelgue. ....	83
Tabla 48. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo de Descuelgue. ....	83
Tabla 49. Costos estimados en insumos para reducción secundaria –Descolgador Telescópico. ....	83
Tabla 50. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Cañón de Agua. ....	84
Tabla 51. Costos totales estimados – Alternativas de descuelgue. ....	84
Tabla 52. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de descuelgue. ....	84
Tabla 53. Tiempos del proceso de reducción con Jumbo Cachorrero. ....	85
Tabla 54. Indicadores productivos reducción con Jumbo Cachorrero (resultados de simulación). ....	85
Tabla 55. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero. ....	86
Tabla 56. Costo de combustible Jumbo Cachorrero. ....	86
Tabla 57. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero. ....	86
Tabla 58. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo Cachorrero. ....	86
Tabla 59. Costos totales estimados – Jumbo Cachorrero. ....	87
Tabla 60. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Jumbo Cachorrero. ....	87
Tabla 61. Tiempos estimados de proceso de alternativas de reducción d bolones. ....	88
Tabla 62. Indicadores productivos reducción con equipos alternativos (resultados de simulación). ....	88
Tabla 63. Costo de adquisición alternativas de reducción de bolones. ....	88
Tabla 64. Costo de combustible alternativas de reducción de bolones. ....	89
Tabla 65. Costo de mantenimiento alternativas de reducción de bolones. ....	89
Tabla 66. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Equipo Hidrofracturador. ....	90
Tabla 67. Costos totales estimados – Alternativas de reducción. ....	90

Tabla 68. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de reducción. ....	90
Tabla 69. Resumen costos estimados – Alternativas de descuelgue de zanjas. ....	91
Tabla 70. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de descuelgue de zanjas. ....	92
Tabla 71. Resumen costos estimados – Alternativas de reducción de bolones. ....	93
Tabla 72. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de reducción de bolones. ....	93
Tabla 73. Tiempos proceso de extracción del equipo LHD. Fuente: Pruebas Alfa, Caterpillar Inc. ....	120
Tabla 74. Productividad equipo LHD. ....	120
Tabla 75. Productividad de semi calles. ....	121
Tabla 76. Matriz de comparación de pares para evaluar y cálculo de ponderadores. .	122
Tabla 77. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH. ....	123
Tabla 78. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH. ....	123
Tabla 79. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO. ....	123
Tabla 80. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO. ....	124
Tabla 81. Evaluación de alternativas de descuelgue. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO. ....	124
Tabla 82. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO. ....	124
Tabla 83. Corrección de datos experimentales. ....	125
Tabla 84. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras. ....	126
Tabla 85. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras. ....	128
Tabla 86. Cotización de equipos de reducción secundaria MacLean. ....	130

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estadística de accidentes fatales en la minería. Chile, periodo 2010-2015. Fuente: SERNAGEOMIN. ....	6
Ilustración 2. Método Block Caving. ....	16
Ilustración 3. Punto de extracción. Imagen real de un punto de extracción (izquierda) y animación del proceso productivo (derecha). ....	17
Ilustración 4. Niveles de un macro bloque en Mina Chuquicamata Subterránea. ....	17
Ilustración 5. Tipos de fragmentación. ....	19
Ilustración 6. Explosivo tipo ANFO. ....	21
Ilustración 7. Cordón detonante. ....	21
Ilustración 8. Detonador. ....	21
Ilustración 9. Diferentes tipos de emulsión en función de la proporción Emulsión/ANFO. ....	22
Ilustración 10. Explosivo tipo APD. ....	22
Ilustración 11. Explosor eléctrico. ....	23
Ilustración 12. Iniciador de pistón. ....	23
Ilustración 13. Mapa de ubicación Mina Chuquicamata. ....	24
Ilustración 14. Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. ....	26
Ilustración 15. Plan de producción Mina Chuquicamata Subterránea. ....	28
Ilustración 16. Filosofía Operacional PMCHS. ....	28
Ilustración 17. Benchmarking del costo unitario real en minas subterráneas y proyectos de CODELCO. ....	29
Ilustración 18. Vista de planta de un nivel de producción. ....	30
Ilustración 19. Representación del nivel de producción en PMCHS. ....	31
Ilustración 20. Load Haul Dump Semiautónomo. ....	31
Ilustración 21. Jumbo de Reducción Secundaria. ....	32
Ilustración 22. Martillo Picador. ....	32
Ilustración 23. Definición del uso del tiempo. ....	33
Ilustración 24. Diagrama de arquitectura del sistema de operación. ....	35
Ilustración 25. Coexistencia de operaciones manuales y semiautónomas. ....	37
Ilustración 26. Estación de operador de LHDs. ....	38
Ilustración 27. Controles de mando remoto del equipo LHD. ....	39
Ilustración 28. Escáner laser del equipo LHD. ....	39
Ilustración 29. Ejemplo de Zona de Transición. ....	40
Ilustración 30. Cuadrilla reduciendo bolones agrupados por acopio. ....	41
Ilustración 31. Tipos de colgadura. ....	42
Ilustración 32. Frecuencia de descuelgue y cachorro de bolones. Mina Inca Central Oeste. ....	45
Ilustración 33. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Mina Rio Blanco. ....	46
Ilustración 34. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 4 – Mina Reservas Norte. ....	47

Ilustración 35. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 10 – Mina Reservas Norte. ....	47
Ilustración 36. Histograma de colgaduras experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO. ....	49
Ilustración 37. Procedimiento de descuelgue con cargas propulsadas por cañón. ....	51
Ilustración 38. Sistema QuikDraw, empresa RockTek Co. ....	52
Ilustración 39. Cañón de agua modelo WC3 de la empresa MacLean. ....	53
Ilustración 40. Descolgador Telescópico prototipado por CODELCO. ....	54
Ilustración 41. Procedimiento de descuelgue del Descolgador Telescópico. ....	55
Ilustración 42. Procedimiento de descuelgue manual. ....	56
Ilustración 43. Jumbos de Descuelgue. Equipo SB9, empresa MacLean (Izquierda) y equipo BH40D, empresa RDH (Derecha). ....	58
Ilustración 44. Procedimiento de descuelgue con Jumbo de Descuelgue. ....	59
Ilustración 45. Radio de giro del brazo perforador. ....	59
Ilustración 46. Dumbo Cachorrero en producción. ....	61
Ilustración 47. Jumbo Hidrofracturador. ....	62
Ilustración 48. Procedimiento de reducción del Jumbo Hidrofracturador. ....	62
Ilustración 49. Jumbo Cachorrero Sandvik DD310. ....	63
Ilustración 50. Equipo dozer con dispositivo de cuña hidráulica. ....	64
Ilustración 51. Martillo Móvil RB3 de la empresa MacLean. ....	65
Ilustración 52. Reducción secundaria con parche explosivo. ....	66
Ilustración 53. Matriz de comparación de pares. ....	68
Ilustración 54. Focos y criterios de decisión. ....	70
Ilustración 55. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue de zanjas. ....	72
Ilustración 56. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, descuelgue de zanjas. ....	72
Ilustración 57. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones. ....	73
Ilustración 58. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, reducción de bolones. ....	74
Ilustración 59. Animación del modelo de simulación. ....	75
Ilustración 60. Resultados evaluación cualitativa, ítem “Seguridad del Personal”. ....	92
Ilustración 61. Flujograma de información en el proceso de descuelgue de zanjas. ....	96
Ilustración 62. Flujograma procedimiento de descuelgue de zanjas de producción. ....	102
Ilustración 63. Flujograma de información en el proceso de reducción de bolones. ....	104
Ilustración 64. Flujograma procedimiento de reducción de bolones en punto de extracción. ....	110
Ilustración 65. Histograma corregido de colgaduras en PMCHS, datos experimentales. ....	125
Ilustración 66. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de colgaduras. ....	126
Ilustración 67. Histograma corregido de colgaduras en PMCHS, datos experimentales. ....	127

Ilustración 68. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de sobre tamaños. .... 127

# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) es uno de los pilares para el futuro de la Corporación del Cobre de Chile (CODELCO), ya que tiene como objetivo agregar decenas de años de operación y prolongar la generación de riquezas para la empresa y el país. Este proyecto está siendo desarrollado por la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco (VP) y contempla la construcción de una mina subterránea masiva bajo la actual mina de Chuquicamata para extraer alrededor de 1.760 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley media<sup>2</sup> de 0,71%. Se prevé que la mina subterránea comience a operar en el año 2019 y tenga una vida operativa de al menos 38 años. La puesta en marcha durará aproximadamente 8 años, periodo en que se reemplazará gradualmente la operación del actual rajo abierto.

El método de explotación a aplicar será de hundimiento por bloques (revisar capítulo 3.5.), el cual contempla unidades geográficas básicas de explotación independientes en su preparación y producción, denominadas macro bloques (MB). Este método ofrece ventajas en costos y capacidades de producción, ya que ofrece una buena adaptación a las condiciones geotécnicas presentes en el yacimiento.

Centrándose en el sistema de extracción, el diseño considera trabajar con equipos de carguío de bajo perfil o *Load Haul Dump* (LHD) semiautónomos, los cuales tienen la función de transportar el material fragmentado desde los puntos de extracción hasta los puntos de vaciado, en donde descargan el mineral para enviarlo hasta el nivel de chancado<sup>3</sup>. Estos equipos se consideran semiautónomos, ya que no es necesario operar el equipo en todo su ciclo productivo, pues realizan ciertas funciones en forma totalmente automatizada. Las funciones que deben ser operadas, son controladas en forma remota desde un Centro Integrado de Operación y Gestión (CIO&G) que estará ubicado en la superficie.

Si bien es cierto, el proyecto cuenta con un proceso productivo semiautónomo que tiene como objetivo aumentar la eficiencia de la mina, las características intrínsecas del método de extracción provocan la aparición de interferencias que merman la producción. Por esta razón, en esta memoria se pretende analizar una de las interferencias que causan mayores pérdidas productivas, para luego proponer una alternativa de solución en pos de mejorar los índices de extracción<sup>4</sup> y los niveles de seguridad de los procedimientos.

---

<sup>2</sup> Porcentaje de cobre presente en una determinada muestra de material.

<sup>3</sup> Proceso por el cual el mineral es triturado, para disminuir su tamaño

<sup>4</sup> Toneladas de mineral extraídas por día.

## 1.1. Problema

Dentro del sistema de extracción de una mina subterránea explotada por hundimiento de bloques, ocurren distintas interferencias en el proceso productivo, las cuales provocan pérdidas productivas al paralizar las operaciones de extracción. Estas interferencias se pueden clasificar en cuatro categorías:

- Inspecciones: Se refiere a los procesos de muestreo de mineral, inspecciones de puntos de extracción, vaciado y calles de producción, mapeo geomecánico y geológico.
- Mantenimiento de calles e infraestructura: Corresponde a todos los procesos de mantenimiento a puntos de extracción<sup>5</sup>, puntos de vaciado<sup>6</sup> y galerías<sup>7</sup>.
- Reducción secundaria: Consiste en los procesos de reducción de rocas con sobre tamaño, las cuales bloquean las zanjas o, por su tamaño, no pueden ser cargadas por el LHD o depositadas en el punto de vaciado.
- Traslado de equipos LHD: Ocurren cuando los equipos deben ser llevados a otras locaciones de la mina, como estaciones diésel, talleres de mantenimiento o cuando se deben cambiar de calle de producción.

Como es posible apreciar en las definiciones, todas estas interferencias producen demoras en el proceso productivo, debiendo suspender la extracción por motivos de seguridad o por ausencia de recursos, transformando al proceso productivo en un proceso discontinuo. Por esta razón, se hace necesario analizar tales procesos, con el objetivo de disminuir el impacto en la productividad de la mina. A continuación, se detallan estimaciones de los tiempos utilizados en solucionar tales interferencias y las pérdidas productivas que éstas generan. El cálculo de las pérdidas de productividad está basado en la producción diaria de los equipos de carguío (ver detalle en Anexo A).

### Inspecciones

Según estimaciones hechas en la etapa de prefactibilidad (CEOP Consulting , 2013), los procesos anteriormente categorizados como “inspecciones” ocasionan paradas de 0,5 horas por turno. Considerando la operación de 33 equipos de carguío en etapa de extracción y un sistema de turnos de 12 horas, se estima que este imprevisto operacional generará pérdidas productivas por 7.052,89 ton/día en la mina (ver Tabla 1).

---

<sup>5</sup> Pique desde donde se extrae el mineral. Conecta el nivel de hundimiento con el nivel de producción.

<sup>6</sup> Pique donde el mineral es descargado por los equipos LHD. Conecta el nivel de producción con el nivel de chancado.

<sup>7</sup> Excavación hecha en la roca, normalmente horizontal o con pendiente suave, utilizadas para el tránsito o transporte de mineral.



Tabla 1. Demoras y pérdidas productivas estimadas por inspecciones.

Demora (h/turno)	Prod. perdida por calle (ton/día)	Prod. perdida total (ton/día)
0,5	213,72	7.052,89

## Mantenimiento de calles e infraestructura

En cuanto al mantenimiento de calles e infraestructura, en la Tabla 2 se detalla el índice estimado de reparaciones por kilo tonelada extraída (CEOP Consulting , 2013), el tiempo entre cada evento y la duración de las reparaciones. Para los cálculos se consideró el flujo de material que pasa diariamente por cada punto de extracción y vaciado (ver Anexo B).

Tabla 2. Frecuencia y tiempos de reparación estimados en subnivel de producción.

Actividad	Índice de Frecuencia (falla/kton)	Tiempo entre fallas (días)	Duración (días)
Reparación punto de extracción	0,01	617,14	7
Reparación parrilla de vaciado	0,0025	137,14	7

Se observa que las fallas en los puntos de extracción ocurren esporádicamente. Además, cuando un punto de extracción tiene daños, no se procede a reparar de inmediato, ya que la calle de producción puede seguir produciendo de manera normal. A pesar de que no existe una planificación de mantenimiento, se prevé que los puntos de extracción serán reparados durante las detenciones programadas para el mantenimiento del sistema de manejo de minerales, las cuales se ejecutan durante 12 días en forma anual. Durante ese tiempo la mina no produce mineral, por lo que no existirían pérdidas productivas originadas por este evento.

Por otro lado, la parrilla de vaciado debe ser reparada en forma inmediata, ya que, al no funcionar el punto de vaciado, la semi calle de producción anexa no puede producir, originando pérdidas productivas.

Con estas consideraciones, se calculan las pérdidas productivas originadas por este imprevisto operativo, las cuales se muestran en la siguiente tabla. Para los cálculos se consideran 6 macro bloques en funcionamiento con 8 puntos de vaciado cada uno.

Tabla 3. Estimación de la producción perdida por reparaciones en el subnivel de producción.

Tiempo de reparación anual por punto (Días)	Prod. Perdida por punto de vaciado (ton/día)	Prod. Perdida total (ton/día)
17,76	218,18	10.472,48

## Reducción secundaria

La reducción secundaria en el subnivel de producción se compone por dos procesos: Descuelgue de zanjas y reducción secundaria en las calles de producción.

En relación al primer proceso, el cual consiste en destrancar el punto de extracción, se estima que existan 54 operaciones diarias de descuelgue (CEOP Consulting , 2013), lo cual implica la inhabilitación de aproximadamente 2 calles de producción por turno. Las pérdidas productivas originadas por esta interferencia se detallan en la Tabla 4. Además, se consideró un tiempo de descuelgue de 45 minutos por punto de extracción (CEOP Consulting , 2013) y se consideró que la decisión de cierre de una calle se toma cuando tiene un 70% de sus puntos colgados.

Tabla 4. Estimación de la producción perdida por descuelgue de zanjas.

Frecuencia de semi calles deshabilitadas (SC/turno)	Tiempo promedio semi calle deshabilitada (hr)	Prod. Perdida (ton/día)
2,07	9,8	4.313,49

Por otro lado, el proceso de reducción secundaria también requiere del cierre de la semi calle, pues la propuesta hecha en etapa de prefactibilidad (CEOP Consulting , 2013) considera el uso de explosivos. La estimación de la producción pérdida por esta interferencia se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 5. Estimación de la producción perdida por reducción secundaria.

Frecuencia de ocurrencia (eventos/día)	Tiempo promedio de reducción (hr)	Prod. Perdida (ton/día)
470	0,1	11.161,15

Con estas estimaciones, se concluye que los procesos de reducción secundaria originan pérdidas productivas por 15.474,64 toneladas por día.

## Traslado de equipos LHD

Finalmente, el traslado del equipo LHD también origina pérdidas productivas, pues los equipos dejan de operar en las calles de extracción mientras son llevados a otras locaciones de la mina. En la siguiente tabla se detalla el tiempo usado en traslado de cada equipo (CEOP Consulting , 2013) (Laubscher, 1994).

Tabla 6. Estimación del tiempo utilizado en traslado de equipos LHD.

Traslados	Tiempo utilizado (h/día)
A taller de mantenimiento	0,5
A estaciones diésel	0,2
Cambio de calle de producción	0,2
Cambio de macro bloque	0,6
Total	1,5

Con esta estimación, se calcula la productividad perdida por esta interferencia, la cual se detalla a continuación.

Tabla 7. Estimación de la producción perdida por traslado de equipos.

Producción perdida por equipo LHD (ton/día)	Dotación de equipos LHD	Producción perdida total (ton/día)
320,59	33	10.579,34

En resumen, según las estimaciones presentadas anteriormente, las interferencias que impactarán con mayor profundidad en la productividad de la mina serán las relacionadas a los procesos de reducción secundaria, compuestos por el descuelgue de zanjas y la reducción de rocas en el punto de extracción, originando un 35,5% de las pérdidas productivas totales (ver tabla 8).

Tabla 8. Resumen de pérdidas productivas estimadas interferencias operacionales.

Interferencias	Producción Perdida (ton/día)	Porcentaje
Mantenimiento	10.472,48	24,0%
Red. Secundaria	15.474,64	35,5%
Traslado LHD	10.579,34	24,3%
Muestreo	7.052,90	16,2%
Total	55.492,20	100%

Por otro lado, el traslado del equipo LHD fuera de la zona de extracción y el mantenimiento de calles e infraestructura originan un porcentaje similar de pérdidas, explicando alrededor de un 24% cada una, sin embargo, gran parte de los procedimientos de ambas categorías pueden ser planificados. Algunos ejemplos de ello son la carga de combustible, el mantenimiento de equipos y el mantenimiento de puntos de extracción. En cambio, los procesos de reducción secundaria corresponden puramente a imprevistos operacionales, los cuales deben ser solucionados en forma reactiva, sin existir la posibilidad de programarlos.

Además, existen ciertos traslados de los equipos productivos (cambios de calle o macro bloque) los cuales se producen debido a los procesos de reducción secundaria,

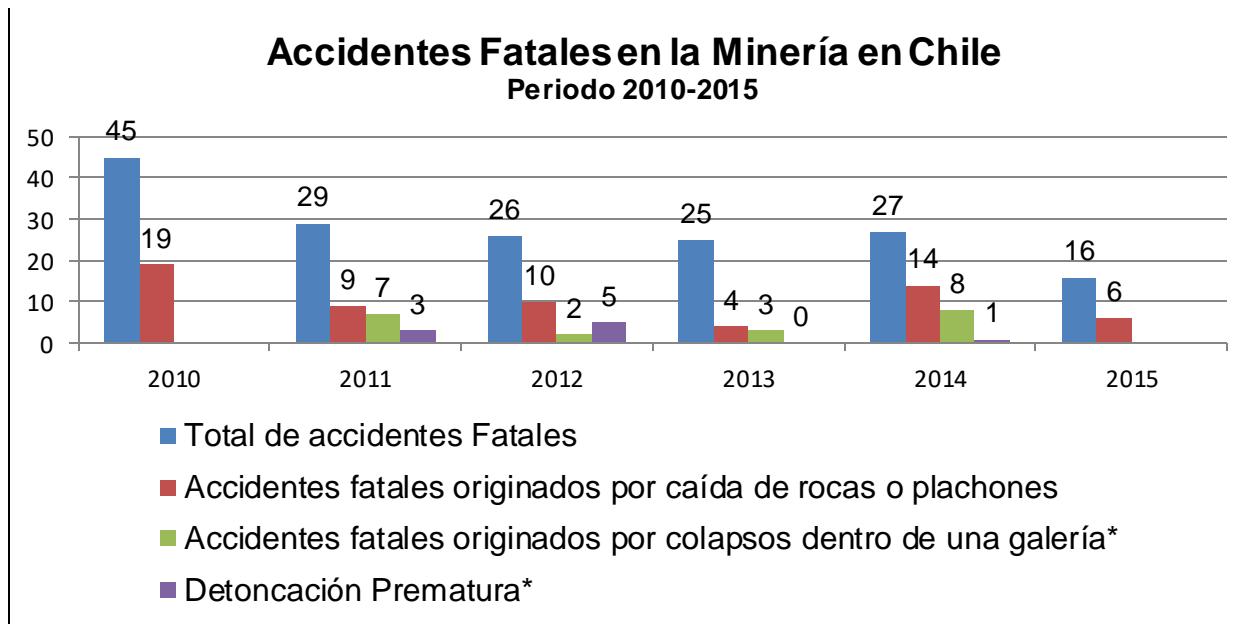
ya que el proceso de extracción debe ser detenido cuando ingresa una unidad de reducción a las calles de extracción. Debido a ello, un porcentaje no menor de los traslados están directamente relacionados con los procesos de reducción secundaria.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se concluye que los procesos de reducción secundaria son los que más afectan la productividad de la mina y, por lo mismo, deben ser analizados y diseñados para disminuir el impacto en el proceso productivo.

## Riesgos

Otra consideración relevante es el riesgo de los procesos de reducción secundaria, particularmente del descuelgue de zanjas, el cual ha causado numerosos accidentes en otras minas que utilizan el mismo método de extracción.

En la Ilustración 1, se observa que una gran cantidad de los accidentes fatales registrados en la minería de Chile entre los años 2010 y 2015, fueron originados por la caída de rocas o planchones<sup>8</sup>. Además, en el periodo 2011-2014, donde existe un registro detallado de cada accidente, se puede observar que alrededor de un 19% de los accidentes fatales corresponde a colapsos dentro de una galería subterránea, mientras que un 8% corresponde a detonaciones prematuras.



\*Datos disponibles sólo en periodo 2011-2014.

Ilustración 1. Estadística de accidentes fatales en la minería. Chile, periodo 2010-2015.  
Fuente: SERNAGEOMIN.

<sup>8</sup> Material rocoso que cuelga dentro de la mina y que está sobrepuesto en el techo de una galería. Un planchón tiene un peso superior a 500 kilogramos.

Con estos datos se intenta recalcar la peligrosidad de trabajar dentro de una galería de extracción y utilizar explosivos, actividades que son realizadas tanto en el descuelgue de puntos de producción como en la reducción de bolones<sup>9</sup>.

## **1.2. Proyecto de Memoria**

Tomando en cuenta los datos anteriores, esta memoria evalúa el uso de alternativas de solución para los procesos de reducción secundaria realizados en el subnivel de producción de la mina Chuquicamata Subterránea. Estos procesos corresponden al descuelgue de zanjas y a la fragmentación de rocas con sobre tamaño, que corresponden a los imprevistos operacionales que merman en mayor porcentaje la productividad de la mina y, además, son altamente riesgosos para los operadores.

El objetivo es diseñar estos procesos en pos de aumentar la productividad y disminuir tanto los costos operacionales como el riesgo al cual se exponen los operarios. Para ello se hará un análisis de los procedimientos que han sido utilizados en otras minas subterráneas, para luego proponer opciones de solución, las cuales considerarán análisis de costos, dotaciones a lo largo del tiempo, productividad de las alternativas y el impacto en la productividad de la mina.

Un primer paso será recopilar y construir un set de potenciales alternativas para ambos procesos de reducción. Luego, se procederá a realizar una evaluación cualitativa, con la ayuda de expertos en el tema, con el objetivo de disminuir el número de opciones. Tras disminuir el tamaño del set de alternativas, éstas serán evaluadas cuantitativamente a través de un método de comparación. Una vez realizada la evaluación, se elegirá la que muestre mejores indicadores, para finalmente proponer un diseño de los procesos de reducción con las alternativas seleccionadas.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Proponer un diseño para los procesos de reducción secundaria que aumente la productividad del proceso de extracción.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Aumentar la disponibilidad de los puntos de extracción.
2. Reducir las interferencias provocadas por los procesos de reducción secundaria.
3. Disminuir los riesgos asociados a los procesos de reducción secundaria.

---

<sup>9</sup> Rocas de mineral de gran tamaño, originadas en los puntos de extracción.

## 1.4. Alcances

Este estudio se acota a dos procesos de apoyo específicos, los cuales ocurren en el subnivel de producción de una mina subterránea de cobre, que es explotada por hundimiento de bloques. Los procesos que se analizan son los siguientes:

- Descuelgue de zanjas o puntos de extracción.
- Reducción secundaria en los puntos de extracción.

Se excluyen del análisis las demás interferencias productivas por representar un impacto menor en la producción en relación a los procesos de reducción secundaria. Además, se considera que los niveles de incertidumbre y riesgo que caracterizan a estos procesos son mayores en relación a otras interferencias, razón por la que se decide estudiar sólo estos dos procesos.

El levantamiento de alternativas se limita a la revisión bibliográfica y la búsqueda de alternativas disponibles en el mercado. Queda fuera del alcance de esta memoria la búsqueda de nuevas tecnologías, pues el foco es proponer un nuevo diseño del proceso con equipos que estén disponibles en el corto plazo. Esto se decide dado que el proyecto definió en su etapa de prefactibilidad que todos los diseños propuestos deben ocupar tecnología probada. Entiéndase por tecnología probada todas aquellas que han sido utilizadas con éxito en la operación de minas de CODELCO y/o de cualquier parte del mundo y en tamaños equivalentes a mediana y gran minería metálica.

La evaluación de las alternativas considerará la factibilidad de su implementación, los riesgos asociados y una evaluación económica. Posterior a ello se desarrollará un diseño del proceso con la tecnología elegida.

El trabajo de memoria no considera el desarrollo de prototipos ni la implementación de los diseños, ya que la puesta en marcha del sistema de extracción está prevista para el año 2019.

Finalmente, gran parte de la información utilizada en el estudio (costos, estimaciones, datos experimentales, etc.) es proporcionada a través de la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco y el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. En las referencias de este informe se presentan los documentos utilizados como fuentes de información.

## 1.5. Metodología

La metodología para proponer nuevos diseños en los procesos analizados consta de 4 etapas, las cuales se definen a continuación:

1. **Comprensión de los procesos:** El objetivo es entender el funcionamiento detallado de los procesos a través de visitas en terreno, revisión de estadísticas y entrevistas con expertos. Para ello se analizarán las propuestas de solución originales para cada proceso (operación manual para el descuelgue de zanjas y operación con equipo Jumbo Cachorrero para la reducción de rocas con sobre tamaño) y se determinarán sus principales ventajas y debilidades.
2. **Levantamiento de alternativas:** La búsqueda de alternativas se basará en revisión bibliográfica, levantamiento de prácticas actuales en las divisiones de Codelco y análisis de tecnologías disponibles en el mercado o que estén en desarrollo y puedan estar disponibles en el corto plazo. La opinión de expertos será usada para definir si las alternativas son adecuadas al proceso. Finalmente, se determinarán las principales ventajas y debilidades de cada alternativa.
3. **Selección y evaluación de alternativas:** La selección de alternativas consiste en una evaluación cualitativa con el objetivo de reducir la cantidad de alternativas a evaluar. En una segunda fase se desarrolla una evaluación económica, que considera la simulación de los procesos. En cada alternativa se detallará el impacto que tiene su aplicación sobre la continuidad en el proceso extractivo y la factibilidad de su aplicación. Esta etapa concluye con la elección de la mejor alternativa analizada.
4. **Propuesta de diseño del proceso:** La metodología finaliza con el desarrollo de una propuesta de diseño con la alternativa elegida, en donde se definirán los responsables de cada proceso, los flujos de información y el detalle de los pasos del procedimiento.

## **2. MARCO TEORICO**

En este capítulo se presentan algunos conceptos relevantes para el desarrollo de la memoria. El primer ítem corresponde a un resumen de algunos métodos de comparación, los cuales pueden ser utilizados para seleccionar las alternativas de solución recopiladas. Luego, se detallan cuatro conceptos mineros. El primero corresponde al método de extracción que será usado en el PMCHS, el segundo a la fragmentación de la roca provocada por este método, en el tercer punto, se define el sistema minero y sus operaciones unitarias, para finalizar con un resumen del proceso de tronadura.

### **2.1. Métodos de Comparación**

Para el proceso de selección y evaluación, será necesario utilizar métodos de comparación de alternativas. En la literatura (Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social, 2008; Roche & Vejo, 2005), se pueden identificar distintas metodologías de comparación, jerarquización, priorización o selección de proyectos, las cuales se clasifican en métodos cuantitativos, cualitativos y mixtos.

Los métodos cuantitativos estudian relaciones entre variables cuantificadas, como, por ejemplo, indicadores de productividad o indicadores económicos, los cuales son puramente objetivos y capturan una realidad estática. Por otro lado, los métodos cualitativos estudian relaciones entre variables cualitativas, las que son definidas por juicios y opiniones. Estas variables pueden ser recopiladas a través de encuestas, observaciones, dinámicas de grupo, entrevistas o técnicas proyectivas. Este método aporta información sobre aspectos no considerados en los métodos cuantitativos, por lo tanto, es información complementaria, lo que permite una evaluación integral de las alternativas analizadas. Finalmente, están los métodos mixtos, que son capaces de recolectar, analizar y vincular datos de tipo cualitativo y cuantitativo. Estos poseen la ventaja de dar una visión más precisa y adquirir un mayor grado de comprensión del fenómeno en estudio.

A continuación, se presenta un breve resumen de algunos métodos de comparación existentes, clasificándolos en las categorías anteriormente mencionadas.

#### **2.1.1. Métodos Cualitativos**

##### **Aporte a metas**

Modelo que mide el aporte de una alternativa al logro de determinadas metas. La metodología consiste en definir metas u objetivos relevantes para el ente ejecutor, para luego definir o estimar el porcentaje de logro de determinada meta al desarrollar el proyecto o utilizar la alternativa en cuestión.



Tras la estimación de los aportes porcentuales de la alternativa a cada meta relevante, estos valores pueden ser ponderados según la importancia de la meta, con lo cual se obtendrá un indicador de aporte general que será útil para comparar un set de alternativas.

La dificultad de este método radica en la complejidad de estimar con claridad los aportes efectivos a las distintas metas definidas.

### **Lista de verificación**

Método que permite verificar en forma sencilla y rápida si un proyecto cumple con los requerimientos y objetivos definidos por el ente ejecutor. La metodología consiste en definir los objetivos relevantes, detallando los requerimientos mínimos a cumplir, para luego chequear si se cumplen con cada alternativa a evaluar.

La ventaja de este procedimiento es la sencillez de aplicación, sin embargo, no permite jerarquizar un set de alternativas, por lo que se considera sólo como un método de descarte rápido y efectivo.

### **Método Delphi**

Método que permite recopilar juicios y opiniones de un grupo de expertos en un tema particular. Usualmente es aplicado para la predicción de eventos bajo condiciones de incertidumbre, como, por ejemplo, predicción de demanda.

La metodología consiste en la realización de encuestas o entrevistas a un grupo seleccionado de expertos, con el objetivo de reunir opiniones y luego hacerlas converger. El método puede conllevar varias etapas de consulta, desde entrevistas individuales hasta debates grupales, para finalmente llegar a consensos en todas las materias relevantes del análisis.

Las fases necesarias para enfrentar un problema son a definición del mismo, la selección del grupo de expertos, la elaboración de los cuestionarios, la realización de entrevistas y, finalmente, el análisis de los resultados.

La ventaja principal de este método es la gran efectividad para llegar a consensos y la útil recopilación de información o consideraciones relevantes, sin embargo, sus desventajas son el costo y larga duración de su ejecución, además de tener un carácter más intuitivo que racional. Otra dificultad es conseguir acceso a los expertos, ya que, dependiendo del tema, pueden ser escasos o muy difíciles de contactar.

## **Q-sorting**

Método de jerarquización de proyectos o alternativas, que se basa en la evaluación y priorización sistemática de un grupo de expertos o evaluadores. La metodología combina etapas de trabajo individuales con etapas grupales.

En una primera etapa, cada evaluador debe clasificar las alternativas en cuestión en dos grupos, proyectos de alta prioridad y otro de baja prioridad. Luego, se debe proceder a una subclasificación, en donde se separa dentro de cada grupo los proyectos de prioridad alta, media y baja. Los proyectos clasificados en prioridades alta-baja o baja-alta en las etapas respectivas, conformarán un solo grupo, obteniendo finalmente 5 categorías según los niveles de prioridad.

Luego, se desarrolla una etapa de interacción grupal, en donde se muestran los resultados de la etapa individual a través de histogramas. Estos resultados son discutidos por el grupo con el objetivo de aumentar la coherencia y reducir la dispersión en las decisiones.

Ambas etapas son repetidas hasta alcanzar un nivel adecuado de coherencia en las prioridades asignadas por los evaluadores.

Este método es útil para estudiar la percepción en relación a distintas alternativas, y como ésta cambia al intercambiar opiniones y puntos de vista.

### **2.1.2. Métodos Cuantitativos**

#### **Dominancia entre proyectos**

Este método es aplicable en la comparación de proyectos en condiciones de incertidumbre, pues analiza los posibles resultados de un proyecto bajo distintos escenarios probables.

Si en cualquier escenario posible un proyecto presenta iguales o mejores resultados que otro, entonces existe una dominancia absoluta y será recomendable emprender en aquel proyecto. También existe la dominancia probabilística, que se refiere a la mayor probabilidad de obtener resultados esperables en comparación a otro proyecto bajo cualquier escenario posible.

Esta metodología es útil para determinar las alternativas óptimas en escenario de incertidumbre, por lo mismo, es usualmente aplicado para seleccionar proyectos de inversión. La dificultad de su aplicación radica en estimar en forma confiable el rendimiento o resultado del proyecto.

## **Indicadores económicos**

El uso de indicadores económicos es probablemente el método más usado para la selección y determinación de prioridades de proyectos, y por lo mismo, el más recomendable si se desea asegurar una máxima eficacia en el uso de los recursos. Algunos ejemplos de indicadores útiles son: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), la relación beneficio/costo, el periodo de recuperación de capital, etc.

Una buena aplicación de este método debe considerar la determinación de ciertos niveles mínimos que deben cumplir los proyectos para que sean aceptables, por ejemplo, una TIR mayor al costo de capital. Luego, se debe efectuar una jerarquización de aquellos que cumplan con los requisitos mínimos para seleccionar las mejores alternativas.

La complejidad de este método consiste en el cálculo mismo de los indicadores, pues usualmente no se cuenta con información suficiente para un cálculo confiable de ellos. Por otro lado, tampoco es posible incluir todos aquellos criterios que no pueden expresarse en términos monetarios, por lo mismo, es recomendable complementarlo con un método más cualitativo.

## **Programación lineal**

La programación lineal también se aplica en la selección de proyectos, pues el proceso evaluativo cumple con tener objetivos múltiples, recursos limitados y estar sujeto a numerosas restricciones. Las restricciones pueden reflejar limitaciones de recursos (fundamentalmente dinero) y relaciones de dependencia, complementariedad o exclusividad entre proyectos.

Si bien es cierto, este método tiene un gran potencial para efectos de comparación y selección de una alternativa óptima, su aplicación se complejiza a medida que aumenta la cantidad de proyectos y el número de restricciones a aplicar. Adicionalmente, el modelo de programación lineal requiere que toda la información sea cuantificable. Por lo mismo, en muchas ocasiones es más recomendable utilizar otros métodos comparativos, ya que el planteamiento del problema y su resolución podría tomar mucho tiempo.

### **2.1.3. Métodos Mixtos**

#### **AHP (*Analytic Hierarchy Process*)**

El proceso de análisis jerárquico (AHP por su sigla en inglés) es una metodología de análisis multicriterio, diseñado para cuantificar juicios u opiniones sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios empleados en el proceso de toma de decisión. El objetivo final es desarrollar un orden jerárquico de las alternativas según una puntuación calculada sistemáticamente.

Su metodología consta de varias etapas, comenzando por descomponer el problema de decisión en varios criterios. Estos criterios deben ser evaluados y comparados entre pares, para determinar un ponderador. Luego, las alternativas son comparadas y evaluadas en relación a cada criterio definido. Finalmente, se obtiene un puntaje ponderado de las opciones, con el cual se pueden ordenar jerárquicamente las alternativas analizadas.

Este método está fundado sobre una base teórica simple pero sólida, y es útil cuando los criterios de decisión son difíciles de cuantificar y comparar, o cuando la comunicación entre los miembros del equipo evaluador es impedida por sus diferentes especialidades, terminologías o perspectivas.

A pesar de ser una sólida metodología de comparación, a medida que el set de alternativas y criterios es más grande, se requiere de un mayor tiempo de desarrollo, pues el método utiliza matrices de comparación por pares. Por ejemplo, si el problema tiene  $m$  alternativas y  $n$  criterios, se deberán evaluar  $n$  matrices de  $m \times m$ , más una matriz de comparación de criterios de  $n \times n$ , las cuales deben ser determinadas o revisadas por algún experto.

### **Modelos de puntuación**

El método de puntuación o *scoring* es una manera más rápida y sencilla para identificar la alternativa preferible en un problema de decisión multicriterio. La metodología se basa en evaluar las alternativas en relación a un set de criterios. A cada criterio se le define un ponderador de importancia, para luego emplear modelos aditivos, multiplicativos u otras funciones matemáticas con el objetivo de jerarquizar las alternativas analizadas. Un ejemplo es usar como función el promedio ponderado entre los puntajes obtenidos en la evaluación y los ponderadores de cada criterio.

Esta metodología presenta la ventaja de ser un proceso simple que permite la jerarquización de proyectos según el aporte a objetivos previamente definidos, sin embargo, no es posible determinar en qué porcentaje un proyecto es mejor que otro, pues los ponderadores y escalas de puntuación utilizadas no representan valores numéricos interpretables.

#### **2.1.4. Metodología a Utilizar**

La comparación y evaluación de alternativas que se propone en esta memoria consta de dos etapas. Primero, se pretende reducir el número de alternativas a evaluar a través de un método cualitativo o mixto, para después hacer una evaluación cuantitativa de las alternativas restantes, la cual estará respaldada por simulaciones de producción. Los métodos a considerar se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 9. Métodos de comparación.

Cualitativos	Cuantitativos	Mixtos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aporte a metas</li> <li>• Lista de verificación</li> <li>• Método Delphi</li> <li>• Q-sorting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominancia entre proyectos</li> <li>• Indicadores económicos</li> <li>• Programación lineal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AHP</li> <li>• Modelo de puntuación</li> </ul>

Para definir los métodos a utilizar, se deben considerar las limitaciones de tiempo y disponibilidad de los expertos que participarán en la etapa de evaluación. Esto dificulta la posibilidad de desarrollar etapas de evaluación o discusión grupal, pues algunos evaluadores trabajan en Chuquicamata y otros en Santiago, con lo que se excluyen los métodos Q-sorting y Dominancia entre Proyectos.

Considerando los demás métodos, se observa que los métodos mixtos, AHP y Modelo de Puntuación, permiten desarrollar una evaluación multicriterio más completa que las metodologías puramente cualitativas, pues recopilan juicios y opiniones de expertos y, al mismo tiempo, las cuantifican con el objetivo de construir una jerarquización de las alternativas.

Analizando estos dos métodos, se observa que el método AHP requiere de la construcción de tantas matrices de comparación de pares como criterios se definan, por lo tanto, existe una relación proporcional entre la cantidad de criterios a evaluar y el tiempo requerido de evaluación. Con esto, se decide utilizar un Modelo de Puntuación, pues se argumenta que la utilización de una mayor cantidad de criterios implica una evaluación de carácter más global y de mejor calidad, considerando, a la vez, la limitación de tiempo de los expertos.

En cuanto al método cuantitativo a utilizar, se consideran los métodos de Indicadores Económicos y Programación Lineal. Si bien es cierto, la programación lineal es un método efectivo con gran potencial, su desarrollo es más complejo que el uso de indicadores económicos. Por otro lado, los indicadores económicos son ampliamente usados en la industria minera, particularmente en el desarrollo de proyectos, y entregan resultados útiles para la toma de decisiones.

Considerando, a priori, que ambos métodos consiguen resultados aceptables y efectivos, no se justifica utilizar una metodología de mayor complejidad, por lo que se decide utilizar el método de Indicadores Económicos en la segunda etapa de evaluación.

En resumen, la primera etapa de selección de alternativas será desarrollada con una metodología de puntuación, mientras que la evaluación cuantitativa será ejecutada a través de indicadores económicos.

## 2.2. Hundimiento por Bloques

El método de extracción llamado *block caving* o hundimiento por bloques es una forma de explotación de minería subterránea en donde el macizo colapsa por su propio peso de manera controlada. El método consiste en dividir el macizo en bloques rectangulares, los cuales son fragmentados mediante explosivos colocados en sus bases para luego extraer el mineral desde la parte inferior a través de embudos o zanjas recolectoras. Una vez removida el área basal, el bloque comienza a hundirse por acción de la gravedad, por lo que el vacío generado es llenado por material superior del bloque. El material extraído es trasladado hasta un pique de traspaso, que conecta con la galería de extracción a través de un punto de vaciado, para ser reducido y transportado posteriormente a la planta de procesamiento (Brady & Brown, 2004).

En la Ilustración 2, se observa una gráfica explicativa del método, en donde se muestra como el macizo se ha hundido en relación a la superficie original y como los fragmentos se extraen a través de embudos que terminan en los puntos de extracción. Finalmente, el material es llevado hasta un punto de vaciado que conecta con el nivel de transporte inferior para ser trasladado a la superficie a través de correas transportadoras.

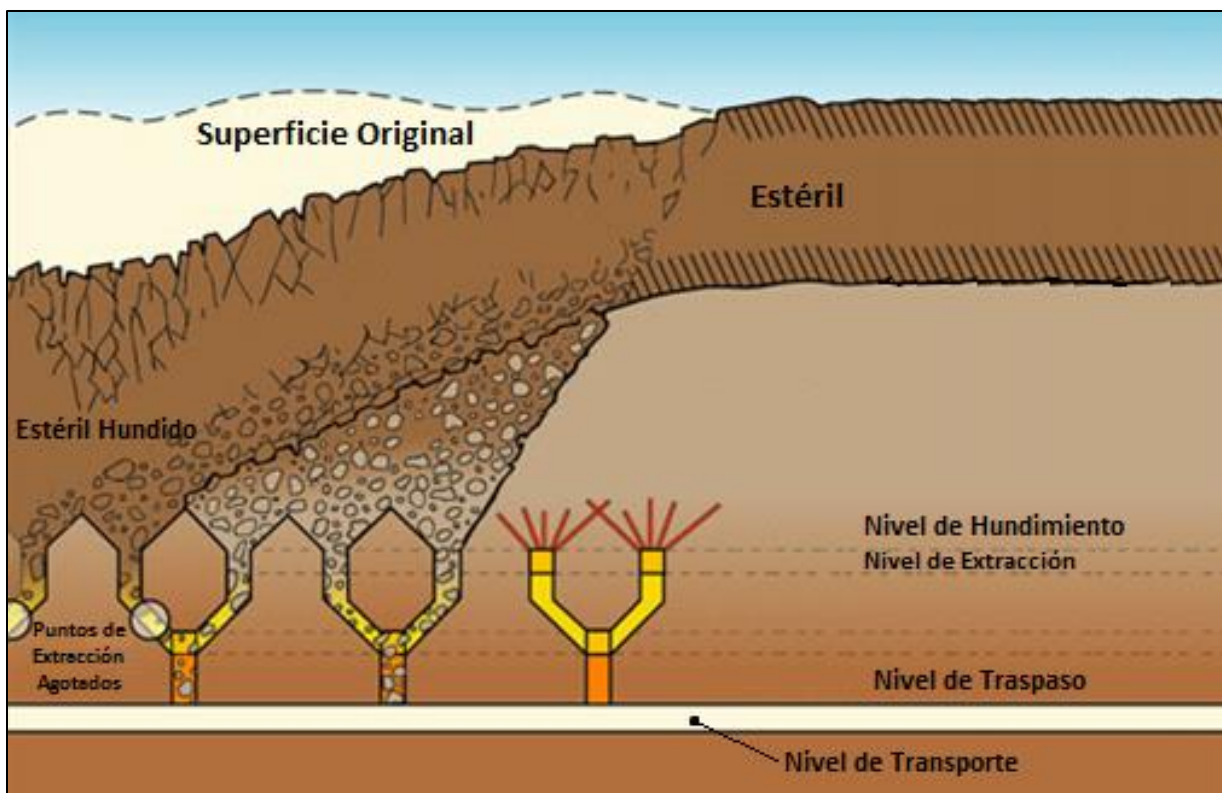


Ilustración 2. Método Block Caving.

En la Ilustración 3, a la izquierda, se puede observar cómo luce un punto de extracción de una mina subterránea. A la derecha, se puede observar una ilustración de

cómo trabaja un equipo de carga en el punto de extracción, cargando el mineral previamente hundido, que ha ido bajando por gravedad desde niveles superiores.



Ilustración 3. Punto de extracción. Imagen real de un punto de extracción (izquierda) y animación del proceso productivo (derecha).

Para el desarrollo de este método es necesario definir distintos niveles físicos dentro de la mina, los cuales permiten la explotación y extracción del mineral. Los distintos niveles son presentados en la Ilustración 4.

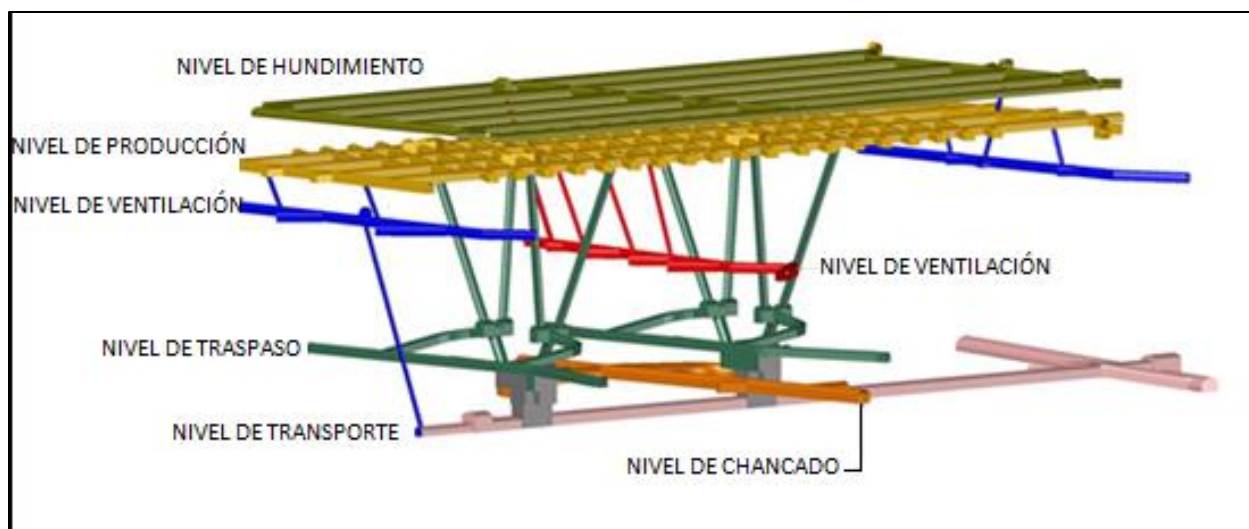


Ilustración 4. Niveles de un macrobloque en Mina Chuquicamata Subterránea.

A continuación, se definen cada uno de los niveles físicos requeridos para utilizar el método de *block caving* (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

- Nivel de Hundimiento: En este nivel se realiza la socavación de la columna mineralizada, mediante perforación y tronadura.
- Nivel de Producción: En este nivel el material es cargado desde el punto de extracción y transportado mediante equipos de carguío mecanizados a los piques de traspaso o vaciado.

- Nivel de Traspaso y Chancado: En este nivel se realiza la reducción de tamaño del mineral mediante martillos picadores o chancadores para luego ser enviado hasta el nivel de transporte.
- Nivel de Transporte: En este nivel se produce el carguío y transporte de mineral proveniente desde el nivel de producción hasta el exterior de la mina.
- Nivel de Ventilación: Permite el ingreso de aire fresco y la descarga del aire viciado desde los niveles de producción.

### 2.3. Fragmentación de Roca en Hundimiento por Bloques

En el nivel de hundimiento de una mina explotada por block caving, es posible identificar distintos tipos de fragmentación de roca, es decir, bloques o porciones de roca en distintos estados y con diferente granulometría. Una clasificación de los tipos de fragmentación fue presentada por Laubscher (Laubscher, 1994), quien determinó tres niveles:

- Fragmentación in situ: Corresponde a la fragmentación intrínseca de los bloques de un macizo, los cuales no han sido alterados por socavación.
- Fragmentación Primaria: Corresponde a la fragmentación del material que ha comenzado a ser socavado. Particularmente, la roca que se encuentra inmediatamente arriba de la socavación (*cave back*) que comienza a fracturarse debido a la redistribución de los esfuerzos en el macizo rocoso.
- Fragmentación Secundaria: Corresponde a la fragmentación del material una vez que los bloques comienzan a desprenderse y caen por gravedad hasta los puntos de extracción. En general, esta fragmentación es de menor granulometría que la fragmentación primaria.

Es importante notar, que al iniciar la socavación en una mina explotada por *block caving*, los primeros metros extraídos corresponden a mineral con fragmentación primaria, pues el *cave back* se encuentra relativamente cerca de las zanjas de producción. Luego, a medida que se va extrayendo una mayor porción de la columna, el mineral extraído corresponde a roca con fragmentación secundaria.

Dada esta clasificación de la fragmentación del mineral, se han acuñado los términos de mineral primario o secundario, dependiendo de la fragmentación que presenta la roca.

En la Ilustración 5, se presenta una imagen de perfil del nivel de hundimiento, en donde se muestran los distintos tipos de fragmentación dentro de una columna de extracción.



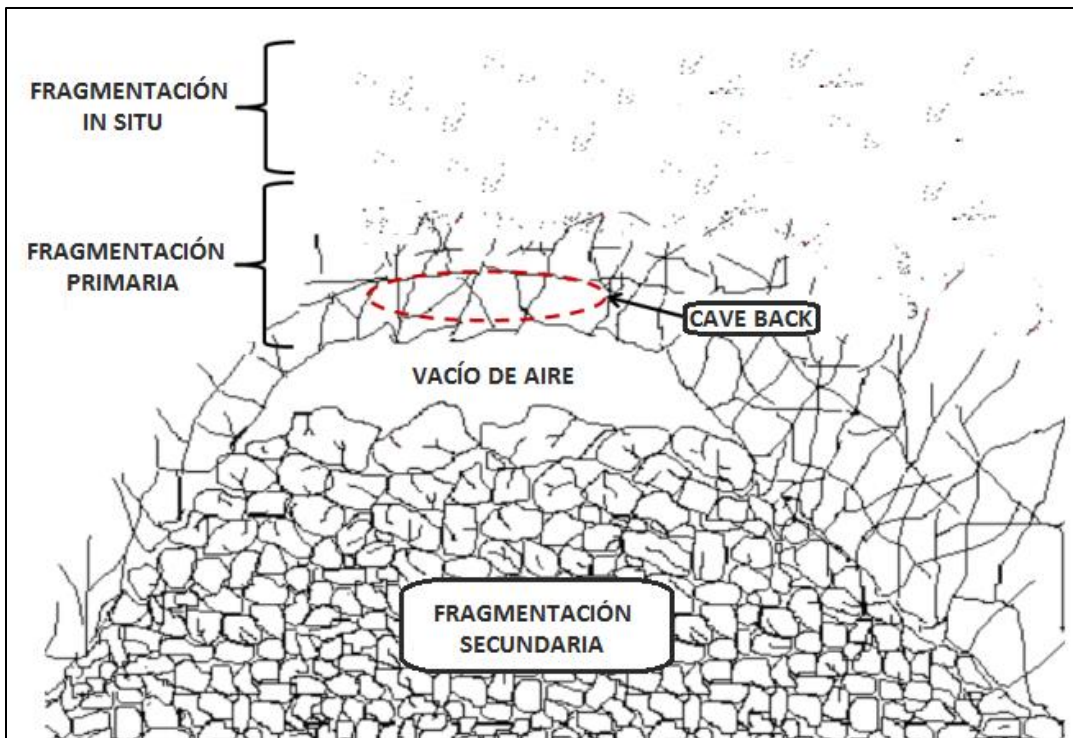


Ilustración 5. Tipos de fragmentación.

## 2.4. Sistema Minero

En un proyecto minero, el sistema minero corresponde al conjunto de operaciones unitarias que conviven dentro de una mina. Algunas operaciones se relacionan directamente con un nivel físico de la mina, sin embargo, hay otras que se desarrollan transversalmente en todos los niveles. En el caso de PMCHS, las operaciones unitarias definidas son (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013):

- Preparación de Mina: Esta operación se divide en el desarrollo de facilidades constructivas y en la preparación minera. El desarrollo consiste en los trabajos previos a la explotación, como la construcción de accesos a las reservas minerales. En el caso de minas subterráneas se realizan trabajos como construcción de galerías, chimeneas, piques, rampas, redes de insumos, etc. La preparación es la etapa en la cual se diseña la forma en que será extraído el mineral y se define el método de explotación. En esta etapa se construyen los niveles o subniveles necesarios.
- Sistema de Extracción: Corresponde a los procesos de traslado de material desde el punto de extracción hasta los puntos de vaciado.
- Sistema de Manejo de Minerales: El sistema de manejo de minerales está definido por los componentes del nivel de transporte que permiten transportar el mineral desde los piques de traspaso hasta la planta generalmente ubicada en la superficie de la mina.

- Sistema de Ventilación: Un sistema de ventilación permite la circulación de aire al interior de la mina para asegurar una atmosfera respirable y segura para el desarrollo de trabajos.
- Mantenimiento: El sistema de mantenimiento asegura el correcto funcionamiento de sistemas, preocupándose por el estado de la infraestructura y de los equipos.
- Servicios y Suministros: La red de servicios y suministros da soporte y abastece de suministros a todas las componentes del sistema minero. Los suministros entregados son electricidad, combustible y agua.

## **2.5. Explosivos y Accesorios de Tronadura**

Los explosivos son sustancias químicas muy usadas en minería subterránea para la construcción de túneles y reducción de rocas. Estas sustancias son inocuas en condiciones normales de temperatura, sin embargo, por medio de un iniciador pasan violentamente al estado gaseoso, produciendo un gran aumento de volumen, alta temperatura y presión. En general, los explosivos se clasifican de acuerdo a su aplicación y secuencia (SERNAGEOMIN, 2013; Castilla, Bernaola, & Herrera, 2013):

- Explosivos primarios o iniciadores: Aquellos cuya misión es iniciar la detonación de una masa explosiva. Son altamente sensibles e inestables.
- Explosivos secundarios o básicos: Aquellos que causan el efecto rompedor del disparo. En comparación a los explosivos primarios, para su detonación requieren una mayor cantidad de explosivo y un mayor impulso energético.

En todos aquellos trabajos en los que se emplean explosivos, es necesario utilizar accesorios que permitan, en forma secuencial, la iniciación del explosivo y, de forma subsiguiente, la iniciación de la voladura, de manera que se produzca la detonación. Por ello, en general, para una tronadura se utiliza un sistema de iniciación (que incluye un explosivo primario) y un explosivo secundario.

A continuación, se definen algunos explosivos y accesorios que son comúnmente utilizados en tronadura de minería subterránea.

- ANFO: La sigla en inglés significa nitrato de amonio mezclado con gasolina (Ammonium Nitrate + Fuel Oil). Es un explosivo secundario, de potencia media y densidad baja. No son sensibles a los detonadores, por lo que necesitan de otro explosivo para iniciarse correctamente, lo que puede conseguirse con cordones detonantes. Esta sustancia puede ser puesta directamente en agujeros o barrenos en donde se requiera tronar.



Ilustración 6. Explosivo tipo ANFO.

- **Cordón Detonante:** Es un cordón flexible e impermeable que contiene en su interior un explosivo denominado pentrita. Se emplea fundamentalmente para transmitir la detonación iniciada a los explosivos colocados en barrenos.



Ilustración 7. Cordón detonante.

- **Detonadores:** Son sistemas de iniciación, cuya finalidad es iniciar los explosivos dentro del barreno. Existen detonadores eléctricos y no eléctricos. En términos generales, constan de una cápsula metálica de aluminio o cobre, donde se aloja el explosivo iniciador. En la tronadura, el detonador se conecta directamente con el explosivo secundario, muchas veces insertándolo dentro de él.



Ilustración 8. Detonador.

- Emulsiones: Corresponden a explosivos secundarios compuestos por sustancias explosivas y agua, las cuales tienen la singularidad de poder ser utilizados en barrenos con agua. Las emulsiones se mezclan con otros explosivos (ejemplo: ANFO) formando una pasta.



Ilustración 9. Diferentes tipos de emulsión en función de la proporción Emulsión/ANFO.

- Explosivo APD: Son explosivos secundarios de alta potencia, fabricados con pentolita, los cuales están diseñados especialmente para reducir bolones o para remover material atascado en chimeneas o piques. El explosivo es ofrecido en el mercado en dos formatos: cilíndrico y cónico. El cilíndrico es usado en cañones, como el dispositivo QuickDraw (ver sección 5.1.1.), mientras que el cónico es usado especialmente en el descuelgue de zanjas (ver sección 4.1.2.).



Ilustración 10. Explosivo tipo APD.

- Explosores eléctricos: Se denominan explosores a las máquinas generadoras de corriente eléctrica que se utilizan para iniciar las voladuras con detonadores eléctricos. A través de estos dispositivos, el operador inicia el disparo desde una distancia segura respecto al área de tronadura.



Ilustración 11. Explosor eléctrico.

- Sistema de iniciación no eléctrica: Estos sistemas son necesarios cuando se usan detonadores no eléctricos. En estos casos, se necesita proporcionar energía al extremo de un tubo de transmisión, de modo que se asegure una correcta iniciación. Esta energía puede obtenerse por diferentes medios: una chispa eléctrica originada por un iniciador de chispa o una pequeña energía proporcionada por un pistón de caza.

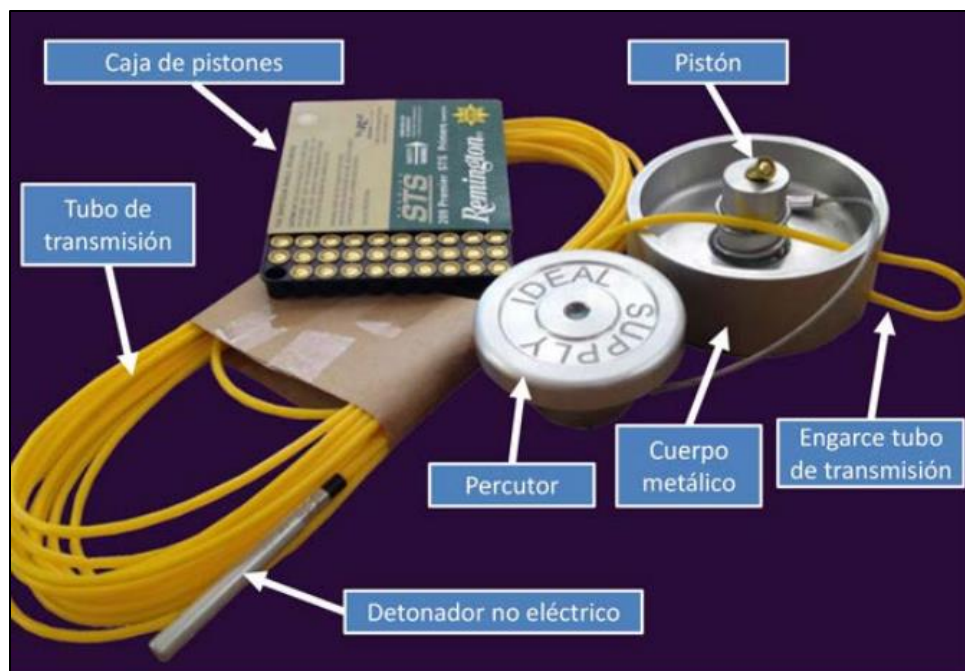


Ilustración 12. Iniciador de pistón.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

#### 3.1. Ubicación y Dimensiones

El complejo minero de Chuquicamata se ubica 15 kilómetros al norte de Calama, y 243 kilómetros al noroeste de Antofagasta, en la II Región de Antofagasta, Provincia El Loa (ver Ilustración 13). Sus coordenadas geográficas son 60°54' longitud oeste y 22°17' latitud sur. La mina a rajo abierto se encuentra a 2.870 metros sobre el nivel del mar y es reconocida como la más grande del mundo, con dimensiones de 4,9 kilómetros de largo, 2,9 kilómetros de ancho y casi 1 kilómetro de profundidad.



Ilustración 13. Mapa de ubicación Mina Chuquicamata.

### **3.2. Reseña Histórica**

De acuerdo a antecedentes históricos (Oyarzún, 2008), tras la Guerra del Pacífico, en 1879, esta región de inmensas riquezas geológicas pasó a formar parte del territorio nacional. En esos años, miles de personas llegaron buscando una oportunidad laboral, en medio del apogeo de la industria salitrera, comenzando las primeras extracciones masivas de cobre. En 1910, un ingeniero estadounidense implementó un proceso para detectar minerales de baja ley con lo cual se descubrió el yacimiento en Chuquicamata.

El 18 de mayo de 1915, se puso en marcha el proyecto minero Mina Chuquicamata, la cual se convertiría en la mina a rajo abierto más grande del mundo. El campamento fue inaugurado desde Santiago por el presidente de la República, Ramón Barros Luco.

En 1923, los hermanos Guggenheim, dueños del yacimiento, vendieron sus derechos y todas las instalaciones a otra empresa norteamericana, *Anaconda Copper Mining Co.*, poderosa firma que comenzó la construcción de colosales obras de mejoramiento de la infraestructura. En este periodo llegaron equipos de última generación y se construyeron caminos para mejorar la conectividad de la mina.

Así avanzaron los años hasta 1969, cuando el Estado de Chile adquirió el 51% de las acciones de *Chile Exploration Company*, subsidiaria de *Anaconda Copper Mining*, y en julio de 1971, mediante una reforma a la constitución, fue promulgada la nacionalización del cobre. Posteriormente, se formó la Corporación del Cobre, CODELCO, la empresa estatal más grande e importante del país (Norte Minero, 2001).

A fines de agosto de 2007, el campamento minero de Chuquicamata fue clausurado tras 92 años de existencia. La decisión fue adoptada para resguardar la salud de los habitantes, quienes podían resentir los efectos del plomo y otros desechos de la extracción minera. La mayoría de los habitantes de Chuquicamata fueron trasladados a la ciudad de Calama.

Actualmente, el complejo minero asociado a la División Codelco Norte, cuenta con tres minas explotadas a rajo abierto: Chuquicamata, Mina Sur y Radomiro Tomic.

### **3.3. Situación Actual y Proyecto**

Debido a la intensa explotación de la Mina Chuquicamata durante los últimos 100 años, el rajo ha llegado a una profundidad cercana al kilómetro. Esto ha conllevado aumentos en la relación estéril mineral y en la distancia que deben recorrer los



camiones y equipos mineros, traduciéndose en mayores costos de producción e implicando un negocio menos rentable.

Por esto razón, se desarrollaron variadas exploraciones y estudios en el yacimiento que arrojaron una alta concentración de recursos de mineral de cobre y molibdeno bajo el rajo. Tales estudios impulsaron la evaluación de la viabilidad técnica y del potencial económico de explotar el yacimiento a través de minería subterránea, generando un proyecto estructural que permitiría sustentar un plan de negocios hasta aproximadamente el año 2060 con una inversión total estimada de US\$4.200 millones.

Actualmente, el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) está siendo desarrollado por la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco (VP), encontrándose en etapa de Ingeniería de Detalle, y contempla la construcción de una mina subterránea masiva de cuatro niveles de explotación para extraer alrededor de 1.760 millones de toneladas de mineral con leyes medias de 0,71% de cobre, 499 ppm de molibdeno y 460 ppm de arsénico. El periodo de operación será de al menos 38 años, precedida por una fase de construcción y puesta en marcha cercana a los 8 años, a partir del año 2015. El inicio de la producción de la mina subterránea se contempla a inicios del año 2019, con un *ramp-up*<sup>10</sup> de 7 años, llegando a una producción de 140 kilotoneladas por día en el año 2025. En la Ilustración 14, se observa la representación gráfica del proyecto (Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, CODELCO, 2009).

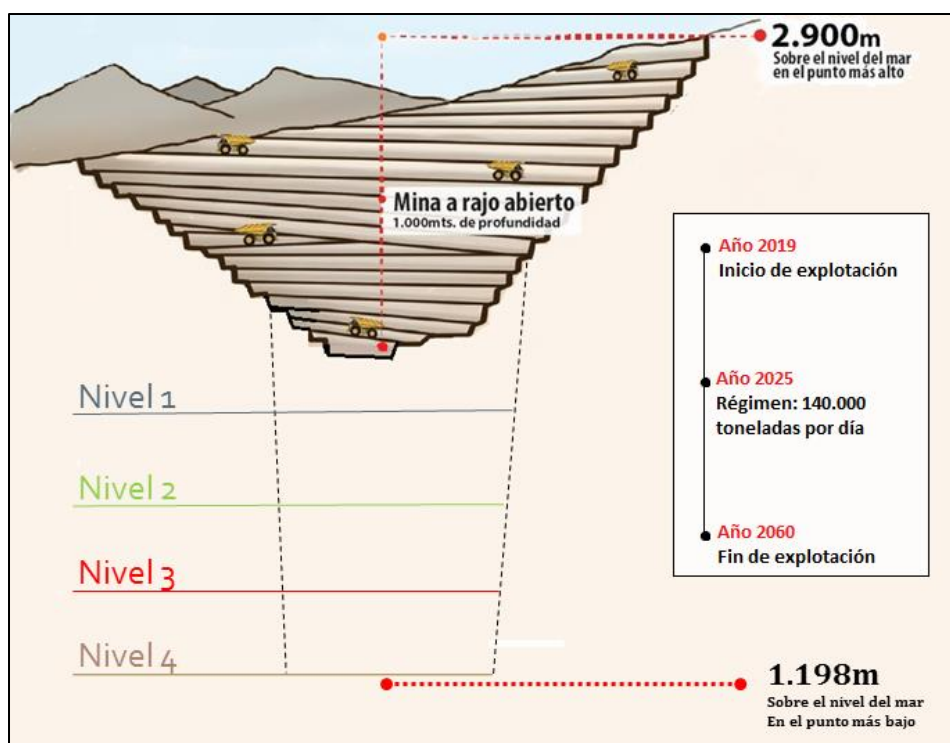


Ilustración 14. Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

<sup>10</sup> Etapa de incremento de la producción de la mina, partiendo de la puesta en marcha hasta el régimen de extracción.



El método de explotación a aplicar será de hundimiento por bloques, contemplando unidades básicas de explotación independientes en su preparación y producción, denominadas macro bloques (MB). Este método ofrece ventajas en costos y capacidades de producción, además de adaptarse de mejor forma a las condiciones geotécnicas presentes en el yacimiento, respecto al método *panel caving*, pues se estimó que la exposición del talud Oeste (en donde existe una falla geológica) a la subsidencia durante la fase inicial de la explotación, tendría una condición de mayor control bajo una configuración de bloques, debido a la mayor flexibilidad que es posible alcanzar con la política de tiraje o extracción del método de bloques.

Centrándose en el sistema de extracción minera, el diseño considera trabajar con equipos de carguío de bajo perfil o *Load Haul Dump* (LHD) semiautónomos, que serán teleoperados en el proceso de carga de mineral y funcionarán de forma autónoma en el transporte y descarga de material. La teleoperación será gestionada desde el Centro Integrado de Operación y Gestión (CIOG) ubicado en la superficie.

### **3.4. Método de Extracción y Programa de Producción**

La mina será explotada a través del método de hundimiento por bloques. El cual tiene la ventaja de no utilizar explosivos para fragmentar el macizo, pues los bloques se hunden debido a la fuerza de gravedad, permitiendo una fragmentación natural de la roca, lo cual reduce los costos de minado en comparación a otros métodos subterráneos. Por otro lado, se obtienen altos volúmenes de producción y permite un alto grado de mecanización de los procesos. A pesar de ello, el método también posee desventajas, como la necesidad de un alto capital inicial y las grandes dificultades técnicas como son la complejidad del diseño, la necesidad de una construcción de calidad y de una gestión rigurosa en cada proceso.

El diseño de Chuquicamata Subterránea considera una variante del *block caving*, ya que el macizo será dividido en Macro Bloques. Un Macro Bloque se define como una unidad básica de explotación donde se realizan las etapas de preparación, socavación y producción independientemente de lo que sucede en otros Macro Bloques de la mina. En general, estos comprenden áreas de entre 20.000 a 55.000 m<sup>2</sup> y son separados por pilares destinados a mantener la estabilidad durante el desarrollo de las distintas actividades de explotación. La ventaja de utilizar esta variante tiene relación a la segmentación geográfica de las operaciones lo que otorga mayor flexibilidad de planificación y permite incorporar cambios tecnológicos de forma paulatina.

En cuanto a la programación de producción, el periodo de planificación, que se presenta en la Ilustración 15, está definido entre los años 2018 y 2058. Con el proyecto se pretende extraer alrededor de 1.760 millones de toneladas de mineral, con leyes medias de 0,71% de cobre, 499 ppm de molibdeno y 460 ppm de arsénico. En el gráfico, también se observa un *ramp up* de 7 años, para llegar a un régimen de

extracción de 140 ktpd<sup>11</sup> en el año 2025 (Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, CODELCO, 2009).

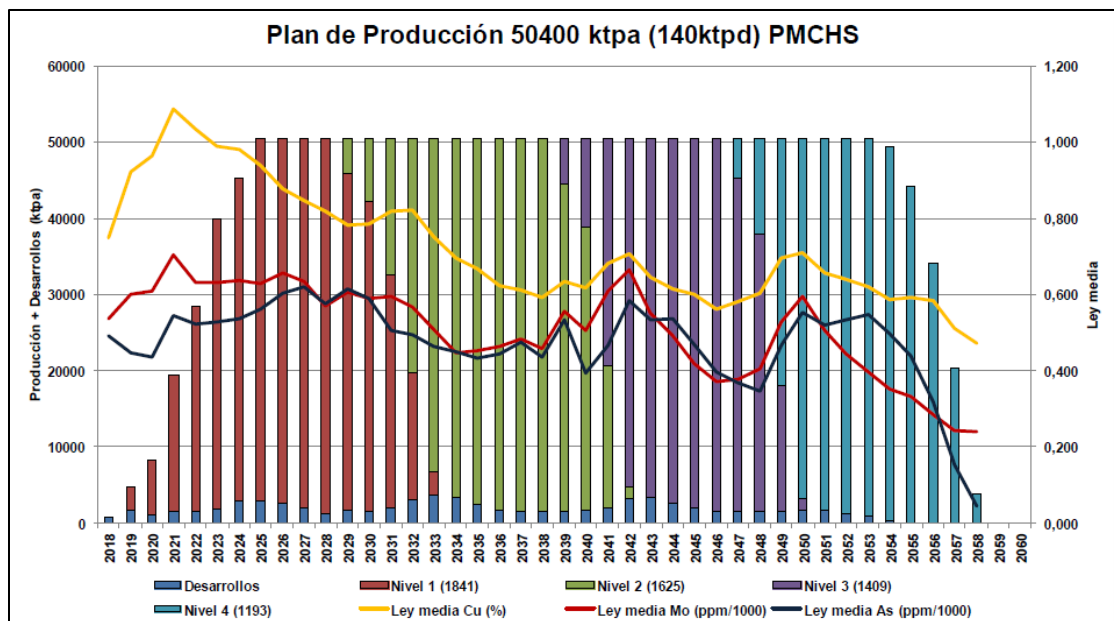


Ilustración 15. Plan de producción Mina Chuquicamata Subterránea.

### 3.5. Filosofía Operacional

La filosofía operacional define la forma en que las distintas operaciones unitarias del sistema minero se relacionan entre sí y como estas interacciones son gestionadas (Ver Ilustración 16) en pos de conseguir ciertos objetivos específicos. En el caso del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo, estos objetivos son maximizar la productividad, minimizar los costos de operación y garantizar una operación segura y sustentable (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

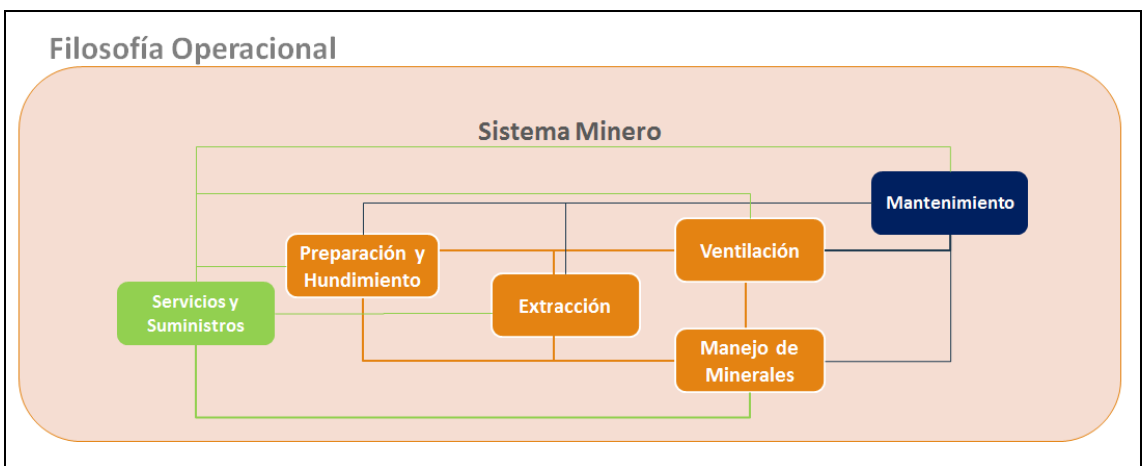


Ilustración 16. Filosofía Operacional PMCHS.

<sup>11</sup> Kilo toneladas por día

Particularmente, en el PMCHS la filosofía operacional está ligada al funcionamiento del sistema minero a través de un Centro Integrado de Operación y Gestión (CIO&G), el cual es un centro de mando único en donde se controlan y operan la totalidad de los procesos dentro de la mina. Este centro estará ubicado en la superficie de la mina y nace como solución para alcanzar los compromisos operacionales y financieros del proyecto.

La operación de este centro pretende lograr mejoras en seguridad y salud ocupacional, ya que reduce el ingreso de trabajadores a la mina subterránea, y también mejoras en productividad y costos, ya que ayuda a la toma de decisiones en todos los procesos, para así lograr ser la mina subterránea de CODELCO con el menor costo unitario real de extracción, con 6,37 US\$/TMS<sup>12</sup>. En la Ilustración 17, se muestra una gráfica comparativa del costo unitario que pretende lograr el proyecto, versus el costo unitario de otras minas y proyectos de CODELCO, donde DET: División El Teniente, DAND: División Andina, PNNM: Proyecto Nuevo Nivel Mina (División El Teniente) y PMCHS: Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

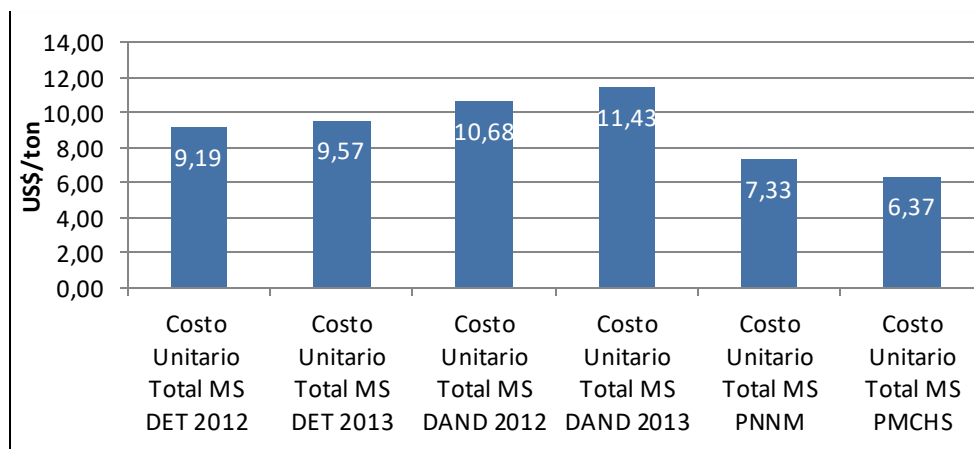


Ilustración 17. Benchmarking del costo unitario real en minas subterráneas y proyectos de CODELCO.

Las principales tareas del CIO&G serán la eliminación de tareas repetitivas, la asignación de recursos, la optimización de procesos, al tener información única, en línea y tiempo real, la gestión integrada de los subprocesos y la coordinación entre operadores y encargados, entre otros. Además, en dicho centro se localizará el centro de operaciones habilitado para la gestión de flotas y la operación de carga asistida de LHDs y también se llevará a cabo la asignación de operadores para suministrar combustible o trasladar los equipos a talleres de mantenimiento.

<sup>12</sup> Tonelada Métrica Seca

### 3.6. Subnivel de Extracción

El proceso de extracción comienza una vez que se ha preparado y hundido completamente el Macro Bloque, es decir, tras haber realizado los desarrollos, construcciones, montajes y puesta en marcha de todos los equipos que forman parte del proceso productivo, tales como equipos móviles (LHD, Jumbos de Reducción Secundaria y Martillos Móviles) y equipos estacionarios (Chancador y Correas), y de haber quebrado la base de la columna mineralizada.

En PMCHS, cada Macro Bloque tendrá cuatro calles independientes entre sí, las cuales serán subdivididas con el objetivo de lograr ocho semi calles a ser explotadas por los LHDs semiautónomos. La función del equipo LHD será cargar el mineral en los puntos de extracción, transportarlo y descargarlo en los puntos de vaciado. Al interior de cada calle existirán puntos de extracción cada 15 a 17 metros, y dos estaciones de vaciado. Las calles tendrán una longitud de entre 300 a 400 metros, por lo que cada macro bloque tendrá entre 140 a 150 puntos de extracción de mineral. Además, cada macro bloque posee dos cabeceras Este y Oeste que permiten el desplazamiento de equipos y la inyección de aire, mientras que la extracción de aire viciado se ubica aproximadamente al medio de cada calle. En la Ilustración 18 se puede ver el *layout* del nivel de producción de un macro bloque estándar de la mina.

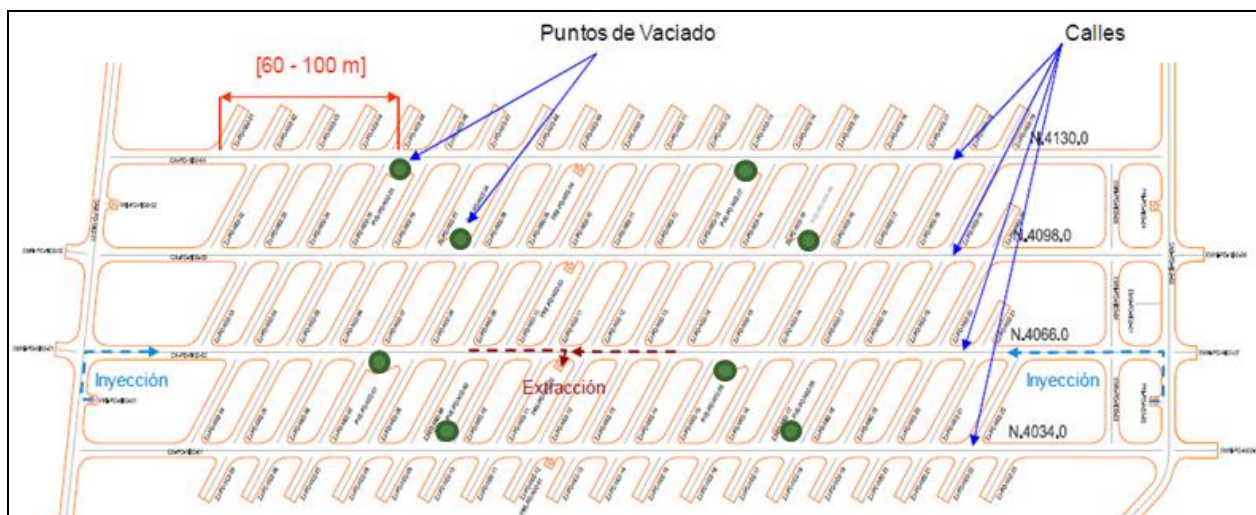


Ilustración 18. Vista de planta de un nivel de producción

En el punto de vaciado existirá una parrilla de control granulométrico de 0,9 x 0,9 metros de abertura. Esta parrilla sirve para clasificar y evitar el paso de colpas<sup>13</sup> de sobre tamaño que puedan afectar su normal traspaso a través del pique y silo, o al funcionamiento del chancador. El mineral que queda sobre la parrilla es reducido por Martillos Picadores (ver sección 3.6.1.) en la medida que el punto de vaciado se va llenando de colpas (CEOP Consulting , 2013).

<sup>13</sup> Trozo de roca de tamaño superior al necesario para el traspaso del mineral por los puntos de vaciado.

En la Ilustración 19, se presenta una imagen ilustrativa del nivel de producción, en donde se observan todas las componentes anteriormente mencionadas.

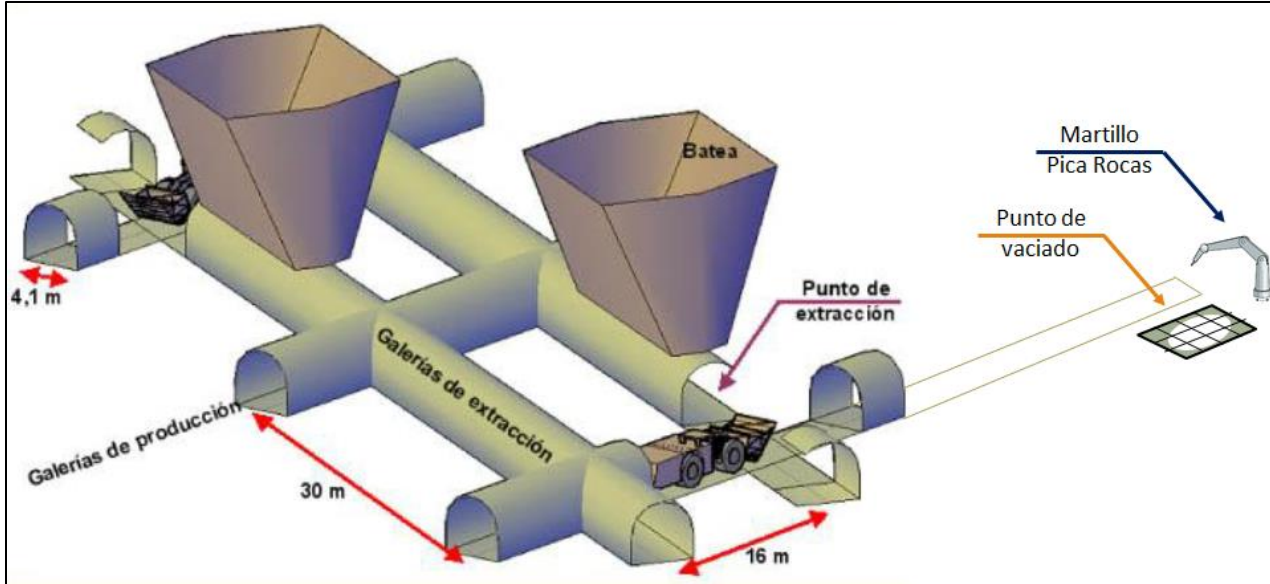


Ilustración 19. Representación del nivel de producción en PMCHS.

La cantidad de mineral a extraer en cada punto de extracción estará regulada por un programa de producción de turno, en relación a esto, se pretende incorporar un sistema de control y gestión de flota móvil de producción, el cual entregará información para gestión operacional como el posicionamiento, los ciclos de trabajo, los tiempos operativos, variables vitales de los equipos y, particularmente en el caso de los LHD, toneladas producidas.

### 3.6.1. Equipos

A continuación, se describen los principales equipos, disponibles en el mercado, usados en los sistemas de extracción de las minas explotadas por *block caving*.

- Load Haul Dump (LHD): Equipo de carguío frontal de bajo perfil. Consiste en un equipo móvil que posee una pala de gran capacidad, diseñado especialmente para minería subterránea. Será usado en la carga, transporte y descarga de mineral.



Ilustración 20. Load Haul Dump Semiautónomo.

- Jumbo de Reducción Secundaria: Equipo perforador. Consiste en un equipo móvil que posee brazos con perforadoras, capaces de insertar explosivos en la roca. Es parte de la propuesta hecha en etapa de prefactibilidad para los procesos de reducción de bolones en el punto de extracción y el descuelgue de zanjas de extracción, en caso de ser requerido.



Ilustración 21. Jumbo de Reducción Secundaria.

- Martillo Picador: Equipo picador de rocas que consiste en un brazo articulado que posee una punta de aleación de acero de gran resistencia y dureza, la cual permite quebrar colpas en fragmentos menores. Este equipo será usado en la reducción secundaria en los puntos de vaciado, permitiendo el flujo continuo de material hacia el nivel de traspaso y reducción secundaria. Existen martillos fijos, que son anclados en puntos determinados de la mina, y también martillos móviles, montados sobre equipos con orugas o ruedas, los cuales se trasladan a distintos sitios de la mina.



Ilustración 22. Martillo Picador.



### 3.6.2. Definición del Uso del Tiempo

La ilustración 23 muestra el esquema de definición del uso del tiempo adoptado en el proyecto (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013), el cual es útil para controlar y evaluar la operación de los distintos equipos utilizados en el subnivel de extracción. Este esquema de uso del tiempo es compatible con los estándares ASARCO (*American Smelting & Refining Co.*), norma que es usada globalmente como marco de referencia para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que los equipos incurren durante las operaciones mineras.

Horas totales		
Horas disponibles		Mantenimiento
Horas operativas		Equipos en standby (Reservas + Interferencias)
Horas efectivas	Demoras (Factor Operacional)	

Ilustración 23. Definición del uso del tiempo

A continuación, se definen cada uno de los espacios de tiempo presentados en la ilustración anterior.

- Horas totales: Espacio de tiempo en que se produce la medición. Para el caso de los equipos del subnivel de producción las horas totales corresponden a 24 horas durante 348 días anuales (se restan 12 días destinados al mantenimiento del sistema de manejo de materiales en los cuales se suspenden las operaciones).
- Mantenimiento: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico. En el caso de los equipos del subnivel de extracción las horas de mantención corresponden a 3 horas diarias.
- Horas disponibles: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para cumplir con su función de diseño. En el caso de los equipos del subnivel de extracción las horas disponibles ascienden a 21 horas durante 348 días anuales.
- Equipos en standby: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto para cumplir su función de diseño no teniendo operador que lo utilice (reservas) o que bajo una condición específica del avance de la operación no pueda ser operado (interferencias). En el caso de los equipos del subnivel de extracción las horas en que los equipos se encuentran standby ascienden a 5 por día debido a actividades normadas por ley, como colación y

cambio de turno, las cuales son programadas de modo que coincidan con las mantenciones.

- Horas operativas: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto, con operador y cumpliendo con las actividades asociadas a la operación. En el caso de los equipos del subnivel de extracción las horas operativas son 19 al día.
- Demoras: Espacio de tiempo en que el equipo no cumple su función de diseño debido a condiciones propias de la operación que implican pérdidas productivas. En el caso de los equipos del subnivel de extracción se estima las demoras sumen aproximadamente 3,8 horas diarias debido a interferencias e imprevistos, como puntos colgados, limpieza de calles, etc.
- Horas efectivas: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para las cuales ha sido adquirido por la organización. En el caso de los equipos del subnivel de extracción, se estima que las horas efectivas asciendan a 15,2 por día.



### 3.7. Sistema Semiautónomo del Equipo Load Haul Dump (LHD)

Para diseñar los procesos del sistema de extracción, es indispensable entender cómo es el sistema semiautónomo que operará los equipos de carguío LHD usados en Chuquicamata Subterránea. Por lo mismo, a pesar de que este sistema aún no está totalmente desarrollado, en esta sección se definen las componentes básicas que deben integrarlo basándose en otros sistemas de operación usados en minas de CODELCO.

También es relevante mencionar que la automatización de equipos de minería subterránea presenta ventajas comparativas en relación a la operación manual, ya que, dada la naturaleza de este tipo de proyectos mineros, existen problemas ambientales que pueden afectar a los operadores. Algunos de estos problemas son la dificultad de ventilación de túneles y la exposición a gases, polvo, ruidos y vibraciones. Por otro lado, la operación manual también provoca discontinuidad en la producción debido a los cambios de turno y horas de colación. En cambio, la automatización de equipos entrega mayor seguridad a los operadores, incrementos en la productividad, aumento en la utilización y reducción en requerimientos de mantenimiento, entre otros.

#### 3.7.1. Arquitectura del Sistema de Operación

El sistema de operación de los equipos LHD estará constituido por una serie de subsistemas. En la Ilustración 24, se presenta una conceptualización de la relación entre estos sistemas (Miranda, 2009).

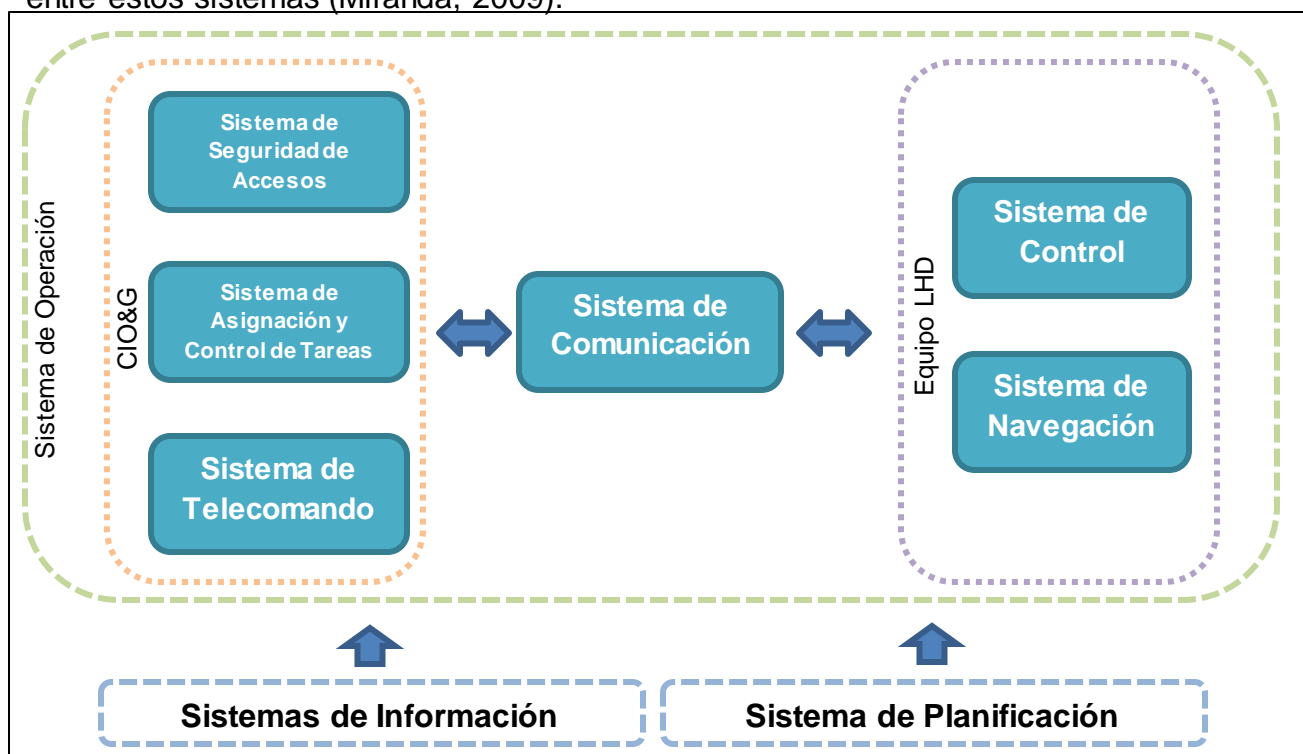


Ilustración 24. Diagrama de arquitectura del sistema de operación.

El sistema de operación deberá estar constituido por (Pozo, 2003):

- Sistema de Seguridad en Accesos: Su función es controlar el acceso del personal y equipos móviles al área de extracción, manteniendo la separación, por motivos de seguridad, entre las actividades desarrolladas por los equipos móviles operados en forma manual respecto al área de trabajo de los equipos LHD semiautónomos.
- Sistema de Asignación de Tareas: Su función es asignar tareas o misiones a los LHDs en relación a la cartilla de tiraje<sup>14</sup> definida para ese día o turno.
- Sistema de Telecomando: Este sistema provee control sobre el LHD y una interface de usuario a los operadores del sistema.
- Sistema de Comunicación: Este sistema provee un enlace de comunicación inalámbrico entre los equipos semiautónomos y la sala de control. Está constituido principalmente por antenas, una red de área local y terminales.
- Sistema de Control: Su función es monitorear indicadores del estado del equipo de carguío y de su producción.
- Sistema de Navegación: Su función es conducir a los equipos de carguío desde un punto inicial hasta un punto final dependiendo de la tarea asignada.
- Sistemas de Información: Está constituido por los principales sistemas de administración de información de la mina, los cuales aportan información sobre producción, procesos, mantenimiento, energía, logística, costos, etc. Los principales sistemas de administración de información son el Sistema de Información para la Gestión de Operación y de Mantenimiento (SIGO&M), el Sistema ERP para Gestión de Negocio (SAP) y el Sistema de Tecnologías de Información para la Comunicación y la Automatización (TICA).
- Sistema de Planificación: Este sistema pertenece al área de Planificación de Corto Plazo, la cual define la producción asociada a días y turnos. Esta información es entregada a través de una cartilla de tiraje, la cual detalla la cantidad de material que debe ser retirado en cada punto de extracción y cuánto debe ser descargado en cada punto de vaciado.

### **3.7.2. Sistemas en el CIO&G**

#### **3.7.2.1. Sistema de Seguridad de Accesos**

El sistema de seguridad de accesos controlará los ingresos y salidas de las áreas de extracción en donde funcionarán los equipos LHD. El objetivo de este subsistema es mantener una operación semiautónoma segura, separando físicamente las actividades de los equipos semiautónomos respecto a las actividades de cuadrillas o

---

<sup>14</sup> Planilla que contiene las cantidades de material que se deben cargar desde cada punto de extracción y la cantidad de material que debe ser descargado en cada punto de vaciado.

equipos operados en forma manual, ya que en una misma calle coexistirán labores de producción autónomas con labores de mantenimiento, reparación de calles o reducción secundaria en puntos de extracción y vaciado (ver Ilustración 25). Para ello, se pueden usar puertas, sensores láser, cierres eléctricos y cámaras, entre otros.

Algunas de las funciones que debe realizar este sistema son controlar y restringir el acceso a la zona autónoma, permitir el aislamiento del área de producción, detectar entradas no autorizadas, prevenir salidas inesperadas de equipos, permitir la entrada y salida de equipos autónomos y semiautónomos del área de producción mientras la producción este activa y controlar la detención rápida de equipos en casos de emergencia.

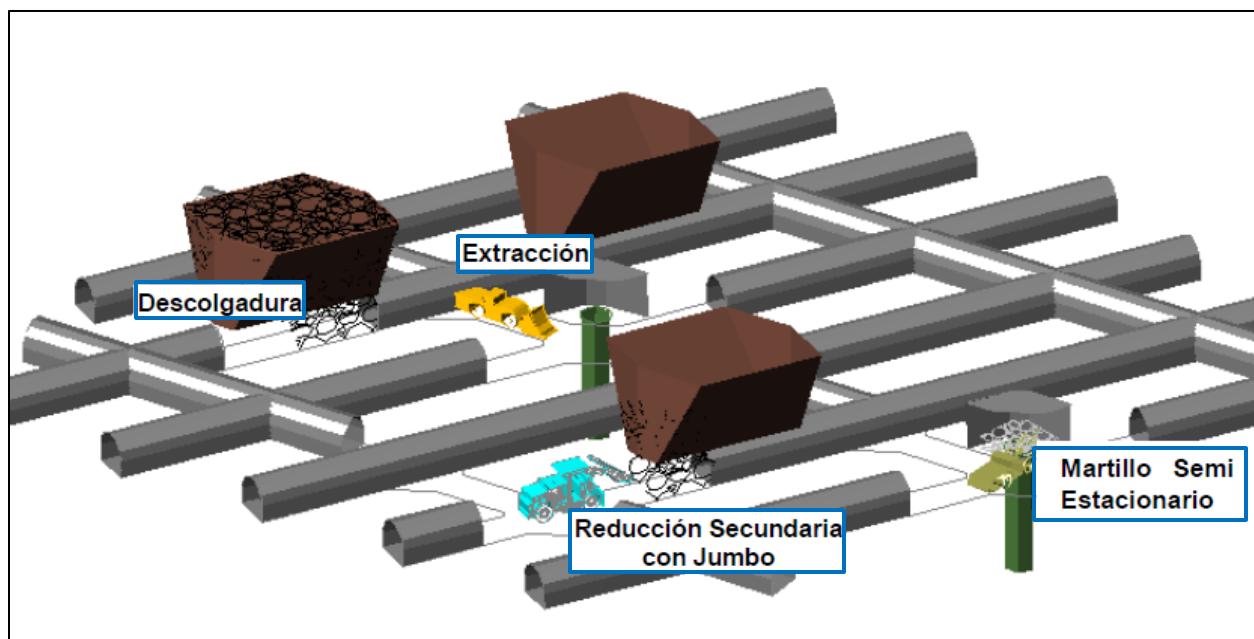


Ilustración 25. Coexistencia de operaciones manuales y semiautónomas.

En el futuro, es altamente probable que todos los equipos funcionen en forma completamente autónoma, lo que implica que no habrá cuadrillas ni trabajos manuales, por lo tanto, este sistema debe ser capaz de comunicarse con los equipos e identificar las operaciones que se están realizando en cada área.

### **3.7.2.2. Sistema de Asignación y Control de Tareas**

Este sistema formará parte de la plataforma de Gestión de Flotas y Control de Producción y su función será asignar tareas a la flota de equipos LHD en relación a la cartilla de tiraje, controlar la ejecución de las tareas, monitorear los indicadores de producción y controlar el tráfico dentro del área de producción.

Su funcionamiento comienza recibiendo la cartilla de tiraje enviada por el Sistema de Planificación, la cual define las cantidades de material que se deben cargar

desde cada punto de extracción y la cantidad de material que debe ser descargado en cada punto de vaciado. Con esta información, el sistema asigna tareas o misiones a cada equipo LHD. Cada misión incluye un destino y el trayecto que utilizará el equipo.

En cuanto al control y monitoreo de la producción, el sistema obtendrá información, respecto al peso de los baldes trasladados, directamente desde el Sistema de Control de cada equipo LHD.

La información de asignación de tareas y monitoreo de la producción deberá estar disponible a través de una interfaz de usuario en la estación del operador. En un inicio, cada operador estará a cargo de 2 o 3 equipos LHD, sin embargo, se están estudiando sistemas de asignación dinámicos, los cuales asignarán equipos a operadores que estén disponibles.

### **3.7.2.3. Sistema de Telecomando**

El sistema de telecomando debe proveer al operador de una interfaz gráfica que permita supervisar y controlar la flota de equipos LHD, y de una estación de trabajo, la cual se compone de monitores y paneles de control.

En general, la silla del operador incluye los paneles de control, con los cuales se controla la dirección, levante y volteo de los equipos, y también se seleccionan las cámaras de video. En la Ilustración 26, se muestra una estación estándar de operación.



Ilustración 26. Estación de operador de LHDs.

En cuanto a los monitores, uno de ellos debe mostrar las interfaces de los Sistemas de Asignación de Tareas y Seguridad, mientras que el otro será un monitor de video que despliega imágenes capturadas por las cámaras de los equipos LHD.

El panel de control (ver Ilustración 27) replica las mismas funciones disponibles dentro de la cabina del equipo LHD. Estos controles incluyen: Encendido y bloqueo del sistema, encendido y apagado del motor, dirección, acelerador, freno, control del balde, control del brazo, selección de marchas, bocina, luces y selección de cámaras.



Ilustración 27. Controles de mando remoto del equipo LHD.

### 3.7.3. Sistemas a Bordo del equipo LHD

#### 3.7.3.1. Sistema de Control

El sistema de control a bordo del equipo LHD debe recoger información de la máquina para el monitoreo de su condición, recolectar datos sobre el monitoreo de producción (pesaje del balde) y proveer de una interfaz gráfica de operación a bordo. Los datos de monitoreo que se deben recolectar son: Mediciones del balde y brazo, mediciones del motor y calibración de sensores. Toda esta información es transferida en forma automática a los sistemas de información y al CIO&G.

Por otro lado, de ser requerido para alguna operación específica, este sistema de control también debe permitir la operación manual del equipo de carguío. El sistema permitirá modos de operación manual, telecomandada o autónoma dependiendo de la tarea que se esté ejecutando, otorgando el control del equipo a un operador ubicado en la cabina o a un operador remoto ubicado en la sala de control.

#### 3.7.3.2. Sistema de Navegación

La función de este sistema es conducir al equipo cuando se le otorguen tareas de producción autónomas (traslado y descarga de material). Este sistema deberá ser capaz de definir la posición exacta del equipo en todo momento, guiándose por sensores, escáner laser, odómetros y cámaras de video, para luego dirigirlo a los piques definidos por el sistema de asignación de tareas.



Ilustración 28. Escáner laser del equipo LHD.

### 3.7.4. Zona de Transición

La zona de transición es el lugar físico donde ocurre el cambio de modo manual a modo autónomo de los equipos LHD, y viceversa. Esta zona debe contar con dispositivos y equipamientos que aseguren una transición libre de riesgos para el personal, el equipo y la infraestructura.

Como se observa en la Ilustración 29, una zona de transición limita con áreas de operación autónoma y con áreas de operación manual, las cuales se separan por barreras físicas (portones) y por barreras láser. Estas barreras son activadas o desactivadas a través de paneles de control que se ubican en los extremos de las zonas de operación autónoma.

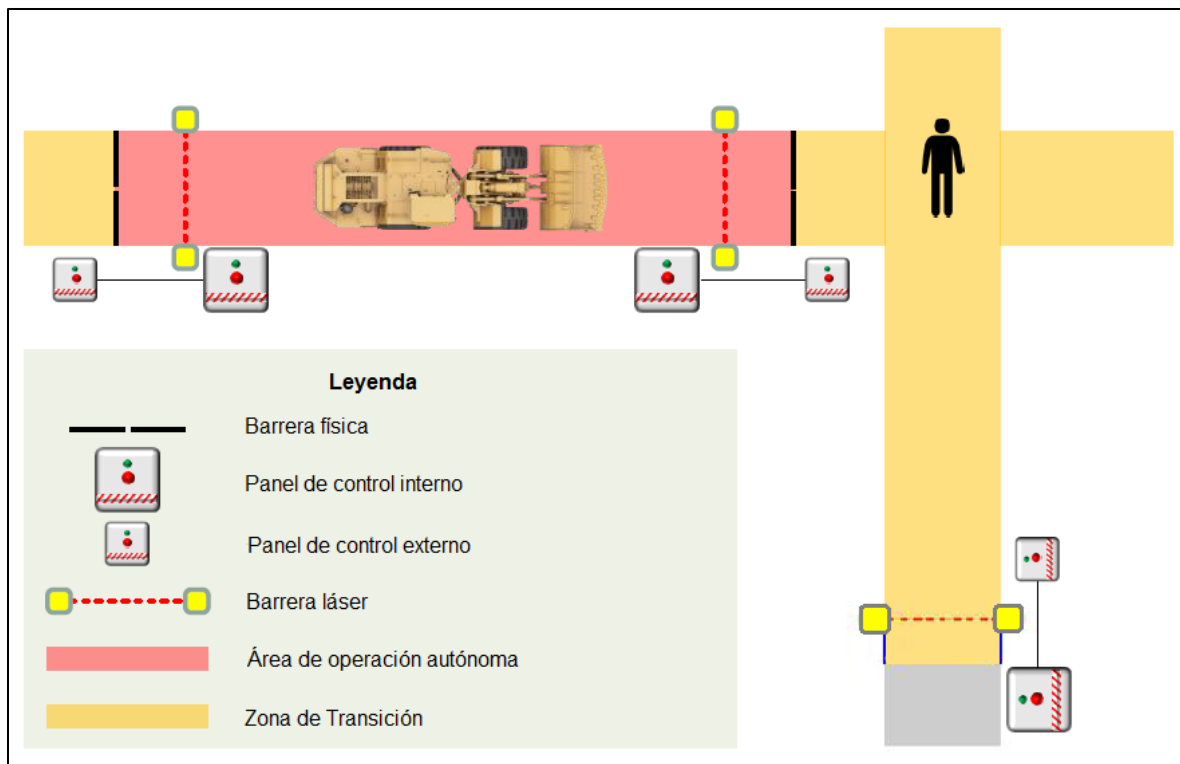


Ilustración 29. Ejemplo de Zona de Transición.

Para ingresar un equipo al área de producción, antes debe ser llevado en modo manual a la zona de transición, ya que el telecomando puede ser habilitado sólo en área de operación autónoma. Una vez ahí, el operador debe salir de la zona de transición y bloquear desde el exterior las barreras, activando la operación autónoma. En ese momento, el LHD se moverá en forma autónoma hasta la calle de producción y la zona de transición quedará despejada para el ingreso de personal. La misma operación debe ser ejecutada en forma reversa para sacar al equipo del área de producción (Caterpillar Inc., 2015).



## 4. INTERRUPCIONES DEL FLUJO DE MINERAL

### 4.1. Clasificación de Interrupciones

A menudo, el proceso de producción es interrumpido por diferentes interferencias, las cuales provocan diariamente importantes pérdidas productivas. Como ya se mencionó en secciones anteriores, las interrupciones del flujo de mineral serán los imprevistos que ocurrirán con mayor frecuencia y causarán mayores pérdidas productivas. Éstas se componen por la aparición de bolones y colgadas en los puntos de extracción.

#### 4.1.1. Bolones

Corresponden a colpas de roca de mineral de gran tamaño, originadas en los puntos de extracción. Estas colpas son separadas y agrupadas por acopio en las afueras de las zanjas de producción, por decisión de los operadores de equipos LHD (IM2 Consulting, 2006).

Esta decisión es tomada debido a que los martillos picadores, ubicados en los puntos de vaciado, no son capaces de fragmentar estas colpas en un lapso de tiempo menor al ciclo del LHD, por lo tanto, es preferible agruparlas a un lado de la zanja para que luego sean fragmentadas por una cuadrilla de reducción a través de explosivos. Si estos bolones fuesen descargados en los puntos de vaciado, entonces el martillo picador comenzaría a fragmentarlos, utilizando un tiempo considerable en esta tarea y provocando una demora en el proceso productivo, ya que el equipo LHD no puede seguir descargando mineral mientras el martillo picador está en operación.

En la Ilustración 30 se observa una cuadrilla de reducción perforando algunos bolones agrupados por acopio al lado de un punto de producción.



Ilustración 30. Cuadrilla reduciendo bolones agrupados por acopio.

### 4.1.2. Colgaduras

Una colgadura se presenta cuando se forman encadenamientos estables de fragmentos de rocas dentro de la zanja de extracción, las cuales obstaculizan el flujo de mineral, generando un atasco en la zanja (Maass, 2013).

Las colgaduras se pueden producir por bloqueos originados por el atascamiento de una colpa de gran tamaño (Ilustración 31.a), por encadenamientos naturales de rocas con sobre tamaño (Ilustración 31.b) o por compactación de material fino que genera un piso natural de apoyo para fragmentos de mayor tamaño (Ilustración 31.c).

Con la aparición de una colgadura, el punto se bloquea, impidiendo la caída de mineral, por lo que el punto se inhabilita hasta que se ejecute un proceso de descuelgue.

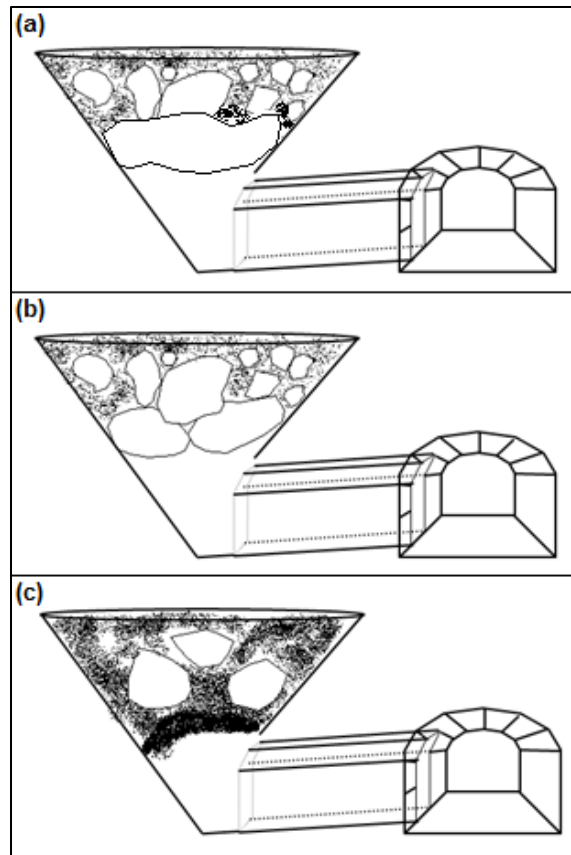


Ilustración 31. Tipos de colgadura.

Por otro lado, existe otra calificación usada por IM2<sup>15</sup> (IM2 Consulting, 2006) caracterizada por la altura en la que son formadas las colgaduras y por la granulometría de las rocas encadenadas. Esta clasificación fue realizada con

<sup>15</sup> Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia.



información proveniente de faenas subterráneas de CODELCO y las categorías son las siguientes:

- **Colgaduras a baja altura (C1):** Corresponden al tipo de colgaduras que ocurren a una altura inferior a los 5 metros respecto al piso de los puntos de extracción. Generalmente se constituyen por una o más colpas de roca de gran tamaño.
- **Colgaduras intermedias (C2-C3):** Corresponden a colgaduras que ocurren a una altura que fluctúa entre los 5 y los 12 metros respecto al piso de los puntos de extracción. Pueden producirse por el encadenamiento de dos o más colpas o fragmentos de roca de mineral de gran tamaño (4-6 metros) y otras de menor envergadura (C2) o por una única colpa de gran tamaño (C3). Se observa que este tipo de colgaduras ocurren con menor tasa de frecuencia que las colgaduras tipo C1.
- **Colgaduras en altura (C4):** Corresponden a colgaduras originadas en alturas superiores a 12 metros respecto al piso de los puntos de extracción. Generalmente se forman por una única gran colpa o fragmento de roca de mineral de grandes dimensiones (>6 metros).

Cada tipo de colgadura se clasifica según la altura en la que se origina, sin embargo, como la zanja tiene forma de embudo, existe una relación entre la altura y el tamaño del fragmento de las rocas, es decir, dependiendo de la altura, es esperable que la dimensión del fragmento este entre ciertos rangos de tamaño. Un resumen de esta clasificación es presentado en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen de clasificación de colgaduras.

Clasificación	Altura de Colgadura	Tamaño de Fragmentos
Colgadura C1	<5 metros	<6 metros
Colgadura C2-C3	Entre 5 a 12 metros	Entre 4 a 6 metros
Colgadura C4	>12 metros	>6 metros

## 4.2. Estadísticas

El indicador que usualmente se utiliza para definir la frecuencia de colgaduras y/o rocas con sobre tamaño es el Índice de Reducción Secundaria, que se define como:

$$IRS = \frac{(B + ZC)}{1000 [ton]}$$

En donde  $ZC$  corresponde a la cantidad de zanjadas de producción colgadas por cada 1000 toneladas de mineral extraído y  $B$  es la cantidad de bolones quebrados en el

punto de extracción o las interrupciones del flujo de mineral producidas fuera de las zanjas de producción cada 1000 toneladas de mineral extraído. Aunque en algunos casos, los índices de bolones y colgaduras se registran por separado.

Es importante mencionar que el Índice de Reducción Secundaria de una zona de extracción varía en el tiempo y generalmente es distinto a los índices de otras zonas de producción adyacentes. Esto sucede porque es muy poco probable que exista un amplio volumen de roca homogénea, por lo que el índice cambiará en función de la granulometría del mineral, del tipo de fragmentación, de la altura de la columna de mineral extraída y de las dimensiones de las zanjas de producción.

Finalmente, la única forma de obtener un índice preciso es por intermedio de las cuadrillas de descuelgue, quienes deben mantener un registro continuo de sus actividades y de las características de las interrupciones de mineral. Con esta información, se puede generar un índice para un punto de extracción particular o para un conjunto de puntos.

A continuación, se presentan algunos datos estadísticos de reducción secundaria publicados por *IM2 Consulting* en el año 2004 (IM2 Consulting, 2006). Los datos corresponden a Divisiones El Salvador, Andina y El Teniente de CODELCO. En todas ellas se usa el método de hundimiento por bloques, sin embargo, en las divisiones Andina y El Teniente existen algunos sectores que son explotados a través de *Panel Caving* o *Sub Level Caving*.

#### **4.2.1. Mina Inca Central Oeste, División Salvador**

La Mina Inca, ubicada en la Región de Atacama, actualmente es la única explotación subterránea en la División Salvador de CODELCO. Esta mina es explotada a través del método de *block caving* y se divide en las áreas Norte, Oeste y Central Oeste.

La frecuencia de interrupciones del flujo de mineral que se presenta en la siguiente ilustración, corresponde al periodo entre el mes de enero de 2001 a febrero del 2004 en Central Oeste. Ahí, se registraron eventos en 11 zanjas productivas, diferenciando la naturaleza de la interrupción (bolones o colgaduras), el tipo de colgadura y la altura de la columna extraída.

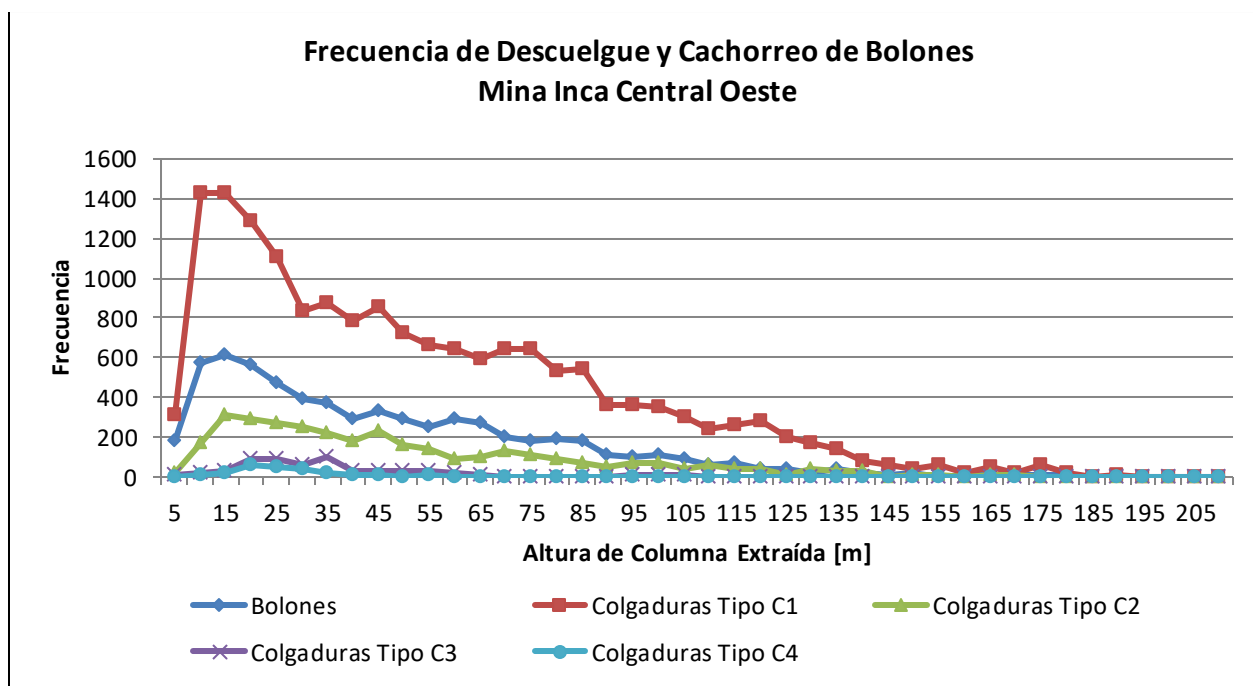


Ilustración 32. Frecuencia de descuelgue y cachorreo de bolones. Mina Inca Central Oeste.

El IRS obtenido para los puntos registrados es de 9,8 [colg./kton]. El gráfico muestra una mayor ocurrencia de colgaduras tipo C1 a lo largo de la extracción de la columna. Además, un precedente importante es que el índice de reducción secundaria tiene un *peak* a una altura aproximada de 10 metros y luego decrece a medida que aumenta el porcentaje de columna extraída.

#### 4.2.2. Mina Río Blanco, División Andina

La Mina Río Blanco se ubica en la Región de Valparaíso y actualmente es la única explotación subterránea de la División Andina. En los distintos sectores de esta mina se utilizan los métodos de *block* y *panel caving*.

Los índices de reducción secundaria en este caso fueron registrados en 5 zanjas de producción durante un periodo de 9 días en el mes de noviembre de 2004. Los datos corresponden a la cantidad de baldadas de mineral extraídas entre interrupciones del flujo de mineral, no diferenciando la naturaleza de ellas, el tipo de colgadura, ni la altura de la columna extraída.

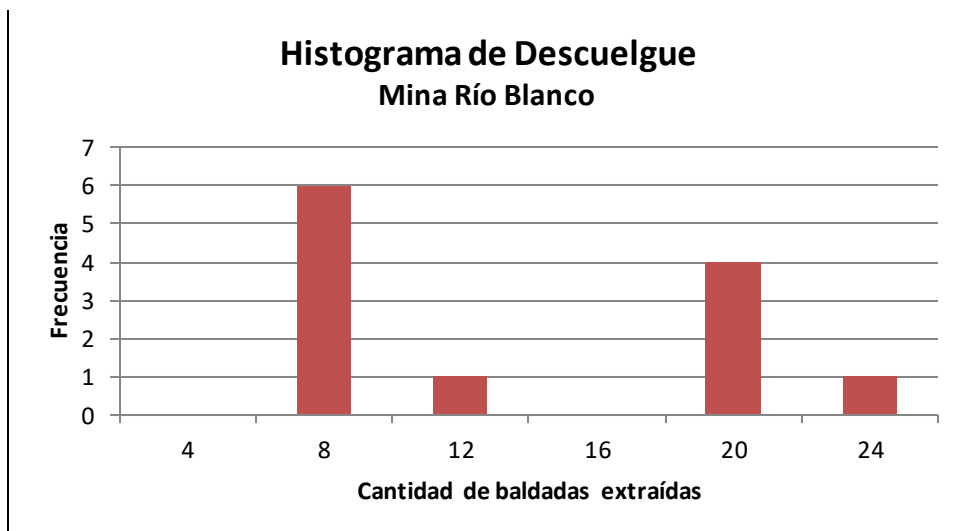


Ilustración 33. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Mina Río Blanco.

El IRS obtenido para este conjunto de puntos es de 4,18 [colg./kton], la cual corresponde principalmente a fragmentación primaria y, en menor magnitud, a fragmentación secundaria. Si se descuentan los puntos de producción con mineral secundario, el IRS asciende a 6,9 [colg./kton], lo cual pone en evidencia que los índices más altos de colgaduras estarán asociados a mineral que corresponde a fragmentación primaria. Sin embargo, esta información no es representativa debido al corto periodo de toma de datos.

#### 4.2.3. Reservas Norte, División El Teniente

La Mina El Teniente, ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se encuentra a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. El Teniente corresponde al yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta y cuenta con más de 3.000 kilómetros de galerías construidas. El yacimiento se divide en varias minas, las cuales son explotadas con diferentes métodos subterráneos, entre ellos, *block caving* y *panel caving*.

En la Mina Reservas Norte, el cálculo de los índices de interrupción de flujo de mineral fue realizado en base a la información recogida en 2 calles productivas que se componen de 8 y 15 zanjas de producción, durante un periodo de 13 días en diciembre de 2004. Los datos corresponden a la cantidad de baldadas de mineral extraídas entre interrupciones del flujo, no diferenciando la naturaleza de éstas, ni el tipo de colgadura.

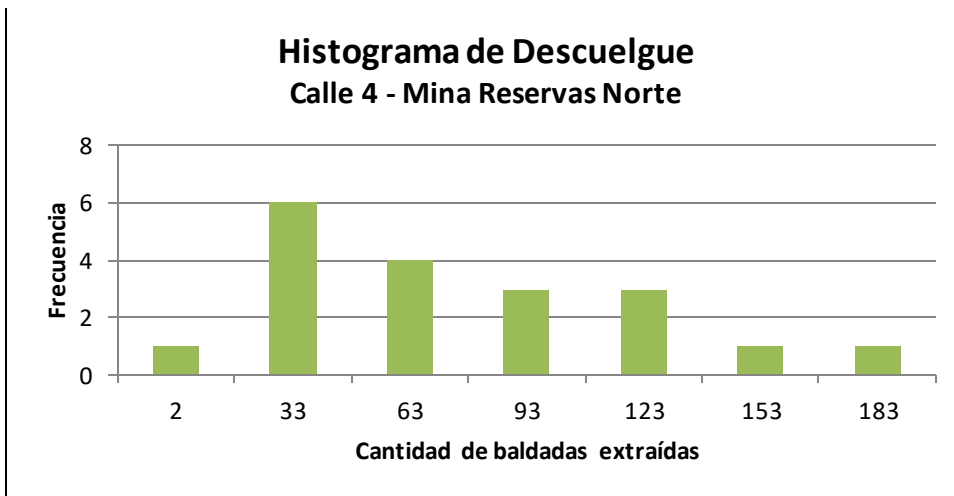


Ilustración 34. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 4 – Mina Reservas Norte.

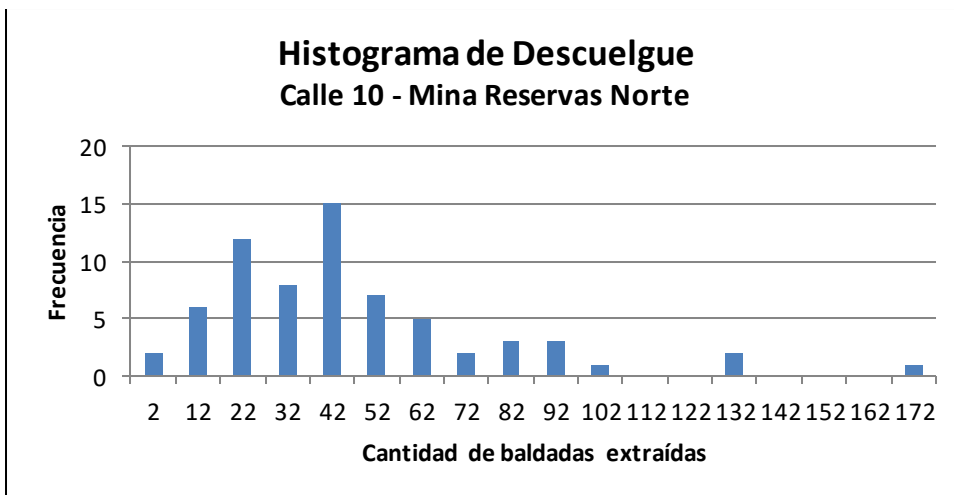


Ilustración 35. Histograma de colgaduras en función de la cantidad de baldadas extraídas. Calle 10 – Mina Reservas Norte.

La variación en la cantidad de colgaduras se debe principalmente al porcentaje de extracción de columna que presentaba cada calle al momento de la medición. En la calle 4 se estaba extrayendo mineral perteneciente a una altura relativa al 70% de la columna de mineral, mientras que en la calle 10 se extraía mineral perteneciente a una altura relativa al 30% de extracción.

Este dato sirve de precedente para demostrar que los primeros metros de la columna a extraer, que corresponden a mineral de fragmentación primaria, causan una mayor cantidad de interrupciones en el flujo de mineral, siendo la etapa que muestra una mayor necesidad o exigencia de reducción secundaria.

### 4.3. Estimaciones Chuquicamata Subterránea

En febrero de 2016, las empresas BCTEC<sup>16</sup> y REDCO<sup>17</sup> publicaron un estudio (BCTEC & REDCO, 2016) que tenía como objetivo recomendar una malla de extracción<sup>18</sup> óptima para la Mina Chuquicamata Subterránea, basada en resultados de modelos experimentales y computacionales, siendo uno de los focos principales del estudio el índice de colgaduras resultantes en diferentes escenarios.

El estudio consistió en el desarrollo de un modelo físico, a escala, de una zanja de producción con dos puntos de extracción, la cual fue rellena con rocas de granulometrías similar a la existente en Chuquicamata. En él se reprodujo el proceso productivo, usando una pala a escala y registrando las interferencias de flujo. Al mismo tiempo, se desarrollaron modelos computacionales en 3D que simulaban el flujo de mineral en las zanjas de producción. Este modelo computacional fue diseñado en el software Rebop.

Las conclusiones relevantes para este trabajo de memoria son que, considerando factores como la recuperación de reservas, dilución y rentabilidad, se recomienda la construcción de una malla con un espaciamiento de 16x15 metros con un largo de batea de 14 metros (definida como batea larga), con lo cual se obtuvo un Índice de Reducción Secundaria de 1,6 [Colg./kton]. Estas recomendaciones fueron consideradas por la Vicepresidencia de Proyectos, tomando la decisión de construir la malla recomendada.

El informe también cuenta con los histogramas de frecuencia de colgaduras medidas en los experimentos. La ilustración 36, muestra el histograma para el experimento de malla 16x15 metros, fragmentación primaria y batea larga. Sin embargo, este experimento escaló la producción de un equipo LHD con una capacidad de cucharón de 14 yd<sup>3</sup>, mientras que en el PMCHS se usarán equipos con cucharones de 9 yd<sup>3</sup>. Dado esto, los datos deberán ser modificados para ser usados en simulaciones posteriores.

---

<sup>16</sup> Empresa de ingeniería y tecnología enfocada en Block Caving. Página Web: [www.bctec.cl](http://www.bctec.cl).

<sup>17</sup> Empresa consultora enfocada en la industria minera. Página Web: [www.redcoglobal.com](http://www.redcoglobal.com)

<sup>18</sup> Disposición geométrica de los puntos por donde se extrae el mineral en el nivel de producción.

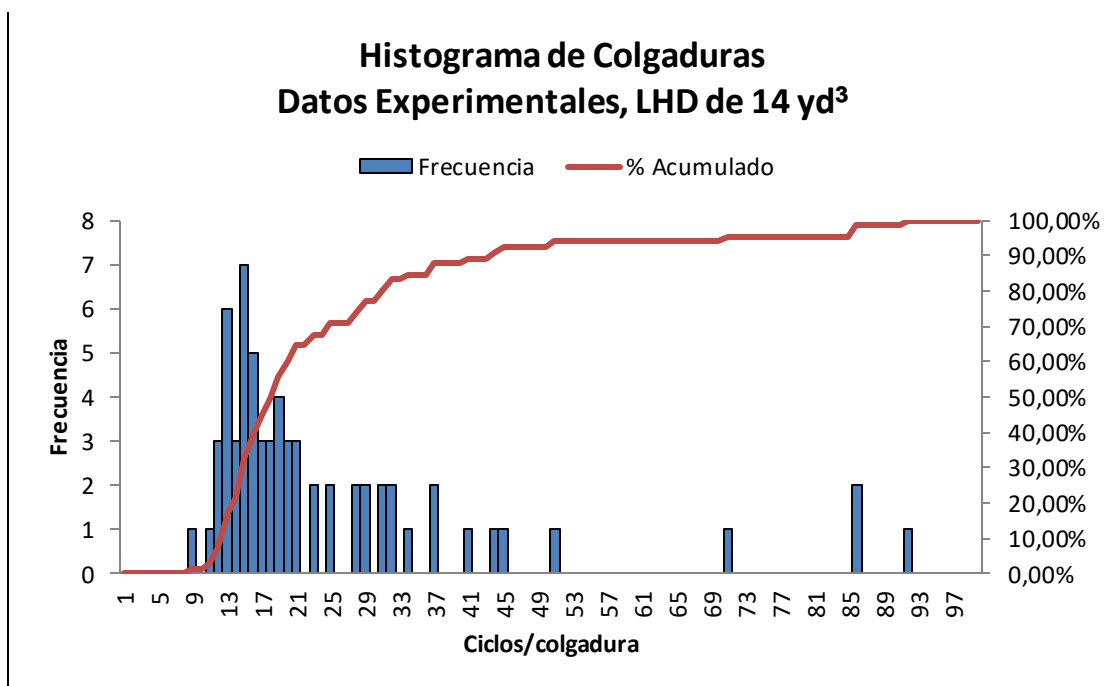


Ilustración 36. Histograma de colgadas experimento N°3, PMCHS.  
Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.

También se registró el tipo de colgadas durante la extracción, clasificándolas según su altura. Se consideran de Tipo 1 las colgadas bajas, que se producen en el punto de extracción o en la visera, y de Tipo 2 las colgadas altas, que se forman por encima de la visera. La Tabla 11 muestra el porcentaje de colgadas en relación a su altura de ocurrencia. La escala usada en el experimento fue de 1:50, por lo que 4 centímetros corresponden 2 metros sobre la visera del punto de extracción, es decir, colgadas a una altura aproximada de 6,25 metros de altura.

Tabla 11. Porcentaje medido de colgadas según su altura. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.

Clasificación	Porcentaje
Colgadura Tipo 1	39%
Colgadura Tipo 2	61%
Mayores a 4 cm.	60%
Menores a 4 cm.	40%

Finalmente, el estudio también consideró un análisis de producción, cuantificando la productividad real de la pala, suponiendo equipos LHD con capacidad de 14yd<sup>3</sup>, lo que equivale aproximadamente a 17 toneladas. La Tabla 12 muestra un resumen de los datos obtenidos en el experimento.

Tabla 12. Análisis de productividad. Experimento N°3, PMCHS. Fuente: Análisis Geometría de Bateas para el PMCHS. BCTEC y REDCO.

Experimento	Descripción	Producción Escalada [ton/extracción]	Factor de llenado [%]
N°3	Malla 16x15 m. Batea Larga Fragmentación media	13,5 ± 3,2	79,4

Como se mencionó anteriormente, estos datos sirven como base para simulaciones posteriores, sin embargo, los datos deben ser modificados considerando el uso de palas de 9 yd<sup>3</sup> en el PMCHS.



## 5. LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA REDUCCIÓN SECUNDARIA

Para realizar el levantamiento de alternativas se desarrolló una exhaustiva revisión bibliográfica de diferentes métodos de reducción secundaria, incluyendo un levantamiento de las prácticas utilizadas en las divisiones de CODELCO que cuentan con minas subterráneas (Andina, El Salvador y El Teniente). En todas ellas ha sido utilizado el método de hundimiento por bloques, sin embargo, en las divisiones Andina y El Teniente existen algunos sectores que son explotados a través de Panel Caving o Sub Level Caving, que corresponden a otros métodos de hundimiento. Además, se incluyeron nuevas tecnologías ofrecidas en el mercado, las cuales fueron recopiladas a través de búsquedas en la web y reuniones con proveedores mineros.

En el proceso de recopilación fueron encontrados 6 procedimientos de descuelgue de zanjas y 6 procedimientos de reducción de bolones, los cuales se muestran a continuación.

### 5.1. Descuelgue de zanjas de producción

#### 5.1.1. Cargas propulsadas por cañón

Esta alternativa consiste en un dispositivo que lanza cargas explosivas hasta las colgaduras, las cuales explotan al impactar la masa rocosa que bloquea la zanja de producción. El cañón cuenta con un sistema laser, que permite direccionar el lanzamiento hasta el punto deseado y tiene un alcance aproximado de 100 metros (Maass, 2013).



Ilustración 37. Procedimiento de descuelgue con cargas propulsadas por cañón.

El procedimiento de descuelgue consiste en localizar visualmente el punto colgado, para luego posicionar el cañón en la base del punto de extracción. Se ubica el

dispositivo en posición de lanzamiento y se apoya con alguna roca o mediante un trípode. Se apunta, a través del láser, el lugar que se desea impactar, luego se desmonta el láser y se inserta el proyectil. Finalmente, se despeja el área en un radio aproximado de 30 metros y se inicia el lanzamiento de la carga explosiva.

Esta tecnología fue probada en División Andina de CODELCO, particularmente en colgaduras de gran altura, sin embargo, no se obtuvieron buenos resultados, por lo que se dejó de usar.

Por otro lado, la empresa australiana RockTek ofrece el equipo QuikDraw, el cual pesa aproximadamente 2,2 kg. y posee un sistema de disparo eléctrico. Con estas características, se hace innecesario el uso de equipos pesados o la entrada de personal en zonas peligrosas. Este sistema utiliza un APD cilíndrico como carga explosiva.



Ilustración 38. Sistema QuikDraw, empresa RockTek Co.

A continuación, se presenta una tabla resumen con las principales características del dispositivo.

Tabla 13. Cargas propulsadas con cañón – Principales Características.

Alternativa:	Cargas propulsadas por cañón.
Método de Descuelgue:	Lanzamiento de cargas explosivas.
Efectividad:	A pesar de tener un alto rango de alcance, existe una gran imprecisión en el lanzamiento de las cargas.
Riesgos:	El equipo permite una operación mecanizada desde una distancia segura para el personal, sin embargo, el dispositivo queda expuesto tras la normalización del flujo de mineral.
Características del Equipo:	Dispositivo liviano, fácil de transportar.
Costo de Adquisición:	Bajo. Inferior a US\$5.000.
Otras características:	Su operación requiere sólo de un operador.

### 5.1.2. Cañón de Agua

Un cañón de agua es un dispositivo capaz de remover las colgaduras originadas por finos compactados<sup>19</sup> lanzando agua a alta presión. El chorro de agua desestabiliza los encadenamientos de colpas logrando normalizar el flujo de material. En la Ilustración 39, se presenta el cañón de agua de la empresa MacLean, el cual cuenta con un estanque de 11.000 litros y posee una bomba que dispara aproximadamente 2.800 litros por minuto (MacLean Engineering, 2015).



Ilustración 39. Cañón de agua modelo WC3 de la empresa MacLean.

El procedimiento de descuelgue consiste en el posicionamiento del camión bajo el punto de extracción, el cual es operado en forma remota. Una vez ubicado el vehículo, el brazo retráctil puede ser extendido para acercarse más a la colgadura. Luego, se procede a lanzar agua a alta presión a través del brazo hasta que el flujo de mineral comienza a caer. Una vez normalizado el flujo, el camión es retirado del lugar.

A pesar de que el descuelgue de zanjas con agua a alta presión resulta ser un proceso que demora aproximadamente 5 minutos por punto de extracción, sólo el 40% de las colgaduras son eliminadas durante este proceso, mientras que las colgaduras originadas por rocas de gran tamaño deben ser removidas con algún método que use explosivos.

Esta tecnología es usada actualmente en minas subterráneas de Australia y Canadá, en donde se extrae oro y uranio, como la minas Musselwhite de Goldcorp, McArthur River de Cameco y Telfer de Newcrest.

---

<sup>19</sup> Mineral fino o de granulometría menor que, en presencia de humedad, forma una capa de material resistente.

A continuación, se presenta una tabla con las principales características de esta alternativa.

Tabla 14. Cañón de agua – Principales características.

Alternativa:	Cañón de agua.
Método de Descuelgue:	Lanzamiento de agua a alta presión.
Efectividad:	Este procedimiento es altamente efectivo cuando las colgaduras son originadas por compactación de finos. El equipo es capaz de eliminar el 40% de las colgaduras según especificaciones del mismo fabricante
Riesgos:	El equipo permite una operación mecanizada y a una distancia segura para el personal, sin embargo, el brazo del equipo queda expuesto al normalizarse el flujo de mineral.
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones. Posee un estanque con capacidad para 11.000 litros de agua.
Costo de Adquisición:	Medio. El equipo tiene un precio cercano a los US\$500 mil.
Otras características:	La operación del equipo requiere de altos volúmenes de agua, además de tiempos de llenado de estanque, lo cual podría hacer no factible su aplicación en Chuquicamata Subterránea.

### 5.1.3. Descolgador Telescópico

En 2012, CODELCO desarrolló el prototipo de un robot de descuelgue, el cual fue probado en la División Andina. La tecnología consistió en un equipo teleoperado, capaz de escanear galerías y zanjas de producción y ejecutar el descuelgue, acompañado de un equipo de comunicaciones, el cual instala antenas a lo largo de las galerías para expandir la red wifi y permitir la operación remota. Para llevar a cabo el proceso de descuelgue, se debe contar con dos operadores, cada uno controlando un robot (Cerde, Sanchez, & Abarca, 2012). En la Ilustración 40 se puede observar el equipo descolgador (derecha) y el equipo de comunicaciones (izquierda).



Ilustración 40. Descolgador Telescópico prototipado por CODELCO.



Como se presenta en la Ilustración 41, el Descolgador Telescópico procede a ingresar a la galería de extracción, mientras que el robot de comunicaciones instala las antenas para establecer una red wifi. Una vez alojado dentro de la zanja, el robot hace una topografía del lugar, la cual es enviada y cargada en los computadores del centro de operaciones. Con ello, los operadores tienen una visión confiable del estado de la colgadura, ya que cuentan con una gráfica 3D de la zanja. Finalmente, se procede a instalar el explosivo que es posicionado con el brazo articulado del robot. Esta carga explosiva debe tener un dispositivo de anclaje para adherirse a la roca, pues el robot no cuenta con perforadora.

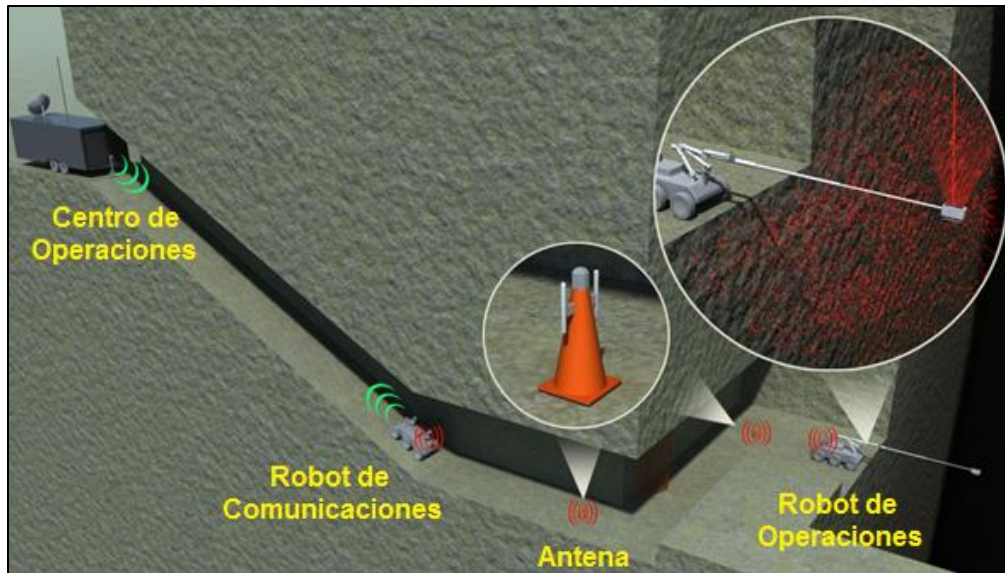


Ilustración 41. Procedimiento de descuelgue del Descolgador Telescópico.

Orica Chile<sup>20</sup> desarrolló hace algunos años un explosivo del tipo emulsión de características autoadhesivas, a partir de la cual se fabricaron conos de emulsión que fueron probados con éxito en fábrica. Posterior a ello, se realizaron pruebas en laboratorio y en terreno obteniendo buenos resultados.

En cuanto a su fuente de energía, ambos robots funcionan con 4 baterías industriales, que entregan una autonomía de 12 horas de operación.

A continuación, se presenta un cuadro con las principales características de esta alternativa.

<sup>20</sup> Empresa de productos y servicios mineros. Página web: [www.oricaminingsservices.com/cl/es](http://www.oricaminingsservices.com/cl/es)

Tabla 15. Descolgador Telescópico – Principales características.

Alternativa:	Descolgador Telescópico.
Método de Descuelgue:	Colocación de cargas explosivas autoadhesivas y tronadura.
Efectividad:	Equipo confiable y efectivo, pues utiliza un dispositivo de escaneo para visualizar las colgaduras. Además, es capaz de alcanzar colgaduras de hasta 10 metros de altura.
Riesgos:	El equipo es altamente seguro, pues permite una operación mecanizada y a una distancia segura para el personal, además el equipo no se expone a desprendimientos sorpresivos, ya que el equipo no perfora las rocas, disminuyendo los riesgos de operación.
Características del Equipo:	Dos equipos eléctricos, que utilizan 4 baterías industriales cada uno. El prototipo incluye una estación de operación.
Costo de Adquisición:	Alto. La inversión para la fabricación de los equipos fue superior a los US\$900 mil.
Otras características:	La carga explosiva requiere de un sistema para adherirse a la roca. Para este prototipo se desarrolló una emulsión adhesiva, la cual obtuvo buenos resultados.

#### 5.1.4. Descuelgue Manual

El descuelgue manual es el procedimiento más usado por las divisiones de minería subterránea de CODELCO. Este método forma parte de la propuesta hecha en etapa de prefactibilidad para facilitar el flujo de mineral en el PMCHS. El procedimiento consiste en la colocación de cargas explosivas en puntos estratégicamente elegidos por los operadores. Para ello se utilizan palos de coligüe o columnas de coligües amarrados entre sí, uno tras otro, dependiendo de la altura a la cual se encuentra la colgadura. En el extremo superior de la columna se acopla el explosivo (generalmente explosivos APD Cónicos), el cual es posicionado en la roca colgada, mientras que el extremo inferior de la columna es colocado contra una de las paredes de la galería para asegurar que el explosivo quede fijo en el punto a detonar (IM2 Consulting, 2006). En la Ilustración 42, se observa el posicionamiento de la carga explosiva a través de una columna de coligües.



Ilustración 42. Procedimiento de descuelgue manual.

El uso de explosivos obliga el aislamiento de la zona hasta una distancia segura, la cual es despejada hasta que el punto se ventile. Por otro lado, la efectividad de este procedimiento es menor, pues generalmente el objetivo no se logra al primer intento, debiendo repetir la maniobra hasta que la colpa sea fragmentada.

Claramente, la operación de descuelgue expone al personal a una situación de alto riesgo, ya que la persona encargada debe analizar visualmente la colgadura y colocar el explosivo, debiendo acercarse a la boca del punto de extracción, quedando vulnerable al colapso sorpresivo del flujo de mineral.

A continuación, se presentan las principales características de este procedimiento.

Tabla 16. Procedimiento manual de descuelgue – Principales características.

Alternativa:	Descuelgue manual.
Método de Descuelgue:	Colocación de cargas explosivas a presión y tronadura.
Efectividad:	Dado el riesgo y dificultad para visualizar las colgaduras, muchas veces se hace necesario repetir la operación en el punto colgado. Algunas estadísticas muestran que en un 30% de los casos, el descuelgue no se logra en el primer intento (Maass, 2013).
Riesgos:	El procedimiento tiene un alto riesgo para el personal, pues el operador debe ingresar al punto de extracción, exponiéndose al aplastamiento por el colapso sorpresivo del pique.
Características del Equipo:	No aplica.
Costo de Adquisición:	No aplica.
Otras características:	Se ha observado que, dada la dificultad para posicionar el explosivo en altura, el manipulador aumenta la carga para disminuir la probabilidad de fracaso en el proceso de descuelgue. Esto aumenta la probabilidad de generar daños a la infraestructura cercana (Maass, 2013).

### 5.1.5. Descuelgue Manual con Bolsa Expansiva

Una variante del procedimiento de descuelgue manual es el uso de cañerías o tubos plásticos en lugar de coligües, con una bolsa expansiva en el extremo superior. La técnica consiste en colocar dentro de una bolsa plástica un cartucho de dinamita amarrado al cordón detonante. La carga explosiva es posicionada, en forma manual, lo más cerca posible de la colgadura, para luego rellenar la bolsa con ANFO<sup>21</sup>, el cual es inyectado a través del tubo por medio de un inyector de aire.

Otra alternativa es introducir la bolsa con el cartucho y el cordón detonante dentro de una cavidad del encadenamiento de colpas y una vez en esa posición,

<sup>21</sup> Mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, desde gasolina a aceites de motor.

rellenarla con ANFO o emulsión. Con el aumento de volumen, la bolsa queda atrapada en la cavidad.

A continuación, se presenta un resumen de las principales características de esta alternativa.

Tabla 17. Procedimiento manual de descuelgue con bolsa expansiva – Principales características.

Alternativa:	Descuelgue manual con bolsa expansiva.
Método de Descuelgue:	Colocación de cargas explosivas a presión y tronadura.
Efectividad:	El procedimiento es efectivo cuando la configuración de la colgadura permite posicionar la carga explosiva en los espacios formados entre rocas (Maass, 2013).
Riesgos:	El procedimiento tiene un alto riesgo para el personal, pues el operador debe ingresar al punto de extracción, exponiéndose al aplastamiento por el colapso sorpresivo del pique.
Características del Equipo:	No aplica.
Costo de Adquisición:	Bajo. El costo de un compresor de aire no supera los US\$1.000.
Otras características:	La operación requiere del mantenimiento de una red de aire comprimido o la utilización de un compresor de aire (Maass, 2013).

### 5.1.6. Jumbo de Descuelgue

Estos equipos están diseñados para eliminar bloqueos en altura de forma segura, ya que cuentan con un brazo capaz de perforar e instalar explosivos en las colpas. En la etapa de prefactibilidad, se considera el uso de Jumbos de Reducción Secundaria los cuales permiten perforar colpas en colgaduras a baja altura, sin embargo, en el último año, empresas como MacLean<sup>22</sup> y RDH<sup>23</sup> han desarrollado equipos capaces de alcanzar bloqueos de hasta 12,8 metros de altura. Los mismos equipos cuentan con sistemas de radio control remoto y video, lo que permite un procedimiento totalmente seguro para los operadores (MacLean Engineering, 2015; RDH, 2015).



Ilustración 43. Jumbos de Descuelgue. Equipo SB9, empresa MacLean (Izquierda) y equipo BH40D, empresa RDH (Derecha).

<sup>22</sup> Empresa canadiense productora de equipos mineros. Página web: [www.macleaneengineering.com](http://www.macleaneengineering.com)

<sup>23</sup> Empresa canadiense productora de equipos mineros. Página web: [www.rdhminingequipment.com](http://www.rdhminingequipment.com)



En la Ilustración 44, se muestra cómo opera el equipo SB9 en un proceso de descuelgue. El operador puede controlar el equipo en forma remota. El proceso comienza con el ingreso del equipo al punto de extracción, luego se posiciona el brazo en el punto de la colgadura, se perfora la roca y finalmente se instala el explosivo. Luego el equipo es retirado del lugar para efectuar la tronadura.



Ilustración 44. Procedimiento de descuelgue con Jumbo de Descuelgue.

El equipo SB9 posee un sistema que mezcla la emulsión explosiva al momento de instalar la carga, lo que hace más seguro el traslado del equipo, pues no se moviliza con explosivos prefabricados.

En la Ilustración 45, se observa que el brazo perforador tiene un radio de giro de 360° grados, lo que hace más fácil el posicionamiento del explosivo en el bloqueo.



Ilustración 45. Radio de giro del brazo perforador.

Los equipos BH2 y BH3 de MacLean, similares al SB9, pero de menor alcance, son utilizados en minas de cobre, oro y otros minerales en Australia, Canadá y Sudáfrica. Actualmente la empresa cuenta con más de 100 unidades en funcionamiento alrededor del mundo.

A continuación, se presenta un análisis de las principales características de esta alternativa.

Tabla 18. Jumbo Descolgador – Principales características.

Alternativa:	Jumbo Descolgador.
Método de Descuelgue:	Perforación y tronadura.
Efectividad:	El equipo es comúnmente utilizado en minería subterránea y es capaz de alcanzar alturas de hasta 12 metros dentro de la zanja.
Riesgos:	El equipo permite una operación mecanizada y a una distancia segura para el personal, sin embargo, el equipo queda expuesto al colapso del pique mientras precede a perforar las rocas.
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones. Posee un brazo muy versátil para la perforación y colocación de cargas explosivas.
Costo de Adquisición:	Alto. Su precio es cercano a US\$1 millón.
Otras características:	Este equipo es compatible con el proceso de cachorro o reducción de bolones en el piso.

### 5.1.7. Resumen de Alternativas para el Descuelgue de Zanjas

A continuación, se presenta una tabla resumen que contiene las principales características las alternativas de descuelgue de zanjas.

Tabla 19. Resumen de alternativas de descuelgue de zanjas.

Alternativa	Método de Descuelgue	Efectividad	Uso de Agua	Uso de Explosivos	Riesgo	Costo de Adquisición	Motor
Cargas propulsadas por cañón	Lanzamiento de cargas explosivas	Baja	No	Si	Alto	Bajo	-
Cañón de agua	Lanzamiento de agua a alta presión	Media	Alto	No	Bajo	Medio	Diésel
Descolgador telescópio	Colocación de cargas explosivas autoadhesivas y tronadura	Alta	No	Si	Bajo	Alto	Eléctrico
Descuelgue manual	Colocación de cargas explosivas a presión y tronadura	Media	No	Si	Medio	-	-
Descuelgue manual c/ bols a expansiva	Colocación de cargas explosivas a presión y tronadura	Media	No	Si	Medio	-	-
Jumbo de descuelgue	Perforación y tronadura	Alta	Bajo	Si	Bajo	Alto	Diésel

## 5.2. Reducción de bolones en puntos de extracción

### 5.2.1. Dumbo Cachorrero

El Dumbo Cachorrero es un equipo que fue probado en División El Salvador durante el año 2000, el cual permite realizar perforaciones de pequeño diámetro (entre 2,5 a 6 cms.), ideales para introducir las cargas explosivas en el cachorreo de bolones<sup>24</sup>. Este equipo fue construido sobre un cargador Case 90XT de pequeñas dimensiones (2,03 metros de alto por 2,68 metros de largo) lo cual permite un mejor movimiento dentro de las calles de producción (IM2 Consulting, 2006).



Ilustración 46. Dumbo Cachorrero en producción.

De acuerdo a las pruebas del equipo en terreno, el equipo alcanzó una productividad de 16,3 [bolones/hora], con lo cual se estima que puede tener una productividad un 18% mayor a los equipos Jumbo generalmente utilizados en las minas subterráneas de CODELCO. A continuación, se muestra una tabla con las principales características de esta propuesta.

Tabla 20. Dumbo Cachorrero – Principales características.

Alternativa:	Dumbo cachorrero.
Método de Fragmentación:	Perforación y tronadura.
Efectividad:	El procedimiento es similar al uso de un equipo Jumbo, el cual es altamente utilizado en la industria y muy efectivo. Además, permite la perforación de agujeros con diámetros menores en comparación a un equipo Jumbo, ideal para el uso de explosivos APD cilíndricos.
Riesgos:	Bajo. El procedimiento permite una tronadura a una distancia segura para el personal.
Características del Equipo:	Equipo diésel de pequeñas dimensiones, con gran capacidad de giro.
Costo de Adquisición:	Bajo. El costo de un equipo Case 90XT usado es cercano a los US\$20 mil.
Otras características:	El equipo original no está diseñado para este trabajo, por lo que existen ciertas deficiencias en la visibilidad al perforar. Esto podría mejorar con la instalación de una cámara fuera del equipo y un monitor al interior de la cabina.

<sup>24</sup> Término acuñado a la reducción de rocas en las galerías o puntos de extracción.

## 5.2.2. Equipo Hidrofracturador

Un equipo hidrofracturador también fue probado en División El Teniente durante el año 2000. Este equipo móvil posee un brazo compuesto por una perforadora percutora electrohidráulica y un generador de pulsos (IM2 Consulting, 2006).



Ilustración 47. Jumbo Hidrofracturador.

Como se observa en la Ilustración 48, el proceso de reducción consiste en perforar el bolón, introducir un cartucho rompedor en la perforación, posicionar el generador de pulsos<sup>25</sup> en el collar de la perforación y finalmente, en forma simultánea, lanzar un golpe de agua a alta presión e iniciar el cartucho rompedor<sup>26</sup>. Con esto, la roca es fragmentada por el efecto de la presión del agua.

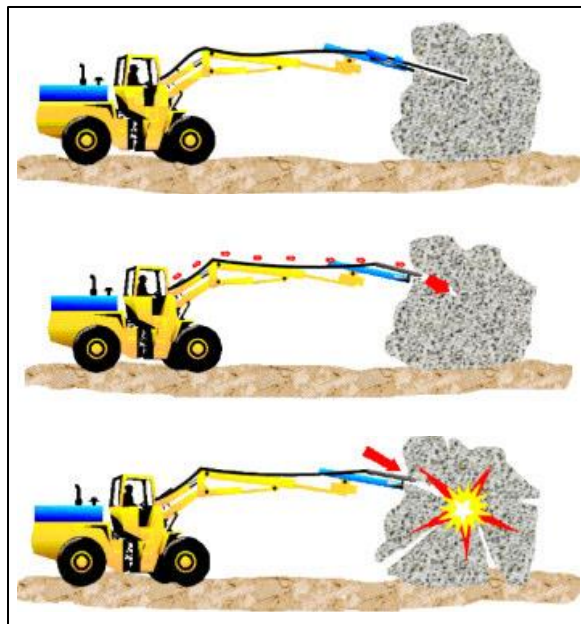


Ilustración 48. Procedimiento de reducción del Jumbo Hidrofracturador.

A continuación, se presentan las principales características del equipo hidrofracturador.

<sup>25</sup> Sistema que genera pulsos eléctricos para iniciar el cartucho rompedor.

<sup>26</sup> Explosivo de baja potencia que sirve para fracturar el bolón.

Tabla 21. Jumbo Hidrofracturador – Principales características.

Alternativa:	Jumbo hidrofracturador.
Método de Fragmentación:	Perforación e hidrofracturamiento.
Efectividad:	Según las pruebas realizadas en División El Teniente, el equipo muestra una menor productividad en comparación al Jumbo Cachorrero (IM2 Consulting, 2006).
Riesgos:	Medio. El hidrofracturamiento implica la proyección de rocas en el área de operación, aunque ésta ocurre dentro de un área de seguridad de 10 metros (IM2 Consulting, 2006).
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones.
Costo de Adquisición:	Medio. Valor cercano a los US\$500 mil.
Otras características:	A pesar de utilizar un cartucho rompedor, éste sólo cumple la función de trizar la roca, por lo que no es necesario el aislamiento de calles aledañas, minimizando las interferencias del proceso productivo.

### 5.2.3. Jumbo Cachorrero

Un Jumbo Cachorrero consiste en un equipo que posee un brazo compuesto por un dispositivo de perforación y, dependiendo del modelo, es capaz de introducir un explosivo en el agujero perforado. Este equipo forma parte de la propuesta hecha en la etapa de prefactibilidad para solucionar las interferencias de flujo de mineral en el PMCHS (Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, CODELCO, 2009).

En general, son equipos de grandes dimensiones. Por ejemplo, el equipo Sandvik DD310 tiene un chasis de 6,35 metros de largo, lo cual no le permite operar en ambos lados de una calle de producción, pues necesita mayor espacio para movilizarse. Estos equipos tienen un gran rango de alcance y un brazo versátil, siendo capaces de barrenar cualquier bolón ubicado a las afueras del punto de extracción.



Ilustración 49. Jumbo Cachorrero Sandvik DD310.



En la actualidad, se ofrecen Jumbos Cachorreros más pequeños, los cuales pueden ser operadores sólo por control remoto y no cuentan con cabina para el operador. Estos equipos tienen un chasis de aproximadamente 4 metros de largo.

A continuación, se muestran las principales características del equipo Jumbo Cachorrero.

Tabla 22. Jumbo Cachorrero – Características principales.

Alternativa:	Jumbo cachorrero.
Método de Fragmentación:	Perforación y tronadura.
Efectividad:	Equipos altamente efectivos y utilizados en la industria minera.
Riesgos:	Bajo. Permite la perforación segura para luego tronar desde una distancia segura.
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones.
Costo de Adquisición:	Medio. Valor cercano a los US\$500 mil.
Otras características:	El equipo es compatible con el descuelgue de zanjas cuando las colgaduras son de menor altura.

#### 5.2.4. Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica

Este equipo también fue probado en División El Teniente, a través de un prototipo compuesto por un brazo que posee una perforadora percutora electrohidráulica y un dispositivo de cuña expansiva que produce la ruptura. La fragmentación mediante cuñas expansivas consiste en aplicar presión al interior de una perforación con el objetivo de alcanzar la ruptura de la roca (IM2 Consulting, 2006).

En la imagen se observa cómo opera un equipo dozer con un dispositivo de cuña hidráulica en una faena de demolición.



Ilustración 50. Equipo dozer con dispositivo de cuña hidráulica.

El procedimiento de operación comienza con la perforación de la colpa, para introducir dos piezas de acero de forma semicircular de 45 centímetros de longitud.

Luego, a través de un sistema hidráulico se empuja una cuña central que ejerce presión y expande las piezas de acero, lo cual provoca finalmente la fractura del bolón.

A continuación, se muestra un cuadro con las principales características de esta alternativa.

Tabla 23. Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica – Principales características.

Alternativa:	Jumbo fracturador con cuña hidráulica.
Método de Fragmentación:	Perforación y fragmentación a presión.
Efectividad:	Baja. De acuerdo a las pruebas realizadas en División El Teniente, fue necesario realizar en promedio 1,6 [reducciones/colpa] para aproximarse a la granulometría requerida.
Riesgos:	Bajo. El equipo permite una operación mecanizada y segura para el personal.
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones.
Costo de Adquisición:	Medio. Valor cercano a los US\$500 mil.
Otras características:	Este procedimiento de fractura es ampliamente usado en faenas de demolición.

### 5.2.5. Martillo Móvil

El Martillo Móvil es un equipo que se compone por un brazo con un dispositivo de impacto especialmente diseñado para romper rocas en el suelo (MacLean Engineering, 2015). Algunas empresas que ofrecen este tipo de equipos son BTI, MacLean y Rammer (Sandvik).



Ilustración 51. Martillo Móvil RB3 de la empresa MacLean.

Su principal ventaja es la capacidad de fragmentar rocas sin utilizar explosivos, lo que disminuye el tiempo de operación, ya que no es necesaria la evacuación y ventilación de la zona de operación. El procedimiento de fragmentación comienza con el posicionamiento del equipo sobre la roca a reducir, para luego comenzar a

fragmentar por impacto a través de un martillo. Este proceso puede tener una duración de 3 o 4 minutos.

A continuación, se detallan las principales características de esta alternativa.

Tabla 24. Martillo Móvil – Principales características.

Alternativa:	Martillo móvil.
Método de Fragmentación:	Fragmentación por impacto.
Efectividad:	Alta. El equipo muestra gran efectividad en la fragmentación y tiempos eficientes de proceso.
Riesgos:	El equipo permite una fragmentación mecanizada. Además, el operador puede controlar el equipo desde una distancia segura a través de control remoto, sin exponerse a riesgos.
Características del Equipo:	Equipo diésel de grandes dimensiones.
Costo de Adquisición:	Medio. Valor cercano a los US\$500 mil.
Otras características:	Dada la naturaleza del equipo, es posible que requiera mayores costos de mantenimiento por el desgaste de las componentes del brazo.

### 5.2.6. Parche Explosivo

Este procedimiento simple consiste en adherir un explosivo en la parte más delgada de la roca, taparlo con barro u otro material y hacerla detonar. En la imagen se muestra una ilustración de este procedimiento.

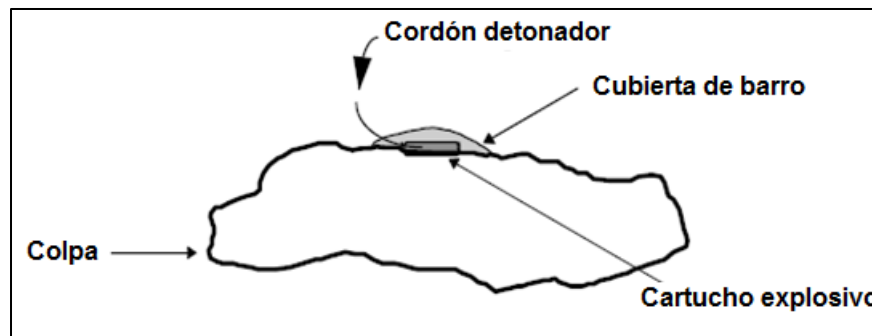


Ilustración 52. Reducción secundaria con parche explosivo.

La principal ventaja de este procedimiento es que no se requiere hacer uso de ningún equipo móvil, ya que no es necesaria la perforación de las colpas, sin embargo, puede no ser efectivo en rocas de mayor dureza o aquellas que sean de mayor magnitud.



Tabla 25. Procedimiento de reducción con parche explosivo – Principales características.

Alternativa:	Reducción con parche explosivo.
Método de Fragmentación:	Colocación de carga explosiva y tronadura.
Efectividad:	Baja efectividad. Este procedimiento posee un bajo rango de aplicación, ya que depende de la geometría de las colpas y de la calidad del material.
Riesgos:	Medio. El procedimiento no es riesgoso si se siguen los estándares de seguridad necesarios, sin embargo, los operadores deben manipular explosivos.
Características del Equipo:	No aplica.
Costo de Adquisición:	No aplica.
Otras características:	Es uno de los procedimientos de menor costo debido a que no requiere de la utilización de equipos mecanizados.

### 5.2.7. Resumen de Alternativas para la Reducción de Bolones

A continuación, se presenta una tabla resumen que contiene las principales características las alternativas de reducción de bolones.

Tabla 26. Resumen de alternativas de reducción de bolones.

Alternativa	Método de Reducción	Efectividad	Uso de Agua	Uso de Explosivos	Riesgo	Costo de Adquisición del Equipo	Motor
Dumbo cachorrero	Perforación y tronadura	Alta	Bajo	Si	Bajo	Bajo	Diésel
Equipo hidrofracturador	Perforación e hidrofracturamiento	Media	Medio	No	Medio	Medio	Diésel
Jumbo cachorrero	Perforación y tronadura	Alta	Bajo	Si	Bajo	Medio	Diésel
Jumbo fracturador c/ cuña hidráulica	Perforación y fragmentación a presión	Media	Bajo	No	Bajo	Medio	Diésel
Martillo móvil	Fragmentación por impacto	Alta	No	No	Bajo	Medio	Diésel
Parche explosivo	Colocación de carga explosiva y tronadura	Media	No	Si	Medio	-	-

## 6. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

### 6.1. Metodología de Selección

Como se dijo en la sección 2.1.4., para este caso de comparación se utilizará un modelo de puntuación o *scoring*, con ponderadores calculados a través de una matriz de comparación de pares. Las etapas del método son las siguientes:

1. Identificar las alternativas.
2. Definir los criterios a emplear en la toma de decisión.
3. Asignar una ponderación para cada uno de los criterios.
4. Evaluar las alternativas en relación a los criterios definidos.
5. Calcular la puntuación para cada una de las alternativas.
6. Ordenar las alternativas en función de su puntuación y seleccionar las mejores opciones.

La puntuación de cada alternativa se calculará de la siguiente forma:

$$S_i = \frac{\sum_{j,k} p_j e_{ijk}}{|K|}$$

Donde:  $S_i$  es la puntuación de la alternativa  $i$ .  
 $p_j$  es la ponderación del criterio  $j$ .  
 $e_{ijk}$  es la evaluación de la alternativa  $i$  asignada por el evaluador  $k$  en función del criterio  $j$ .  
 $K$  es el conjunto de evaluadores.

El ponderador  $p_j$  se asigna realizando una evaluación de los criterios de selección. Para ello, se compara la importancia que tiene cada criterio para el proceso en cuestión, respecto de los otros criterios. Esto se realiza en una matriz de comparación de pares sencilla, como la que se muestra en la Ilustración 53. Esta matriz se completa con 1 cuando el criterio columna tiene mayor relevancia que el criterio fila, o 0 en caso contrario. Luego, se obtiene la suma de cada fila y se divide por el total de puntos asignados en la matriz, con lo que se obtienen ponderadores  $p_j \in [0,1]$ .

	Criterio i	Criterio j	Criterio k
Criterio i			
Criterio j			
Criterio k			

Ilustración 53. Matriz de comparación de pares.

Finalmente, el proceso de evaluación de las alternativas será desarrollado por expertos en el tema, los cuales evaluarán las alternativas en relación a cada criterio en una escala de 1 a 10.

## 6.2. Criterios de Decisión

Tanto los criterios definidos para la toma de decisiones como sus ponderadores, fueron determinados por el memorista con ayuda de Nicolás Miranda, Ingeniero y Asistente de la Gerencia Estratégica del PMCHS, CODELCO. A continuación, se presentan los criterios definidos.

- Seguridad del personal: Se refiere al nivel de seguridad que ofrece la alternativa para los operadores, considerando el riesgo al que se ve expuesto el personal al realizar la operación. Se debe tomar en cuenta el traslado, la manipulación y la operación de la tecnología. Una mayor puntuación, significa un mayor nivel de seguridad para el personal.
- Seguridad del sistema: Se refiere al nivel de seguridad que ofrece la alternativa para el sistema, considerando el daño que puede generar la maquinaria sobre sí misma o sobre otros equipos e infraestructura. Una mayor puntuación, significa un mayor nivel de seguridad para el sistema.
- Uso de tecnologías de apoyo: Considera el grado de autonomía de la tecnología para lograr solucionar la colgadura o reducir el bolón, referidos a los requerimientos de insumos y otras componentes. Una mayor puntuación, significa un menor uso de tecnologías de apoyo.
- Eficiencia: Rapidez en provocar el descuelgue o reducción. Dependiendo de la tecnología, se puede considerar tiempo de aplicación, cantidad de explosivo, número de intentos, etc. Una mayor puntuación, significa que la alternativa tiene mayor eficiencia.
- Costos: Se refiere a los costos operacionales estimados o relativos de la tecnología. Una mayor puntuación significa un menor nivel de costos.
- Automatización: Compatibilidad con tecnologías automatizadas. Una mayor puntuación significa mayor compatibilidad con tecnologías automatizadas.
- Nivel de desarrollo: Se refiere al avance tecnológico y de validación presente a nivel industrial. Una mayor puntuación significa mayor nivel de desarrollo.
- Simplicidad de operación: Considera la complejidad de operación, como, por ejemplo, la cantidad de pasos que debe seguir el operador antes de lograr el descuelgue o reducción. Una mayor puntuación significa mayor simplicidad de operación.
- Interferencia con el resto de las operaciones: Referido al tiempo que el sistema de producción queda detenido y al área que debe resguardarse para su implementación. Una mayor puntuación, significa que la alternativa genera un menor grado de interferencias.
- Compatibilidad con minería continua: Compatibilidad o adaptabilidad futura para implementarse en un diseño de minería continua. Una mayor puntuación significa mayor compatibilidad con minería continua.

Estos criterios se definen en torno a tres focos: Disminuir el impacto de los procesos de reducción secundaria sobre las operaciones de extracción, mejorar los niveles de seguridad y asegurar una coherencia con la filosofía operacional del proyecto. En la Ilustración 54, se muestra, a través de un mapa conceptual, la relación entre los criterios de decisión y los objetivos generales.

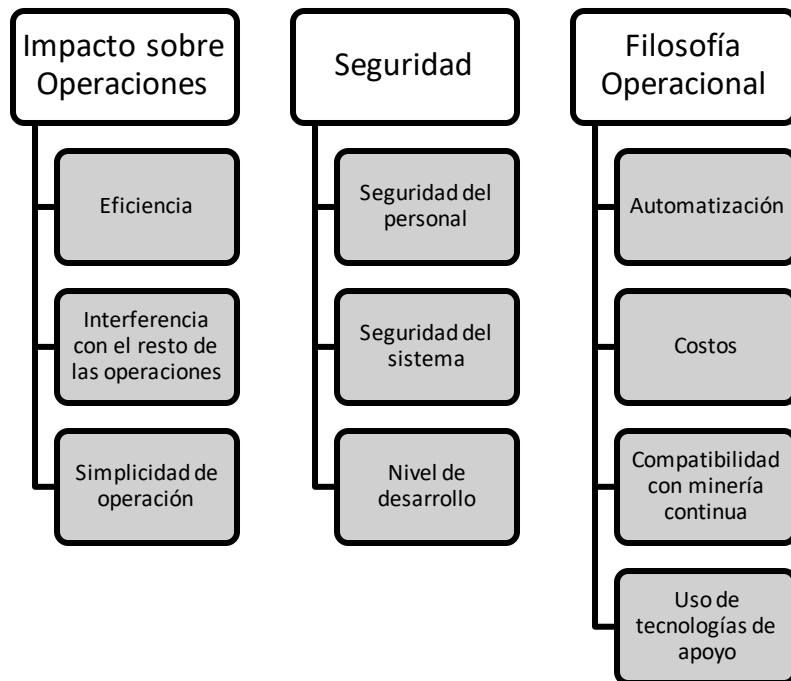


Ilustración 54. Focos y criterios de decisión.

Luego, los ponderadores fueron asignados a través de una matriz de comparación de pares (ver Anexos C), la cual también fue completada con ayuda de Nicolás Miranda. En ella, se determinó qué ponderadores tenían mayor relevancia que otros. En la Tabla 27, se presenta la asignación de ponderadores.

Tabla 27. Ponderadores para evaluación de alternativas.

Criterio	Ponderador
Seguridad del personal	0,24
Interferencia con el resto de las operaciones	0,21
Seguridad del sistema	0,16
Eficiencia	0,08
Costos	0,08
Automatización	0,08
Nivel de desarrollo	0,08
Simplicidad de operación	0,05
Compatibilidad con minería continua	0,03
Uso de tecnologías de apoyo	0,00

Como se observa en la tabla anterior, el uso de tecnologías de apoyo tiene un ponderador igual a 0, pues su importancia relativa es menor en comparación a los

demás criterios. Dado esto, este criterio puede ser excluido de la evaluación, pues no aportará valor en la evaluación de alternativas.

Por otro lado, los factores de mayor importancia serán el nivel de seguridad que ofrece la alternativa, tanto para el personal como para el sistema, y las interferencias que genera el uso de la alternativa sobre el resto de las operaciones productivas.

### 6.3. Evaluación de Alternativas

Tras la definición de los criterios de decisión, se desarrolló la evaluación de las alternativas. Para ello, se pidió la opinión de tres expertos de minería subterránea, quienes valoraron las características de cada equipo en una escala de 1 a 10. Los tres profesionales son Ingenieros Civiles de Minas que trabajan o han trabajado en minas o proyectos subterráneos de CODELCO.

A continuación, se muestran los promedios ponderados obtenidos por cada alternativa para ambos procesos de reducción secundaria. En el Anexo D, se presenta en detalle cada una de las evaluaciones.

#### 6.3.1. Descuelgue de zanjas de producción

La tabla 28 muestra el promedio ponderado de las alternativas de solución para el descuelgue de zanjas.

Tabla 28. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue.

Alternativa	EV1	EV2	EV3	Promedio
Cargas propulsadas por cañón	1,0	3,6	4,1	2,88
Cañón de agua	8,5	6,9	7,9	7,78
Descolgador telescópico	7,2	5,4	6,4	6,34
Descuelgue manual	4,8	2,4	4,4	3,89
Descuelgue manual con bolsa expansiva	5,3	2,4	3,7	3,81
Jumbo de descuelgue	5,7	3,4	6,1	5,04

En la Ilustración 55, se presentan gráficamente los resultados de las evaluaciones para las alternativas de descuelgue. El eje vertical fue centrado en el puntaje obtenido por el Descuelgue Manual, que corresponde a la solución propuesta en etapa de factibilidad del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

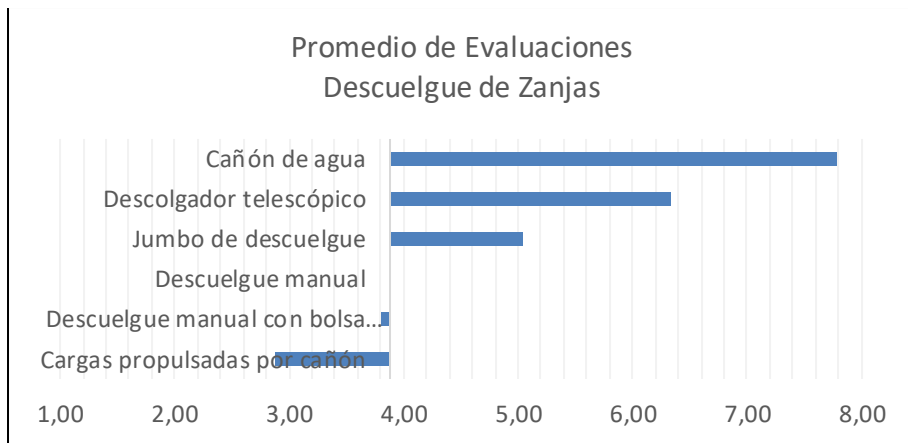


Ilustración 55. Resultados evaluación de alternativas de descuelgue de zanjas.

En el gráfico se puede observar que hubo tres alternativas que lograron un puntaje mayor a la propuesta base, éstas son: Cañón de Agua, Descolgador Telescópico y Jumbo de Descuelgue. Estas opciones pasaran a una segunda etapa de evaluación de carácter cuantitativo.

Junto a ello, es importante mencionar que en el ítem “Seguridad del Personal”, la alternativa Descuelgue Manual obtuvo un puntaje de 2,3 sobre 10 puntos posibles, siendo una de las alternativas con menor puntaje en este criterio. Por otro lado, las alternativas Jumbo de Descuelgue y Descuelgue Manual, también obtuvieron un puntaje menor en el criterio “Nivel de Interferencias” con 2 puntos cada una (sobre 10 posibles). Estos puntajes serán considerados en la evaluación final.

En la siguiente ilustración, se muestran gráficamente los puntajes obtenidos en los criterios de mayor ponderación por las alternativas que obtuvieron los mayores puntajes finales.

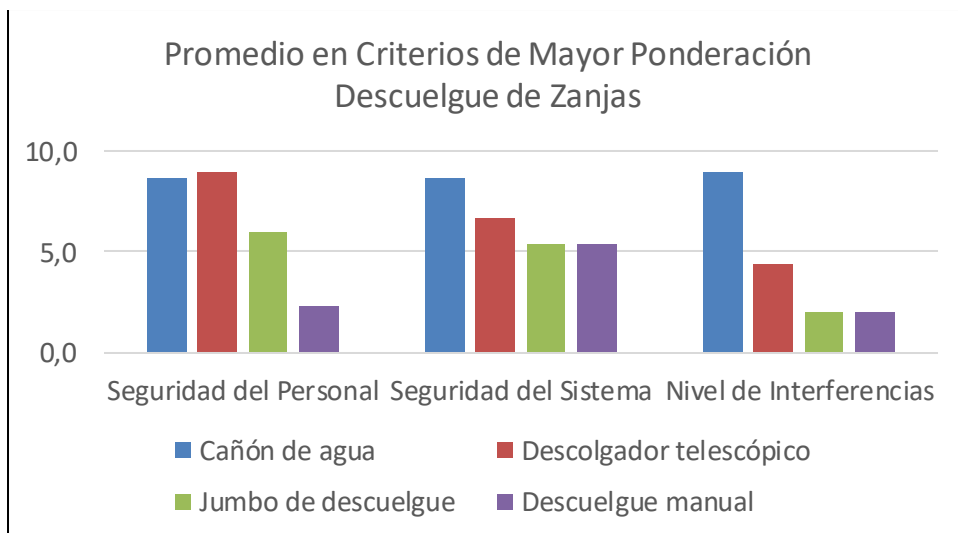


Ilustración 56. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, descuelgue de zanjas.

### 6.3.2. Reducción de bolones en puntos de extracción

La tabla 29 muestra el promedio ponderado de las alternativas de solución para la reducción de bolones.

Tabla 29. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones.

Alternativa	EV1	EV2	EV3	Promedio
Dumbo cachorrero	6,3	5,2	4,8	5,42
Equipo hidrofracturador	7,5	8,2	4,9	6,88
Jumbo cachorrero	6,4	5,4	5,2	5,68
Jumbo fracturador con cuña hidráulica	7,7	7,7	7,3	7,56
Martillo móvil	8,1	7,7	7,8	7,88
Parche explosivo	6,1	4,5	5,1	5,23

En la Ilustración 57, se presentan gráficamente los resultados de las evaluaciones para las alternativas de reducción. El eje vertical fue centrado en el puntaje obtenido por el Jumbo Cachorrero, que corresponde a la solución propuesta en etapa de factibilidad del proyecto.

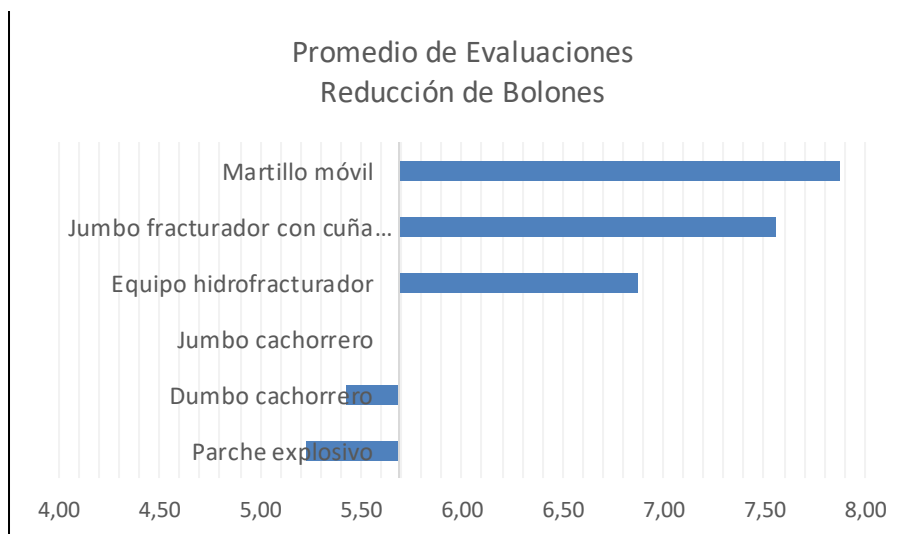


Ilustración 57. Resultados evaluación de alternativas de reducción de bolones.

Al igual que en el proceso de descuelgue, en el gráfico se puede observar que hubo tres alternativas que lograron un puntaje mayor a la propuesta base, éstas son: Martillo Móvil, Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica y Equipo Hidrofracturador, las cuales pasarán a una segunda etapa evaluativa de carácter cuantitativo.

Junto a ello, es importante mencionar que en el ítem “Nivel de Interferencias”, la alternativa Jumbo Cachorrero obtuvo un puntaje de 2,7 (sobre 10 puntos posibles), siendo una de las alternativas con menor puntaje en este criterio. Esto será considerado en la evaluación final.

En la siguiente ilustración, se muestran gráficamente los puntajes obtenidos en los criterios de mayor ponderación por las alternativas que obtuvieron los mayores puntajes finales.

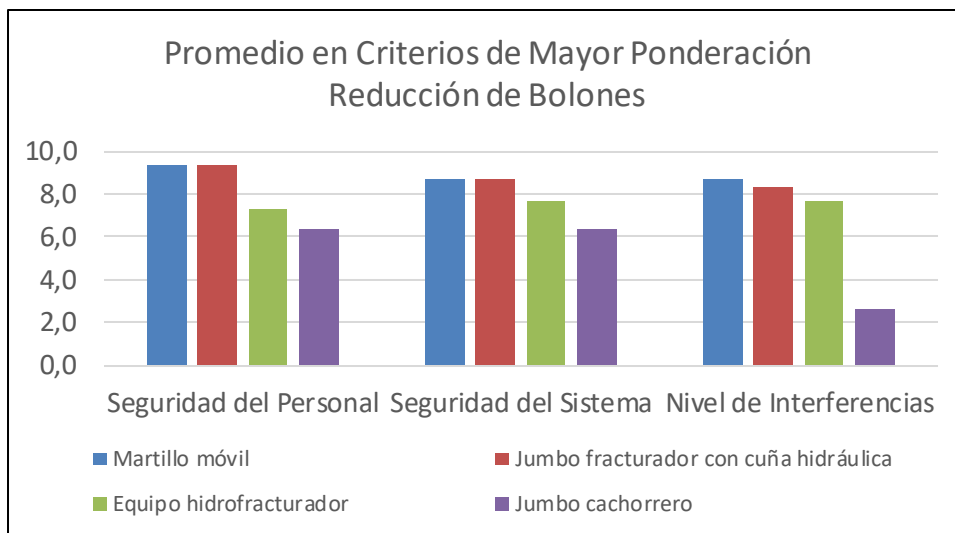


Ilustración 58. Promedio de puntajes en criterios de mayor ponderación, reducción de bolones.

#### 6.4. Alternativas Seleccionadas

Con los resultados anteriores, se definen las alternativas que pasarán a la segunda etapa de evaluación. Estas serán las que obtuvieron un puntaje igual o mayor a las propuestas hechas en la etapa de prefactibilidad del proyecto, que corresponden al Descuelgue Manual y Jumbo Cachorrero. Las alternativas seleccionadas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 30. Alternativas seleccionadas para la etapa de evaluación cuantitativa.

Proceso	Descuelgue de zanjas	Reducción de bolones
Caso Base	Descuelgue Manual	Jumbo Cachorrero
Alternativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cañón de Agua</li> <li>• Descolgador Telescópico</li> <li>• Jumbo de Descuelgue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Martillo Móvil</li> <li>• Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica</li> <li>• Equipo Hidrofracturador</li> </ul>

Cabe destacar que el caso base de descuelgue de zanjas considera un procedimiento manual de descuelgue, apoyado por un Jumbo Cachorrero en los casos en que las colgaduras sean de Tipo 1, es decir, aquellas que se originan en el punto de extracción o en su visera<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Parte superior del punto de extracción, dentro de la zanja de producción, la cual se encuentra al mismo nivel del techo de la galería colindante.



## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta sección se presenta la evaluación económica de las alternativas seleccionadas en el capítulo anterior. Para cada una de ellas, se presentan indicadores productivos, costos de capital, costos operacionales e impacto sobre el proceso de extracción los cuales fueron calculados en base a un modelo de simulación. Finalmente, los indicadores a comparar serán la productividad de las cuadrillas (n° de Reducciones/Día), el costo por descuelgue (US\$/Descuelgue), el costo por reducción de bolones (US\$/Reducción) y el costo de los procesos de reducción secundaria por tonelada extraída (cUS\$/ton).

### 7.1. Modelo de Simulación

Como parte de la evaluación económica se utilizó un modelo de simulación que fue usado para determinar indicadores productivos. El modelo fue desarrollado a través del software *Arena Simulation Software*. A través de él, se simuló el trabajo de un equipo LHD de 9 yd<sup>3</sup> en una semi calle de producción de 18 puntos de extracción. A medida que el equipo extraía mineral de los distintos puntos, se originaron colgaduras y sobre tamaños. Para solucionar estas interferencias, se probó con las alternativas evaluadas en el capítulo 7, obteniendo así indicadores de producción y utilización de recursos.

A continuación, se presenta una ilustración de la animación del modelo, en donde se observa la semi calle y el equipo LHD activo. Además, el estado de los puntos de extracción se representa a través de animaciones. Los puntos inhabilitados se marcan con rojo, mientras que los habilitados se marcan en verde. También fueron agregados algunos indicadores: Cantidad de punto habilitados en ese instante, cantidad de puntos colgados en ese instante y cantidad de ciclos de producción a lo largo de la simulación.

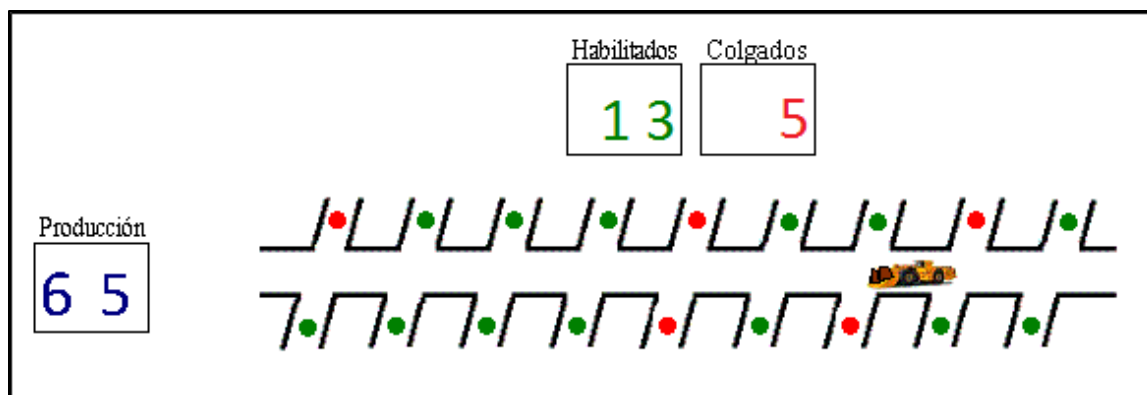


Ilustración 59. Animación del modelo de simulación.

### 7.1.1. Consideraciones del modelo

A continuación, se detallan las consideraciones y supuestos base para la construcción, ejecución y validación del modelo de simulación:

- El tiempo simulado fue de 14 días para cada alternativa. Este tiempo de simulación aseguró que los indicadores productivos entregados por el software tuvieran un *half width*<sup>28</sup> menor a un 0,05%.
- Para la frecuencia de aparición de colgaduras y sobre tamaños se usaron las estimaciones detalladas en los anexos E y F. Estos eventos corresponden a las únicas variables aleatorias del modelo.
- Para el tiempo de proceso del equipo LHD se utilizó la estimación detallada en el Anexo A.
- La semi calle modelada se componía de 18 puntos de extracción, en donde trabaja un equipo LHD de 9 yd<sup>3</sup> tal como se pretende trabajar en la Mina Chuquicamata Subterránea. Para cada ciclo se consideró un porcentaje de llenado del 80% del cucharón, con lo que se extrajeron 9,23 toneladas por ciclo productivo (carga, traslado, descarga).
- En el modelo se consideraron tiempos destinados a colación y cambios de turno. En relación a ello, el tiempo disponible tanto del equipo LHD, como de las cuadrillas, fue de 20 horas diarias.
- La aparición de una colgadura implica la inhabilitación inmediata del punto de extracción en cuestión.
- La aparición de una roca con sobre tamaño no implica la inhabilitación del punto de extracción, sino que el equipo puede seguir trabajando, sin embargo, la roca con sobre tamaño es contabilizada y es reducida cuando ingresa una cuadrilla de reducción. En la realidad, puede ocurrir que la aparición de una roca con sobre tamaño impida la operación normal de un equipo de carguío, sin embargo, se decidió utilizar este supuesto para simplificar el modelo de simulación.
- Dentro de la semi calle se restringió el trabajo de dos recursos simultáneamente, es decir, si se ejecutaba un proceso de descuelgue o reducción, el equipo LHD no puede extraer mineral, y viceversa.
- El ingreso de las cuadrillas de descuelgue se realiza cuando el porcentaje de puntos inhabilitados en la calle es igual a un 70%. En la realidad, esta decisión depende varios factores, entre ellos, la programación de la carta de tiraje y la disponibilidad de otras calles de producción, sin embargo, por simplicidad, se decide utilizar este mismo criterio para todas las simulaciones.
- El ingreso de las cuadrillas de reducción de sobre tamaños se permitió sólo en los tiempos de colación del equipo LHD, para reducir el impacto sobre la producción.

---

<sup>28</sup> Valor proporcionado por el software Arena con el que se forma un intervalo de confianza. Se interpreta como la confianza de que en el 95% de las corridas se obtendrá una media que estará en el intervalo de la media obtenida  $\pm$  "Half Width".

- Por último, considerando que los datos de frecuencia de colgaduras y sobre tamaños se basan en la extracción del primer 30% de las columnas de extracción de los macro bloques N01 y S01, y suponiendo una velocidad de extracción de 0,4 [tpd/m<sup>2</sup>] y una densidad del material de 2,7 [t/m<sup>3</sup>], entonces los resultados del modelo de simulación tendrán una validez para los primeros 6 meses de producción. Si se requiere calcular indicadores para los siguientes meses o años del proyecto, los datos deberán ser actualizados en terreno, sin embargo, es esperable que las frecuencias de colgaduras y sobre tamaños sean menores en comparación a los primeros meses.

### 7.1.2. Inputs y outputs del modelo

Como se mencionó anteriormente, se usaron 3 variables de entrada en el modelo de simulación: Colgaduras (variable aleatoria), paladas (constante) y sobre tamaños (variable aleatoria).

Por otro lado, los outputs del modelo fueron indicadores productivos, tales como: cantidad de ciclos productivos, cantidad de descuelgues, cantidad de reducciones y utilización de equipos.

### 7.1.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de las alternativas de reducción secundaria. Para cada caso se ejecutaron 50 simulaciones. La utilización de los equipos se presenta en las secciones 7.2 y 7.3.

Tabla 31. Resultados de simulación.

N°	Equipos/Procedimientos considerados	Cantidad de ciclos productivos por día	Cantidad de descuelgues por día	Cantidad de reducciones por día
1	Descuelgue manual y Jumbo Cachorrero	308,5	8,7	12,0
2	Descuelgue manual y Martillo Móvil	308,5	8,7	15,0
3	Descuelgue manual y Equipo Hidrofracturador	315,9	8,8	15,3
4	Descuelgue manual y Jumbo c/ Cuña Hidráulica	308,5	8,7	13,3
5	Jumbo Descolgador y Jumbo Cachorrero	342,5	9,5	13,1
6	Descolgador Telescópico y Jumbo Cachorrero	330,8	9,4	12,7
7	Cañón de Agua y Jumbo Cachorrero	327,0	9,0	12,6

## 7.2. Descuelgue de Zanjas de Producción

### 7.2.1. Caso Base: Descuelgue Manual

La primera alternativa a evaluar consiste en el descuelgue manual, apoyado por un Jumbo Cachorrero en caso de que se presente una colgadura Tipo 1. Estas alternativas corresponden a la propuesta de descuelgue hecha en etapa de prefactibilidad.

#### a. Productividad

- **Tiempo de Proceso:** El descuelgue manual considera el uso de explosivos, por lo mismo, para desarrollar el descuelgue es necesario cargar la mayor cantidad de puntos para luego realizar sólo un proceso de tronadura y, por consiguiente, sólo un proceso de evacuación y ventilación por semi calle. A continuación, se presentan los tiempos de cada tarea asociada al descuelgue manual.

Tabla 32. Tiempos estimados del proceso de descuelgue manual.

Procedimiento	Duración* (min)
Inspección y coordinación	5
Colocación de carga	20
Evacuación y ventilación	30

\*Tiempos estimados en base al informe de reducción secundaria de IM2 (IM2 Consulting, 2006).

- **Productividad:** Considerando los tiempos definidos anteriormente, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la simulación del proceso de descuelgue manual con apoyo de un Jumbo Cachorrero en una semi calle de producción. De ahora en adelante, la productividad es medida en operaciones (op) por día.

Tabla 33. Indicadores productivos descuelgue manual (resultados de simulación).

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo efectivo de trabajo	Horas	4,92
Productividad	Op/Día	8,73

#### b. Costos de Capital<sup>29</sup>

En la siguiente tabla se presenta el costo del Jumbo Cachorrero y se considera una vida útil de 10.800 horas. El Jumbo Cachorrero será usado sólo en el 39% de los casos, que corresponde a porcentaje estimado de colgaduras Tipo 1 (BCTEC, 2016).

<sup>29</sup> El tiempo de vida útil del Jumbo Cachorrero, su costo de adquisición, mantenimiento y consumo estimado de combustible, el sueldo promedio mano de obra rol B, el sistema de turnos y el costo de insumos de tronadura son datos obtenidos desde el informe de Costos de Operación del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

Tabla 34. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero

Equipo	Valor de Adquisición (US\$)	Vida Útil (hr)	Amortización (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	595.754	10.800	55,16

### c. Costos Operacionales

- **Mano de obra:** El sistema de descuelgue propuesto en etapa de prefactibilidad, considera 2 trabajadores por cuadrilla. Sus cargos son Jefe de Cuadrilla y Ayudante. En la siguiente tabla se detallan los parámetros usados en la evaluación.

Tabla 35. Parámetros mano de obra.

Parámetro	Unidad	Valor
Sueldo promedio mano de obra Rol B	US\$/Año	60.006
Días por mes	Días/Mes	30
Sistema de turnos	Turnos/Día	2
Cuadrilla	N° Trabajadores/Cuadrilla	2
Costo promedio mano de obra por hombre al día	US\$/hr-Día	166,68

- **Equipo:** Los costos operacionales asociados al uso del equipo corresponden a costos en combustible y mantenimiento. El detalle de estos costos se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 36. Costo de combustible Jumbo Cachorrero.

Equipo	Consumo de Combustible (lt/hr)	Precio Diésel* (US\$/lt)	Costo de Combustible (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	5	0,849	4,25

\*Precio promedio por litro de combustible según licitación de combustibles periodo 2015-2020 adjudicada a Copec.

Tabla 37. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero.

Equipo	Costo Estimado de Mantenimiento (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	55,3

- **Insumos:** Los principales insumos usados en este proceso son las cargas explosivas (APD) y accesorios de tronadura, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 38. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Descuelgue Manual.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Unidad)	Cantidad* (Unidad/op)	Costo (US\$/op)
Cordón detonante	m	0,36	20,0	7,2
Explosivo APD (450 grs.)	Un	1,8	1,0	1,8
Detonador	Un	0,49	1,0	0,49
Coligüe	Un	1,0	3,0	3,0
<b>TOTAL</b>				<b>12,49</b>

\*Datos basados en tesis de S. Maass (Maass, 2013).

- **Costos totales:** A continuación, se presenta un resumen de los costos asociados al proceso de descuelgue manual con apoyo del Jumbo Cachorrero.

Tabla 39. Costos totales estimados – Descuelgue Manual.

Ítem	Unidad	Valor
Productividad	Op/Día	8,73
Dotación	H/Día	4
Costo Mano de Obra	US\$/hr-Día	166,68
	US\$/Día	82,01
	US\$/Op	9,39
Costo Equipo	US\$/hr	114,71
	US\$/Op	25,21
Costo Insumos	US\$/Op	11,32
Costo Total	US\$/Op	45,93
	cUS\$/ton	14,08

#### d. Impacto en Proceso de Extracción

A continuación, se presentan los indicadores productivos y la utilización del equipo LHD obtenidos de la simulación del proceso de descuelgue manual.

Tabla 40. Indicadores productivos (resultados de simulación) - Descuelgue Manual.

Indicador	Unidad	Valor
Utilización Equipo LHD	%	80
Productividad Equipo LHD	Ton/día	2.847,3

### 7.2.2. Alternativas de Descuelgue

Las siguientes evaluaciones corresponden a las alternativas de descuelgue que obtuvieron un mayor puntaje en la evaluación cualitativa en relación al caso base. Estas alternativas son: Jumbo de Descuelgue, Descolgador Telescópico y Cañón de Agua. Todos estos equipos fueron presentados en la sección 5.1.

En cuanto al cañón de agua, según indicaciones de la empresa fabricante, el equipo es capaz de remover sólo un 40% de las colgaduras, ya que su efectividad dependerá de la forma en que se origina la interferencia. Por ello, su evaluación se desarrolla considerando que las colgaduras restantes son solucionadas con el método manual.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones ejecutadas con estas alternativas de solución y los costos asociados a sus resultados productivos.

## a. Productividad

- **Tiempo de Proceso:** Tanto el Jumbo de Descuelgue como el Descolgador Telescópico usan explosivos en sus procedimientos, por lo mismo, para desarrollar el descuelgue se carga con explosivos la mayor cantidad de puntos obstruidos, para luego realizar sólo un proceso de tronadura y, por consiguiente, sólo un proceso de evacuación y ventilación por semi calle. En cambio, el procedimiento que usa el Cañón de Agua considera un proceso de evacuación y ventilación por cada punto operado. A continuación, se presentan los tiempos de cada tarea asociada a los procedimientos de descuelgue.

Tabla 41. Tiempos estimados de proceso de alternativas de descuelgue.

Procesos	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
Inspección y coordinación (min)	5	10	5
Descuelgue (min)	10	10	5
Evacuación y ventilación (min)	30	20	5

\*Tiempos estimados en base al informe de reducción secundaria de IM2 (IM2 Consulting, 2006).

- **Productividad:** Considerando los tiempos definidos anteriormente, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la simulación de los procedimientos de descuelgue.

Tabla 42. Indicadores productivos alternativas de descuelgue (resultados de simulación).

Parámetro	Unidad	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
Tiempo efectivo de trabajo	Horas	2,54	3,17	3,82
Productividad	Op/Día	9,5	9,4	9,0

## b. Costos de Capital

Para el caso del Jumbo de Descuelgue y el Cañón de Agua, se cotizaron ambos equipos con la empresa MacLean (ver Anexo H). En cuanto a la vida útil de los equipos, se utilizó el mismo periodo considerado para el caso base.

Tabla 43. Costo de adquisición Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua.

Alternativa	Valor de Adquisición (US\$)	Vida Útil (hr)	Costo de Reposición (US\$/hr)
Jumbo de Descuelgue	940.000	10.800	87,04
Cañón de Agua	439.790	10.800	40,72

Por otro lado, el desarrollo del Descolgador Telescópico fue financiado por CODELCO en el año 2012. El monto de la inversión fue corregido según la variación del

IPC<sup>30</sup> entre la fecha de inversión (junio de 2012) y el presente año (febrero de 2016). Para este caso, índice de corrección monetaria es de 1,142.

Por otro lado, al ser un equipo eléctrico, se consideró un mayor tiempo de vida útil, que corresponde a un 150% de la vida útil de equipos diésel (Paraszczak, Svedlund, Fytas, & Laflamme, 2014).

Tabla 44. Costo de adquisición Descolgador Telescópico.

Alternativa	Valor de Adquisición Año 2012 (US\$)	Valor de Adquisición Corregido Año 2016 (US\$)	Vida Útil (hr)	Costo de Reposición (US\$/hr)
Descolgador Telescópico	1.000.000	1.142.000	16.200	70,49

### c. Costos Operacionales

- **Mano de obra:** Los costos de mano de obra son los mismos que fueron utilizados en el caso base. El tamaño de las cuadrillas varía según la alternativa a utilizar. El Jumbo de Descuelgue requiere de un operador, el Descolgador Telescópico requiere de dos operadores y el Cañón de Agua requiere de un operador más la cuadrilla de descuelgue manual.
- **Equipo:** Los costos operacionales asociados al uso de los equipos corresponden a costos en combustible/electricidad y mantenimiento. El detalle de estos costos se detalla en las siguientes tablas.

Para el consumo de combustible del Jumbo de Descuelgue se consideró la misma estimación del caso base. Para el Cañón de Agua se consideró un consumo mayor dados los viajes que debe hacer para llenar su estanque de agua tras cada procedimiento de descuelgue.

Tabla 45. Costos de combustible Jumbo de Descuelgue y Cañón de Agua.

Alternativa	Consumo de Combustible (lt/hr)	Precio Diésel* (US\$/lt)	Costo Combustible (US\$/hr)
Jumbo de Descuelgue	5	0,849	4,25
Cañón de Agua	6,35	0,849	5,39

\*Precio promedio por litro de combustible según licitación de combustibles periodo 2015-2020 adjudicada a Copec.

En cuanto al Descolgador Telescópico, se considera el uso de 4 baterías industriales por equipos, las cuales entregan una autonomía de 12 horas (Cerde, Sanchez, & Abarca, 2012).

<sup>30</sup> Índice de Precios del Consumidor.



Tabla 46. Costo de energía eléctrica Descolgador Telescópico.

Alternativa	Consumo por Turno (kWh)	Precio energía eléctrica* (US\$/MWh)	Costo energía eléctrica (US\$/hr)
Descolgador Telescópico	12	85	0,09

\*Precio estimado por MWh en base a contrato eléctrico con empresa Colbún.

Para el mantenimiento, se consideró el mismo costo estimado usado en el caso base para los equipos diésel. En el caso del equipo eléctrico, este costo se redujo en un 50% (Paraszczak, Svedlund, Fytas, & Laflamme, 2014).

Tabla 47. Costo de mantenimiento alternativas de descuelgue.

Alternativa	Costo estimado de mantención
Jumbo de Descuelgue	55,3
Descolgador Telescópico	27,65
Cañón de Agua	55,3

- **Insumos:** A continuación, se presentan los principales insumos usados por cada alternativa de descuelgue. Las tablas se construyeron en base al estudio realizado por IM2 (IM2 Consulting, 2006).

Para el caso del Cañón de Agua se consideró un 60% del costo del procedimiento de descuelgue manual, dado que el Cañón de Agua tiene un 40% de efectividad según datos del fabricante.

Tabla 48. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo de Descuelgue.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Un)	Cantidad (Un/Op)	Costo (US\$/Op)
Cordón detonante	m	0,36	20	7,2
Carga columna (Emulsión)	kg	1,18	0,78	0,92
Detonador	Un	0,49	1	0,49
TOTAL				8,61

Tabla 49. Costos estimados en insumos para reducción secundaria –Descolgador Telescópico.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Un)	Cantidad (Un/Op)	Costo (US\$/Op)
Cordón detonante	m	0,36	10	3,6
Explosivo APD (450 grs.)	Un	1,8	1	1,8
Detonador	Un	0,49	1	0,49
Adhesivo para explosivo	kg	5	0,3	1,5
TOTAL				7,39

Tabla 50. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Cañón de Agua.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Un)	Cantidad (Un/Op)	Costo (US\$/Op)
Agua Industrial	lt	0,00136	11.000	14,96
60% insumos caso base				7,49
TOTAL				22,45

\*El costo por litro de agua industrial se extrajo del informe de Costos de Operación del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

- **Costos totales:** A continuación, se presenta un resumen de los costos asociados al proceso de descuelgue de las alternativas Jumbo de Descuelgue, Descolgador Telescópico y Cañón de Agua.

Tabla 51. Costos totales estimados – Alternativas de descuelgue.

Ítem	Unidad	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
Productividad	Op/Día	9,5	9,4	9,0
Dotación	H/Día	2	4	6
Costo Mano de Obra	US\$/hr-Día	166,68	166,68	166,68
	US\$/Día	21,20	52,81	95,41
	US\$/Op	2,23	5,62	10,60
Insumos	US\$/Op	8,61	7,39	22,45
Costo Equipo	US\$/hr	146,58	98,23	101,41
	US\$/Op	39,25	33,11	27,30
Costo Total	US\$/Op	50,10	46,11	60,36
	cUS\$/ton	15,05	14,20	18,00

#### d. Impacto en Proceso de Extracción

A continuación, se presentan los indicadores productivos y la utilización del equipo LHD obtenidos en cada simulación del proceso de descuelgue.

Tabla 52. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de descuelgue.

Indicador	Unidad	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
Utilización Equipo LHD	%	88,8	85,8	84,8
Productividad Equipo LHD	Ton/día	3.161,5	3.052,9	3.018,3

### 7.3. Reducción de Bolones en Puntos de Extracción

#### 7.3.1. Caso Base: Jumbo Cachorrero

La primera alternativa a evaluar para la reducción de bolones consiste en el uso de un Jumbo Cachorrero. A continuación, se presentan los resultados de la simulación ejecutada con esta alternativa de solución y los costos asociados a sus resultados productivos.

##### a. Productividad

- **Tiempo de Proceso:** La reducción de bolones con el Jumbo Cachorrero también considera el uso de explosivos, por lo mismo, es necesario evacuar y ventilar la zona al fragmentar cada bolón. A continuación, se presentan los tiempos de cada tarea asociada al descuelgue manual.

Tabla 53. Tiempos del proceso de reducción con Jumbo Cachorrero.

Procedimiento	Duración
Traslado	0,5
Perforación	1
Carga Explosivo	1,5
Evacuación y ventilación	3
Tiempo Total	6

\*Tiempos estimados en base al informe de reducción secundaria de IM2 (IM2 Consulting, 2006).

- **Productividad:** Considerando los tiempos definidos anteriormente, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la simulación del proceso de reducción con Jumbo Cachorrero en una semi calle de producción.

Tabla 54. Indicadores productivos reducción con Jumbo Cachorrero (resultados de simulación).

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo efectivo de trabajo	Horas	1,18
Productividad	Op/Día	12,00

##### b. Costos de Capital<sup>31</sup>

En la siguiente tabla se presenta el costo del Jumbo Cachorrero y se considera una vida útil de 10.800 horas.

<sup>31</sup> El tiempo de vida útil del Jumbo Cachorrero, su costo de adquisición, mantenimiento y consumo estimado de combustible y el costo de insumos de tronadura son datos obtenidos desde el informe de Costos de Operación del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013)

Tabla 55. Costo de adquisición Jumbo Cachorrero

Equipo	Valor de Adquisición* (US\$)	Vida Útil (hr)	Amortización (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	595.754	10.800	55,16

### c. Costos Operacionales

- **Mano de obra:** Los costos de mano de obra son los mismos que fueron utilizados en la evaluación de las alternativas de descuelgue. En este caso, será necesario contar sólo con un operador por turno para el Jumbo Cachorrero.
- **Equipo:** Los costos operacionales asociados al uso del equipo corresponden a costos en combustible y mantenimiento. El detalle de estos costos se detalla en las siguientes tablas.

Tabla 56. Costo de combustible Jumbo Cachorrero.

Equipo	Consumo de Combustible (lt/hr)	Precio Diésel* (US\$/lt)	Costo de Combustible (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	5	0,849	4,25

\*Precio promedio por litro de combustible según licitación de combustibles periodo 2015-2020 adjudicada a Copec.

Tabla 57. Costo de mantenimiento Jumbo Cachorrero.

Equipo	Costo Estimado de Mantenimiento (US\$/hr)
Jumbo Cachorrero	55,3

- **Insumos:** Los principales insumos usados en este proceso son las cargas explosivas (APD) y accesorios de tronadura, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 58. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Jumbo Cachorrero.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Un)	Cantidad* (Un/op)	Costo (US\$/op)
Cordón detonante	m	0,36	20,0	7,2
Explosivo APD (450 grs.)	Un	1,8	1,0	1,8
Detonador	Un	0,49	1,0	0,49
<b>TOTAL</b>				<b>9,49</b>

\*Datos basados en tesis de S. Maass (Maass, 2013).

- **Costos totales:** A continuación, se presenta un resumen de los costos asociados al proceso de descuelgue manual.

Tabla 59. Costos totales estimados – Jumbo Cachorrero.

Ítem	Unidad	Valor
Productividad	Op/Día	12,00
Dotación	H/Día	2
Costo Mano de Obra	US\$/hr-Día	166,68
	US\$/Día	19,60
	US\$/Op	1,63
Costo Equipo	US\$/hr	114,71
	US\$/Op	11,24
Costo Insumos	US\$/Op	9,49
Costo Total	US\$/Op	22,36
	cUS\$/ton	9,43

#### d. Impacto en Proceso de Extracción

A continuación, se presentan los indicadores productivos y la utilización del equipo LHD obtenidos de la simulación del proceso considerando la utilización de un Jumbo Cachorrero en el proceso de reducción de bolones.

Tabla 60. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Jumbo Cachorrero.

Indicador	Unidad	Valor
Utilización Equipo LHD	%	80
Productividad Equipo LHD	Ton/día	2.847,3

### 7.3.2. Alternativas de Reducción

Las siguientes evaluaciones corresponden a las alternativas de reducción de bolones que obtuvieron un mayor puntaje en la evaluación cualitativa en relación al caso base. Estas alternativas son: Martillo Móvil, Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica y Equipo Hidrofracturador. Todos estos equipos fueron presentados en la sección 5.2. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones ejecutadas con estas alternativas de solución y los costos asociados a sus resultados productivos.

#### a. Productividad

- **Tiempo de proceso:** Los equipos alternativos de reducción no utilizan explosivos, por lo que no es necesario evacuar o ventilar la zona de operación. A continuación, se muestran los tiempos estimados de reducción para cada una de las alternativas.

Tabla 61. Tiempos estimados de proceso de alternativas de reducción d bolones.

Procesos	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
Traslado (min)	1,3	1,3	1,3
Perforación (min)	-	1,3	1,3
Carga Cartucho Rompedor (min)	-	-	0,6
Quiebre (min)	2,2	1,3	0,5
Tiempo Total (min)	3,5	4	3,7

\*Tiempos estimados en base al informe de reducción secundaria de IM2 (IM2 Consulting, 2006).

- **Productividad:** Considerando los tiempos definidos anteriormente, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la simulación del proceso de reducción con los equipos alternativos.

Tabla 62. Indicadores productivos reducción con equipos alternativos (resultados de simulación).

Parámetro	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
Tiempo efectivo de trabajo (hr)	0,86	0,89	0,94
Productividad (Op/Día)	15,0	15,3	13,3

## b. Costos de Capital

Para el caso del Martillo Móvil, el equipo fue cotizado en la empresa MacLean (ver Anexo H). Para los otros dos equipos, se consideró el mismo costo de un Jumbo Cachorrero, ya que ambos prototipos usados en CODELCO fueron construidos sobre un Jumbo de un brazo. El tiempo de vida útil es el mismo utilizado en el informe de costos operacionales del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

Tabla 63. Costo de adquisición alternativas de reducción de bolones.

Alternativa	Valor de Adquisición (US\$)	Vida Útil (hr)	Costo de Reposición (US\$/hr)
Martillo Móvil	534.290	10.800	49,47
Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	595.754	10.800	55,16
Equipo Hidrofracturador	595.754	10.800	55,16

## c. Costos Operacionales

- **Mano de obra:** Los costos de mano de obra son los mismos que fueron utilizados en el caso base. Para todas las alternativas se requiere sólo de un operador.

- **Equipo:** Los costos operacionales asociados al uso de los equipos corresponden a costos en combustible/electricidad y mantenimiento. El detalle de estos costos se detalla en las siguientes tablas. En este caso, se consideró el mismo consumo de combustible que los demás equipos diésel, sin embargo, al consumo del Martillo Móvil se le agregó un 10% extra por el gasto que implica el uso del martillo.

Tabla 64| Costo de combustible alternativas de reducción de bolones.

Alternativa	Consumo de Combustible (lt/hr)	Precio Diésel (US\$/lt)	Costo Combustible (US\$/hr)
Martillo Móvil	6	0,849	5,09
Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	5	0,849	4,25
Equipo Hidrofracturador	5	0,849	4,25

Para los costos de mantenimiento, se tomó como base el costo asociados al Jumbo Cachorrero en el informe de costos operacionales del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013). A este costo se le agregó un 10% y 20% extra a los equipos hidrofracturador y fracturador con cuña hidráulica dada las características de su operación, según la información obtenida en el informe de reducción secundaria de IM2 (IM2 Consulting, 2006). Al Martillo Móvil, se le agregó un 30% debido al desgaste en la utilización del martillo del equipo. De esta forma, los costos asociados a mantenimiento quedan de la siguiente forma:

Tabla 65. Costo de mantenimiento alternativas de reducción de bolones.

Alternativa	Costo estimado de Mantenimiento (US\$/hr)
Martillo Móvil	71,89
Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	66,36
Equipo Hidrofracturador	60,83

- **Insumos:** De las tres alternativas, la única que utiliza insumos en su operación es el Equipo Hidrofracturador. Los costos asociados a los insumos se expresan en la siguiente tabla.

Tabla 66. Costos estimados en insumos para reducción secundaria – Equipo Hidrofracturador.

Ítem	Unidad	Precio (US\$/Un)	Cantidad (Un/Op)	Costo (US\$/Op)
Cartucho Rompedor	Unidad	1,5	1,6	2,4
Agua Industrial	lt	0,0014	50	0,07
TOTAL				2,47

\*El costo por litro de agua industrial se extrajo del informe de Costos de Operación del PMCHS (Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2013).

\*\*La cantidad de insumos utilizada en la operación de reducción se estimó en base al informe de IM2 (IM2 Consulting, 2006).

- **Costos totales:** A continuación, se presenta un resumen de los costos asociados a las alternativas de reducción de bolones.

Tabla 67. Costos totales estimados – Alternativas de reducción.

Ítem	Unidad	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
Productividad	Op/Día	15,0	13,3	15,3
Dotación	H/Día	1	1	1
Costo Mano de Obra	US\$/hr-Día	166,68	166,68	166,68
	US\$/Día	7,20	7,40	7,80
	US\$/Op	0,48	0,56	0,51
Insumos	US\$/Op	0,00	0,00	2,47
Costo Equipo	US\$/hr	126,46	125,77	120,24
	US\$/Op	7,28	8,40	7,36
Costo Total	US\$/Op	7,76	8,95	10,33
	cUS\$/ton	4,09	4,18	5,42

#### d. Impacto en Proceso de Extracción

A continuación, se presentan los indicadores productivos y la utilización del equipo LHD obtenidos en cada simulación considerando diferentes alternativas en la reducción de bolones.

Tabla 68. Indicadores productivos (resultados de simulación) – Alternativas de reducción.

Indicador	Unidad	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
Utilización Equipo LHD	%	80,0	80,0	81,9
Productividad Equipo LHD	Ton/día	2.847,8	2.847,8	2.915,8



## 7.4. Selección de Alternativas

A continuación, se presenta un resumen de la evaluación económica de las alternativas de reducción secundaria, la cual se desarrolló en base a las simulaciones del proceso productivo. Junto a ello, se presentan las propuestas de solución elegidas para ambos procesos analizados en base a los criterios de selección que se detallan a continuación.

### 7.4.1. Criterios de Selección

Para determinar cuáles serán las alternativas de reducción secundaria se utilizarán los siguientes criterios:

1. Menor costo por tonelada extraída con un margen de un 5% en relación al menor costo.
2. Mayor utilización del equipo LHD con un margen de 5%.
3. Mayor puntaje obtenido en el ítem “Seguridad del Personal”.
4. Mayor puntaje obtenido en el ítem “Seguridad del Sistema”.
5. Mayor puntaje obtenido en el ítem “Nivel de Interferencias”.

### 7.4.2. Descuelgue de Zanjas de Producción

En relación al proceso de descuelgue, los resultados económicos mostrados en la tabla siguiente revelan que la alternativa más conveniente para este proceso es el Descuelgue Manual de zanjas, con un costo de 14,08 [cUS\$/ton], seguido por el Descolgador Telescópico con un costo de 14,20 [cUS\$/ton].

Tabla 69. Resumen costos estimados – Alternativas de descuelgue de zanjas.

Unidad	Descuelgue Manual	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
US\$/Op	45,93	50,10	46,11	60,36
cUS\$/ton	14,08	15,05	14,20	18,00

A pesar de que el costo por tonelada extraída es el indicador más relevante para definir los procedimientos de reducción secundaria, aún no es posible seleccionar el descuelgue manual, pues considerando un margen de un 5% sobre el menor costo, el Descolgador Telescópico no puede ser descartado como opción.

Al revisar el impacto que tiene el uso de las alternativas en la utilización del equipo de carguío, se observa que el Descuelgue Manual consigue el resultado más bajo, con un 80% de utilización. En este mismo análisis, los equipos Jumbo de Descuelgue y Descolgador Telescópico obtienen 8,8 y 5,8 puntos porcentuales por encima del Descuelgue Manual.

Tabla 70. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de descuelgue de zanjas.

Indicador	Descuelgue Manual	Jumbo de Descuelgue	Descolgador Telescópico	Cañón de Agua
Utilización Equipo LHD	80,0%	88,8	85,8	84,8

Por otro lado, es importante recordar que el Descuelgue Manual es la alternativa menos segura entre las evaluadas, pues obtuvo uno de los puntajes más bajos en el ítem “Seguridad del Personal” en la evaluación cualitativa, con apenas 2,3 puntos sobre 10 posibles (ver Ilustración 60). Esto la transforma en una alternativa que no cumple con uno de los objetivos específicos de esta investigación: “Disminuir los riesgos asociados a los procesos de reducción secundaria”. En la misma evaluación, el Descolgador Telescópico obtuvo 9 puntos en “Seguridad del Personal”, consiguiendo el mejor puntaje en ese ítem.

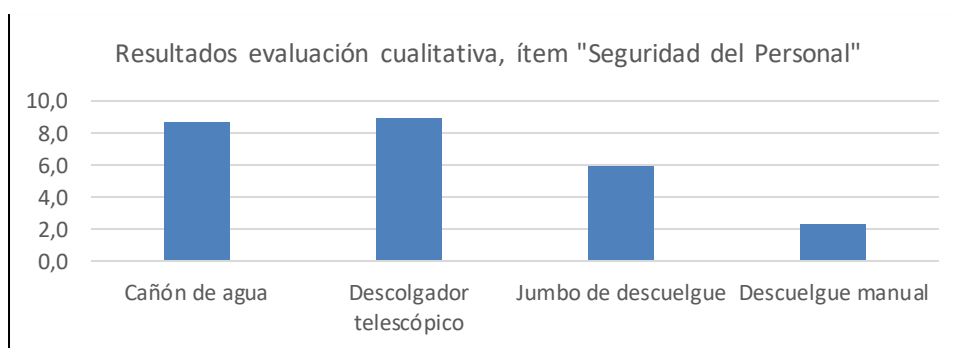


Ilustración 60. Resultados evaluación cualitativa, ítem “Seguridad del Personal”.

Por estas razones, se decide proponer al Descolgador Telescópico como la alternativa de solución para el descuelgue de zanjas por tres motivos: Aumenta la disponibilidad de los puntos de extracción en relación al caso base (Descuelgue Manual), es una opción que brinda seguridad al personal en el procedimiento de descuelgue y presenta bajos costos operativos al ser un equipo eléctrico.

Dado el tiempo efectivo de trabajo de esta alternativa, es posible que a cada cuadrilla de descuelgue se le asignen 6 semi calles de producción, por lo mismo, se propone disponer de al menos 3 cuadrillas de descuelgue al momento de comenzar las operaciones en la Mina Chuquicamata Subterránea con el objetivo de mantener un flujo normal de mineral en los puntos de extracción. Esta dotación podría aumentar con el paso de los años dependiendo de la cantidad de macro bloques en funcionamiento y del índice de colgaduras que se presente.

### 7.4.3. Reducción de Bolones en Punto de Extracción

En relación al proceso de reducción de bolones en el suelo, los resultados económicos mostrados en la siguiente tabla revelan que la alternativa más conveniente

para este proceso es el Martillo Móvil, con un costo de 4,09 [cUS\$/ton], seguido por el Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica con un costo de 4,18 [cUS\$/ton].

Tabla 71. Resumen costos estimados – Alternativas de reducción de bolones.

Unidad	Jumbo Cachorrero	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
US\$/Op	22,36	7,76	8,95	10,33
cUS\$/ton	9,43	4,09	4,18	5,42

Con estos resultados, aún no es posible seleccionar una opción, pues con un margen de un 5% sobre el menor costo, el Jumbo Fracturador con Cuña Hidráulica no puede ser descartado como opción.

Por otro lado, ambos equipos, Martillo Móvil y Jumbo Fracturador, presentan un impacto similar en el proceso productivo, consiguiendo un 80% de utilización del LHD. Mientras que el Equipo Hidrofracturador consigue una mejora de 1,9 puntos porcentuales en este indicador, sin embargo, el costo total de operación es mayor en un 32,5% en comparación al Martillo Móvil.

Tabla 72. Utilización equipo LHD (resultado de simulación) – Alternativas de reducción de bolones.

Indicador	Jumbo Cachorrero	Martillo Móvil	Jumbo Fracturador c/ Cuña Hidráulica	Equipo Hidrofracturador
Utilización Equipo LHD	80,0%	80,0%	80,0%	81.9%

En cuanto al puntaje promedio obtenido en los ítems de “Seguridad del Personal” y “Seguridad del Sistema”, ambos equipos, Martillo Móvil y Jumbo Fracturador, consiguen puntajes de 9,3 y 8,7 respectivamente. Sin embargo, en el ítem “Nivel de Interferencias” obtienen puntajes distintos, siendo el Martillo Móvil la mejor opción con 8,7 puntos sobre los 8,3 puntos obtenidos por el Jumbo Fracturador.

Considerando los resultados presentados anteriormente, se decide proponer al Martillo Móvil como la alternativa de solución para la reducción de bolones en el punto de extracción, pues es la opción más económica y consiguió el mejor puntaje en la evaluación cualitativa entre las alternativas para este proceso de reducción secundaria.

Dado el tiempo efectivo de trabajo de esta alternativa y considerando que la reducción de bolones se debe realizar cuando el equipo LHD no está en operación, es posible que a cada cuadrilla se le asignen 4 semi calles de producción, por lo mismo, se propone disponer de al menos 4 equipos de reducción al momento de comenzar las operaciones en la Mina Chuquicamata Subterránea con el objetivo de mantener la granulometría requerida del mineral en los puntos de extracción. Esta dotación podría aumentar con el paso de los años dependiendo de la cantidad de macro bloques en funcionamiento y del índice de aparición de bolones que se presente.

## **8. DISEÑO DE PROCESOS DE REDUCCIÓN SECUNDARIA**

Una vez elegidos los procedimientos y equipos a utilizar en los procesos de reducción secundaria del PMCHS, en esta sección se plantea un diseño de procesos para el descuelgue de zanjas y la reducción de bolones. Para ello, se presenta una breve descripción de las actividades, se definen las responsabilidades en cada tarea y se propone un diseño, describiendo a grandes rasgos cada uno de los procedimientos.

### **8.1. Descuelgue de Zanjas de Producción**

#### **8.1.1. Descripción de la Actividad**

La actividad de descuelgue de zanjas de producción se puede describir como la habilitación de un punto de extracción a partir del desplome del material que se encuentra suspendido en la parte superior o media de la batea por razones de granulometría.

El sistema de descuelgue consiste en la aplicación directa de explosivos en el material que se encuentra colgado, a través de un equipo que posee un brazo telescópico.

El procedimiento comienza cuando el operador del equipo LHD (de ahora en adelante operador del sistema) detecta un flujo anormal de mineral en el punto de extracción asignado por el Sistema de Asignación y Control de Tareas (ver sección 3.7.2.2.) y determina que es necesario el descuelgue en aquel punto. Esta detección se hace a través de las cámaras dispuestas en el equipo LHD a su cargo. El operador del sistema ingresará el punto colgado como inhabilitado o no disponible para la carga de mineral al Sistema de Asignación y Control de Tareas. Dependiendo de la cantidad de puntos colgados en la calle de producción, se acordará el descuelgue en forma inmediata o se postergará esta actividad hasta que la cantidad de puntos colgados no permita completar la cartilla de tiraje<sup>32</sup> asignada por el sistema. Si se opta por el descuelgue inmediato, el operador coordinará el descuelgue con la Unidad de Reducción Secundaria, quienes enviarán un Descolgador Telescópico a la calle de producción en cuestión.

Como se explica en la sección 3.7.2.2., el Sistema de Asignación y Control de Tareas será la plataforma en donde serán asignadas las misiones de cada equipo. Cada misión incluirá el destino y trayecto que utilizará el equipo de descuelgue. Este trayecto, es determinado por un Sistema de Control de Tráfico, el cual cuenta con la capacidad de realizar confinamientos por segmentos de rutas, es decir, cada equipo transita por un tramo de ruta reservado por el Sistema de Control de Tráfico para dicho

---

<sup>32</sup> Planilla que contiene las cantidades de material que se deben cargar desde cada punto de extracción y la cantidad de material que debe ser descargado en cada punto de vaciado en un turno de trabajo.

equipo. Luego de trasponer el tramo reservado, el segmento es liberado y vuelve a estar disponible para el tránsito del mismo u otro equipo, ya sea LHD o equipo de apoyo. En resumen, cuando un equipo se aproxima al final del último segmento reservado, el Sistema de Control de Tráfico reserva el próximo segmento hasta que el destino final es alcanzado. De esta forma, el sistema evita eventuales interferencias que pudieran provocar accidentes en el Área de Operación Autónoma entre los equipos que circulan en dicho sector.

El sistema garantiza el ingreso seguro de los equipos de apoyo desde la Zona de Transición hasta el punto de extracción o calle que presenta el problema. Por lo tanto, una vez asignada la tarea de reducción, el Sistema de Control de Tráfico asignará una ruta que será seguida por el operador del Descolgador Telescópico. Los segmentos confinados y reservados para esta actividad se irán liberando en la medida que el equipo de reducción avance por la ruta, y de esta forma, quedarán disponibles para la utilización de los equipos LHD. El Área de Operación Autónoma deberá contar con señalética que indique al personal de la unidad de reducción secundaria la condición de accesibilidad de las calles, ayudando al correcto seguimiento de la ruta entregada por el sistema. Esta señalética será regulada por el Sistema de Seguridad de Accesos (ver sección 3.7.2.1.), que permitirá el ingreso y salida de los equipos desde y hacia el Área de Operación Autónoma.

Una vez que el equipo de descuelgue se encuentre frente al punto colgado, se realizará la siguiente secuencia:

- Evaluación: Se evalúa la situación a través de cámaras o escáner. Si es descuelgue es necesario, se define la ubicación y cantidad de explosivos a aplicar. En caso de que se defina la espera de un descuelgue natural, se deja el punto inhabilitado o no disponible para su posterior reevaluación.
- Aplicación: Se aplican los explosivos autoadhesivos al material colgado, a través del brazo telescópico del equipo.
- Aislamiento: Se aísla el sector correspondiente al punto de extracción que se está descolgando.
- Ejecución: Se detonan las cargas explosivas en el momento programado y autorizado, bajo las condiciones impuestas en los procedimientos de trabajo al interior de la mina.
- Revisión de resultados: Se revisa el punto descolgado. Si la actividad fue efectiva, se habilita el punto. Si la actividad fue ineficaz, se retoma la metodología de aplicación.

El Descolgador Telescópico deberá contar con una zona de seguridad, que será entregada por el Sistema de Control de Tráfico, la cual limitará la operación del equipo LHD a cargar a una distancia mínima de dos puntos de extracción contiguos al punto donde se encuentra trabajando el equipo de descuelgue. Si lo anterior no es posible, ya

sea porque estos puntos no se encuentran habilitados o no existen puntos de extracción más allá de la zona de seguridad, entonces el equipo LHD deberá aguardar a que el Descolgador Telescópico concluya su labor de reducción secundaria y libere los segmentos reservados para él.

Los actores involucrados en este procedimiento son: Operador del Sistema, Jefe de Unidad de Reducción Secundaria, el Jefe de la Cuadrilla de Descuelgue, la Cuadrilla de Descuelgue y el Jefe de Unidad de Control (encargado de velar por el buen funcionamiento de la instrumentación que apoya el sistema). Ellos intercambiarán información en forma permanente durante el desarrollo de la actividad, de manera de realizar una tarea eficiente, solucionando cualquier problema que pudiera presentarse en el menor tiempo posible.

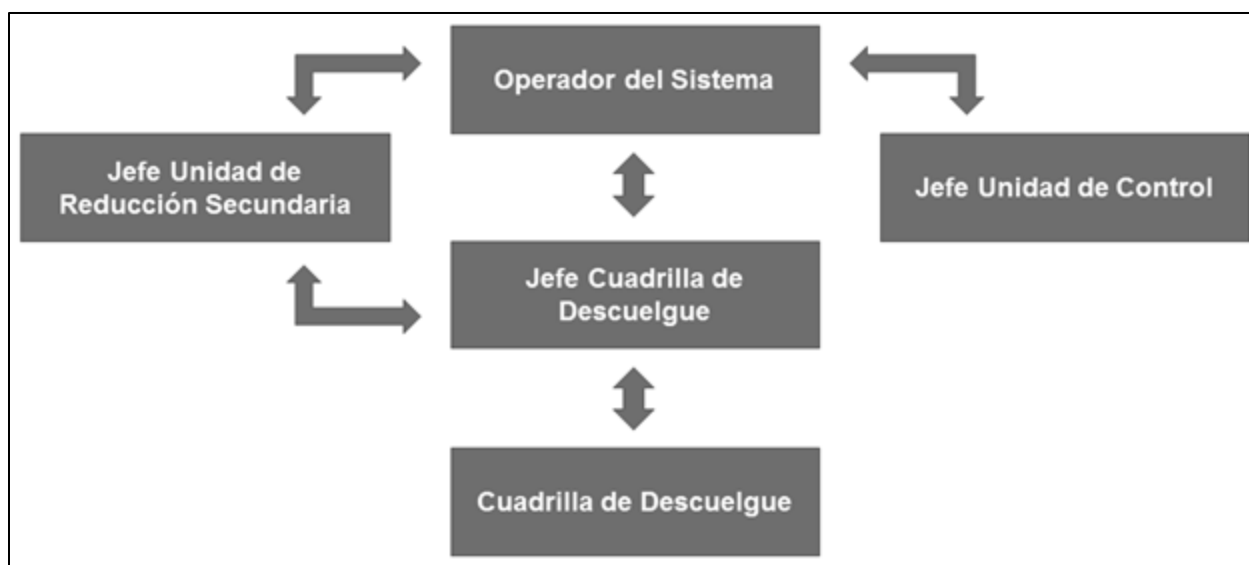


Ilustración 61. Flujograma de información en el proceso de descuelgue de zanjas.

### 8.1.2. Responsabilidades

A continuación, se detallan las responsabilidades de cada uno de los actores involucrados en el procedimiento de reducción de bolones.

- **Operador del Sistema**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma el descuelgue de puntos de extracción.
- Conocer las características de los sistemas de control y navegación de los equipos LHD en sus diferentes modalidades (manual, remoto y semiautónomo).
- Conocer la instrumentación de apoyo del equipo LHD y su utilización, tanto dentro del Área de Operación Autónoma, como en la Zona de Transición.

- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de descuelgue de los puntos de extracción.
- Inspeccionar la disponibilidad del punto de extracción a operar, poniendo especial atención en la presencia de colpas en el piso y mineral colgado en la batea. Esta inspección se debe desarrollar con la ayuda de cámaras de televisión dispuestas en el equipo LHD.
- Velar por la continuidad del ciclo productivo, procurando el cuidado de los equipos e instalaciones al interior del Área de Operación Autónoma,
- Coordinar con el Jefe de la Cuadrilla de Descuelgue el ingreso y salida del equipo descolgador al Área de Operación Autónoma, cuidando su integridad.
- Monitorear permanentemente el estado del sistema y la posición del equipo de descuelgue durante la permanencia en el Área de Operación Autónoma.

- **Jefe Unidad de Control**

- Conocer el presente procedimiento que norma el descuelgue de puntos de extracción.
- Conocer las características técnicas y operativas del sistema que gobierna los equipos LHD y su instrumentación de apoyo, tanto dentro del Área de Operación Autónoma, como en la Zona de Transición.
- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de descuelgue de los puntos de extracción.
- Asegurar el buen funcionamiento de la instrumentación que apoya el ingreso y salida segura del equipo de descuelgue al Área de Operación Autónoma, además de la instrumentación dispuesta al interior de esta área.

- **Jefe Unidad de Reducción Secundaria**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma el descuelgue de puntos de extracción. Además, dar a conocer, a manera de instrucción, el presente procedimiento al personal de la unidad a su cargo.
- Conocer las características operacionales del sistema, tanto del equipo LHD como de la instrumentación de apoyo dentro del Área de Operación Autónoma y la Zona de Transición.
- Velar por la integridad y protección de los equipos e instalaciones de la unidad de reducción secundaria.
- Llevar un registro actualizado de las operaciones de reducción secundaria realizadas durante el turno. Este registro debe incluir: Fecha y hora de operación, punto de extracción, operador a cargo, identificación del equipo reductor y comentarios.
- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de descuelgue de zanjas de producción.

- Coordinar con el Operador del Sistema el ingreso y salida del equipo reductor al Área de Operación Autónoma, cuidando su integridad.

- **Jefe Cuadrilla de Descuelgue**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma el descuelgue de puntos de extracción.
- Conocer las características operacionales del sistema, tanto del equipo LHD como de la instrumentación de apoyo dentro del Área de Operación Autónoma y la Zona de Transición.
- Instruir al personal de su cuadrilla sobre el funcionamiento del sistema LHD y su instrumentación de apoyo.
- Conocer e identificar las rutas y áreas de operación.
- Velar por la seguridad e integridad del equipo asociado a la actividad.
- Realizar un chequeo visual del equipo de descuelgue antes y después de cada faena. El chequeo debe considerar las principales componentes del equipo, incluyendo: Equipo de extinción de incendios, luces, bocina, frenos, baterías e instrumentos, funcionamiento de cámaras y brazo telescópico, estado y presión de neumáticos.
- Monitorear en forma permanente el funcionamiento del equipo reductor y detenerlo ante cualquier falla que pueda causar daños mayores.
- Informar a personal de mantención ante cualquier duda o anomalía mecánica y/o eléctrica del equipo.
- Conocer cada uno de los pasos y equipos necesarios para ejecutar el descuelgue de los puntos de extracción.
- Conocer, analizar y asociar los diferentes tipos de riesgos presentes en la actividad de descuelgue.

- **Cuadrilla de Descuelgue**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma el descuelgue de puntos de extracción.
- Conocer e identificar las rutas y áreas de operación.
- Velar por el cuidado del equipo asociado a la actividad.
- Acatar todas las indicaciones anunciadas por el jefe de cuadrilla.
- Conocer cada uno de los pasos y equipos necesarios para ejecutar el descuelgue de los puntos de extracción.
- Conocer, analizar y asociar los diferentes tipos de riesgos presentes en la actividad de descuelgue.



### 8.1.3. Procedimiento

En relación al descuelgue de zanjas de producción en la Mina Chuquicamata Subterránea, se propone aplicar el siguiente procedimiento:

- El operador del sistema deberá revisar las condiciones en que se encuentran los puntos de extracción designados por el Sistema de Asignación y Control de Tareas, por medio de las cámaras de televisión ubicadas en el equipo LHD. Esta revisión se debe realizar antes de cargar la pala del equipo.
- En caso de detectar una colgadura de mineral en la batea, el operador del sistema deberá ingresar este punto como no disponible o inhabilitado y de acuerdo a esta información el Sistema de Asignación y Control de Tareas re asignará una nueva misión a este equipo.
- En caso de que esta colgadura afecte el procedimiento normal de producción en la semi calle, entonces el operador comunicará esta situación al jefe de la Unidad de Reducción Secundaria, indicándole en forma exacta y precisa el área y el punto o los puntos que requieren reducción y la Zona de Transición a utilizar. En esta situación, el descuelgue de la zanja debe realizarse lo antes posible, dependiendo de la disponibilidad de los equipos de descuelgue.
- El operador del sistema no deberá ingresar el equipo LHD al punto de extracción si sospecha que este se encuentra colgado.
- El jefe de la Unidad de Reducción Secundaria deberá revisar la disponibilidad de descolgadores telescópicos y cuadrillas. De acuerdo a esto, y a la información entregada por el operador del sistema, deberá enviar el equipo de descuelgue al acceso del Área de Operación Autónoma que corresponda.
- Una vez ubicado en el acceso, el jefe de cuadrilla deberá comunicar su posición al operador del sistema, acordando la liberación del punto de ingreso.
- El operador del sistema deberá verificar que los sistemas de seguridad en el acceso al Área de Operación Autónoma se encuentren activos.
- Al momento de comunicar la posición del Descolgador Telescópico, el operador del sistema deberá ingresar los datos (punto de partida y llegada del descolgador telescópico) al Sistema de Control de Tráfico. Con ello, se reservará y asignará una ruta al equipo de apoyo, la cual será comunicada al operador del equipo reductor.
- El jefe de cuadrilla deberá verificar la liberación del punto de ingreso en el sistema e ingresar el descolgador telescópico a la Zona de Transición.
- El equipo de descuelgue no deberá ingresar a la Zona de Transición sin la debida autorización del operador del sistema.
- Una vez dentro de la Zona de Transición, el jefe de la cuadrilla de reducción se comunicará con el operador del sistema, indicando nuevamente su posición.
- El operador del sistema deberá verificar la posición del operador del descolgador telescópico con la ayuda de las cámaras de televisión dispuestas al interior de la Zona de Transición.

- Una vez verificada su posición, el operador del sistema deberá bloquear nuevamente el ingreso a la Zona de Transición, para luego liberar el acceso al Área de Operación Autónoma.
- El operador del sistema deberá asegurarse que la ruta asignada al descolgador telescópico se encuentra despejada y que el confinamiento por segmentos se encuentre activo. Esto debe revisarse a través del panel del sistema, donde se visualizará la posición de los equipos LHD.
- Al liberarse el acceso al Área de Operación, la cuadrilla de reducción secundaria conducirá al descolgador telescópico al punto o los puntos colgados a través de la ruta asignada por el Sistema de Control de Tráfico.
- Una vez que el descolgador telescópico ingresa a la calle, el operador del sistema deberá bloquear nuevamente el acceso al Área de Operación Autónoma desde la Zona de Transición.
- El descolgador telescópico no deberá seguir rutas alternativas diferentes a la asignada por el Sistema de Control de Tráfico en ningún momento de la faena.
- Luego, la cuadrilla de reducción secundaria debe realizar los descuelgues necesarios dentro de la calle de producción.
- Sólo una vez que exista seguridad que el sector a tronar está totalmente bloqueado, la cuadrilla podrá solicitar permiso para detonar al jefe de la Unidad de Reducción Secundaria y al operador del sistema.
- No se podrá hacer detonación sin la debida autorización del jefe de la Unidad de Reducción Secundaria y del operador del sistema.
- Si la operación de descuelgue no fue efectiva, se deberá verificar que los explosivos fueron detonados.
- Si la zanja aún permanece colgada luego de la operación de descuelgue se deberá esperar un mínimo de dos horas para volver a ingresar al punto de extracción y proceder a la colocación de una nueva carga.
- Luego de realizar el descuelgue de puntos, el descolgador telescópico deberá abandonar el Área de Operación Autónoma por la ruta asignada por el Sistema de Control de Tráfico.
- Una vez que la cuadrilla de reducción secundaria comienza a liberar los segmentos asignados por el sistema para la realización de los descuelgues, estos segmentos vuelven a estar disponibles para su utilización por parte de los equipos LHD. De acuerdo a esto, el operador del sistema deberá habilitar nuevamente el punto de extracción antes inhabilitado, ingresando esta información al Sistema de Asignación y Control de Tareas para que se pueda reprogramar la producción.
- El jefe de cuadrilla de reducción secundaria se deberá comunicar con el operador del sistema una vez que sitúe el equipo en el ingreso a la Zona de Transición desde el Área de Operación Autónoma, comunicándole la posición del equipo y acordando la liberación del acceso.

- El operador del sistema deberá desbloquear el acceso a la Zona de Transición, para luego comunicar la liberación de este acceso al jefe de la cuadrilla de reducción secundaria.
- Una vez que el descolgador telescópico se encuentre dentro de la Zona de Transición, el jefe de la cuadrilla de reducción secundaria se comunicará con el operador del sistema, indicando nuevamente la posición del equipo.
- El operador del sistema deberá verificar la posición del descolgador telescópico con la ayuda de las cámaras de televisión dispuestas al interior de la Zona de Transición.
- Una vez verificada la posición, el operador del sistema deberá bloquear el ingreso a la Zona de Transición desde el Área de Operación Autónoma.
- Luego, el operador del sistema deberá liberar la salida de la Zona de Transición.
- Una vez liberada la salida, el descolgador telescópico abandonará la Zona de Transición y el jefe de la cuadrilla avisará al operador del sistema una vez que el equipo se encuentre fuera.
- El operador del sistema deberá verificar que la Zona de Transición se encuentra despejada y procederá a bloquear el acceso de la Zona de Transición, aislando nuevamente el Área de Operación Autónoma.

### 8.1.4. Flujograma del Proceso

A continuación, se presenta el flujograma del proceso de descuelgue de zanjas, en donde PE: Punto de Extracción, DT: Descolgador Telescópico, ZT: Zona de Transición y AOA: Área de Operación Autónoma.

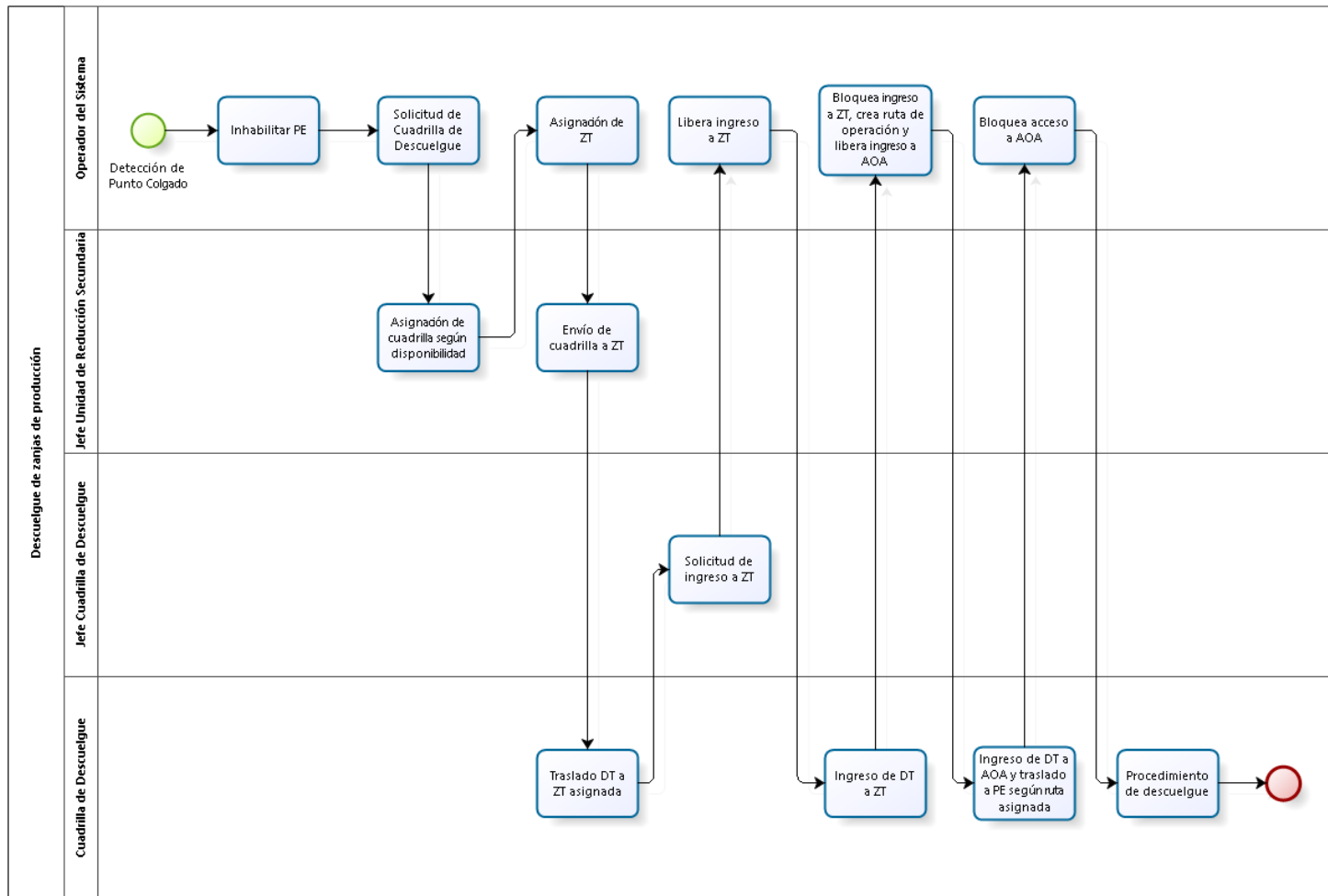


Ilustración 62. Flujograma procedimiento de descuelgue de zanjas de producción.

## **8.2. Reducción de Bolones en Puntos de Producción**

### **8.2.1. Descripción de la Actividad**

De acuerdo a la granulometría esperada en los puntos de extracción, se debe considerar la necesidad de reducción secundaria en los niveles de producción. La reducción secundaria consiste básicamente en la generación de un material de granulometría adecuada para su manejo, a partir de una colpa que por sus dimensiones no resulta adecuada para transportarla con el equipo LHD o que podría provocar la obstrucción del punto de vaciado.

Dados los análisis cualitativos y cuantitativos desarrollados en esta memoria, se propone utilizar un equipo llamado Martillo Móvil para la reducción de colpas en el punto de extracción, el cual disminuye la granulometría de las rocas impactándolas con un martillo perforador.

El procedimiento comienza con la detección de la presencia de una o más colpas en el piso de un punto de extracción. El operador del equipo LHD (operador del sistema) será quien haga la detección y determinará si es necesaria la reducción secundaria. Si así fuera el caso, el operador del sistema se comunicará con la Unidad de Reducción Secundaria que ingresará al área requerida y procederá a reducir el material con la ayuda de un Martillo Móvil.

El sistema de reducción consiste básicamente en impactar o percutir la colpa con un brazo tipo excavadora, fragmentando la roca en dos o más partes. Si es necesario, los fragmentos también pueden ser reducidos, quedando a criterio del operador cuantas veces se repite la operación hasta conseguir una fragmentación que facilite el transporte del mineral en el área de producción.

Una vez realizada esta operación, el equipo debe abandonar el Área de Operación Autónoma, dejando habilitado nuevamente el o los puntos de extracción.

Como se explica en la sección 3.7.2.2., el Sistema de Asignación y Control de Tareas será la plataforma en donde serán asignadas las misiones de cada equipo. Cada misión incluirá el destino y trayecto que utilizará el equipo en cuestión. Este trayecto, es determinado por un Sistema de Control de Tráfico, el cual cuenta con la capacidad de realizar confinamientos por segmentos de rutas, es decir, cada equipo transita por un tramo de ruta reservado por el Sistema de Control de Tráfico para dicho equipo. Luego de trasponer el tramo reservado, el segmento es liberado y vuelve a estar disponible para el tránsito del mismo u otro equipo, ya sea LHD o equipo de apoyo. En resumen, cuando un equipo LHD se aproxima al final del último segmento reservado, el Sistema de Control de Tráfico reserva el próximo segmento hasta que el destino final es alcanzado. De esta forma, el sistema evita eventuales interferencias que

podrían provocar accidentes en el Área de Operación Autónoma entre los equipos que circulan en dicho sector.

El sistema garantiza el ingreso seguro de los equipos de apoyo y el personal desde la Zona de Transición hasta el punto de extracción que presenta el problema. Por lo tanto, una vez asignada la tarea de reducción, el Sistema de Control de Tráfico asignará una ruta que será seguida por el operador del Martillo Móvil. Los segmentos confinados y reservados para esta actividad se irán liberando en la medida que el equipo de reducción avance por la ruta, y de esta forma, quedarán disponibles para la utilización de los equipos. El Área de Operación Autónoma deberá contar con señalética que indique al personal de la unidad de reducción secundaria la condición de accesibilidad de las calles, ayudando al correcto seguimiento de la ruta entregada por el sistema. Esta señalética será regulada por el Sistema de Seguridad de Accesos (ver sección 3.7.2.1.), que permitirá el ingreso y salida de los equipos desde y hacia el Área de Operación Autónoma.

El Martillo Móvil deberá contar con una zona de seguridad, que será entregada por el Sistema de Control de Tráfico, la cual limitará la operación del equipo LHD a cargar a una distancia mínima de dos puntos de extracción contiguos al punto donde se encuentra trabajando el equipo reductor. Si lo anterior no es posible, ya sea porque estos puntos no se encuentran habilitados o no existen puntos de extracción más allá de la zona de seguridad, entonces el equipo LHD deberá aguardar a que el Martillo Móvil concluya su labor de reducción secundaria y libere los segmentos reservados para él. Por esta razón, se recomienda desarrollar las tareas de reducción secundaria en los horarios de colación o cambio de turno.

Los actores involucrados en este procedimiento son: Operador del Sistema, Jefe de Unidad de Reducción Secundaria, Operador del Martillo Móvil y el Jefe de Unidad de Control (encargado de velar por el buen funcionamiento de la instrumentación que apoya el sistema). Ellos intercambiarán información en forma permanente durante el desarrollo de la actividad, de manera de realizar una tarea eficiente, solucionando cualquier problema que pudiera presentarse en el menor tiempo posible.



Ilustración 63. Flujo de información en el proceso de reducción de bolones.

## 8.2.2. Responsabilidades

A continuación, se detallan las responsabilidades de cada uno de los actores involucrados en el procedimiento de reducción de bolones.

- **Operador del Sistema**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma la reducción secundaria en los puntos de extracción.
- Conocer las características de los sistemas de control y navegación de los equipos LHD en sus diferentes modalidades (manual, remoto y semiautónomo).
- Conocer la instrumentación de apoyo del equipo LHD y su utilización, tanto dentro del Área de Operación Autónoma, como en la Zona de Transición.
- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de reducción secundaria en los puntos de extracción.
- Inspeccionar la disponibilidad del punto de extracción a operar, poniendo especial atención en la presencia de colpas en el piso y mineral colgado en la batea. Esta inspección se debe desarrollar con la ayuda de cámaras de televisión dispuestas en el equipo LHD.
- Velar por la continuidad del ciclo productivo, procurando el cuidado de los equipos e instalaciones al interior del Área de Operación Autónoma,
- Coordinar con el Operador del Martillo Móvil el ingreso y salida del equipo reductor al Área de Operación Autónoma, cuidando la seguridad del personal involucrado en esta operación.
- Monitorear permanentemente el estado del sistema, la posición del Operador del Martillo Móvil y su equipo durante la permanencia en el Área de Operación Autónoma.

- **Jefe Unidad de Control**

- Conocer el presente procedimiento que norma la reducción secundaria en el punto de extracción.
- Conocer las características técnicas y operativas del sistema que gobierna los equipos LHD y su instrumentación de apoyo, tanto dentro del Área de Operación Autónoma, como en la Zona de Transición.
- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de reducción secundaria en los puntos de extracción.
- Asegurar el buen funcionamiento de la instrumentación que apoya el ingreso y salida segura del operador del Martillo Móvil y su equipo al Área de

Operación Autónoma, además de la instrumentación dispuesta al interior de esta área.

- **Jefe Unidad de Reducción Secundaria**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma la reducción secundaria en el punto de extracción. Además, dar a conocer, a manera de instrucción, el presente procedimiento al personal de la unidad a su cargo.
- Conocer las características operacionales del sistema, tanto del equipo LHD como de la instrumentación de apoyo dentro del Área de Operación Autónoma y la Zona de Transición.
- Velar por la seguridad del personal a cargo y por la protección de los equipos e instalaciones de la unidad de reducción secundaria.
- Llevar un registro actualizado de las operaciones de reducción secundaria realizadas durante el turno. Este registro debe incluir: Fecha y hora de operación, punto de extracción, operador a cargo, identificación del equipo reductor y comentarios.
- Conocer las jerarquías de responsabilidades de los agentes que intervienen en la aplicación del procedimiento de reducción secundaria en los puntos de extracción.
- Coordinar con el Operador del Sistema el ingreso y salida del equipo reductor al Área de Operación Autónoma.

- **Operador Martillo Móvil**

- Conocer y aplicar el presente procedimiento que norma la reducción secundaria en el punto de extracción.
- Conocer las características operacionales del sistema, tanto del equipo LHD como de la instrumentación de apoyo dentro del Área de Operación Autónoma y la Zona de Transición.
- Conocer e identificar el sentido de las señaléticas dispuestas al interior del Área de Operación Autónoma.
- Permanecer alerta ante cualquier eventualidad y mantener contacto permanente con el operador del sistema durante la permanencia en el Área de Operación Autónoma, debido a las características de la actividad y la presencia de equipos operador en modo semiautónomo.
- Realizar un chequeo visual del equipo reductor antes y después de cada faena. El chequeo debe considerar las principales componentes del equipo, incluyendo: Equipo de extinción de incendios, luces, bocina, frenos, nivel de aceite de motor, hidráulico, transmisión, lubricación y de petróleo, tablero de control e instrumentos, estado del martillo, estado y presión de neumáticos.



- Informar a personal de mantención ante cualquier duda o anomalía mecánica y/o eléctrica del equipo.
- Conocer e identificar las rutas y áreas de operación.
- Conocer procedimientos de control y extinción de incendios de equipos móviles.
- Conocer procedimientos y normas de seguridad para el abastecimiento de petróleo de los equipos móviles.
- Monitorear en forma permanente el funcionamiento del equipo reductor y detenerlo ante cualquier falla que pueda causar daños mayores.

### **8.2.3. Procedimiento**

En relación a la reducción de bolones en el punto de extracción en la Mina Chuquicamata Subterránea, se propone aplicar el siguiente procedimiento:

- El operador del sistema deberá revisar las condiciones en que se encuentran los puntos de extracción designados por el Sistema de Asignación y Control de Tareas, por medio de las cámaras de televisión ubicadas en el equipo LHD. Esta revisión se debe realizar antes de cargar la pala del equipo.
- En caso de detectar una o más colpas con dimensiones que impiden su traslado en el equipo LHD o que podrían obstruir el punto de vaciado, el operador del sistema deberá ingresar este punto como no disponible o inhabilitado y de acuerdo a esta información el Sistema de Asignación y Control de Tareas re asignará una nueva misión a este equipo.
- En caso de que la colpa además dificulte el procedimiento normal de producción en la semi calle, entonces el operador comunicará esta situación al jefe de la Unidad de Reducción Secundaria, indicándole en forma exacta y precisa el área y el punto o los puntos que requieren reducción y la Zona de Transición a utilizar. En esta situación, la reducción de la colpa debe realizarse lo antes posible, dependiendo de la disponibilidad de los equipos de reducción.
- El jefe de la Unidad de Reducción Secundaria deberá revisar la disponibilidad de martillos móviles y operadores. De acuerdo a esto, y a la información entregada por el operador del sistema, deberá enviar al acceso del Área de Operación Autónoma que corresponda al operador del martillo móvil y su equipo.
- Una vez ubicado en el acceso, el operador del martillo móvil deberá descender del equipo y, mediante el teléfono dispuesto a un costado del ingreso, deberá comunicar su posición al operador del sistema, acordando la liberación del punto de ingreso.
- El operador del sistema deberá verificar que los sistemas de seguridad en el acceso al Área de Operación Autónoma se encuentren activos.
- Al momento de comunicar la posición del operador del martillo móvil, el operador del sistema deberá ingresar los datos (punto de partida y llegada del martillo móvil) al

Sistema de Control de Tráfico. Con ello, se reservará y asignará una ruta al equipo de apoyo, la cual será comunicada al operador del equipo reductor.

- El operador del martillo móvil deberá verificar la liberación del punto de ingreso en el panel de control e ingresar a la Zona de Transición.
- El operador del martillo móvil no deberá ingresar a la Zona de Transición sin la debida autorización del operador del sistema.
- Una vez dentro de la Zona de Transición, el operador del martillo móvil se comunicará con el operador del sistema, vía teléfono, indicando nuevamente su posición.
- El operador del sistema deberá verificar la posición del operador del martillo móvil y su equipo con la ayuda de las cámaras de televisión dispuestas al interior de la Zona de Transición.
- Una vez verificada su posición, el operador del sistema deberá bloquear nuevamente el ingreso a la Zona de Transición, para luego liberar el acceso al Área de Operación Autónoma.
- El operador del sistema deberá asegurarse que la ruta asignada al martillo móvil se encuentra despejada y que el confinamiento por segmentos se encuentre activo. Esto debe revisarse a través del panel del sistema, donde se visualizará la posición de los equipos LHD.
- Al liberarse el acceso al Área de Operación, el operador del martillo móvil se dirigirá al punto o los puntos de extracción que requieran reducción secundaria a través de la ruta asignada por el Sistema de Control de Tráfico.
- Una vez que el martillo móvil ingresa a la calle, el operador del sistema deberá bloquear nuevamente el acceso al Área de Operación Autónoma desde la Zona de Transición.
- El operador del martillo móvil no deberá seguir rutas alternativas diferentes a la asignada por el Sistema de Control de Tráfico en ningún momento de la faena.
- Luego, el operador del martillo móvil debe realizar las reducciones necesarias dentro de la calle de producción.
- El operador deberá asegurarse que la colpa se encuentre bien apoyada y en una posición estable, con el fin de evitar su desestabilización durante la percusión.
- Dependiendo de la posición y tamaño de las colpas, el operador deberá decidir la cantidad y ubicación de las percusiones, debiendo colocar el equipo en forma perpendicular a la superficie de la colpa para la percusión.
- Durante la operación, el operador del martillo móvil tendrá estrictamente prohibido introducir el cuerpo, o parte de él, más allá del límite de la visera de la zanja, debiendo operar sólo desde el equipo. El brazo del martillo móvil deberá penetrar como máximo hasta la visera del punto de extracción.
- Luego de realizar la reducción secundaria, el operador del martillo móvil deberá abandonar el Área de Operación Autónoma por la ruta asignada por el Sistema de Control de Tráfico.

- Una vez que el operador del martillo móvil comienza a liberar los segmentos asignados por el sistema para la realización de la reducción, estos segmentos vuelven a estar disponibles para su utilización por parte de los equipos LHD. De acuerdo a esto, el operador del sistema deberá habilitar nuevamente el punto de extracción antes inhabilitado, ingresando esta información al Sistema de Asignación y Control de Tareas para que se pueda reprogramar la producción.
- El operador del martillo móvil se deberá comunicar con el operador del sistema una vez que se sitúe en el ingreso a la Zona de Transición desde el Área de Operación Autónoma, comunicándole su posición y acordando la liberación del acceso.
- El operador del sistema deberá desbloquear el acceso a la Zona de Transición, para luego comunicar la liberación de este acceso al operador del martillo móvil.
- Una vez dentro de la Zona de Transición, el operador del martillo móvil se comunicará con el operador del sistema, vía teléfono, indicando nuevamente su posición.
- El operador del sistema deberá verificar la posición del operador del martillo móvil y su equipo con la ayuda de las cámaras de televisión dispuestas al interior de la Zona de Transición.
- Una vez verificada su posición, el operador del sistema deberá bloquear el ingreso a la Zona de Transición desde el Área de Operación Autónoma.
- Luego, el operador del sistema deberá liberar la salida de la Zona de Transición.
- Una vez liberada la salida, el operador del martillo móvil abandonará el área junto a su equipo, dando aviso al operador del sistema una vez fuera.
- El operador del sistema deberá verificar que la Zona de Transición se encuentra despejada y procederá a bloquear el acceso de la Zona de Transición, aislando nuevamente el Área de Operación Autónoma.

### 8.2.4. Flujograma del Proceso

A continuación, se presenta el flujograma del proceso de reducción de bolones, en donde PE: Punto de Extracción, MM: Martillo Móvil, ZT: Zona de Transición y AOA: Área de Operación Autónoma.

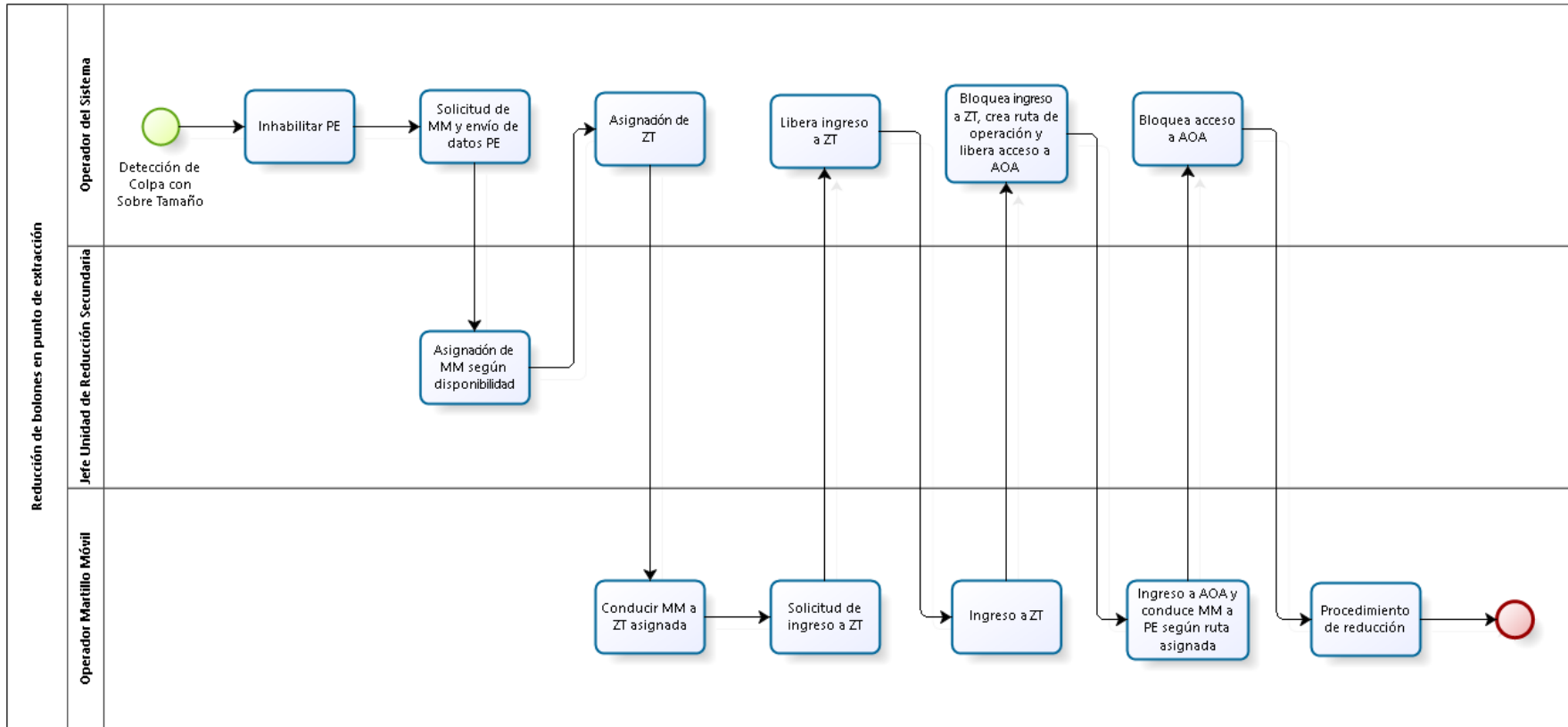


Ilustración 64. Flujograma procedimiento de reducción de bolones en punto de extracción.

## 9. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los análisis iniciales desarrollados en este trabajo, se observa que, de las interferencias consideradas, cerca de un 36% de las pérdidas productivas que ocurrirán en el nivel de producción se relacionan a problemas en el flujo de mineral, esto es, trabamiento de bateas y aparición de bolones con sobre tamaño en el punto de extracción. Esta información encasilla a las actividades de reducción secundaria como un ítem crítico dentro del proceso productivo.

Al mismo tiempo, se observa que estos procesos son altamente riesgosos para el personal a cargo, ya que generalmente los procedimientos requieren de la presencia de personal dentro de los puntos de extracción. En relación a esto, según estadísticas de SERNAGEOMIN, de los accidentes fatales ocurridos en minas chilenas durante el periodo 2011-2014, alrededor de un 19% corresponde a colapsos dentro de una galería subterránea. Estos datos fomentan la búsqueda de tecnologías y procedimientos más seguros para dar solución a los problemas de flujo de mineral.

Por otro lado, al observar las estadísticas de reducción secundaria de otras minas subterráneas de CODELCO, es posible deducir que los primeros metros de la columna de extracción, que corresponden a mineral de fragmentación primaria, causan una mayor cantidad de interrupciones en el flujo de mineral, siendo la etapa de extracción que muestra una mayor necesidad o exigencia de reducción secundaria.

En cuanto a la recopilación de alternativas, se observa que existen distintos equipos y procedimientos que han sido probados en otras minas subterráneas de CODELCO en los procesos de reducción secundaria. Se recomienda considerar estas opciones al momento de decidir que procedimiento será usado en la Mina Chuquicamata Subterránea, aprovechando la experiencia que han tenido otras divisiones de la empresa. Al mismo tiempo, es importante considerar otras alternativas que han comenzado a ser ofrecidas en el mercado, ya que a pesar de que no son utilizadas en forma masiva en la industria minera, presentan altos niveles de seguridad y eficiencia en los procesos analizados. En relación a esto, en este trabajo se lograron reunir 6 alternativas para cada procedimiento de reducción secundaria.

Es importante destacar que a lo largo de este trabajo fue posible establecer una metodología de análisis y comparación de equipos y procedimientos mineros, compuesta por dos etapas de evaluación, una cualitativa y otra cuantitativa, la cual fue efectiva en la selección de alternativas para los procesos de reducción secundaria. Para ello, en una primera etapa se utilizó un modelo de puntuación, mientras que en la etapa final se utilizaron indicadores económicos.

De la etapa cualitativa es posible concluir que, según los expertos en el tema, la seguridad del personal, equipos e infraestructura, además de las interferencias

provocadas en las operaciones productivas, corresponden a los criterios de mayor importancia al momento de evaluar y decidir cuáles serán los procedimientos a utilizar en las actividades de reducción secundaria.

Con los resultados de la evaluación económica, fue posible desarrollar una propuesta de diseño para los procesos de reducción secundaria que considera la utilización de equipos de descuelgue telescópicos para destrabar zanjas de producción y martillos móviles para reducir colpas con sobre tamaño en los puntos de extracción. Con estas opciones, el descuelgue de bateas tendría un costo estimado de 14,02 [cUS\$/kton], mientras que la reducción de bolones costaría 4,09 [cUS\$/kton]. En resumen, las operaciones de reducción secundaria en los primeros meses de extracción de la Mina Chuquicamata Subterránea tendrían un costo estimado de 18,11 [cUS\$/kton], monto similar al que se gasta en algunos sectores de División El Teniente. Estas alternativas fueron elegidas principalmente por su bajo costo de operación y por los niveles de seguridad que brindan al personal y a la infraestructura.

En cuanto a los procedimientos de reducción secundaria planteados en este trabajo, independiente de los equipos que finalmente se decidan utilizar en la Mina Chuquicamata Subterránea, se recomienda usarlos como base para el desarrollo de los procedimientos definitivos, pues en ellos se propone un modo de proceder considerando los sistemas de seguridad y las áreas de operación autónoma que existirán en la mina. Principalmente se recomienda llevar una gestión en línea de la información del estado de los puntos de extracción, para permitir un uso eficiente de los recursos humanos y técnicos, y sectorizar las calles destinadas a operaciones en donde coexistan equipos LHD y equipos de apoyo.

Finalmente, para futuras evaluaciones de equipos de reducción secundaria, es importante considerar la variabilidad de la fragmentación de la roca en el tiempo y el error de los modelos de fragmentación, por lo mismo, es recomendable incluir cualquier información adicional sobre la frecuencia de colpas con sobre tamaño y colgaduras. En este sentido, también es recomendable promover una campaña de mediciones de fragmentación que sea constante en el tiempo, con el objetivo de validar los modelos y obtener datos más precisos.

Al mismo tiempo, para trabajos similares, en caso de tener mayores recursos para investigación, se recomienda trabajar con datos de productividad más precisos para cada alternativa, ya que son antecedentes sumamente relevantes para el desarrollo de simulaciones y evaluaciones económicas más rigurosas.

## 10. GLOSARIO

### B

- Brocal: Terminación fortificada de la rotura de un pique con una galería horizontal.
- Buitra: Brocal superior de un pique concretado y emparrillado, diseñado para la reducción de colpas o bolones provenientes del punto de extracción.

### C

- Cachorro: Perforación de pequeña longitud que se realiza en una roca de mayor tamaño (bolón) para introducir un explosivo y que la fragmente en un tamaño adecuado para el carguío y transporte.
- Calle: Galería de tráfico y vaciado de mineral de las palas LHD.
- Carguío: Una de las etapas que forma parte del proceso de explotación. Se refiere específicamente a la carga de material mineralizado del yacimiento.
- Cartilla de Tiraje: Planilla que contiene las cantidades de material que se deben cargar desde cada punto de extracción y la cantidad de material que debe ser descargado en cada punto de vaciado en un periodo de tiempo determinado, generalmente en un turno de trabajo.
- Chancado: Proceso por el cual el mineral es triturado, para disminuir su tamaño.
- Colpa: Trozo de roca de cierto tamaño que es necesario reducir para hacerla pasar por las parrillas.
- Colgadura: Rocas con sobre tamaño que bloquean el flujo normal de mineral por chimeneas, piques o zanjas.
- Cuadrilla: Conjunto de dos o más trabajadores encargados de realizar una faena determinada.

### D

- Diésel: Se refiere al combustible, diésel es un sinónimo de gasóleo. También puede referirse al motor de combustión interna de alta compresión que funciona con aceites pesados o con gasóleo.
- Disponibilidad: Medida que nos indica cuánto tiempo está utilizable un equipo o sistema operativo respecto de las horas nominales (totales).
- Dozer: Máquina o equipo móvil utilizado principalmente en construcción y minería para el movimiento de tierra, excavación o empuje de otras máquinas.

### E

- Estéril: Se refiere al material que no tiene cobre (su ley está bajo la ley de corte), el cual es enviado a botaderos.

## F

- Fragmentación in situ: Corresponde a la fragmentación intrínseca de los bloques de un macizo, los cuales no han sido alterados por socavación.
- Fragmentación Primaria: Corresponde a la fragmentación del material que ha comenzado a ser socavado. Particularmente, la roca que se encuentra inmediatamente arriba de la socavación que comienza a fracturarse debido a la redistribución de los esfuerzos en el macizo rocoso.
- Fragmentación Secundaria: Corresponde a la fragmentación del material una vez que los bloques comienzan a desprenderse y caen por gravedad hasta los puntos de extracción. En general, esta fragmentación es de menor granulometría que la fragmentación primaria.

## G

- Galería: Excavación hecha en la roca, normalmente horizontal o con pendiente suave, utilizadas para el tránsito o transporte de mineral.
- Granulometría: Se refiere al tamaño de los granos que forman una mezcla.

## H

- Hundimiento por bloques: Sistema de explotación de minas subterráneas en que la extracción se realiza gracias a la fuerza de gravedad. Consiste en dividir el cuerpo mineralizado en bloques rectangulares y quebrar cada uno de estos en forma separada siguiendo una secuencia, mediante explosivos colocados en su base. De esta forma, el bloque se rompe en fragmentos que son retirados desde su parte inferior a través del nivel de producción y enviados a través de piques y/o galerías hasta llegar al nivel de transporte desde donde son llevadas al proceso de chancado.

## J

- Jumbos: Equipos mecanizados de perforación, utilizados principalmente en los métodos de explotación subterráneos (horizontal y vertical). Han permitido, por una parte, aumentar la productividad de perforación, ya que se incorporan más de dos perforadoras que pueden trabajar en forma simultánea, y por otra, la eficiencia, ya que los sistemas automatizados pueden controlar la rotación, percusión, barrido y avance.



## L

- Ley de cobre: Es el porcentaje de cobre que encierra una determinada muestra. Cuando se habla de una ley del 1% significa que en cada 100 kilogramos de roca mineralizada hay 1 kilogramo de cobre puro.
- Ley de corte: Corresponde a la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído con beneficio económico. Todo el material que tiene un contenido de cobre sobre la ley de corte se clasifica como mineral y es enviado a la planta para ser procesado, en tanto que el resto, que tiene un contenido de cobre más bajo, se considera estéril o lastre y debe ser enviado a botaderos.
- Ley de un yacimiento: La distribución de una mineralización dentro de un yacimiento no es uniforme, existiendo zonas con menas de análogas o idénticas mineralogías, pero distintas leyes. La ley de un yacimiento es la media ponderada de las leyes correspondientes a las menas de las distintas zonas del yacimiento.
- LHD (Load Haul Dump): Equipo de carguío frontal de bajo perfil. Consiste en un equipo móvil que posee una pala de gran capacidad, diseñado especialmente para minería subterránea. Será usado en la carga, transporte y descarga de mineral.

## M

- Macro bloque: Unidad básica de explotación en yacimientos explotados por Hundimiento de Bloques, donde se realizan las etapas de preparación, socavación y producción independientemente de lo que sucede en otros Macro Bloques de la mina. En general, estos comprenden áreas de entre 20.000 a 55.000 m<sup>2</sup> y son separados por pilares destinados a mantener la estabilidad durante el desarrollo de las distintas actividades de explotación.
- Malla de extracción: Disposición geométrica de los puntos por donde se extrae el mineral en el nivel de producción de un sistema de block caving.

## N

- Nivel: Conjunto de galerías horizontales con todas las instalaciones adecuadas de aire, agua, energía eléctrica y comunicaciones con distintos fines, como, por ejemplo: El de hundimiento donde se hace la tronadura basal de los bloques, el nivel de producción, de ventilación, traspaso y transporte. Los niveles se comunican entre sí por piques principales, o bien por rampas.

## O

- Operador: Persona encargada de operar una maquina LHD o Jumbo, o cualquier otro equipo autopropulsado, fijo o semiestacionario.

## P

- Parrilla: Conjunto de hierro dispuesto en forma de reja sobre la buitra para clasificar el tamaño de las colpas y reducirlas en el mismo sitio.
- Piques: Son los túneles verticales que comunican los niveles de hundimiento con los de producción y de transporte al interior de la mina subterránea.
- Planchón: Material rocoso que cuelga dentro de la mina y que está sobrepuesto en el techo de una galería. Un planchón tiene un peso superior a 500 kilogramos.
- Punto de extracción: Lugar fortificado desde donde se extrae el mineral.
- Punto de vaciado: Brocal fortificado donde se vacía el mineral con palas LHD.

## R

- Rampa: Galería construida con una inclinación que une un nivel con otro para el acceso de equipos o peatones.
- Recurso: Concentraciones naturales de elementos metálicos, no metálicos y minerales, así como rocas que forman parte de la corteza terrestre en forma tal que puedan ser potencialmente extraídos y procesados de manera económicamente rentable, dados los conocimientos científico-tecnológicos existentes.
- Reserva: Recurso identificado de ubicación, calidad y cantidad conocida a través de evidencia geológica y apoyada con mediciones de ingeniería, el cual puede extraerse con beneficio económico.

## T

- Tronadura: La tronadura es la fragmentación instantánea que se produce en la roca por efecto de la detonación de explosivos depositados en su interior. La tronadura primaria es la que se realiza directamente en el macizo rocoso para separar y fragmentar parte de éste, ya sea en minas a rajo abierto o subterráneas, en tanto que se denomina tronadura secundaria a la que se realiza sobre fragmentos de gran tamaño o colpas ya separados del macizo, de manera de lograr su reducción al tamaño adecuado para ser cargadas y transportadas a la planta.

## U

- Utilización: Definida como el tiempo en que el equipo realiza su función básica de diseño, se mide como la razón entre las horas efectivamente trabajadas y las horas nominales (totales).

## V

- Visera: Parte superior del punto de extracción, dentro de la zanja de producción, la cual se encuentra al mismo nivel del techo de la galería colindante.

## Y

- Yacimiento: Masa de roca localizada en la corteza terrestre que contiene uno a varios minerales en cantidad suficiente como para ser extraídos con beneficio económico.

## Z

- Zanja: En minería, se entiende como un túnel vertical o de gran pendiente, ubicado en el nivel de producción, el cuál une el nivel de hundimiento con el nivel de producción. En la parte inferior, se conecta con uno o dos puntos de extracción.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- BCTEC & REDCO. (2016). *Recomendación de diseño de malla de extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea*. Santiago: s.e.
- BCTEC. (2016). *Análisis geometría de bateas para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea*. Santiago: s.e.
- Brady, B., & Brown, E. (2004). *Rock mechanics for underground mining. Third edition*. Springer.
- Castilla, J., Bernaola, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid.
- Caterpillar Inc. (2015). *Especificaciones de diseño funcional. Propuesta para pruebas Alfa de Codelco*. Santiago: s.e.
- CEOP Consulting . (2013). *Informe de análisis de procesos y subprocesos, identificando sus interrelaciones, variables y parámetros claves*. Santiago: s.e.
- Cerda, H., Sanchez, J., & Abarca, L. (2012). *Innovación en CODELCO*. Obtenido de CODELCO Web Site:  
<https://www.codelco.com/flipbook/innovacion/codelcodigital6/PDF/EXPOSICION/30p.pdf>
- IM2 Consulting. (2006). *Levantamiento y evaluación de prácticas de reducción secundaria*. Santiago: s.e.
- Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago: s.e.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining – the state of the art. *The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 279-293.
- Maass, S. (2013). *Alternativas tecnológicas para descuelgue de zanjas*. Santiago.
- MacLean Engineering. (2015). *Productos: Facilitación del flujo de mineral*. Obtenido de MacLean web site: <http://www.macleaneengineering.com/es-es/productos/mineria/facilitacion-del-flujo-de-mineral>
- Miranda, N. (2009). *Tecnologías de detección de interferencias y manejo operacional de control de tráfico y accesos*. Santiago: s.e.

- Norte Minero. (9 de Abril de 2001). Obtenido de Página Web de El Mercurio de Antofagasta:  
<http://www.mercurioantofagasta.cl/site/apg/minero/pags/20010413163613.html>
- Oyarzún, F. (2008). *Sitios y pueblos mineros de Chile: patrimonio histórico, científico y turístico*.
- Paraszczak, J., Svedlund, E., Fytas, K., & Laflamme, M. (2014). Electrification of loaders and trucks - A step towards more sustainable underground mining. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. España: Renewable Energy and Power Quality Journal.
- Pozo, R. (2003). *Procedimientos de operación LHD semiautónomos*. Santiago.
- RDH. (2015). *In Stock Equipment: Jumbos/Rockbolters*. Obtenido de RDH Mining Equipmes Web site: <http://www.rdhminingequipment.com/product-category/in-stock/jumbosrockbolters/>
- Roche, H., & Vejo, C. (2005). *Análisis multicriterio en la toma de decisiones*. Montevideo: s.e.
- Schiazano, R. (s.f.). *Gestión de proyectos: Procedimiento de selección – Matriz de decisión. Aplicación a selección de ideas en proyectos de máquinas*. Buenos Aires: s.e.
- SERNAGEOMIN. (2013). *Guía N°3 de operación para la pequeña minería - Manejo de Explosivos*. Santiago: s.e.
- Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, CODELCO. (2009). *Estudio de prefactibilidad. Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Principales Decisiones*. Santiago: s.e.
- Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO. (2013). Capítulo 17: Costos de Operación. En C. Vicepresidencia de Proyectos, *API - Explotación Chuquicamata Subterránea*. Santiago: s.e.
- Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO. (2013). *Filosofía operacional integrada PMCHS*. Santiago: s.e.

## 12. ANEXOS

### Anexo A. Tiempos de Proceso y Productividad Equipos LHD.

Las siguientes tablas contienen los cálculos de productividad de equipos de carguío.

Tabla 73. Tiempos proceso de extracción del equipo LHD. Fuente: Pruebas Alfa, Caterpillar Inc.

Proceso	Tiempo (min)
Carga	0,5
Transporte (ida)	1,1
Descarga	0,3
Transporte (vuelta)	1,0
Total	2,9

Con estos tiempos es posible calcular la productividad de un equipo LHD, considerando un mineral con una densidad de 1,61 [m<sup>3</sup>/ton], un cucharón de 9 yd<sup>3</sup> y un porcentaje de llenado de un 90%.

Tabla 74. Productividad equipo LHD.

Parámetro	Unidad	Valor
Capacidad balde	Ton	10,3
Ciclos por hora	Ciclos/hr	20,7
Productividad	Ton/hr	213,7

## **Anexo B. Producción por Semi Calle de Extracción.**

Las siguientes tablas contienen los cálculos de productividad de semi calles de extracción. Para ello se consideraron 18 puntos de extracción por semi calle.

Tabla 75. Productividad de semi calles.

Parámetro	Unidad	Valor
Productividad punto de extracción	Ton/hora-punto	11,87
Productividad semi calle	Ton/hora-semi calle	213,72
Productividad diaria semi calle	Ton/día-semi calle	4.274,48

## Anexo C. Matriz de Comparación de Pares.

La siguiente tabla corresponde a la matriz de comparación de pares usada en la selección de alternativas.

Tabla 76. Matriz de comparación de pares para evaluar y cálculo de ponderadores.

	Seguridad del personal	Seguridad del sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua	Suma	Ponderador
Riesgo para el personal	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9,0	23,7%
Riesgo para el sistema	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	6,0	15,8%
Uso de tecnologías de apoyo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0%
Eficiencia	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	3,0	7,9%
Costos	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3,0	7,9%
Automatización	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	3,0	7,9%
Nivel de desarrollo	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	3,0	7,9%
Simplicidad de operación	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2,0	5,3%
Interferencia con el resto de las operaciones	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8,0	21,1%
Compatibilidad con minería continua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1,0	2,6%



## Anexo D. Evaluación de Alternativas de Reducción Secundaria.

Las siguientes tablas corresponden a las evaluaciones hechas por expertos en relación a las alternativas de reducción secundaria.

Tabla 77. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH.

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Cargas propulsadas por cañón	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cañón de agua	9	9	8	9	8	8	8	9	8	8
Descolgador telescópico	8	9	8	5	5	8	6	5	8	6
Descuelgue manual	3	9	1	5	7	1	8	5	3	6
Descuelgue manual con bolsa expansiva	5	9	1	5	7	1	8	5	3	6
Jumbo de descuelgue	7	9	3	5	5	3	8	5	3	1

Tabla 78. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ricardo Pfeifer, Ingeniero Senior de Minería, HATCH.

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Dumbo cachorrero	7	9	5	8	6	5	8	5	5	3
Equipo hidrofracturador	9	9	5	6	6	5	8	8	8	3
Jumbo cachorrero	7	9	5	8	6	5	8	5	5	3
Jumbo fracturador con cuña hidráulica	9	9	5	6	6	5	8	8	8	3
Martillo móvil	9	9	5	8	6	5	8	9	9	3
Parche explosivo	7	9	5	4	6	5	8	5	5	3

Tabla 79. Evaluación de alternativas de descuelgue. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO.

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Cargas propulsadas por cañón	9	6	4	1	1	1	1	1	2	1
Cañón de agua	2	2	8	4	1	1	4	9	1	1
Descolgador telescópico	2	6	4	3	3	8	5	6	8	8
Descuelgue manual	10	10	8	4	2	1	9	9	10	1
Descuelgue manual con bolsa expansiva	10	10	8	4	2	1	9	9	10	1
Jumbo de descuelgue	8	10	2	8	6	3	6	9	10	1

**Tabla 80. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Ernesto Arancibia, Ingeniero Senior de Planificación Minera, CODELCO.**

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Dumbo cachorrero	2	2	8	9	2	2	3	9	10	4
Equipo hidrofracturador	1	1	2	6	4	4	8	8	1	1
Jumbo cachorrero	4	4	9	9	3	1	9	9	10	10
Jumbo fracturador con cuña hidráulica	1	1	10	4	1	4	2	9	1	10
Martillo móvil	1	1	10	4	1	4	2	9	1	10
Parche explosivo	5	8	10	3	6	8	6	10	10	1

**Tabla 81. Evaluación de alternativas de descuelgue. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO.**

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Cargas propulsadas por cañón	4	3	9	2	10	6	5	7	2	2
Cañón de agua	8	8	6	5	7	8	7	9	9	8
Descolgador telescópico	10	6	4	9	5	9	3	7	2	8
Descuelgue manual	3	6	5	6	7	3	10	5	2	2
Descuelgue manual con bolsa expansiva	3	6	6	6	6	3	2	5	2	2
Jumbo de descuelgue	8	6	8	8	3	8	9	9	2	5

**Tabla 82. Evaluación de alternativas de reducción de bolones. Pablo Paredes, Especialista de Ingeniería y Procesos, CODELCO.**

Alternativa	Seguridad del personal	Seguridad para el sistema	Uso de tecnologías de apoyo	Eficiencia	Costos	Automatización	Nivel de desarrollo	Simplicidad de operación	Interferencia con el resto de las operaciones	Compatibilidad con minería continua
Dumbo cachorrero	5	4	8	8	7	6	3	9	2	6
Equipo hidrofracturador	4	4	8	6	6	6	5	7	5	4
Jumbo cachorrero	5	4	8	8	5	6	10	9	2	6
Jumbo fracturador con cuña hidráulica	9	7	8	7	6	6	6	9	7	6
Martillo móvil	9	7	8	8	7	6	10	10	7	6
Parche explosivo	5	4	6	8	10	3	10	7	2	1

## Anexo E. Frecuencia Estimada de Colgadas.

Para obtener la frecuencia de ocurrencia de colgadas se utilizaron datos registrados en el experimento realizado por BCTEC. Los datos utilizados correspondían a la masa neta de mineral extraída entre cada colgada. Los datos de frecuencia fueron corregidos, pues el experimento consideraba equipos LHD de 14 yd<sup>3</sup>, mientras que en el PMCHS se usarán equipos LHD de 9 yd<sup>3</sup>. La escala de corrección utilizada fue la siguiente:

Tabla 83. Corrección de datos experimentales.

Equipo	Volumen [yd <sup>3</sup> ]	Masa Experimental [grs]	Masa Real [ton]
LHD Experimental	14	108,5	13,8
LHD PMCHS	9	72,8	9,2

Con ello, se obtuvo un nuevo histograma de frecuencia de colgadas, el cual se presenta a continuación. El eje horizontal representa la cantidad de ciclos productivos entre dos colgadas. Un ciclo corresponde a la carga, traslado y descarga del mineral.

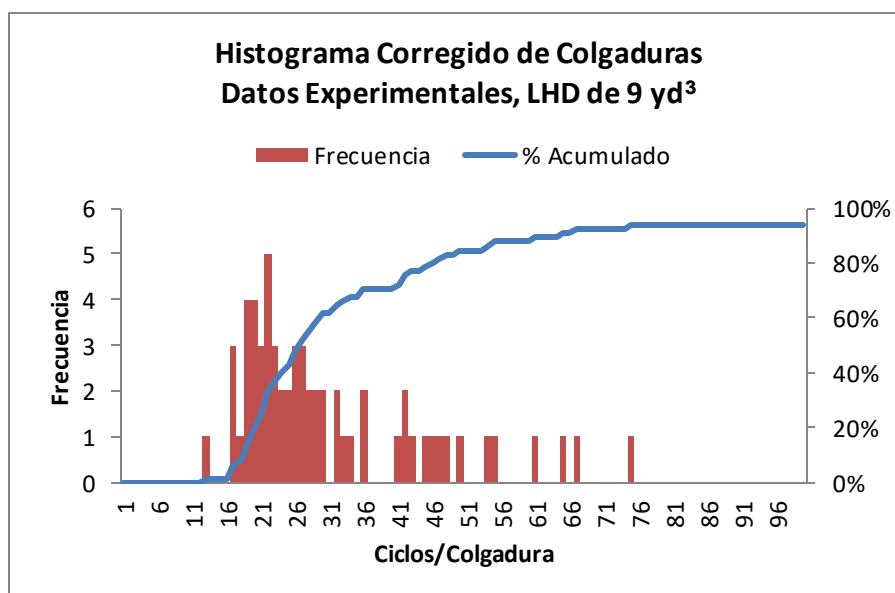


Ilustración 65. Histograma corregido de colgadas en PMCHS, datos experimentales.

Estos datos fueron analizados con el software EasyFit Versión 5.5, para encontrar la curva de probabilidad que mejor se ajusta a los datos experimentales. Con ello, se concluyó que la distribución Burr de 3 parámetros (ver Anexo G) es la que obtiene una mejor bondad de ajuste, no siendo rechazada por los test Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ni Chi-Cuadrado. Las siguientes gráficas muestran el ajuste de las curvas a los datos experimentales.

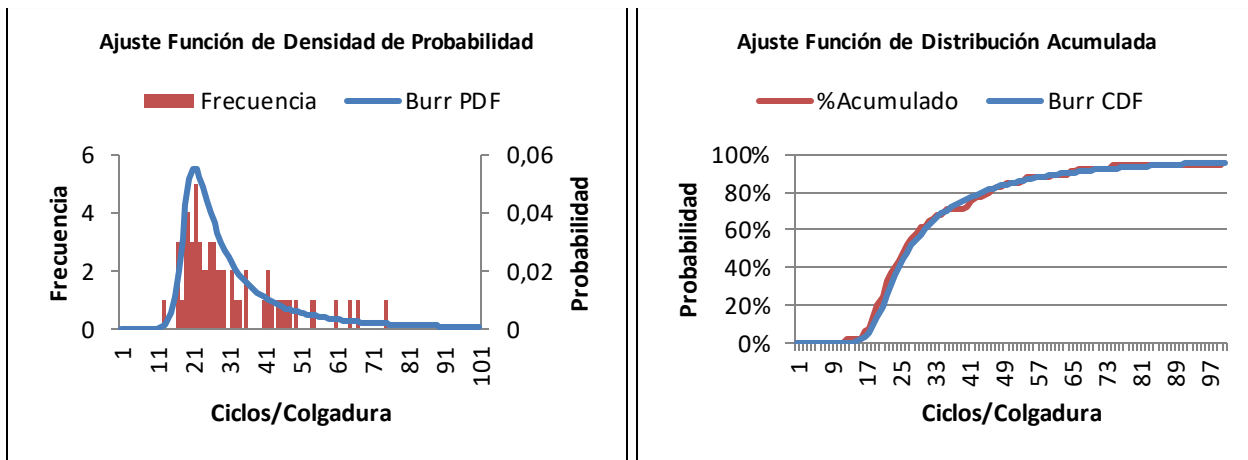


Ilustración 66. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de colgaduras.

Finalmente, los 3 parámetros de ajuste de la distribución Burr con los datos son los siguientes:

Tabla 84. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras.

Parámetro	Valor
k	0,160
$\alpha$	11,543
$\beta$	18,262

## Anexo F. Frecuencia Estimada de Sobre Tamaños.

Al igual que en el caso de las colgaduras, para estimar y obtener la frecuencia de sobre tamaños se usaron datos registrados en el experimento de BCTEC. En este caso, los datos también fueron corregidos y analizados, pues no existía mayor estudio sobre la ocurrencia de sobre tamaños. Tras la corrección y análisis de datos, se obtuvo el siguiente histograma de sobre tamaños en relación a la cantidad de ciclos del equipo LHD.

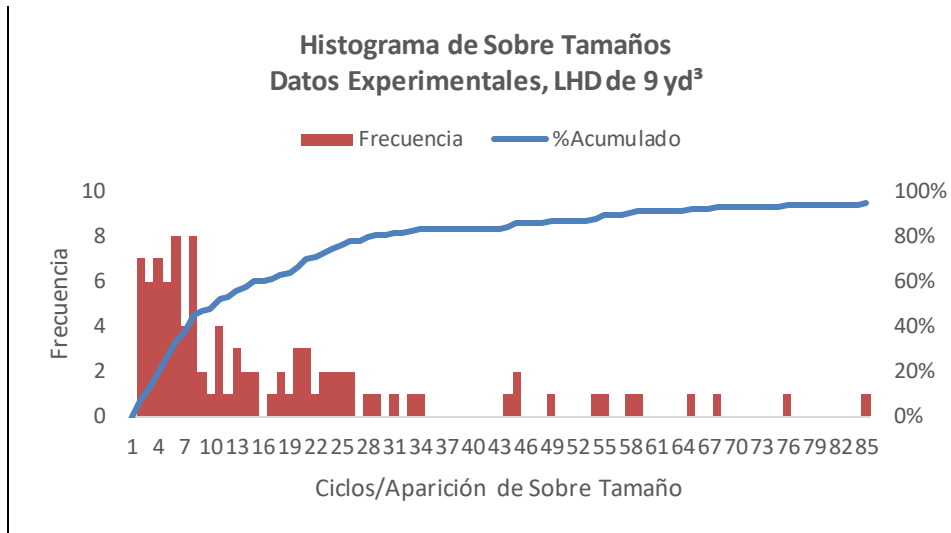


Ilustración 67. Histograma corregido de colgaduras en PMCHS, datos experimentales.

Estos datos fueron analizados con el software EasyFit Versión 5.5, para encontrar la curva de probabilidad que mejor se ajusta a los datos experimentales. Con ello, se concluyó que la distribución Burr de 4 parámetros (ver Anexo G) es la que obtiene una mejor bondad de ajuste, no siendo rechazada por los test Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ni Chi-Cuadrado. Las siguientes gráficas muestran el ajuste de las curvas a los datos experimentales.

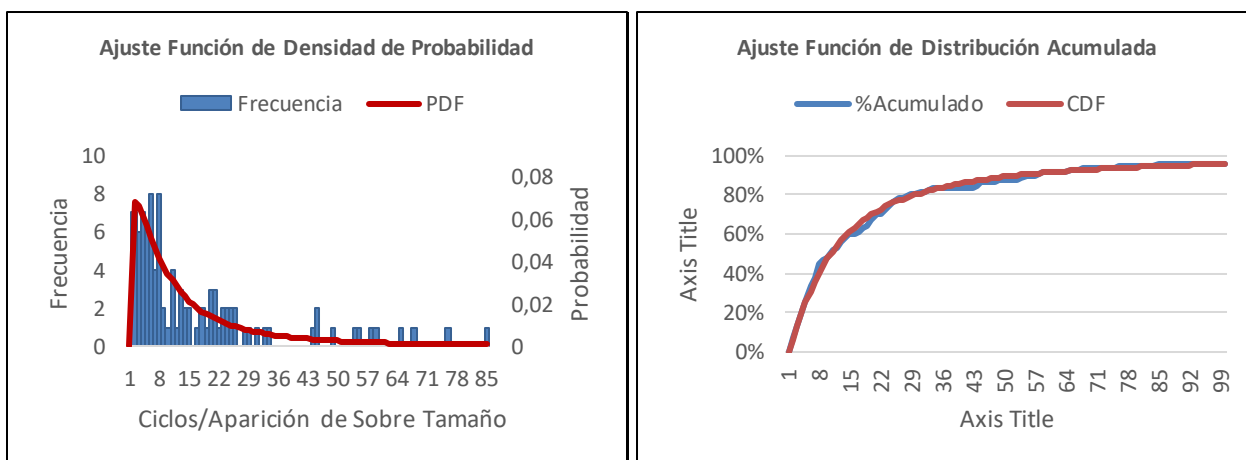


Ilustración 68. Ajustes de distribución Burr con datos experimentales de frecuencia de sobre tamaños.

Finalmente, los 4 parámetros de ajuste de la distribución Burr con los datos son los siguientes:

Tabla 85. Parámetros de ajuste Distribución Burr con datos de frecuencia de colgaduras.

Parámetro	Valor
k	1,266
$\alpha$	1,160
$\beta$	12,837
$\gamma$	1

## Anexo G. Distribución Burr.

La distribución Burr Tipo XII o simplemente distribución Burr es una distribución continua de probabilidad. Existen dos versiones de ella, una con 3 parámetros y otra con 4. A continuación se presenta sus parámetros, dominio, función de densidad (PDF) y función de distribución acumulada (CDF).

### Parámetros

$k$  – Parámetro continuo de forma ( $k > 0$ )

$\alpha$  – Parámetro continuo de forma ( $\alpha > 0$ )

$\beta$  – Parámetro continuo de escala ( $\beta > 0$ )

$\gamma$  – Parámetro continuo de localización ( $\gamma \equiv 0$  cuando la distribución es de 3 parámetros)

### Dominio

$\gamma \leq x < +\infty$

### Función de Densidad

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^{\alpha - 1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k + 1}}$$

### Función de Distribución Acumulada

$$F(x) = 1 - \left(1 + \left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{-k}$$

## **Anexo H. Cotización Equipos MacLean.**

A continuación, se presentan los precios cotizados de equipos de reducción secundaria de la empresa canadiense MacLean. Estos datos fueron entregados por Tony Caron, Gerente General de MacLean en Latinoamérica y Quebec.

Tabla 86. Cotización de equipos de reducción secundaria MacLean.

Equipo	Modelo	Precio de compra EXW (USD\$)
Jumbo Cachorrero	BH2 Blockholer	459,290.00
Cañón de Agua	WC-3 Water Cannon	439,790.00
Martillo Móvil	RB3 Hyd. Breaker	534,290.00
Jumbo de Descuelgue	MR12	940,000.00