

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA MINERÍA CONTINUA Y SU
POTENCIAL APLICABILIDAD PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK
CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FABIÁN ANÍBAL MARTÍNEZ AGUILERA

PROFESOR GUÍA:

RAÚL CASTRO RUÍZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GERMÁN PUGA GOMEZ

FRANCISCO ARMIJO ALLENDES

SANTIAGO DE CHILE

2018

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

RESUMEN EJECUTIVO

Las condiciones actuales de la minería, dadas por la disminución de la productividad, el descenso de las leyes y el aumento de los costos de producción, entre otros, sumado a la progresiva transición de explotación mediante rajo abierto a minería subterránea y la creciente demanda proyectada (Northey, 2014) para el cobre en los próximos años a nivel mundial, han planteado una serie de desafíos para la industria actual. Chile es el principal productor de cobre a nivel mundial y poseedor de aproximadamente el 20% de la producción por medio de explotación subterránea del mundo, siendo uno de los protagonistas de la minería de cobre. En vista de lo anterior, la Corporación Nacional del Cobre, Codelco, introdujo el concepto de Minería Continua, como alternativa productiva para yacimiento de block caving, la cual busca enfrentar los principales desafíos actuales en la minería, proponiendo un método altamente productivo, con potencial de automatización, eficiente y con altos estándares de seguridad.

La Minería Continua, comenzó a formarse como tal a principios del presente siglo, llevando a cabo su primera prueba entre los años 2007 y 2009 en División El Salvador, la cual permitió la interacción de las diferentes componentes y variables que afectan tanto el funcionamiento como la capacidad productiva del sistema.

El presente trabajo, tiene por objetivo estudiar las principales variables que afectan en la capacidad productiva de la Minería Continua y su funcionamiento en general. Adicionalmente, se espera determinar el potencial de aplicabilidad que esta nueva tecnología presenta para yacimientos explotados por block caving en diferentes partes del mundo.

En cuanto a la capacidad productiva de la MC, se determinó que su potencial de desarrollo está fuertemente limitado por la altura de columna extraíble, no haciendo viable el método para alturas de columna inferiores a 200 m. Las altas velocidades de extracción esperadas para el método y la temprana conexión del caving debido a la utilización de PA, generan un aumento esperado de la capacidad productiva promedio de la MC con respecto a la extracción con LHD de entre 15% y 44%, sin embargo, para velocidades de extracción en quiebre inferiores a 0,12 t/m²-día, la MC no resulta significativamente mejor que un sistema de extracción convencional. La capacidad productiva de la MC se ve limitada por la tasa de incorporación de área, se observó que para velocidades de incorporación de área inferiores a 1.800 m², la extracción convencional alcanza mayores capacidades productivas promedio (considerando una tasa de incorporación de 3.072 m²/mes), para un escenario base de 200 m de altura de columna y 80 mil m² de área basal.

En cuanto a aplicabilidad, se determinó que existe un alto potencial de aplicabilidad de la MC para yacimientos de block caving tanto en Chile como en otras partes del mundo, resultando aplicable en 9 de los 11 yacimientos estudiados, los cuales poseen significativas diferencias tanto en geometría como en condiciones de entorno y macizo rocoso, es preciso recalcar que no se evaluaron en el presente trabajo aspectos geotécnicos y niveles de esfuerzos en los yacimientos. La causa común que descartó la aplicabilidad de la MC corresponde a la presencia de altos caudales de agua ingresando a la mina (sobre 120 l/s), lo cual no es compatible con el funcionamiento de los equipos de la MC. Dentro de los yacimientos con potencial aplicabilidad destacan proyectos como Chuquicamata Subterráneo, New Afton, en Canadá y Oyu Tolgoi, en Mongolia. Los yacimientos descartados por presencia de agua fueron GBC, Freeport y Diamante, DET.

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

ABSTRACT

The current conditions of mining, given by less productivity, the decrease in the grades and the increase in production costs, among others factors, added to the progressive transition from open pit operation to underground mining and the growing expected demand (Northey, 2014) for copper for the next years, have implied a series of challenges for the industry. Chile is one of the main producers of copper worldwide and owns approximately 20% of the production of the underground mining production, being one of the main producers of copper. For this reason, Codelco, has introduced the concept of Continuous Mining, as a productive alternative for block caving mines, which seeks to face the main current challenges in mining, proposing a highly productive method, with high potential of automation, efficient and with high safety standards.

Continuous Mining, has its first approach at the beginning of this century, carrying out its first test between 2007 and 2009 in El Salvador, Codelco. This tests allowed to analyze the interaction of the different components and variables that affect both the operation and the productive capacity of the system.

The objective of current report is to study and analyze the main variables affecting the production capacity of Continuous Mining and its operation in general. Additionally, it is analyzed the applicability of the Continuous Mining for different block caving mines worldwide.

According to the production capacity of the Continuous Mining it was determined that its production potential is strongly limited by the column height, not making the method viable for column heights of less than 200 m. The high extraction rates expected for the method and the early connection of the caving, generate an expected increase in the average production capacity of the Continuous Mining with respect to the extraction with LHD equipment between 15% and 44%, however, for restricted extraction rates below 0,12 t/m²-day, the Continuous Mining is not significantly better than the conventional extraction system. The production capacity of the Continuous Mining System is limited by the capacity to incorporate productive area, it was observed that for rates of incorporation lower than 1.800 m²/month, the conventional extraction system reaches higher average production capacities (considering an incorporation rate of 3.072 m²/month)

According to the applicability of the Continuous Mining System, it was determined that the method has a high potential of application for different block caving operations in different countries, being applicable in 9 of the 11 studied deposits, which have significant differences in terms of geometry, environment conditions and rock mass characteristics. The main reason that determined the non applicability of de CMS in the studied mines was the presence of high quantity of incoming water (over 120 l/s), which is not compatible with the operation of the CMS equipment. Among the mines with potential applicability are included projects such as Chuquicamata Subterráneo, New Afton, in Canada and Oyu Tolgoi, in Mongolia. In GBC, Freeport and Diamante, DET, the application of the CMS is not possible due to the high rate of incoming water.

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Motivación.....	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo General.....	3
1.3.2	Objetivos Específicos/Alcances	3
1.4	Limitaciones	4
2	Metodología de trabajo.....	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Metodología.....	5
2.2.1	Estudio de la Minería Continua.....	5
2.2.2	Definición de variables de estudio.....	5
2.2.3	Análisis de capacidad productiva de la Minería Continua y otras variables.....	5
2.2.4	Generación de criterios de aplicabilidad de la Minería Continua	6
2.2.5	Benchmarking de yacimientos de block caving y análisis de aplicabilidad de la Minería Continua	6
3	Minería Continua	7
3.1	Principios y Fundamentos de la MC.....	7
3.2	Sistema de MC.....	8
3.3	Componentes de la MC.....	9
3.3.1	Dozer feeder	9
3.3.2	Panzer.....	10
3.3.3	Sizer	11
3.3.4	Pre acondicionamiento.....	12
3.4	Pruebas MC en División Salvador.....	15
3.5	Conclusiones del capítulo.....	16
4	Análisis de variables críticas de la Minería Continua	17
4.1	Variables que inciden directamente en la capacidad productiva de la MC.....	18
4.1.1	Tasa de incorporación de área productiva.....	22
4.1.2	Velocidad de extracción en quiebre.....	25
4.1.3	Velocidad de extracción en régimen.....	29
4.1.4	Geometría del yacimiento	32

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

4.1.5	Frecuencia de colgaduras	35
4.2	Otras variables	37
4.2.1	Fragmentación, macizo rocoso y pre acondicionamiento	38
4.2.2	Condición de agua, polvo y temperatura	38
4.3	Conclusiones del capítulo.....	40
5	Benchmarking de yacimientos DE block caving	43
5.1	Cadia East – PC1	43
5.1.1	Geometría	44
5.1.2	Fragmentación	44
5.1.3	Macizo rocoso	45
5.1.4	Condición de agua y otros.....	45
5.2	Ridgeways Deeps – Lift 1	45
5.2.1	Geometría	46
5.2.2	Condición de esfuerzos	46
5.2.3	Fragmentación	46
5.2.4	Macizo rocoso	47
5.2.5	Condición de agua y otros.....	47
5.3	Resolution Copper	47
5.3.1	Geometría	48
5.3.2	Condición de esfuerzos	48
5.3.3	Fragmentación	49
5.3.4	Macizo rocoso	49
5.3.5	Condición de agua y otros.....	50
5.4	New Afton – C zone	50
5.4.1	Geometría	50
5.4.2	Condición de esfuerzos	51
5.4.3	Fragmentación	51
5.4.4	Macizo rocoso	51
5.4.5	Condición de agua y otros.....	52
5.5	Oyu Tolgoi – Hugo Norte – Lift 1	52
5.5.1	Geometría	52
5.5.2	Condición de esfuerzos	53
5.5.3	Fragmentación	53

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

5.5.4	Macizo rocoso	54
5.5.5	Condición de agua y otros.....	54
5.6	Grasberg Block Cave	54
5.6.1	Geometría	55
5.6.2	Condición de esfuerzos	55
5.6.3	Fragmentación	55
5.6.4	Macizo rocoso	56
5.6.5	Condición de agua y otros.....	57
5.7	Palabora – Lift 1	57
5.7.1	Geometría	57
5.7.2	Condición de esfuerzos	58
5.7.3	Fragmentación	58
5.7.4	Macizo rocoso	58
5.7.5	Condición de agua y otros.....	59
5.8	Chuquicamata Subterráneo – N2.....	59
5.8.1	Geometría	59
5.8.2	Condición de esfuerzos	59
5.8.3	Fragmentación	60
5.8.4	Macizo rocoso	60
5.8.5	Condición de agua y otros.....	61
5.9	Diamante	61
5.10	Geometría	61
5.10.1	Condición de esfuerzos	61
5.10.2	Fragmentación	62
5.10.3	Macizo rocoso	62
5.10.4	Condición de agua y otros.....	63
5.11	Módulo de minería continua Andina.....	63
5.11.1	Geometría	63
5.11.2	Condición de esfuerzos	64
5.11.3	Fragmentación	64
5.11.4	Macizo rocoso	65
5.11.5	Condición de agua y otros.....	65
5.12	Argyle.....	66

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

5.12.1	Geometría	67
5.12.2	Condición de esfuerzos	67
5.12.3	Fragmentación	67
5.12.4	Macizo rocoso	68
5.12.5	Condición de agua y otros	68
5.13	Conclusiones del capítulo	69
6	Conclusiones y trabajo futuro	71
6.1	Conclusiones.....	71
6.2	Trabajo futuro	72
7	Bibliografía	73
8	Anexos.....	75
8.1	Anexo A: Análisis conceptual de la estabilización de la capacidad productiva en función del área del bloque	75
8.1.1	Área del bloque.....	75
8.1.2	Altura de columna.....	76
8.2	Anexo B: Efecto de la velocidad de extracción en la capacidad productiva de la MC ...	78
8.3	Anexo C: Efectos de la tasa de incorporación de área en el tiempo de explotación de un bloque	79

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Benchmarking sistema de manejo de minerales para minas de block caving en Chile y el mundo. (BCTEC, 2017)	3
Tabla 2.- Tipos de encadenamiento y tratamiento. (BCTEC, 2017)	10
Tabla 3.- Comparación de longitud de ejes de colpas de mayor tamaño registradas en sectores con y sin FH en DET. (BCTEC, 2017).....	15
Tabla 4.- Definición de caso base para extracción por MC y LHD.....	20
Tabla 5.- Casos evaluados para la variable de tasa de incorporación de área.	22
Tabla 6.- Resumen resultados análisis de capacidad productiva en función de tasa de incorporación de área.	24
Tabla 7.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función de la altura de columna extraíble y la tasa de incorporación de área para un área basal de 80mil m ²	24
Tabla 8.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función del área del footprint y la tasa de incorporación de área para una altura de columna extraíble de 200 m.	25
Tabla 9.- Velocidad de extracción máxima en quiebre en función del índice MRMR.	27
Tabla 10.- Capacidad productiva en función de velocidad de extracción en quiebre para la MC.	29
Tabla 11.- Casos análisis velocidad de extracción en régimen.	30
Tabla 12.- Resumen resultados análisis capacidad productiva en función de velocidad de extracción en régimen.	32
Tabla 13.- Índice de colgadura esperado para la MC en función de tamaño máximo de colpa.	36
Tabla 14.- Resumen de los experimentos de flujo realizados a escala laboratorio escalados. (BCTEC, 2017).....	37
Tabla 15.- Criterios de aplicabilidad de la MC.	42
Tabla 16.- Condición de esfuerzos in situ Cadia East.	44
Tabla 17.- Tamaños característicos, fragmentación primaria.	45
Tabla 18.- Características macizo rocoso Cadia East - PC1.	45
Tabla 19.- Condición de esfuerzos in situ Ridgeway Deeps.	46
Tabla 20.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	47
Tabla 21.- Características macizo rocoso Ridgeway Deeps.....	47
Tabla 22.- Condición de esfuerzos in situ Resolution Copper Mine.	49
Tabla 23.- Tamaños característicos fragmentación secundaria.	49
Tabla 24.- Características del macizo rocoso Resolution Copper Mine.	49
Tabla 25.- Condición de esfuerzos in situ New Afton - C-Zone.	51
Tabla 26.- Condiciones de macizo rocoso New Afton C-Zone.....	51
Tabla 27.- Condición de esfuerzos in situ Oyu Tolgoi-Hugo Norte.....	53
Tabla 28.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	54
Tabla 29.- Condición de esfuerzos in situ GBC.	55
Tabla 30.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	56
Tabla 31.- Condiciones del macizo rocoso, GBC.....	57
Tabla 32.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	58
Tabla 33.- Condiciones de macizo rocoso, Palabora.	58
Tabla 34.- Condición de esfuerzos in situ CHS.....	59
Tabla 35.- Tamaños característicos fragmentación secundaria.	60
Tabla 36.- Condiciones de macizo rocoso, CHS.	61

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

Tabla 37.- Condición de esfuerzos in situ Diamante.	62
Tabla 38.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	62
Tabla 39.- Condición de macizo rocoso, Diamante.	62
Tabla 40.- Condición de esfuerzos in situ módulo MC Andina.	64
Tabla 41.- Tamaños característicos fragmentación primaria.	65
Tabla 42.- Condición de macizo rocoso MC Andina.	65
Tabla 43.- Condición de esfuerzos in situ Argyle.	67
Tabla 44.- Tamaños característicos fragmentación primaria, Core2Frag.	68
Tabla 45.- Resumen de benchmarking de yacimientos de block caving.	69
Tabla 46.- Resumen potencial de aplicabilidad de la MC.	72
Tabla 47.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función de la tasa de incorporación de área para distintas geometrías de bloque.	79

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Demanda proyectada de cobre para los próximos años. (Northey y otros, 2014).....	1
Figura 2.- Participación de Chile en minería subterránea del mundo.....	2
Figura 3.- Rendimiento de LHD en función de distancia media de acarreo.	2
Figura 4.- Metodología de trabajo.	6
Figura 5.- Esquema sector de prueba para Minería Continua III Panel, División Andina. (IM2) ..	8
Figura 6.- Dozer feeder. (BCTEC, 2017).....	9
Figura 7.- Transportador blindado, Panzer. (BCTEC, 2017)	11
Figura 8.- Chancador de bajo perfil, Sizer. (MMD, 2016).....	12
Figura 9.- Esquema FH y plano preferencial de ruptura.	12
Figura 10.- Esquema DDE y efecto en el pozo de tronadura.	13
Figura 11.- Resultados PA en minas de Codelco. (IM2, 2010).....	14
Figura 12.- Razón eje mayor/menor y volumen de colpas sometidas a reducción secundaria en los puntos de extracción. (Brzovic, 2016)	14
Figura 13.- Prueba MC División Salvador 2007-2009. (Gortaris-IM2, 2009).....	15
Figura 14.- Variables en estudio para análisis de la MC.....	17
Figura 15.- Propagación del caving. (Vargas, 2017)	19
Figura 16.- Plan de producción MC y LHD y velocidad de extracción, caso base.	21
Figura 17.- Plan de producción MC y LHD y área activa, caso base.	21
Figura 18.- Variación de la capacidad productiva de la MC en función de la tasa de incorporación de área.	22
Figura 19.- Variación de los periodos productivos en la MC en función de la tasa de incorporación de área.	23
Figura 20.- Relación entre tasa de hundimiento y calidad del macizo rocoso. (Laubscher, 1997-2000)	26
Figura 21.- Relación entre volumen in situ, air gap y volumen esponjado en una columna de extracción.	26
Figura 22.- Velocidad de extracción en función de la tasa de quiebre del macizo rocoso. (Paredes, 2012)	27
Figura 23.- Efectos de la velocidad de extracción en quiebre en la capacidad productiva de la MC.	28
Figura 24.- Variación del tiempo de extracción en función de la velocidad de extracción en quiebre.	28
Figura 25.- Variación de la capacidad productiva en función de la velocidad de extracción en quiebre. (Azul, verde y naranja representan MRMR de 30, 50 y 70, respectivamente).....	29
Figura 26.- Plan de producción para diferentes velocidades de extracción en régimen.	31
Figura 27.- Análisis de sensibilidad de capacidad productiva en función de velocidad de extracción en régimen.	31
Figura 28.- Análisis de la capacidad productiva en función de área de bloque.	32
Figura 29.- Área activa en función del área del bloque.	33
Figura 30.- Análisis de la capacidad productiva en función de la altura de columna extraíble.	34
Figura 31.- Área activa en función de la altura de columna.....	34
Figura 32.- Diferencia porcentual entre capacidad productiva máxima con MC y LHD para velocidades de extracción y RMR definidas en caso base.	35

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

Figura 33.- Velocidad de extracción en MC en función de la frecuencia de colgaduras. (IM2, 2012)	36
Figura 34.- Frecuencia de colgaduras en función de razón largo de batea/d100.	37
Figura 35.- recopilación tasas de propagación en minería subterránea. (BCTEC, 2017)	38
Figura 36.- Cadia East, vista isométrica. (Manca, 2013)	43
Figura 37.- Fragmentación primaria Cadia East - PC1. (Brunton, 2016)	44
Figura 38.- Ridgeway Deeps, vista perfil. (Dunstan, 2016)	46
Figura 39.- Fragmentación primaria Ridgeway Deeps. (Brunton, 2016)	47
Figura 40.- Resolution Copper Mine, diseño. (Pascoe, 2008)	48
Figura 41.- Geometría y secuencia de explotación Resolution Copper Mine.	48
Figura 42.- Curva de fragmentación secundaria Resolution Copper Mine. (Hudson, 2012)	49
Figura 43.- New Afton, vista hacia el norte. (Dennis, 2015)	50
Figura 44.- Altura de columna extraíble C-Zone. (Dennis, 2015)	51
Figura 45.- Mapa RMR New Afton.	52
Figura 46.- Oyu Tolgoi - Hugo Norte, vista perfil. (Peters, 2016)	53
Figura 47.- Curva de fragmentación primaria QMD New Afton.	53
Figura 48.- Grasberg Block Cave, vista isométrica. (Brannon, 2012)	55
Figura 49.- Fragmentación primaria GBC simulada en Core2Frag. (Srikant, 2007)	56
Figura 50.- Distribución RMR en GBC. (Srikant, 2007)	56
Figura 51.- Palabora - Lift 1, vista isométrica. (Sainsbury, 2016)	57
Figura 52.- Fragmentación primaria Palabora simulada en Core2Frag.	58
Figura 53.- Chuquicamata Subterráneo, vista isométrica.	59
Figura 54.- Curva de fragmentación secundaria CHS. (Campbell, 2015)	60
Figura 55.- Distribución de UGBT MB N1 y S1. (SRK, 2015)	60
Figura 56.- Diamante, vista isométrica. (DET, 2017)	61
Figura 57.- Fragmentación esperada en función de la frecuencia de colgaduras, Diamante. (Codelco, 2017)	62
Figura 58.- Condición de canalón para los sectores de División El Teniente (izquierda) y para el sector Diamante (Derecha) (BCTEC, 2017).	63
Figura 59.- Vista columna extraíble módulo de MC Andina (DAND, 2016).	64
Figura 60.- Curva fragmentación primaria Módulo MC.	64
Figura 61.- Clasificación del riesgo de bombeo en puntos de extracción (Tapia y Martínez, 2011).	66
Figura 62.- Mapa de riesgo de bombeo según la clasificación de División Andina a Febrero-2017 (BCTEC, 2017).	66
Figura 63.- Geometría Argyle, vista planta. (IMjan, 2009)	67
Figura 64.- Curva de fragmentación primaria Argyle, Core2Frag. (Srikant, 2007)	68
Figura 65.- Esquemmatización de variación de la capacidad productiva máxima en función del área del bloque, para una altura de columna H [m], v_q [t/m^2 -día] y v_r [t/m^2 -día] fijos.	76
Figura 66.- Esquemmatización de variación de la capacidad productiva máxima en función de la altura de columna, para un área de bloque de A [m^2], v_q [t/m^2 -día] y v_r [t/m^2 -día] fijos.	77
Figura 67.- Producción máxima alcanzable para el sistema de MC en función de principales parámetros geométricos del yacimiento. Valores de velocidades en quiebre y régimen correspondiente a los definidos para el caso base de la MC.	77

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA
MINERÍA CONTINUA Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD
PARA YACIMIENTOS EXPLOTADOS POR BLOCK CAVING

Figura 68.- Producción máxima alcanzable para el sistema LHD en función de principales parámetros geométricos del yacimiento. Valores de velocidades en quiebre y régimen correspondiente a los definidos para el caso base del sistema convencional LHD.78

Figura 69.- Variación de la capacidad productiva de la MC en función de la velocidad de extracción en régimen.78

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se entrega una breve introducción a la Minería Continua, partiendo por la situación de la minería subterránea y, en particular, de la minería de caving en el mundo. Se definen las principales motivaciones que impulsan el surgimiento de la Minería Continua, los objetivos y limitaciones del presente trabajo.

1.1 Introducción

En la actualidad existe una creciente demanda de minerales metálicos en el mundo y, en particular, de cobre, proyectándose un aumento sostenido de esta para los próximos años (Northey y otros, 2014). Con los proyectos y condiciones actuales de la minería en el mundo se prevé un déficit de oferta de cobre a contar del año 2020, como se muestra en la Figura 1.

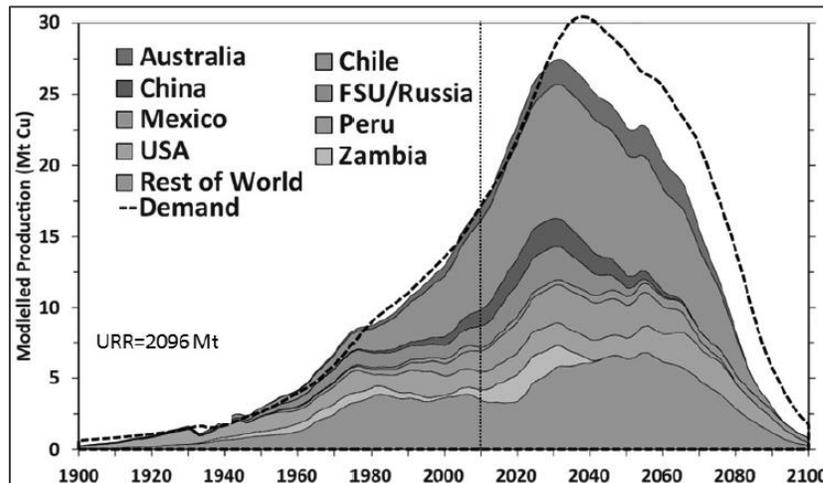
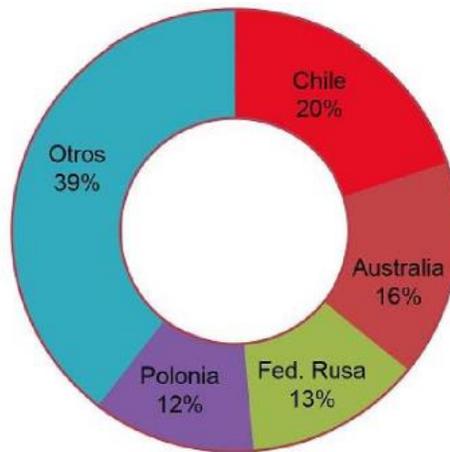


Figura 1.- Demanda proyectada de cobre para los próximos años. (Northey y otros, 2014)

Por otra parte, se ha evidenciado una progresiva transición en las explotaciones mineras pasando de operaciones en superficie hacia subterráneas (Freznel, 2016), debido principalmente al agotamiento de las reservas superficiales y la profundización de los actuales rajes (siendo el caso más próximo en Chile la transición del rajo Chuquicamata hacia Chuquicamata Subterráneo, cuyo método de explotación se definió como block caving), lo que ha significado una disminución en las capacidades productivas.

Dentro de los métodos de explotación subterráneos, el block caving es el que tiene mayor capacidad productiva, siendo un método de explotación masivo y que presenta costos operativos relativamente bajos (en torno a 8 USD/ton) dentro de la minería subterránea. A pesar de lo anterior, las nuevas condiciones que presenta el macizo rocoso en explotaciones profundas, emplazadas en roca primaria, el descenso progresivo de las leyes de cabeza en el mineral y las mejoras en rendimiento productivos, eficiencia y seguridad requeridas han planteado una serie de desafíos para la minería tanto en Chile como en el mundo.

En el caso particular de Chile, se estima que el 30% de la minería se produce a través de métodos subterráneos, a la espera de aumentar con la entrada en producción de mega proyectos como Chuquicamata Subterráneo y Nuevo Nivel Mina, de Codelco. De la producción subterránea actual en el mundo, Chile posee aproximadamente el 20% de la producción (ver Figura 2) siendo uno de los principales productores subterráneos.



Elaborado por MBChile, a partir de información pública de las empresas

Figura 2.- Participación de Chile en minería subterránea del mundo.

En la actualidad, la minería subterránea y, en particular, la de caving lleva a cabo sus operaciones por medio de la extracción de mineral desde los puntos de extracción con equipos de bajo perfil LHD, los cuales se mueven a través del nivel de producción, extrayendo y transportando el mineral hacia etapas posteriores de reducción de tamaño y transporte a plantas de proceso. Si bien estos equipos son ampliamente utilizados en las operaciones en el mundo (ver Tabla 1) debido a su flexibilidad y alto grado de conocimiento, tienen una productividad limitada por la distancia de acarreo que deben cubrir para el vaciado de mineral, además de tener una serie de otras restricciones operacionales. En la Figura 3 se muestra el descenso de rendimiento de un equipo LHD en función de la distancia de acarreo media, siendo el principal factor que define la capacidad productiva del sistema.

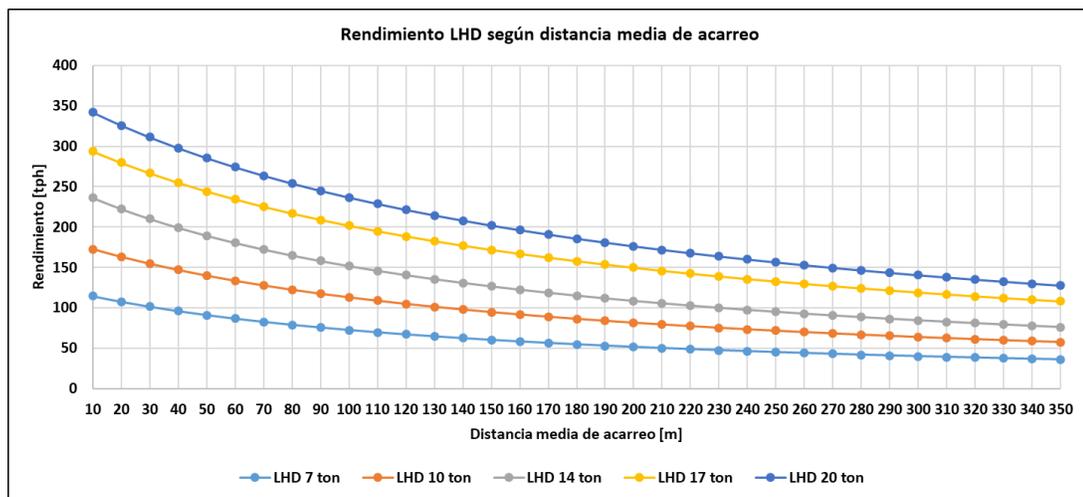


Figura 3.- Rendimiento de LHD en función de distancia media de acarreo.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Tabla 1.- Benchmarking sistema de manejo de minerales para minas de block caving en Chile y el mundo. (BCTEC, 2017)

Mina	Manejo de mineral					
Teniente 4 Sur	LHD	Pique	Ferrocarril	Chancador giratorio	Ferrocarril	
Reservas Norte	LHD	Pique	Camión	Pique	Reducción	Ferrocarril
Diablo Regimiento	LHD	Tolva	Chancador giratorio	Pique	Correa	Ferrocarril
Oyu Tolgoi	LHD	Pique	Camión	Chancador giratorio	Correa	
New Afton	LHD	Pique	Chancador giratorio	Correa		
Resolution	LHD	Pique	Ferrocarril	Chancador giratorio	Correa	Skip
Grasberg BC	LHD	Pique	Ferrocarril	Chancador giratorio	Correa	
DOZ	LHD	Pique	Camión	Chancador giratorio	Correa	
Ridgeway Deeps	LHD	Chancador de mandíbulas		Correa		
Cadia East	LHD	Chancador giratorio		Correa	Pique	Correa
Salvador	LHD	Pique	Chancador de mandíbulas		Pique	Ferrocarril

Este conjunto de condiciones ha impulsado a Codelco a introducir el concepto de Minería Continua en la industria de la minería, el cual comenzó a tomar cuerpo en la década de los 90, cuando se empezó a evidenciar el debilitamiento de la productividad.

La Minería Continua, como método de extracción es una mezcla de adaptación de los sistemas de explotación de carbón e innovación con equipos diseñados especialmente para el sistema y que buscan aumentar la eficiencia de la producción, disminuyendo los costos y aumentando la productividad de los yacimientos.

1.2 Motivación

La principal motivación del presente trabajo se enmarca en la necesidad de estudiar las premisas que definen a la Minería Continua como alternativa productiva para la minería de block caving, con énfasis en su capacidad productiva, principal aspecto distintivo, y su potencial de aplicación a distintos yacimientos.

1.3 Objetivos

Se presentan a continuación los objetivos generales y específicos del estudio realizado.

1.3.1 Objetivo General

Analizar la capacidad productiva de la Minería Continua en función de las principales variables que afectan a la operación y analizar el potencial de aplicabilidad de la MC a yacimientos de block caving en Chile y el mundo.

1.3.2 Objetivos Específicos/Alcances

Los objetivos específicos o alcances que cumplir para dar cumplimiento al objetivo general del presente trabajo son los siguientes:

- Comprender los Principios y Fundamentos que sustentan a la Minería Continua como método de explotación.
- Identificar los componentes principales de la Minería Continua y su funcionamiento.

- Identificar y analizar las variables que inciden en la capacidad productiva de la Minería Continua.
- Identificar y analizar variables asociadas al macizo rocoso y el entorno que puedan incidir en la aplicabilidad de la Minería Continua.
- Realizar un benchmarking de yacimientos explotados por block caving en Chile y el mundo y evaluar el potencial de aplicabilidad de la Minería Continua en cada uno.
- Estudiar la aplicabilidad de la MC para los yacimientos caracterizados.

1.4 Limitaciones

Las limitaciones del estudio realizado son las siguientes:

- El foco principal del estudio se centra en el análisis de la capacidad productiva de la Minería Continua.
- La información utilizada para el benchmarking de yacimientos de block caving corresponde a la más reciente disponible al momento de la búsqueda.
- Se excluye un análisis de estabilidad de infraestructura e instalaciones.
- Se excluye un análisis económico.

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este capítulo describe la metodología de trabajo utilizada para la investigación y posterior análisis de la Minería Continua en cuanto su conceptualización, variables críticas que afectan su desempeño y potencial aplicabilidad a yacimientos de block caving en Chile y el extranjero.

2.1 Introducción

Para dar cumplimiento con los alcances del trabajo realizado se planteó una secuencia lógica de investigación y análisis de la información la cual permitió, por un parte, comprender el origen, principios y fundamentos de la Minería Continua y, por otra parte, estudiar y analizar su funcionamiento en términos de su capacidad productiva y como ésta se ve afectada en función de sus variables críticas para finalmente estudiar su potencial aplicabilidad a yacimientos de block caving.

2.2 Metodología

Se describen a continuación las etapas que dieron forma al trabajo realizado.

2.2.1 Estudio de la Minería Continua

El estudio de la Minería Continua abarca en términos generales los orígenes de ésta como alternativa productiva en yacimientos de block caving, se realiza una conceptualización del sistema de explotación en donde se mencionan y describen sus principales equipos componentes, así como también sus principios y fundamentos. Adicionalmente, se recolecta información respecto de pruebas previas realizadas del prototipo modular llevado a cabo en división El Salvador de Codelco, la cual otorga información relativa al funcionamiento y potencial desempeño de la Minería Continua como método de explotación.

2.2.2 Definición de variables de estudio

Con el entendimiento y conceptualización de la Minería Continua y su funcionamiento se definen variables a estudiar, identificando cuales tienen una incidencia directa en la capacidad productiva de la mina junto con aquellas variables que pueden afectar en la continuidad operacional de la mina y la seguridad de los trabajadores de interior mina.

2.2.3 Análisis de capacidad productiva de la Minería Continua y otras variables

Se realiza un análisis de la capacidad productiva de la Minería Continua en función de las variables definidas previamente por medio de análisis univariantes y comparación con respecto a un caso base definido para la Minería Continua, en función de sus capacidades esperadas, y un caso base definido para producción mediante equipos LHD, de acuerdo con valores típicos para dicho sistema de extracción.

Se analizan además otras variables importantes para la minería subterránea en general y que pueden incidir en la aplicabilidad de la Minería Continua, como lo son la fragmentación del macizo rocoso, condiciones de agua, temperatura y polvo.

2.2.4 Generación de criterios de aplicabilidad de la Minería Continua

En base al análisis realizado, se define para cada variable un criterio de aplicabilidad de la Minería Continua en base a su potencial ventaja comparativa con respecto a la extracción por medio de LHD.

2.2.5 Benchmarking de yacimientos de block caving y análisis de aplicabilidad de la Minería Continua

Se realiza un benchmarking de los principales yacimientos de block caving en Chile y el extranjero con el propósito de conocer las condiciones actuales que presentan los yacimientos explotados mediante el mencionado método de explotación y se estudia su potencial aplicabilidad de la Minería Continua.

En la Figura 4 se presenta un esquema de la metodología a modo de resumen, los recuadros indican las actividades generales de cada etapa mientras que en el texto fuera de recuadro se da un mayor detalle de cada actividad.

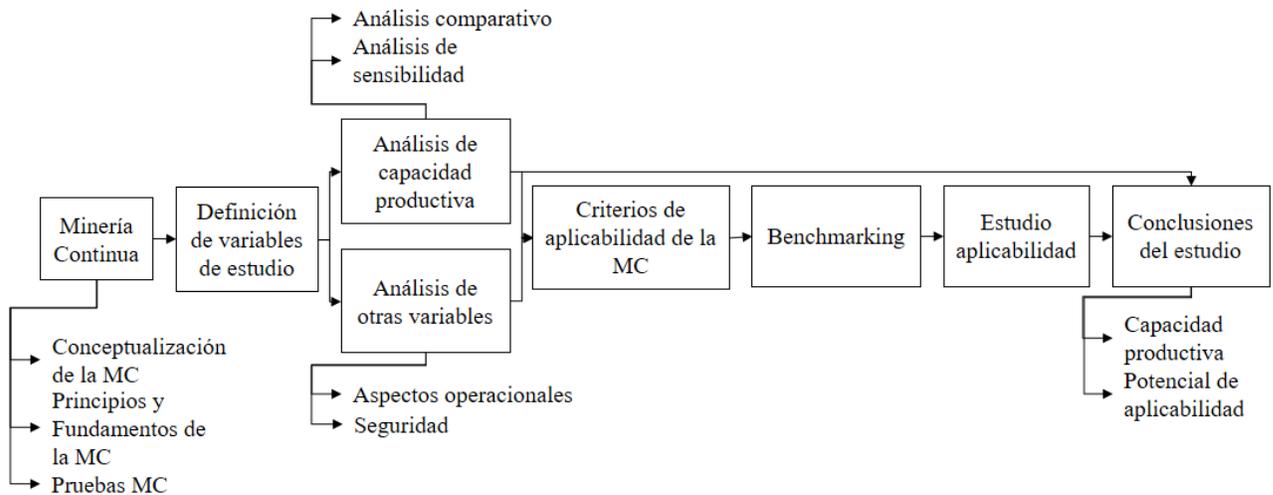


Figura 4.- Metodología de trabajo.

3 MINERÍA CONTINUA

En este capítulo se da una descripción general de la Minería Continua como método de explotación alternativo en minería subterránea, pasando por la identificación de sus principios y fundamentos y la descripción de sus principales componentes. Se finaliza con el resumen de los principales resultados obtenidos en las pruebas del módulo de Minería Continua desarrollado en división Salvador.

3.1 Principios y Fundamentos de la MC

Como se mencionó, dentro de los principios que impulsaron el surgimiento de la Minería Continua se encuentran los mayores requerimientos productivos con respecto a los actuales y los inconvenientes actuales que ha enfrentado la minería de caving en particular debido al aumento del grado de competencia de la roca. Mas concretamente, los principales factores impulsores de la Minería Continua son el aumento del riesgo de inestabilidad debido a la profundización de la explotación, la menor productividad causada, entre otras cosas, por el aumento del número de eventos de colgaduras, velocidades de extracción más restringidas en quiebre y la discontinuidad con la cual se llevan a cabo las operaciones convencionales, con equipos LHD.

Los fundamentos que establecen a la Minería Continua apuntan a la innovación y al deseo de generar un cambio disruptivo en la actual minería de caving, abordando las principales problemáticas presentes.

Los principales fundamentos de la MC son los siguientes:

- **Procesos automatizados y operados a distancia:** Se propone la utilización de equipos mecanizados cuyo funcionamiento pueda ser automatizado o tele comandado desde el exterior de la operación propiamente tal en una sala de control. Dichos equipos se encargarán de la extracción, transporte y reducción del mineral que será llevado hacia la planta de tratamiento.
 - **Extracción y transporte:** La extracción será realizada por equipos estacionarios ubicados en cada punto de extracción, descargando el mineral hacia un equipo de transporte continuo ubicado a lo largo de toda la calle de producción el cual sacará el mineral de la calle y lo transportará hacia una estación de reducción de tamaño.
 - **Chancado:** Será realizado en el mismo nivel de producción por medio de un chancador de bajo perfil apto para la reducción del mineral y posterior transporte.
- **Diseño estable:** El sistema de extracción comprende una serie de instalaciones y equipos estacionarios, es decir, que no se desplazan a través del nivel de producción. Esto requiere del planteamiento de diseños estables de modo que no se vea afectado el funcionamiento de los equipos y no se ponga en riesgo la continuidad de la operación.
- **Fragmentación y propagación del caving:** En cuanto al macizo rocoso, la Minería continua requiere de condiciones particulares para su correcto desarrollo y el aprovechamiento de su potencial productivo. Se debe controlar el tamaño máximo de colpas en los puntos de extracción para disminuir el potencial de colgaduras que afecten la continuidad operacional y las capacidades productivas esperadas para la MC, a la vez que se controla y facilita la propagación del caving para disminuir las restricciones de

velocidad de extracción en quiebre y anticipar la liberación de la columna de extracción. Para estos efectos se plantea la utilización de técnicas de pre acondicionamiento.

- **Capacidad productiva:** La extracción de mineral desde los puntos de extracción en la MC, a diferencia de los sistemas con equipos LHD, se produce de manera **simultánea** por más de un equipo a la vez en una misma calle de producción, permitiendo en conjunto una mayor tasa de extracción instantánea por calle en producción. Por otra parte, para el transporte del mineral extraído en el sistema de MC se postula la utilización de equipos de transporte **continuo**, independizando la capacidad de transporte de la distancia de acarreo con lo que la capacidad productiva esperada para la MC se prevé alta, con velocidades de extracción máximas en torno a 2 t/m²-día.

La simultaneidad de la producción en puntos de extracción de una misma calle y la continuidad del sistema de transporte son los aspectos principales que permiten optar a mayores tasas productivas, así como los fundamentos principales y distintivos de la MC.

3.2 Sistema de MC

El sistema de Minería Continua está dado por la utilización de una serie de equipos mecanizados y con potencial de automatización que operan en conjunto para alcanzar altas tasas productivas. El sistema se compone de equipos de extracción estacionarios ubicados en cada punto de extracción, equipos de transporte continuo y reductores de tamaño principalmente. Estos componentes se disponen en el nivel de producción como se muestra en la Figura 5.

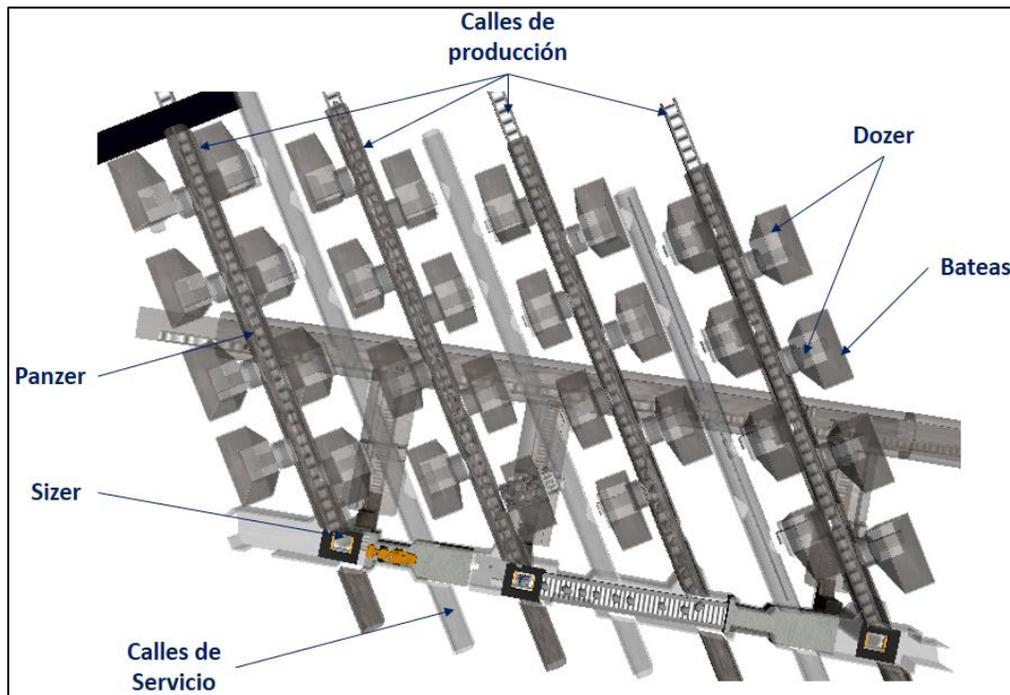


Figura 5.- Esquema sector de prueba para Minería Continua III Panel, División Andina. (IM2)

El sistema de MC cuenta con calles de producción, que reciben el mineral proveniente desde los distintos puntos de extracción que se enfrentan a dicha calle. Adicionalmente, paralelo a cada calle de producción se dispone de una galería de servicio, la cual se utiliza para realizar revisiones y

mantenciones en especial a los equipos alimentadores, teniendo espacio suficiente para el tránsito del personal que se requiera para la actividad. Se cuenta, además, con bateas especialmente diseñadas para la MC, las cuales cuentan con un único punto de extracción. Ubicado en las cabeceras, dentro del mismo nivel de producción, se encuentra un equipo de reducción de tamaño de bajo perfil que chanca el mineral para su posterior transporte por correas u otro mecanismo.

3.3 Componentes de la MC

Se describen a continuación los principales componentes de la MC y su principio de funcionamiento.

3.3.1 Dozer feeder

Es un equipo mecanizado desarrollado conjuntamente por Codelco y Bucyrus-DBT para su aplicación en la MC (IM2, 2009). Su principal función es la de empujar la pila de material fragmentado que se deposita en el punto de extracción, bajo la batea, por medio de un movimiento de avance y retroceso que desestabiliza la pila, generando la descarga hacia el equipo panzer y activando el flujo de mineral en la columna de extracción. Su mecanismo es accionado por un motor electrohidráulico y pistones ubicados en la parte trasera del equipo hacia la galería de servicio. El equipo consta principalmente de dos placas, una fija que recibe el mineral y otra móvil que genera el empuje hacia la descarga del mineral. En la Figura 6 se muestra esquemáticamente el principio físico de funcionamiento del equipo dozer feeder y una imagen de un modelo real.

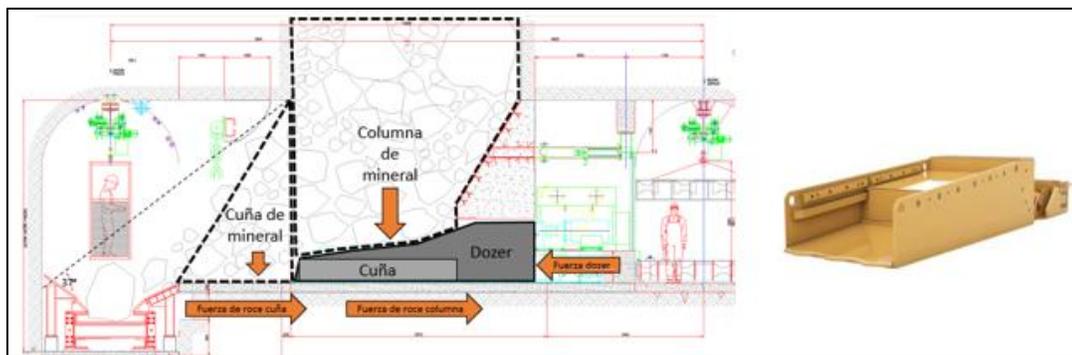
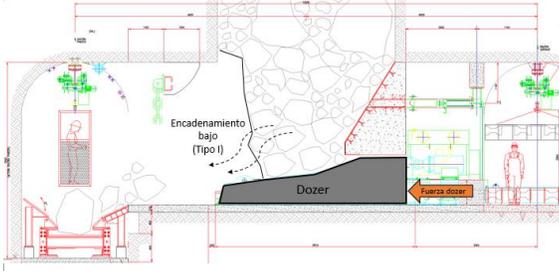
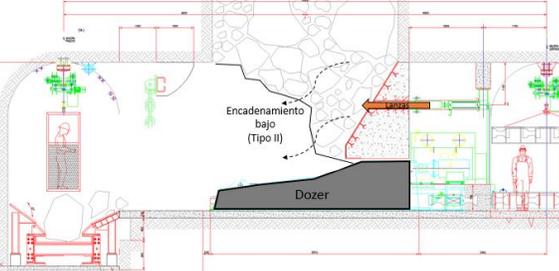
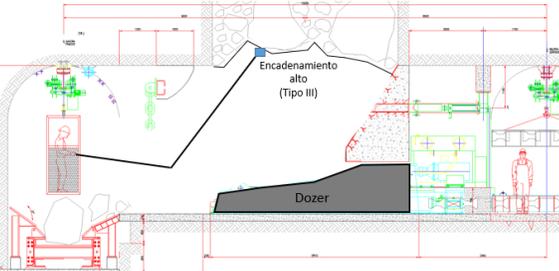


Figura 6.- Dozer feeder. (BCTEC, 2017)

El conjunto del equipo dozer cuenta además con un mecanismo de descuelgue, conformado por lanzas desestabilizadoras que salen de la parte superior del equipo las cuales son capaces de reactivar el flujo de mineral cuando las colgaduras que se producen son medias o bajas, evitando la intervención directa de personal. Para colgaduras altas, se requiere de otro mecanismo de reactivación de flujo. En la Tabla 2 se muestran esquemáticamente los tipos de colgaduras y su mecanismo de reactivación.

Tabla 2.- Tipos de encadenamiento y tratamiento. (BCTEC, 2017)

Tipo de encadenamiento	Esquema	Tratamiento
<p>Bajo Soportado por la batea y el dozer</p>		<p>Encadenamientos que son desestabilizados por el movimiento del dozer.</p>
<p>Medio Soportado por la batea y el dintel</p>		<p>Encadenamientos que son desestabilizados por las lanzas dentro del dintel.</p>
<p>Alto Soportado por las paredes de la batea</p>		<p>Encadenamientos dentro de la batea y que deben ser desestabilizados por el descolgador mediante la colocación de explosivos.</p>

3.3.2 Panzer

Es un equipo mecanizado cuya principal función es la de transportar el mineral proveniente de los puntos de extracción a lo largo de la calle de producción y conducirlos hacia la estación de reducción de tamaño. Consiste en una bandeja fija con la longitud suficiente para abarcar la extensión de la calle de producción, la cual forma la base del equipo, junto con dos bandejas inclinadas en los costados que hacen las veces de baranda y sirven para acomodar el mineral. El transporte es realizado por un par de cadenas que se desplazan a lo largo del equipo, una en cada costado, accionadas por motores eléctricos, las cuales están entrelazadas con racletas o barras de acero transversales que realizan el barrido del mineral, transportándolo a lo largo del equipo. El carácter robusto y blindado del equipo permite que éste sea capaz de transportar mineral ROM en el nivel de producción de manera continua no teniendo su capacidad productiva limitada por la distancia de acarreo. En la Figura 7 se muestra un esquema explicativo del principio físico de funcionamiento del equipo panzer y una vista de uno de sus modelos.

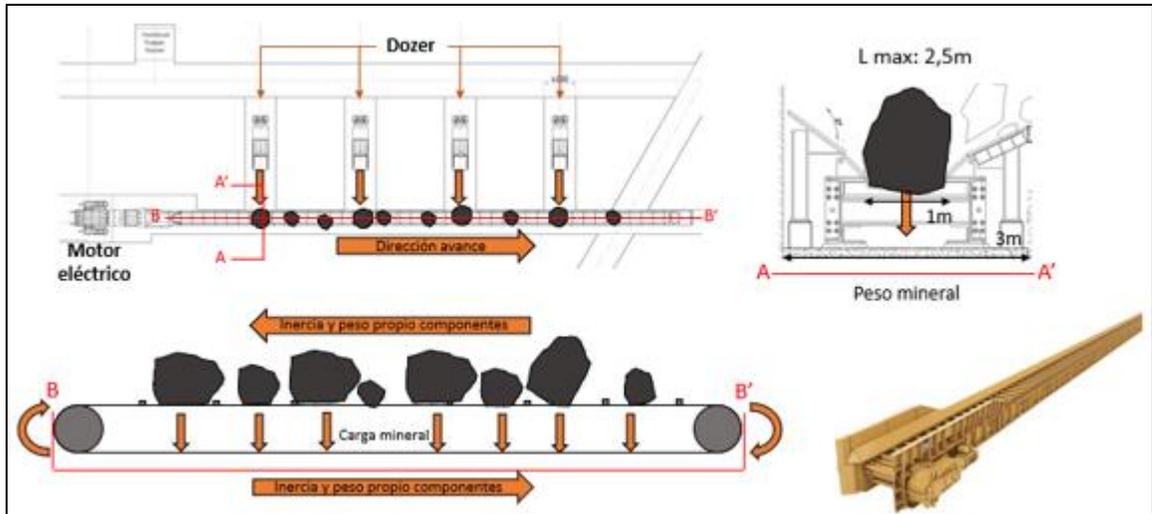


Figura 7.- Transportador blindado, Panzer. (BCTEC, 2017)

3.3.3 Sizer

Corresponde al equipo a cargo de realizar el chancado del mineral proveniente de los puntos de extracción. Tiene la particularidad de poseer menores dimensiones comparativas con respecto a los chancadores de mandíbula o giratorios convencionales, por lo que puede ser instalado y operado dentro del mismo nivel de producción, no requiriendo necesariamente de un nivel inferior para dicha actividad. Se conforma por un cajón que recibe el material a chancar, pudiendo recibir colpas de más de 2,5 m de longitud. El chancado se produce por el accionamiento de dos rodillos dentados que giran en torno a un eje paralelo y en sentido opuesto los cuales capturan el mineral y lo fragmentan por medio de mecanismos de compresión y tensión con la ayuda de una barra central que define el setting de salida del equipo.

La trituración de la roca consta de tres etapas básicas, en la primera de ellas, el mineral es atrapado y sometido a compresión por medio de los rodillos dentados generando las primeras fracturas, posteriormente, el mineral es sometido a esfuerzos de tensión por medio de la acción conjunta de ambos rodillos giratorios con la barra central, fragmentando así el mineral. Finalmente, si el mineral no cumple con el setting establecido por la barra central es sometido nuevamente a presión por los rodillos que giran continuamente. En la Figura 8 se muestra el chancado Sizer y sus etapas de conminución.



Figura 8.- Chancador de bajo perfil, Sizer. (MMD, 2016)

3.3.4 Pre acondicionamiento

Si bien no corresponde a un equipo propiamente tal, se tiene en consideración para facilitar la operación de la MC por lo que se considera un componente del método.

Existen dos técnicas principales de pre acondicionamiento utilizadas en la minería, siendo estas el hidro fracturamiento (FH) y el debilitamiento dinámico con explosivos (DDE). Adicionalmente, se define una tercera técnica, la cual resulta de la aplicación conjunta de las dos anteriores, tomando por nombre Pre acondicionamiento Intensivo o Mixto. Se describen a continuación, brevemente, las técnicas de PA mencionadas:

- FH: consiste en la inyección de líquido a alta presión en pozos confinados realizados en el macizo rocoso. El líquido es inyectado de manera continua en el pozo generando la presurización de las paredes internas de éste. Se genera un estado tensional plano perpendicular a la dirección del esfuerzo principal menor σ_3 , generando la apertura, extensión y generación de nuevas fracturas en dicho plano. Como resultado, se tiene la generación de fracturas radiales sub paralelas al esfuerzo principal mayor, las cuales pueden alcanzar radios de entre 20 m y 40 m, facilitando la ruptura y disminuyendo la fragmentación del macizo rocoso. En la Figura 9 se muestra un pozo de FH y su plano de ruptura.

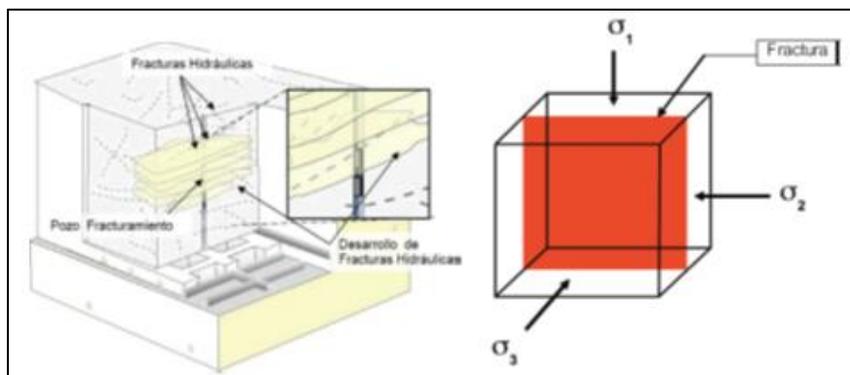


Figura 9.- Esquema FH y plano preferencial de ruptura.

CAPÍTULO 3: MINERÍA CONTINUA

- DDE: Consiste en la detonación de pozos confinados cargados con material explosivo que tienen como principal objetivo el promover la aparición de nuevas fracturas y extender aquellas pre existentes en el macizo rocoso. El fracturamiento es producido por medio de dos mecanismos esenciales, el primero de ellos corresponde a la acción de las ondas de choque generadas por la tronadura las cuales representan una pequeña fracción de la energía liberada por la tronadura (3-20%) y que generan una zona de trituración en torno al pozo de tronadura. El segundo mecanismo corresponde a la acción expansiva de los gases generados por la explosión los cuales se encargan de propagar las fracturas generadas por la detonación de la carga explosiva. En la Figura 10 se muestra esquemáticamente un pozo de tronadura de DDE y su efecto en el macizo.

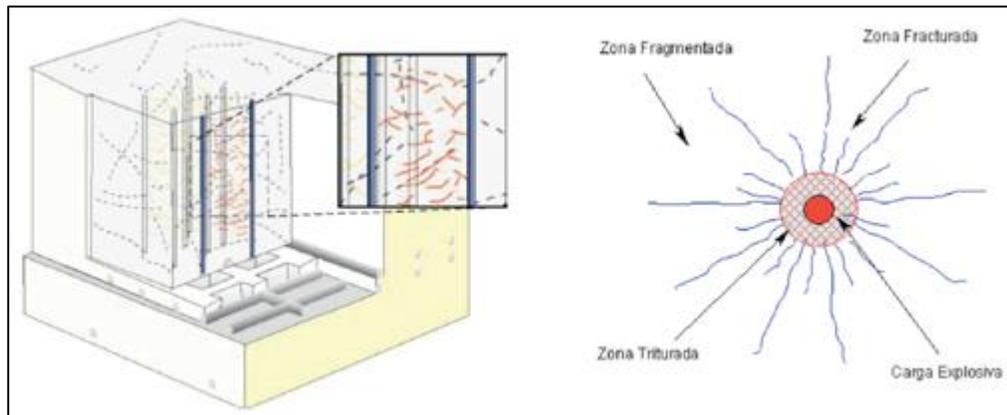


Figura 10.- Esquema DDE y efecto en el pozo de tronadura.

- PA Mixto: corresponde a la aplicación conjunta de los dos mecanismos descritos anteriormente para aprovechar las características de cada uno. Supone que las discontinuidades generadas mediante FH servirán de superficies reflectoras para el campo de ondas posterior a la tronadura, concentrando el mayor efecto en las fracturas hidráulicas y minimizando acoplamiento desfavorable de ondas fuera de la zona de interés.

Primeras pruebas realizadas en Codelco, entre los años 2001 y 2010, muestran que el PA sirve como mecanismo de control de la fragmentación esperada en los puntos de extracción. En la Figura 11 se muestran los principales resultados obtenidos de la aplicación de PA en distintas minas de la corporación.

IMPACTO DEL PA (EN %) EN LA VARIABLE DE FRAGMENTACIÓN RESPECTO DE LAS LÍNEAS BASES DIVISIONALES											
	División										
	Andina				Salvador		Teniente				
Año - aplicación industrial	2001	2005	2007	2008	2004		2005	2005	2007	2007	2007
Período de medición	2001 2003	2005 2006	2007 2010	2008 2010	2003-2006		2005 2010	2005 2010	2007 2010	2010	2010
Variable P80	DDE	FH+ DDE	FH+ DDE	FH	FH+ DDE	FH	FH DR F1	FH DR F2	FH DR F3	FH RENO (calle 6-9)	FH RENO (calle 10-17)
Fragmentación	-50%	-30%	-18,4%	-13,7%	-33,5%	-10%	s/v	s/v	-2,1%	-3,3%	s/v

Figura 11.- Resultados PA en minas de Codelco. (IM2, 2010)

Posteriormente, entre los años 2011 y 2016, en División El Teniente se llevaron a cabo diferentes pruebas de FH en los sectores SUAPI, RENO y DR para dar continuidad al estudio del efecto del PA en el macizo rocoso. (Brzovic, 2016)

Dentro de los principales resultados relacionados con la variación de tamaño máximo de colpa obtenido en las campañas de FH realizadas se observó que en aquellos sectores sin PA el tamaño máximo de colpa alcanzó 100 m³, mientras que para sectores con PA el máximo tamaño se encontró en torno a 10 m³. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 12, en donde para los sectores SUAPI y RENO el volumen máximo se vio reducido en un 90% con respecto a los volúmenes máximos registrados en DR.

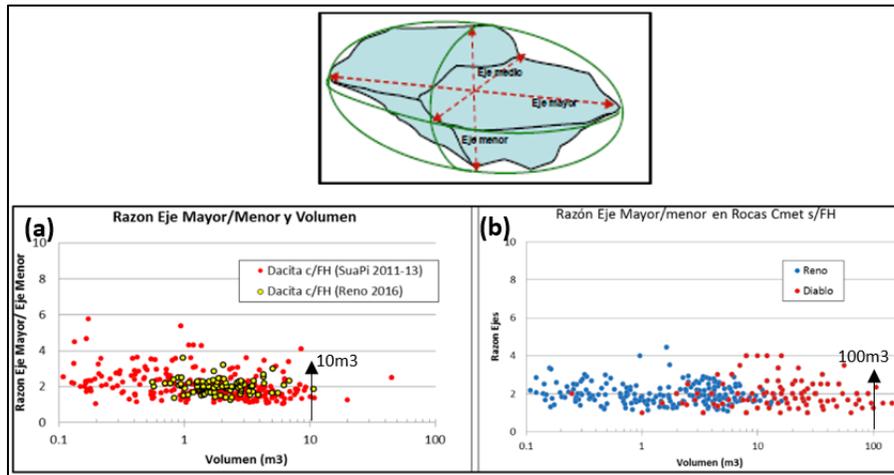


Figura 12.- Razón eje mayor/menor y volumen de colpas sometidas a reducción secundaria en los puntos de extracción. (Brzovic, 2016)

En la Tabla 3 se muestra un resumen del resultado descrito previamente.

Tabla 3.- Comparación de longitud de ejes de colpas de mayor tamaño registradas en sectores con y sin FH en DET. (BCTEC, 2017)

Parámetro	Sin FH	Con FH	Variación [%]
Factor de forma	3,0 : 2,1 : 1,5	3,0 : 2,1 : 1,5 (1,5m eje menor dado por espaciamiento de hidro-fracturas)	-
Volumen máximo de colpas [m ³]	100	10	-90%
Eje mayor [m]	6,6	3,1	-53%
Eje medio [m]	4,6	2,1	-54%
Eje menor [m]	3,3	1,5	-55%

3.4 Pruebas MC en División Salvador

Entre los años 2007 y 2009 se llevaron a cabo pruebas de un módulo de Minería Continua en División Salvador de Codelco, particularmente en el sector Inca Central Oeste (ICO). El diseño del sector consistió en una malla de 13 m x 15 m, con galerías de servicio de 4,3 m x 3,8 m, sección de galería panzer de 3,0 m x 5, 2 m y un largo de equipo panzer de 75 m. en la Figura 13 se muestra una vista en planta del diseño y la ubicación de la prueba realizada.



Figura 13.- Prueba MC División Salvador 2007-2009. (Gortaris-IM2, 2009)

Dentro de los principales resultados de la prueba realizada se estableció que el sistema posee la capacidad de manejar material grueso (colpas de 2,5 m de eje mayor), que el equipo panzer tiene capacidad de iniciar marcha con carga completa, alcanzando productividades promedio de 700 tph con máximos puntuales de 1.000 tph. Asimismo, se obtuvieron rendimientos productivos de la calle operada en torno a 570 tpd con máximos en torno a 980 tpd. (Gortaris, 2009)

3.5 Conclusiones del capítulo

En base a lo expuesto en el presente capítulo se puede concluir que:

- La Minería Continua se presenta como una alternativa con un alto potencial productivo para la explotación de minas de block caving, contribuyendo al desarrollo e innovación en tecnologías que buscan el aumento de la eficiencia, disminución de los costos y mejoras en las condiciones de seguridad de las personas.
- Su planteamiento de alto grado de mecanización genera la posibilidad de automatizar los procesos aumentando aún más el potencial productivo del método.
- La utilización de PA como mecanismo de control de fragmentación propuesto para la MC representa una oportunidad para la utilización del método en yacimientos con roca competente y de mala fragmentación.
- La capacidad de transporte y robustez del equipo panzer, siendo capaz de transportar colpas de gran tamaño (2,5 m) y pudiendo entrar en marcha con carga completa adicionado al trabajo conjunto con los equipos dozer en producción, lo que permitió alcanzar máximos productivos de 980 tpd, permiten pensar en un mayor potencial productivo del sistema a mayor escala. De esta forma se promueve la realización de pruebas adicionales que permitan corroborar los resultados obtenidos previamente y esperados para el sistema en el futuro, así como también detectar fallas y aspectos críticos en el funcionamiento del sistema que permitan robustecerlo y aumentar su confiabilidad.

4 ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

En este capítulo se realiza un análisis de la Minería Continua tomando en cuenta las principales variables que afectan su potencial desempeño como método de explotación. Se analiza separadamente a aquellas variables que se relacionan directamente con la capacidad productiva (Principal foco de la Minería Continua) de aquellas que no lo hacen.

El análisis de las variables críticas de la Minería Continua se divide en dos partes principales. En una primera instancia se analizan aquellas variables que tienen efecto directo en la capacidad productiva del método de explotación y que sirven como punto de comparación con su principal competidor, la extracción convencional mediante equipos LHD. En una segunda instancia, se analizan aquellas variables que, si bien no tienen incidencia directa en la capacidad productiva, pueden tener importancia al momento de establecer la conveniencia o no de la Minería Continua por sobre la extracción convencional, como lo son aspectos operacionales o de seguridad. En la Figura 14 se muestran las variables que fueron analizadas y su respectiva clasificación.

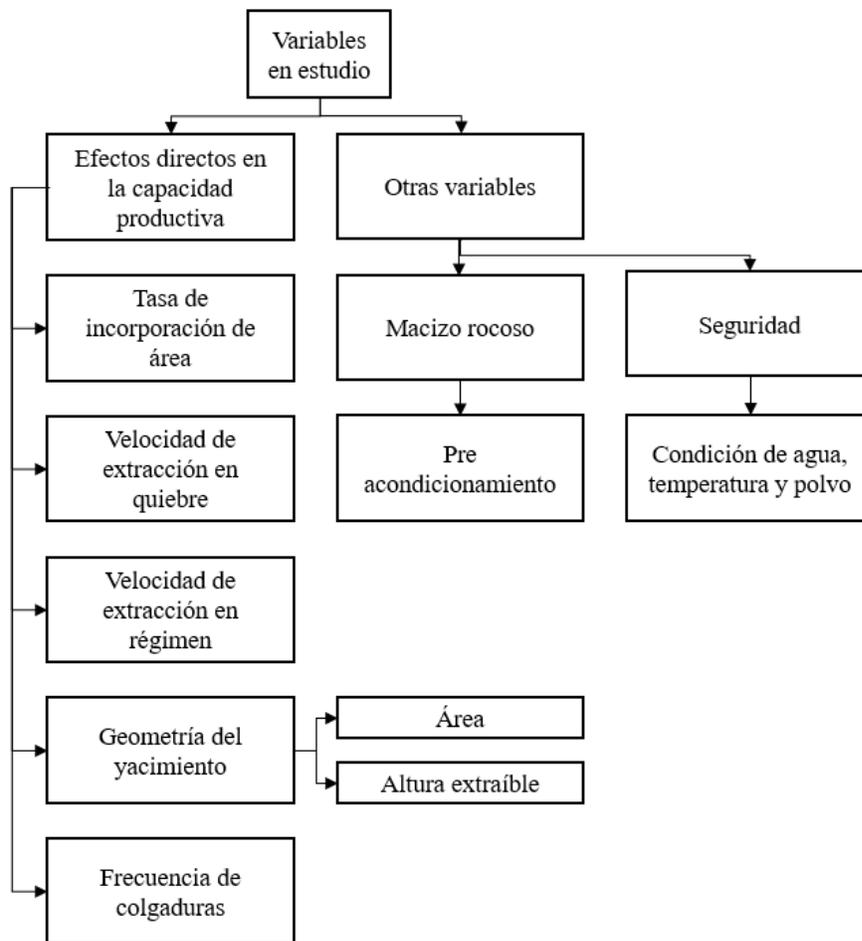


Figura 14.- Variables en estudio para análisis de la MC.

4.1 Variables que inciden directamente en la capacidad productiva de la MC

Para la evaluación de las variables que inciden en la capacidad productiva de la MC se definieron dos casos base, uno para extracción mediante MC y otro para extracción con equipos LHD, con el propósito de obtener un punto de comparación inicial. El caso base planteado para ambos sistemas de extracción considera los siguientes aspectos:

- Tasa de incorporación de área [m^2/mes]: Corresponde a la capacidad que existe en la mina para agregar sectores en producción para dar cumplimiento al plan de producción de la mina. La tasa de incorporación de área se relaciona con el periodo de ramp-up necesario para llegar a la producción en estado de régimen y el tiempo necesario para completar los desarrollos en el nivel de producción. Se considera la utilización de una malla de extracción de 16 m x 16 m, con una tasa de incorporación de 12 puntos por mes o, equivalentemente, 3.072 m^2/mes , en base al plan de producción de largo plazo para el Nivel 1 del Proyecto Chuquicamata Subterráneo.
- Velocidad de extracción [$\text{t}/\text{m}^2\text{-día}$]: la velocidad de extracción se define como la producción diaria extraída en una mina por unidad de superficie disponible para la explotación, representado una cantidad unitaria, la cual sirve como elemento de comparación de rendimientos productivos de yacimientos de distintos tamaños. En block caving la velocidad de extracción con la que se lleva a cabo la producción no es la misma durante toda la operación, sino que varía dependiendo del estado de la propagación del hundimiento o caving en cada sector del cuerpo en explotación, definiéndose así dos velocidades de extracción distintas.
 - Velocidad de extracción en quiebre: Corresponde a la tasa unitaria de extracción que se usa cuando el caving se encuentra en estado de propagación, es decir, que no ha sido conectado con superficie o con sectores explotados en un nivel superior (Ver Figura 15). Las principales razones por las cuales se restringe esta velocidad se deben a condiciones operacionales y seguridad ya que, por un parte, se debe controlar la amplitud del air gap, definido como la distancia que existe entre el material quebrado y el cave back, para evitar colgaduras en altura o eventos como air blast y, por otra parte, se maneja la concentración de esfuerzos, que puede afectar la estabilidad de las excavaciones circundantes. De esta forma, la velocidad de extracción en quiebre se define en función de la velocidad de propagación del caving (Laubscher, 1997-2000).
 - Velocidad de extracción en régimen: Corresponde a la tasa unitaria de extracción que se utiliza una vez que el hundimiento se ha propagado hasta la superficie o sector explotado en un nivel superior. En esta condición el concepto de air gap pierde validez ya que se considera que la columna completa se encuentra fragmentada con lo cual la tasa de extracción dependerá principalmente de la capacidad que tenga el sistema de extracción y manejo de materiales en sí y no del macizo rocoso. Dado lo anterior, la velocidad de extracción en régimen suele ser mayor a la velocidad de extracción en quiebre.

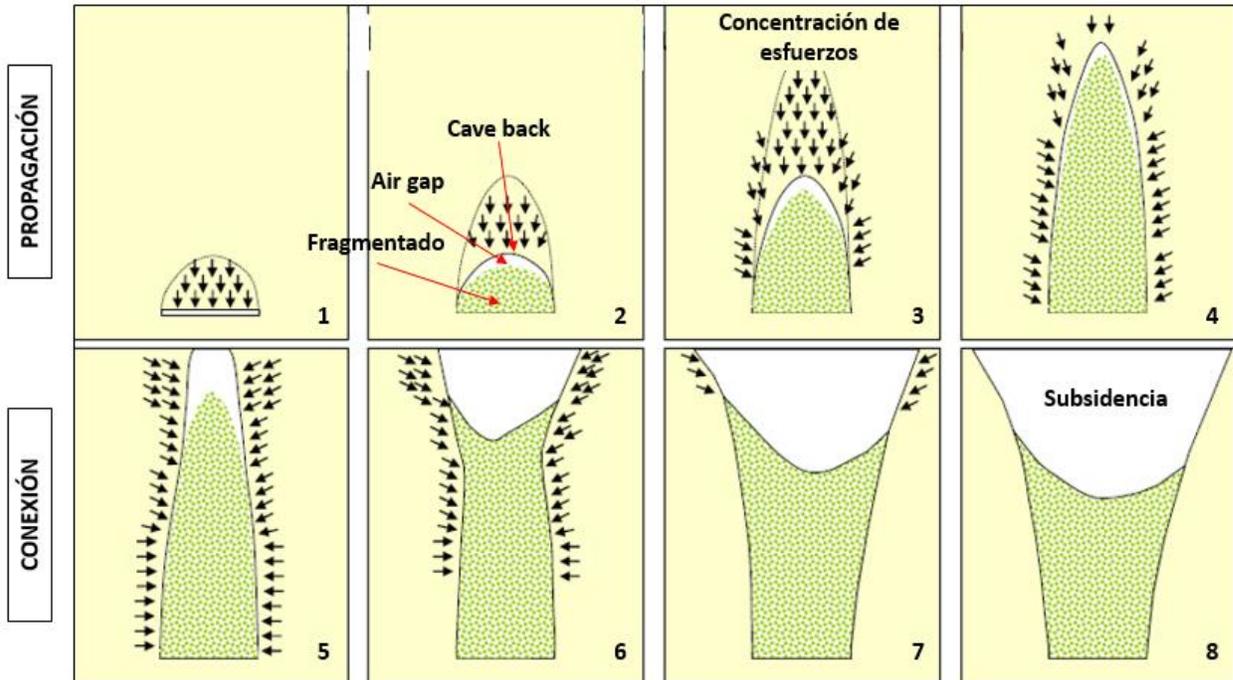


Figura 15.- Propagación del caving. (Vargas, 2017)

- Geometría del yacimiento: la geometría del yacimiento, dada principalmente por la altura de columna extraíble y el área del footprint, define el volumen de reservas del yacimiento a explotar, y el potencial productivo del yacimiento.
 - o Altura de columna [m]: La altura de columna considerada para la evaluación de la capacidad productiva corresponde a la denominada altura extraíble, la cual está definida en base al reporte de reservas de cada yacimiento. Por simplicidad del estudio, se considera como valor representativo de esta variable a la altura de columna extraíble promedio del yacimiento.
 - o Área [m²]: Considera como área del yacimiento a las dimensiones totales que posee el footprint o nivel de producción de cada yacimiento, cabe destacar que no se toma en consideración la forma particular de cada uno de los yacimientos en cuanto a su superficie, sino que se considera el área completa abarcada por los sectores productivos.
- Frecuencia de Colgaduras: Está dada por el número de encadenamientos o detenciones de flujo de mineral fragmentado que ocurren en los puntos de extracción. Estos eventos pueden ser causados por interacción de fragmentos gruesos (con tamaño mayor o igual a 2 m³) en las zonas cercanas a la batea que interrumpen el movimiento de los demás fragmentos, compactación de material fino, exceso de humedad, entre otros factores. Para este análisis se considera el efecto de la fragmentación en la frecuencia de colgadura.

En la Tabla 4 se describe el caso base de producción utilizado tanto para la Minería Continua como para la extracción por LHD. Las condiciones de macizo rocoso y dimensiones definidas para el

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

caso base corresponden a las características presentes en los macro bloques del proyecto CHS (Codelco, 2016), con el objetivo de establecer referencias comparativas en análisis univariados.

Tabla 4.- Definición de caso base para extracción por MC y LHD.

Método de extracción	Extracción de columna para alcanzar conexión* [%]	Tasa de incorporación de área [m ² /mes]	Velocidad de extracción en quiebre [t/m ² -día]	Velocidad de extracción en régimen [t/m ² -día]	Geometría del yacimiento
Minería Continua	20% (Cerruti, 2008)	3.072 m ² /mes, equivalente a la incorporación de 12 puntos de extracción. Se define inicialmente igual para ambos sistemas de extracción. (Referencia, Año)	Es función principal del macizo rocoso y la tasa de propagación del caving que este ofrece. Se define inicialmente 0,25 t/m ² -día en ambos casos, lo que corresponde a un macizo rocoso con un MRMR en torno a 30. (Laubscher, 2000)	2,0 t/m ² -día. Se define en función de los resultados obtenidos a partir de simulación de eventos discretos de un módulo de MC. (IM2, 2012)	Altura extraíble: 200 m Área: 80.000 m ² Definida en base a dimensiones promedio de dos macro bloques de CHS (Codelco, 2016)
Minería LHD	30%			0,6 t/m ² -día. Se define en función del plan de producción proyectado para el 1er Nivel de CHS y velocidades típicas del sistema de extracción LHD. (referencia, año)	

*Nota: Si bien el 20% de extracción para la conexión que se otorga a la MC para el análisis no corresponde al mecanismo de extracción propiamente tal, sino que a la aplicación de PA en la roca, se considera como parte de las características de la MC por cuanto el método incluye la utilización de pre acondicionamiento del macizo rocoso dentro de sus componentes.

En la Figura 16 y Figura 17 se muestra el plan de producción base tanto para la Minería Continua (en naranja) como para la extracción con equipos LHD (en azul), junto con su respectiva velocidad de extracción en el tiempo y área activa.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

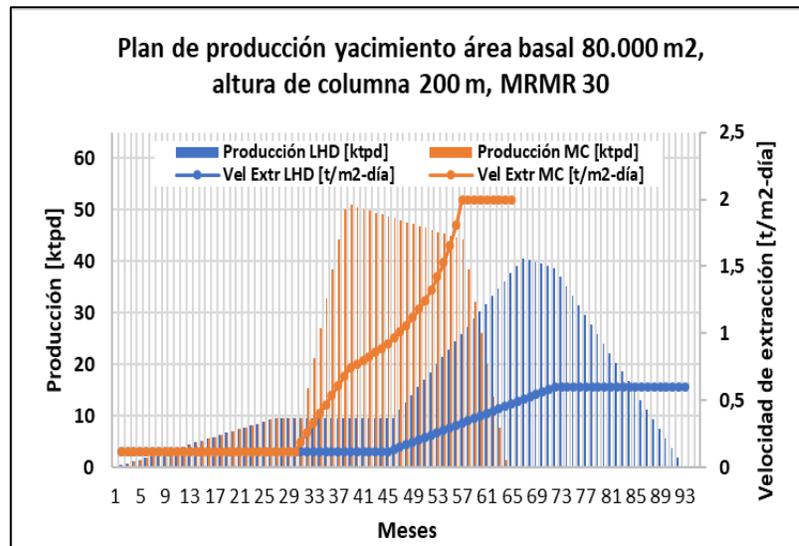


Figura 16.- Plan de producción MC y LHD y velocidad de extracción, caso base.

En la Figura 16 se aprecia que, para un yacimiento con iguales condiciones geométricas, tasa de propagación de hundimiento e incorporación de área para producción, la Minería Continua presenta una potencial ventaja competitiva debido a su alta capacidad productiva, la cual alcanza un máximo de aproximadamente 50 ktpd, siendo un 25% mayor a la extracción con equipos LHD, la cual alcanza aproximadamente 40 ktpd. Lo anterior tiene efecto en la cantidad de periodos necesarios para agotar las reservas, en donde se observa que la Minería Continua es capaz de agotar las reservas en un tiempo un 30% inferior al caso convencional con LHD.

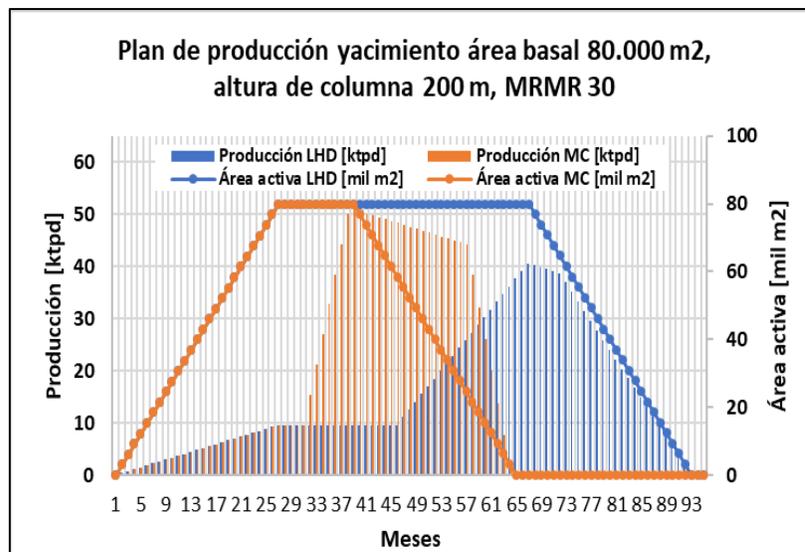


Figura 17.- Plan de producción MC y LHD y área activa, caso base.

En la Figura 17 se puede notar que durante aproximadamente 10 meses la Minería Continua se encuentra operando con el total del área disponible del bloque propuesto (100% de área activa), mientras que para el caso de equipos LHD, la utilización completa del área del bloque se prolonga por aproximadamente 40 periodos, es decir, un 300% más de tiempo con respecto a la MC. Esto se explica principalmente por la tasa de extracción en régimen del sistema LHD la cual, al ser menor

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

que la del sistema MC, provoca que el agotamiento de la columna extraíble de cada sector se produzca más lenta. Lo anterior implica un mayor requerimiento de equipos simultáneos en producción, que puedan sustentar el plan establecido, lo que pudiese generar un aumento en los costos de producción (esto no será analizado).

4.1.1 Tasa de incorporación de área productiva

Para el estudio de la tasa de incorporación de área productiva se tomaron en cuenta ambos casos base propuestos (LHD y MC) y se definieron ocho casos, todos para el sistema de Minería Continua, los cuales representan la disminución de la tasa de incorporación de área. En la Tabla 5 se resumen los casos planteados y su nomenclatura para el análisis gráfico.

Tabla 5.- Casos evaluados para la variable de tasa de incorporación de área.

	Nomenclatura	Puntos incorporados [# /mes]	Área incorporada [m ² /mes]
Caso base LHD	LHD	12	3.072
Caso base MC	MC	12	3.072
Caso 1	C1	11	2.816
Caso 2	C2	10	2.560
Caso 3	C3	9	2.304
Caso 4	C4	8	2.048
Caso 5	C5	7	1.792
Caso 6	C6	6	1.536
Caso 7	C7	5	1.280
Caso 8	C8	4	1.024

En la Figura 18 y Figura 19 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad de la tasa de incorporación de área en la Minería Continua.

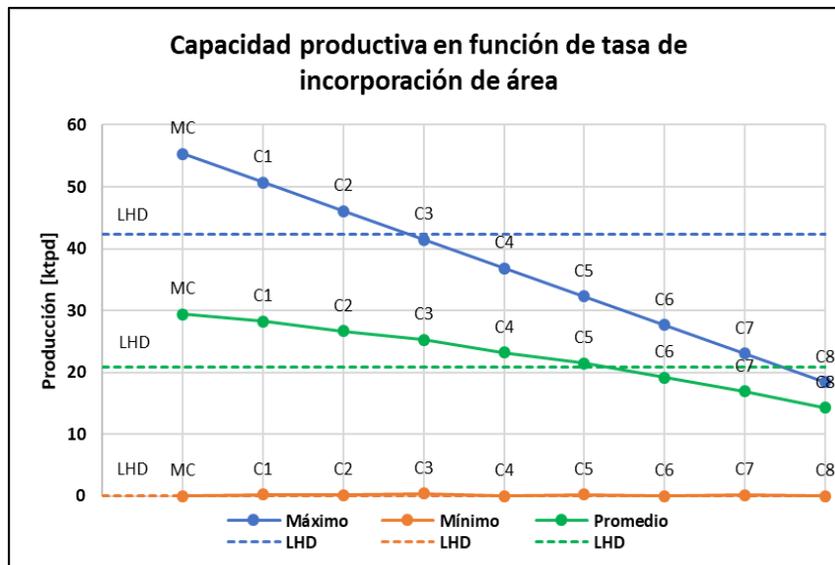


Figura 18.- Variación de la capacidad productiva de la MC en función de la tasa de incorporación de área.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

En la Figura 18 se muestra el descenso que experimenta la capacidad productiva máxima y promedio de la Minería Continua a medida que disminuye la tasa de incorporación de área. Lo anterior puede ser explicado debido a que al tener una menor capacidad de incorporar sectores productivos disminuye el acoplamiento de sectores en operación que pueden aportar a la producción global del yacimiento ya que, por una parte, se tiene menor cantidad de puntos de extracción nuevos cada mes y, por otra parte, se agotan aquellos puntos de extracción de periodos previos.

Se puede notar, además, que una disminución de la tasa de incorporación de área a aproximadamente 1.800 m²/mes, equivalentes a 7 puntos de extracción, genera una capacidad productiva promedio igual a la que ofrece el sistema de extracción con equipos LHD.

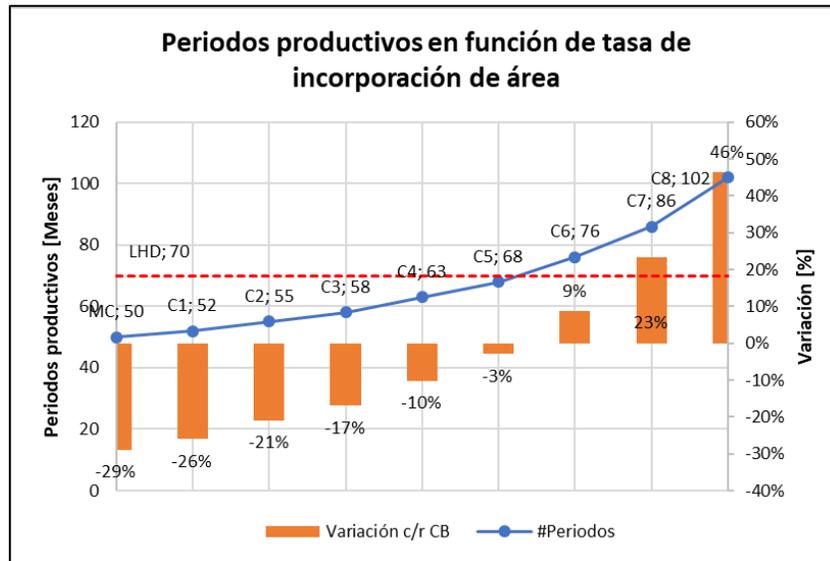


Figura 19.- Variación de los periodos productivos en la MC en función de la tasa de incorporación de área.

La Figura 19 muestra el aumento en el tiempo requerido para la explotación de las reservas del yacimiento a medida que disminuye la tasa de incorporación de área. Se aprecia que para una tasa de incorporación de 1.800 m²/mes se tiene el mismo número de periodos de producción, debido principalmente a la igualdad en la capacidad productiva promedio. En la Tabla 6 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad de la tasa de incorporación de área en la capacidad productiva de la Minería Continua, se puede notar que para rendimientos de incorporación de área inferiores a los 1.800 m²/mes tanto la capacidad productiva promedio como los periodos necesarios para completar la explotación son desfavorables con respecto a la extracción con LHD.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

Tabla 6.- Resumen resultados análisis de capacidad productiva en función de tasa de incorporación de área.

Caso	Área incorporada [m ² /mes]	Cap. Prod. Máx [ktpd]	Cap. Prod. Promedio [ktpd]	Vext. Promedio [t/m ² -día]	Periodos [Meses]	Variación Cap. Prod.	Variación Periodos
LHD	3.072	42,3	20,9	0,43	70	-	-
MC	3.072	55,3	29,4	0,98	50	41%	-29%
C1	2.816	50,7	28,2	0,98	52	35%	-26%
C2	2.560	46,1	26,7	0,98	55	28%	-21%
C3	2.304	41,5	25,3	0,98	58	21%	-17%
C4	2.048	36,9	23,2	0,97	63	11%	-10%
C5	1.792	32,3	21,5	0,97	68	3%	-3%
C6	1.536	27,6	19,2	0,97	76	-8%	9%
C7	1.280	23,0	16,9	0,96	86	-19%	23%
C8	1.024	18,4	14,3	0,96	102	-32%	46%

En la Tabla 7 y Tabla 8 se muestra un análisis de sensibilidad la tasa de incorporación de área en función de la altura de columna extraíble y el área del bloque, respectivamente.

Tabla 7.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función de la altura de columna extraíble y la tasa de incorporación de área para un área basal de 80mil m².

Periodos [mes]	Área incorporada [m ² /mes]	Hcol = 100 m	Hcol = 200 m	Hcol = 400 m	Hcol = 600 m
		A= 80mil m ²			
LHD	3.072	49	70	113	155
MC	3.072	39	50	71	93
	2.816	41	52	73	95
	2.560	44	55	76	98
	2.304	47	58	79	101
	2.048	52	63	84	106
	1.792	57	68	89	111
	1.536	65	76	97	119
	1.280	75	86	107	129
1.024	91	102	123	145	

De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 7 se puede notar que a medida que aumenta la altura de columna extraíble, la disminución de la tasa de incorporación de área tiene un menor efecto en el número de periodos productivos requeridos para llevar a cabo la explotación del bloque en donde, por ejemplo, a una altura extraíble de 100 m una tasa de incorporación inferior a 2.300 m²/mes desfavorece al sistema MC, mientras que para una altura de 200 m el escenario desfavorable para la MC se presenta para tasas de incorporación inferiores a 1.800 m²/mes.

Por otra parte, en la Tabla 8 se observa que a medida que aumenta el área basal del bloque explotado la capacidad productiva promedio de la MC, reflejada en el número de periodos de explotación requeridos, se vuelve más sensible a la disminución de la tasa de incorporación de área, como

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

ejemplo, se puede ver que para un área de bloque de 80 mil m², una tasa de incorporación de área superior a 1.800 m²/mes permite que la explotación por MC requiera de una menor cantidad de periodos que el caso LHD, mientras que para un área de bloque de 150 mil m², la tasa de incorporación debe ser superior a 2.300 m²/mes para que la MC mantenga su ventaja productiva.

Tabla 8.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función del área del footprint y la tasa de incorporación de área para una altura de columna extraíble de 200 m.

Periodos [mes]	Área incorporada [m ² /mes]	Hcol = 200 m			
		A= 40mil m ²	A= 80mil m ²	A= 150mil m ²	A= 300mil m ²
LHD	3.072	57	70	92	141
MC	3.072	37	50	72	121
	2.816	38	52	77	130
	2.560	39	55	82	141
	2.304	41	58	89	154
	2.048	43	63	97	170
	1.792	46	68	107	191
	1.536	50	76	121	219
	1.280	55	86	141	258
	1.024	63	102	170	316

En resumen, se observa que un aumento en la altura de columna extraíble da mayor flexibilidad a la tasa de incorporación de puntos de extracción requerida para mantener la ventaja productiva de la MC con respecto a la extracción con equipos LHD mientras que un aumento en el área del bloque disminuye la flexibilidad en cuanto a la tasa de incorporación de área, disminuyendo el margen sobre el cual la MC tiene ventaja. En la Tabla 47 del apartado de Anexos (Anexo C) se muestran resultados adicionales de sensibilidad de tasa de incorporación de área para distintas geometrías.

4.1.2 Velocidad de extracción en quiebre

La velocidad de extracción en quiebre, tal como se definió previamente, corresponde a la tasa a la cual son explotadas las reservas minerales mientras el hundimiento se encuentra en etapa de propagación, no habiendo alcanzado la superficie. Laubscher (1997-2000), a partir de distintos casos de estudio, estableció la razón existente entre la tasa de hundimiento y la calidad del macizo rocoso (ver Figura 20).

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

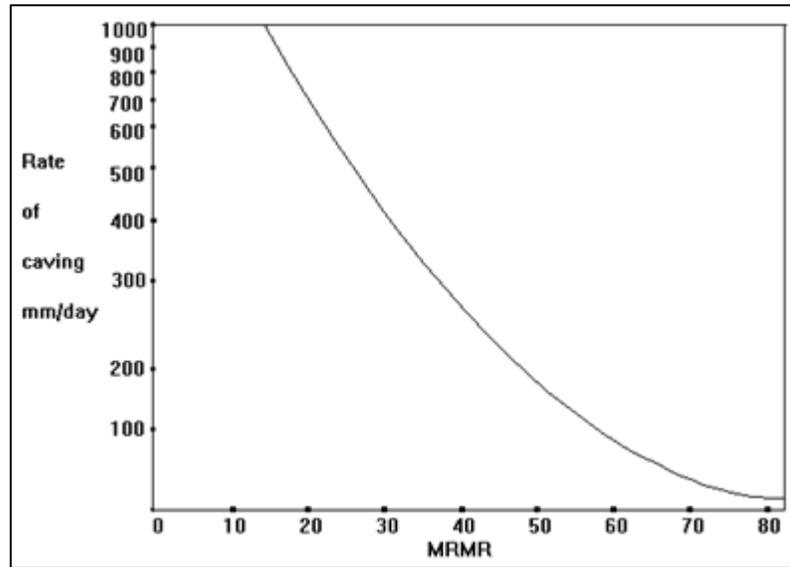


Figura 20.- Relación entre tasa de hundimiento y calidad del macizo rocoso. (Laubscher, 1997-2000)

La tasa de hundimiento, a su vez, guarda relación directa con la velocidad de extracción permitida para cada tipo de macizo rocoso, en donde se tiene que la suma entre el volumen de air gap generado y el volumen de material in situ debe ser igual al volumen generado por el material quebrado (Brown, 1997-2004). En la Figura 21 se esquematiza la situación planteada.

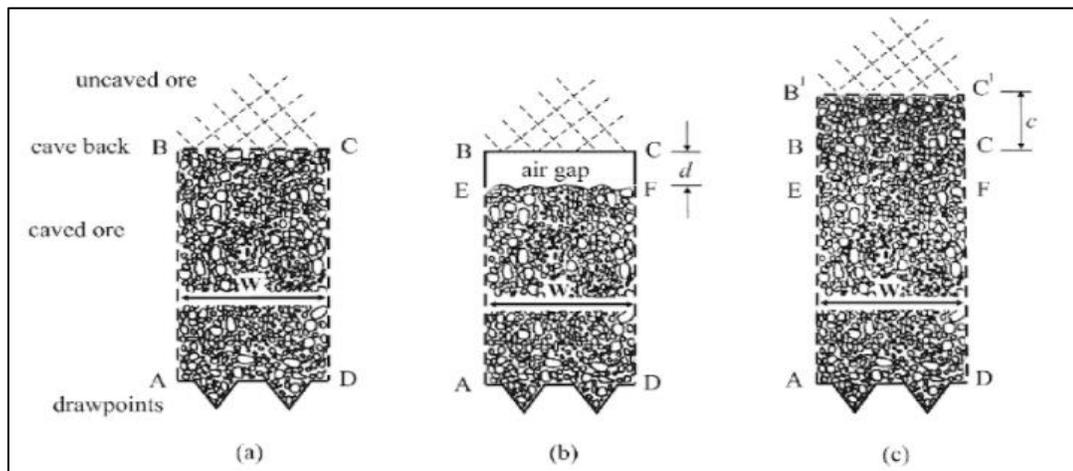


Figura 21.- Relación entre volumen in situ, air gap y volumen esponjado en una columna de extracción.

En la Figura 22 se muestra la relación existente entre la tasa de quiebre y la velocidad de extracción máxima permitida en donde se refleja, de manera transitiva, la disminución de la velocidad de extracción a medida que aumenta la competencia del macizo rocoso, evaluado en etapa de quiebre.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

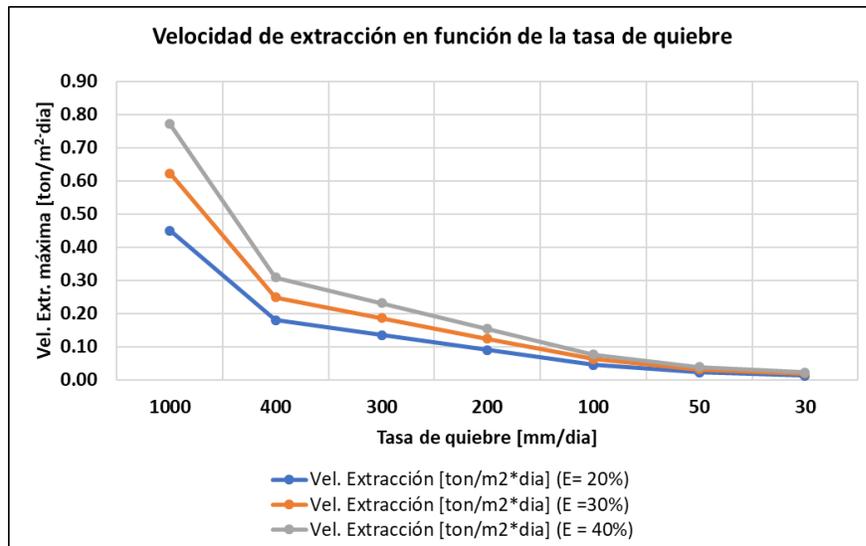


Figura 22.- Velocidad de extracción en función de la tasa de quiebre del macizo rocoso. (Paredes, 2012)

En la Tabla 9 se resumen los valores para la velocidad de extracción máxima permitida para cada calidad de macizo rocoso, cabe mencionar que para los análisis de la capacidad de productiva se toma en consideración el esponjamiento medio (30%).

Tabla 9.- Velocidad de extracción máxima en quiebre en función del índice MRMR.

MRMR	Tasa de quiebre [m/día]	Velocidad de extracción [t/m ² -día]		
		E = 20%	E = 30%	E = 40%
20	1	0,45	0,62	0,77
30	0,4	0,18	0,25	0,31
40	0,3	0,14	0,19	0,23
50	0,2	0,09	0,12	0,15
60	0,1	0,05	0,06	0,08
70	0,05	0,02	0,03	0,04
80	0,03	0,01	0,02	0,02

En la Figura 23 se muestra el plan de producción para yacimientos de iguales dimensiones en donde se asignó a cada uno un valor del índice MRMR diferente, siendo estos de 30, 50 y 70, a los cuales les corresponde una distinta velocidad de extracción en quiebre. Se observa que para el macizo rocoso de menor competencia la liberación de la velocidad de extracción comienza de manera anticipada, con lo que es posible alcanzar una mayor producción máxima, en torno a 55 ktpd, debido al acoplamiento de sectores productivos liberados, provocando un agotamiento de las reservas extraíbles en un periodo menor.

Por otra parte, se observa en el plan para un macizo rocoso con MRMR de 50, la producción máxima alcanzable es inferior en aproximadamente un 10% con respecto al primer caso, comenzando la liberación progresiva de las columnas de extracción en un periodo superior en un 100% con respecto al caso anterior, significando un aumento de los periodos productivos en aproximadamente un 30%. Por último, se observa que, para macizos rocosos competentes, con

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

MRMR de 70, el efecto de la velocidad de extracción en quiebre es altamente significativo en el número de periodos requeridos para la liberación y posterior agotamiento de las columnas extraíbles, además de representar una disminución de aproximadamente 20% en la capacidad productiva máxima alcanzable.

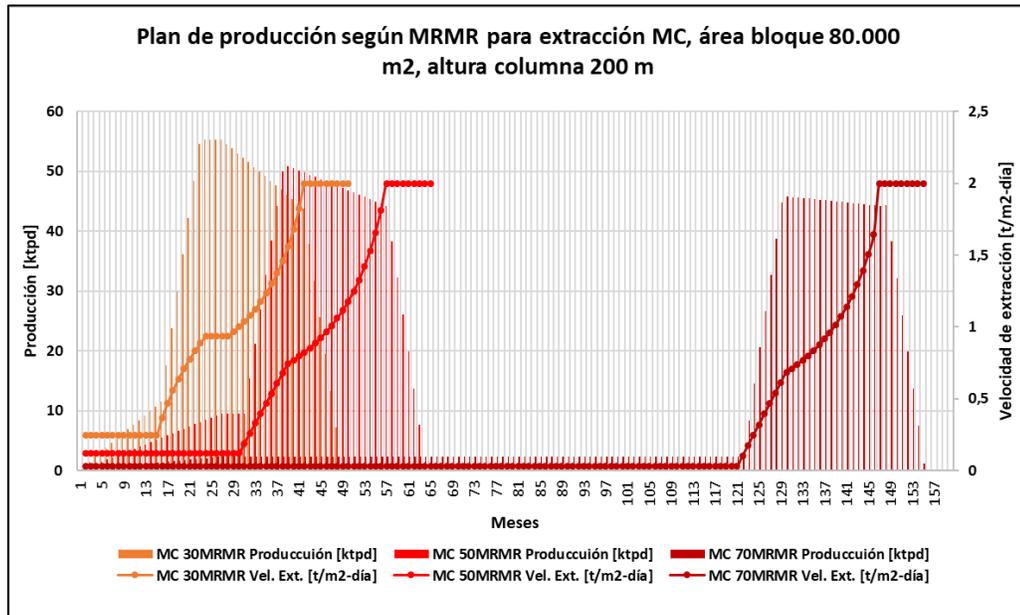


Figura 23.- Efectos de la velocidad de extracción en quiebre en la capacidad productiva de la MC.

En la Figura 24 se muestra la tendencia al aumento de los periodos productivos en función de la velocidad de extracción en quiebre, se observa que tanto para la Minería Continua como para la extracción con equipos LHD una variación de la tasa de extracción en quiebre de 0,25 t/m²-día a 0,03 t/m²-día significa un aumento de más de 210% en los periodos necesarios para la extracción.- Variación del tiempo de extracción en función de la velocidad de extracción en quiebre.

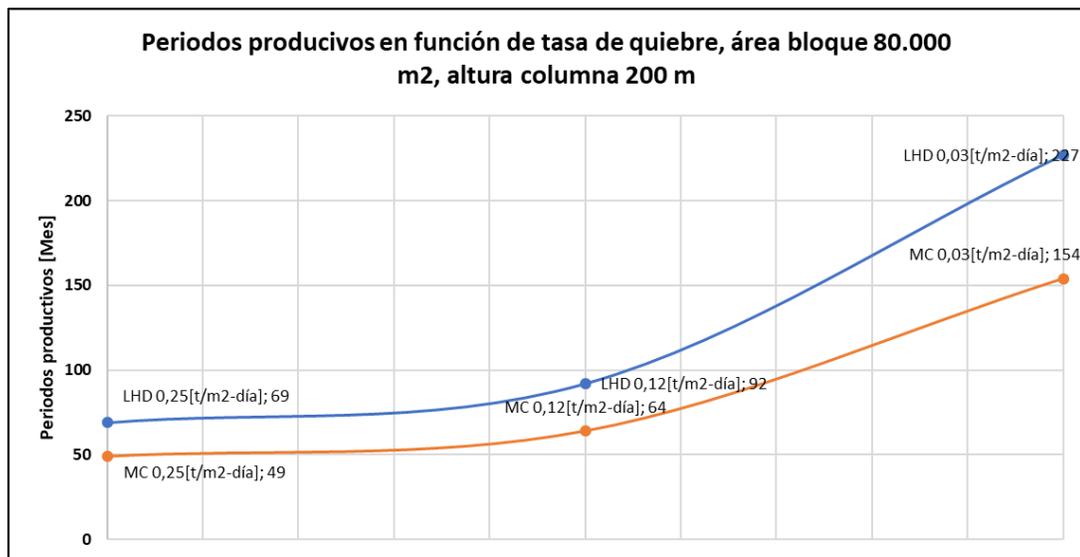


Figura 24.- Variación del tiempo de extracción en función de la velocidad de extracción en quiebre.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

En la Figura 25 se muestra gráficamente el descenso que experimenta tanto la capacidad productiva máxima como la promedio que puede alcanzar la Minería Continua y extracción con LHD con la disminución de la velocidad de extracción en quiebre. Se muestra que, para la MC una disminución de la velocidad de extracción de 0,25 t/m²-día a 0,03 t/m²-día la capacidad productiva promedio descende en un 68% de 30 ktpd a 10 ktpd.

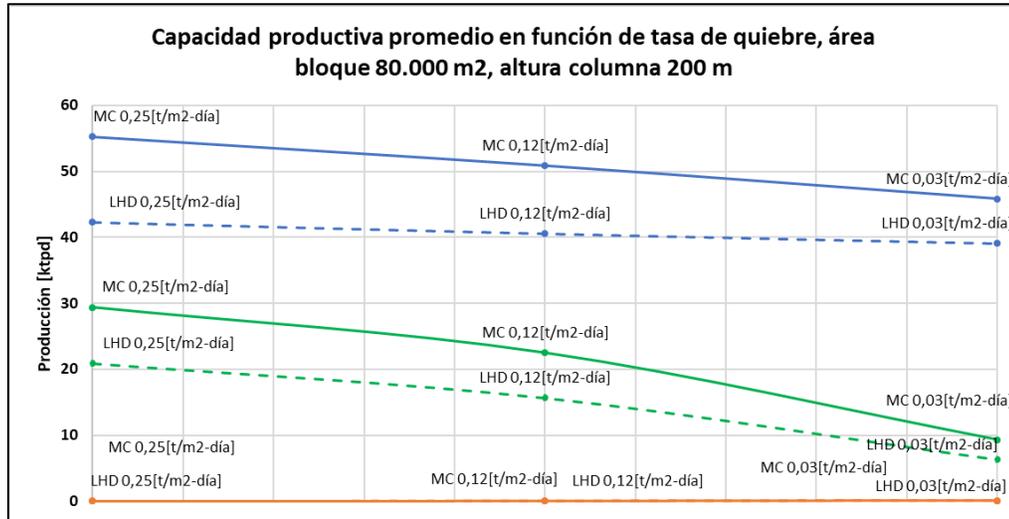


Figura 25.- Variación de la capacidad productiva en función de la velocidad de extracción en quiebre. (Azul, verde y naranja representan MRMR de 30, 50 y 70, respectivamente)

La Tabla 10 resume los principales resultados obtenidos a partir del ejercicio realizado para la velocidad de extracción en quiebre.

Tabla 10.- Capacidad productiva en función de velocidad de extracción en quiebre para la MC.

MRMR	Vext. Quiebre [t/m ² -día]	Vext. Régimen [t/m ² -día]	Cap. Prod. Máxima [ktpd]	Cap. Prod. Promedio [ktpd]	Vext. Promedio [t/m ² -día]	Periodos [Meses]	Variación periodos	Variación Cap. Prod.
30	0,25	2	55,3	29,4	1,0	49	-	-
50	0,12	2	50,9	22,5	0,7	64	31%	-24%
70	0,03	2	45,8	9,4	0,3	154	214%	-68%

4.1.3 Velocidad de extracción en régimen

La velocidad de extracción en régimen forma parte de uno de los principales aspectos distintivos de la Minería Continua. Tal como se mostró en la evaluación de los casos base (Figura 16 y Figura 17), este parámetro genera diferencias significativas en el plan de producción de un determinado yacimiento tanto en capacidad productiva como en cantidad de periodos necesarios para la explotación de las reservas. Sin embargo, dicha velocidad de extracción inicial puede no ser alcanzada, ya sea por problemas operacionales, restricciones de capacidad de transporte, fallas de equipos, etc., lo cual puede tener efectos en la producción máxima.

En la Tabla 11 se muestran los casos analizados para la velocidad de extracción en régimen de la Minería Continua.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

Tabla 11.- Casos análisis velocidad de extracción en régimen.

Caso	Nomenclatura	V. Ext. Régimen [t/m ² -día]
Extracción LHD Base	LHD	0,6
Extracción MC Base	MC	2,0
Extracción MC Caso 1	C1	1,9
Extracción MC Caso 2	C2	1,8
Extracción MC Caso 3	C3	1,7
Extracción MC Caso 4	C4	1,6
Extracción MC Caso 5	C5	1,5
Extracción MC Caso 6	C6	1,4
Extracción MC Caso 7	C7	1,3
Extracción MC Caso 8	C8	1,2
Extracción MC Caso 9	C9	1,1
Extracción MC Caso 10	C10	1,0
Extracción MC Caso 11	C11	0,9
Extracción MC Caso 12	C12	0,8
Extracción MC Caso 13	C13	0,7
Extracción MC Caso 14	C14	0,6

En la Figura 26 se muestra el plan de producción para cada caso planteado observándose claramente la disminución de la capacidad productiva máxima y el aumento en el número de periodos productivos con la disminución de la velocidad de extracción. Se muestra que en el caso para el cual se iguala la velocidad de extracción de la Minería Continua y la extracción con LHD, la MC requiere de una menor cantidad de periodos, esto debido a la premisa en la cual se basa la MC, en la cual la liberación de la columna extraída se produce a un 20% de extracción (Cerruti, 2008) en lugar de un 30%, utilizado para extracción convencional, teniendo en consideración que el PA se define como una de las etapas o componentes del sistema de MC, el cual es el verdadero responsable de la conexión temprana del caving.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

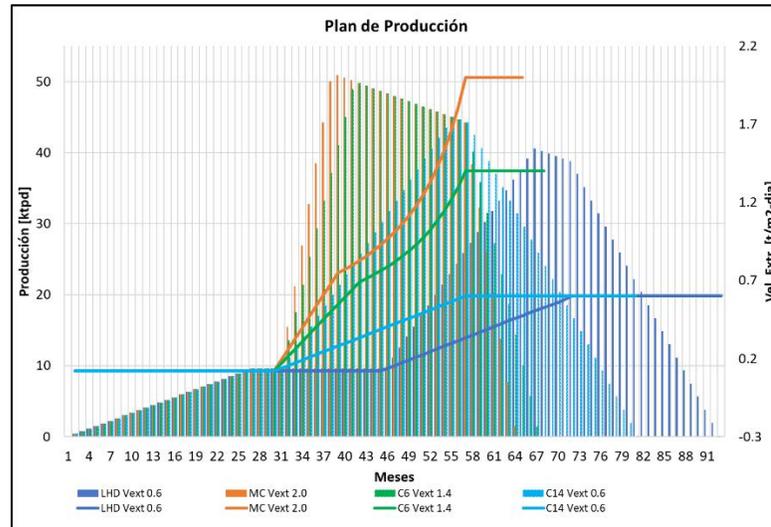


Figura 26.- Plan de producción para diferentes velocidades de extracción en régimen.

En la Figura 27 se muestra el tiempo de extracción requerido en función de la velocidad de extracción. Se muestra que, para la Minería Continua, si bien existe un aumento en el tiempo de requerido al disminuir la velocidad de extracción este es de tan solo un 20% al pasar de 2,0 t/m²-día a 0,6 t/m²-día, siendo además inferior al tiempo utilizado por los equipos LHD. Es preciso mencionar que para este análisis no se considera restricción de capacidad del sistema de manejo de materiales para la MC, sino que se analiza en términos de potencial productivo.

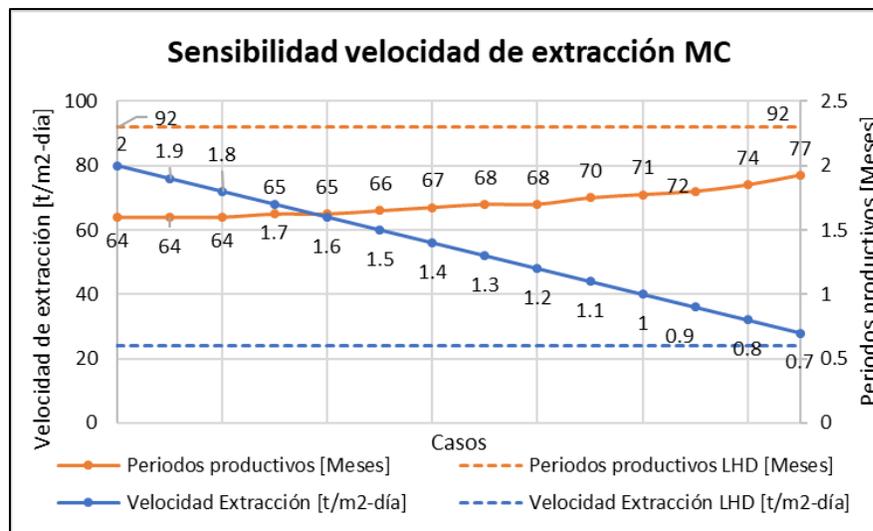


Figura 27.- Análisis de sensibilidad de capacidad productiva en función de velocidad de extracción en régimen.

A través del ejercicio realizado se puede notar la mayor velocidad de extracción proyectada para la Minería Continua es una de las principales ventajas con respecto a la extracción con equipos LHD, permitiendo agotar en menor tiempo las reservas disponibles. En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis de sensibilidad de la velocidad de extracción en régimen. Es preciso mencionar que el resto de las variables (altura extraíble, geometría, etc.) corresponden a las establecidas en el caso base planteado al comienzo del capítulo.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

Tabla 12.- Resumen resultados análisis capacidad productiva en función de velocidad de extracción en régimen.

Caso	Vext. Régimen [t/m ² -día]	Vext. Promedio [t/m ² -día]	Cap. Prod. Máx [ktpd]	Cap. Prod. Promedio [ktpd]	Periodos [Meses]	Variación Periodos	Variación Cap. Prod.
LHD	0,6	0,3	40,6	15,7	92	-	-
MC	2,0	0,7	50,9	22,5	64	-30%	44%
C1	1,9	0,7	50,9	22,5	64	-30%	44%
C2	1,8	0,6	50,9	22,5	64	-30%	44%
C3	1,7	0,6	50,5	22,2	65	-29%	42%
C4	1,6	0,6	50,5	22,2	65	-29%	42%
C5	1,5	0,6	50,2	21,8	66	-28%	39%
C6	1,4	0,6	49,8	21,5	67	-27%	37%
C7	1,3	0,6	49,5	21,2	68	-26%	35%
C8	1,2	0,5	49,4	21,2	68	-26%	35%
C9	1,1	0,5	48,7	20,6	70	-24%	31%
C10	1,0	0,5	48,3	20,3	71	-23%	30%
C11	0,9	0,4	47,9	20,0	72	-22%	28%
C12	0,8	0,4	47,2	19,5	74	-20%	24%
C13	0,7	0,4	46,1	18,7	77	-16%	19%
C14	0,6	0,3	45,0	18,0	80	-13%	15%

4.1.4 Geometría del yacimiento

Se presenta a continuación el análisis de la capacidad productiva para la Minería Continua en función de las principales variables geométricas del yacimiento: área del bloque o footprint y altura de columna extraíble.

4.1.4.1 Área de bloque

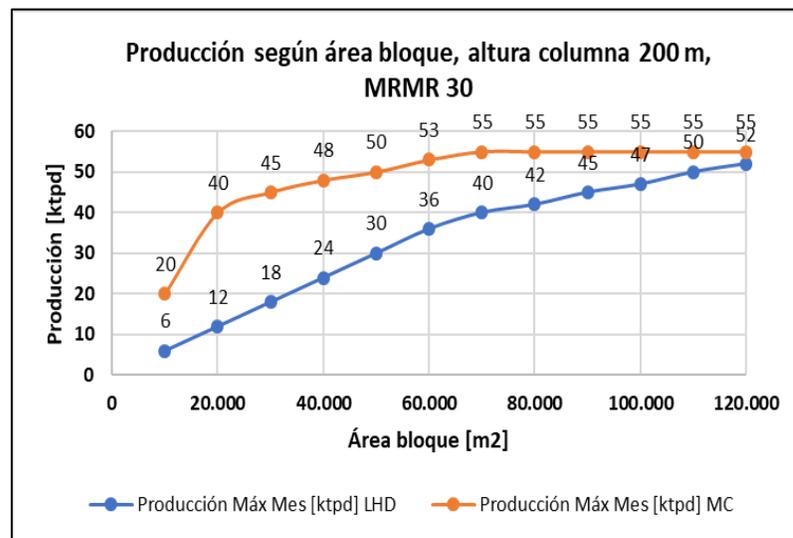


Figura 28.- Análisis de la capacidad productiva en función de área de bloque.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

En la Figura 28 se muestra la capacidad productiva máxima alcanzable para un yacimiento que tiene un macizo rocoso con un índice MRMR de 30 y una altura de columna de 200 m. se varía el área de bloque extraíble entre 10.000 m² y 120.000 m². Se observa que entre 20.000 m² y 40.000 m² se produce la mayor diferencia en producción máxima alcanzable entre extracción MC y LHD, siendo un 230% en la MC para un área de 20.000 m². Sin embargo, para áreas más grandes la diferencia de producción comienza a reducirse, siendo prácticamente iguales a 120.000 m². La estabilización que se produce en la capacidad productiva máxima de la MC se debe principalmente a la altura de columna utilizada para la comparación, la cual limita el máximo posible en 55 ktpd.

La altura de columna extraíble y la velocidad de extracción (en quiebre y régimen) son los principales parámetros que definen el tiempo en producción de un punto de extracción, de acuerdo con la expresión mostrada en la siguiente expresión.

$$T_{Prod}[\text{día}] = \rho \left[\frac{t}{m^3} \right] * \frac{1}{v_{ext}} \left[\frac{m^2 * \text{día}}{t} \right] * H_{Col}[m]$$

T_{Prod} : Tiempo en producción para un punto de extracción

ρ : Densidad del macizo rocoso

v_{ext} : Velocidad de extracción

H_{Col} : Altura de columna

Se deduce que, el tiempo en producción, disminuye con el aumento de la velocidad de extracción y aumenta con la altura de columna asociada a dicho punto. En base a esto, se tiene que cada punto de extracción tendrá un periodo productivo fijo una vez que comience su producción, el cual será definido por los dos factores mencionados previamente, adicionalmente, se debe tener en cuenta que los puntos de extracción entrarán en producción en la medida en que se incorpore área productiva, cuyo valor se define a través de la tasa de incorporación, por lo tanto, la capacidad productiva máxima de un yacimiento depende de la cantidad de puntos de extracción que operan simultáneamente, siendo más en la medida que poseen un mayor tiempo productivo (i.e. mayor altura de columna), para una tasa de incorporación de puntos dada.

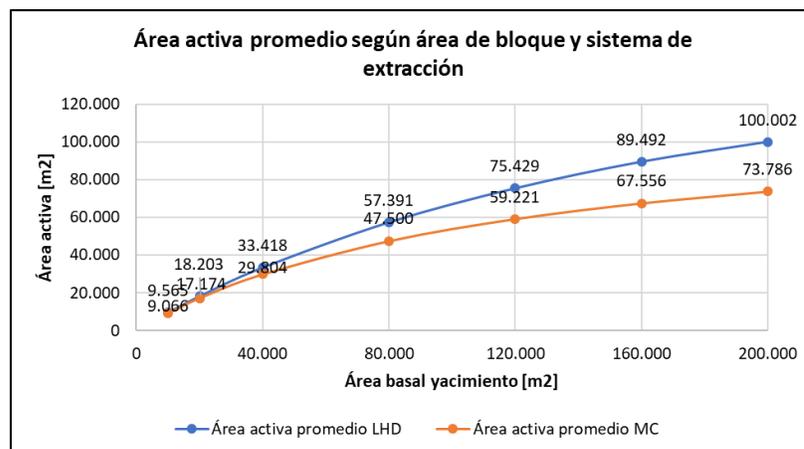


Figura 29.- Área activa en función del área del bloque.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

4.1.4.2 Altura de columna

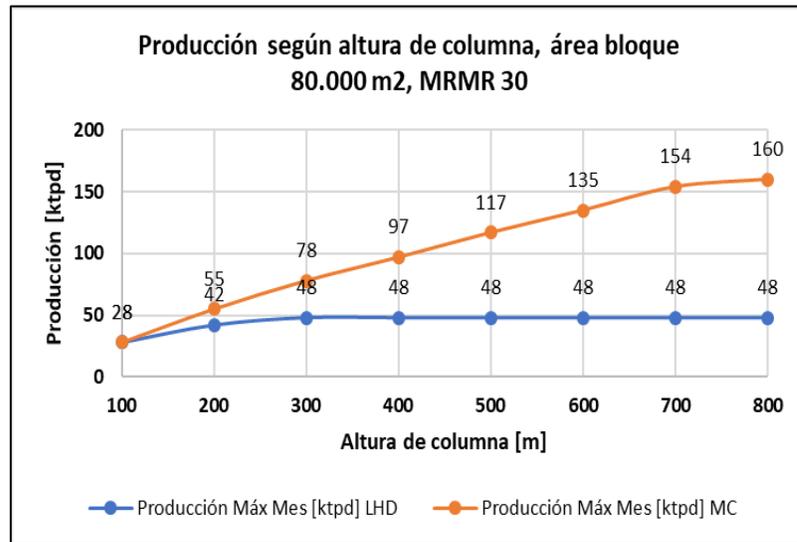


Figura 30.- Análisis de la capacidad productiva en función de la altura de columna extraíble.

En la Figura 30 se muestra la capacidad productiva máxima para un yacimiento con un índice MRMR de 30 y un área de bloque de 80.000 m². Se observa que, para alturas de columna inferiores a 200 m, la diferencia de capacidad productiva entre MC y LHD es mínima, igualándose a alturas extraíbles bajo 100 m. Sin embargo, se puede notar que, a medida que aumenta la altura de columna extraíble, la diferencia entre las capacidades productivas de ambos sistemas de extracción se acentúa debido a que, por una parte, la extracción LHD alcanza su máximo posible, restringido principalmente por su velocidad de extracción en régimen y, por otra parte, la MC tiene la opción de alcanzar su potencial productivo máximo debido al mayor tiempo en producción que le otorga a un punto una mayor altura de columna, permitiendo así que se acoplen los aportes productivos de más puntos de extracción y aumente el área activa en explotación, tal como se observa en la Figura 31.

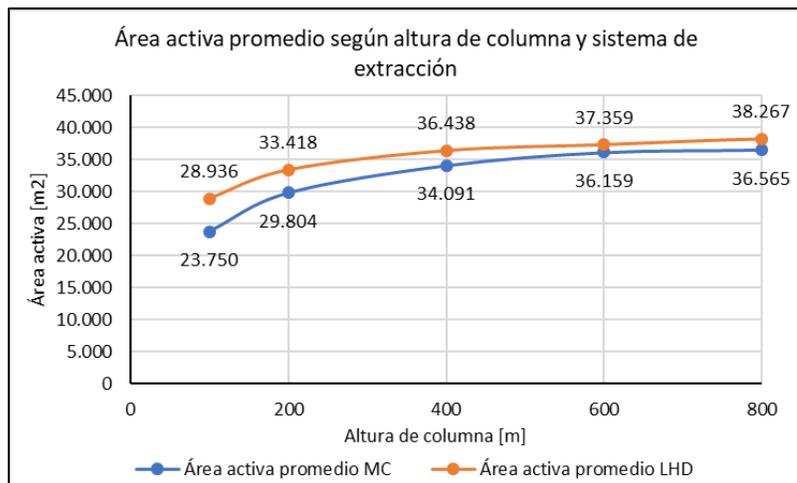


Figura 31.- Área activa en función de la altura de columna.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

En la Figura 32 se muestra la diferencia porcentual de la capacidad productiva máxima alcanzable para la MC con respecto a la extracción LHD para diferentes configuraciones geométricas. (La producción máxima para MC y LHD para cada configuración evaluada se muestra en la Figura 67 y Figura 68 en Anexo A)

Diferencia Prod Máx [%]		ALTURA [m]								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
AREA [m ²]	10 mil	95%	210%	233%	233%	233%	233%	233%	233%	233%
	20 mil	33%	95%	233%	233%	233%	233%	233%	233%	233%
	40 mil	0%	33%	98%	182%	233%	233%	233%	233%	233%
	80 mil	0%	0%	31%	62%	102%	143%	182%	222%	233%
	120 mil	0%	0%	6%	31%	48%	76%	102%	128%	156%
	160 mil	0%	0%	0%	13%	31%	43%	62%	82%	102%
	200 mil	0%	0%	0%	0%	17%	30%	40%	54%	70%
	240 mil	0%	0%	0%	0%	6%	19%	30%	40%	49%
	280 mil	0%	0%	0%	0%	0%	10%	21%	30%	38%
	320 mil	0%	0%	0%	0%	0%	2%	12%	22%	30%
	360 mil	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	15%	23%

Figura 32.- Diferencia porcentual entre capacidad productiva máxima con MC y LHD para velocidades de extracción y RMR definidas en caso base.

De la Figura 32 se puede notar que la igualdad en la capacidad productiva máxima alcanzable entre la MC y la extracción con LHD's se tiende a eliminar a medida que se aumenta la altura de columna extraíble. El caso crítico se observa para alturas inferiores a 100 m en donde para áreas superiores a 20 mil m² no se espera diferencia en la producción máxima para ambos sistemas, perdiéndose así la principal ventaja de la MC. Por parte del área del bloque, se observa que su efecto es relevante para áreas inferiores a 40 mil m², en donde se aprecian diferencias notorias en la capacidad productiva para alturas de columna de hasta 200 m.

4.1.5 Frecuencia de colgaduras

La frecuencia de colgaduras o encadenamientos afecta la continuidad operacional de la MC, teniendo efectos en la velocidad de extracción promedio con la cual se extrae en el estado de régimen. Simulaciones de eventos discretos (IM2, 2012) muestran que la velocidad con la cual se extrae un sector explotado con MC está relacionada con la frecuencia de colgaduras producidas en dicho lugar. En la Figura 33 se muestran los resultados obtenidos por IM2 a partir de la simulación realizada para un módulo de MC, en donde se aprecia que la velocidad de extracción alcanzada para altas tasas de colgaduras (1 colgadura cada 200 t extraídas) se encuentra restringida a un 50% del valor objetivo de la MC, llegando a 1 t/m²-día, teniendo así un importante efecto. Se observa que la velocidad de extracción aumenta progresivamente con el descenso del número de eventos de colgadura, aproximándose a 2 t/m²-día cuando el tonelaje entre colgaduras es igual a 800 t.

Como principal resultado de la simulación realizada se tiene que un adecuado control de la frecuencia de colgaduras permite alcanzar la velocidad de extracción deseada para la MC.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

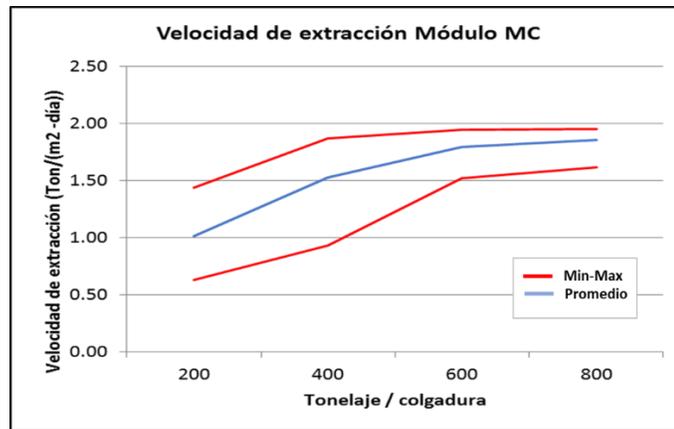


Figura 33.- Velocidad de extracción en MC en función de la frecuencia de colgaduras. (IM2, 2012)

Por otra parte, uno de los factores que afecta en la frecuencia de colgaduras corresponde al tamaño de los fragmentos que se desplazan hacia los puntos de extracción y su relación de tamaño con la batea. El gráfico de la Figura 34 muestra una recopilación de información relativa al tamaño máximo de colpa, d_{100} y su razón con el largo de batea experimentos realizados a escala de laboratorio (ver Tabla 14), correspondiente a experimentos realizados a escala de laboratorio para pruebas de extracción con equipos LHD y Minería Continua. De acuerdo con lo mostrado en la Figura 34 la razón de largo/ d_{100} que permite el tonelaje deseado entre eventos de colgadura para alcanzar velocidades de extracción en torno a $2 \text{ t/m}^2\text{-día}$, corresponde a $L/d_{100}=3$. Para el caso de partículas con alto grado de esfericidad (igual dimensión en tres ejes coordenados), el volumen correspondiente para la razón mencionada es de aproximadamente 5 m^3 . Adicionalmente, se muestra que para una razón $L/d_{100}=2$, el índice de colgaduras esperado es de 1,5 eventos cada 1.000 t, un 50% mayor al caso deseado, para esta razón se espera un d_{100} de aproximadamente 15 m^3 . En la Tabla 13 se muestra un resumen de los tamaños de eje máximo y su índice de colgadura esperado en base a la información otorgada gráficamente.

Tabla 13.- Índice de colgadura esperado para la MC en función de tamaño máximo de colpa.

IC [#colg/1.000 t]	Lb/ d_{100}	d_{100} [m]	d_{100} [m^3]
0,5	3,6	1,4	2,7
1	3	1,7	4,6
1,5	2	2,5	15,6
2	1,5	3,3	37,0

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

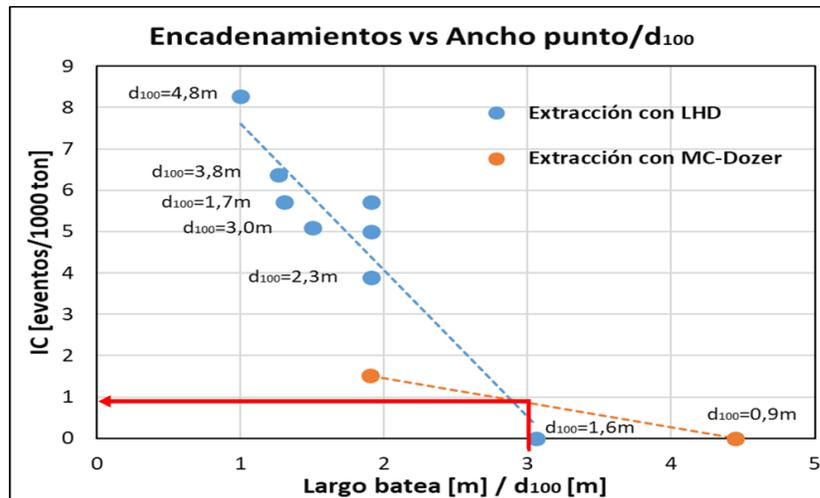


Figura 34.- Frecuencia de colgaduras en función de razón largo de batea/d₁₀₀.

Tabla 14.- Resumen de los experimentos de flujo realizados a escala laboratorio escalados. (BCTEC, 2017)

Autor	Tipo de extracción	Ancho punto [m]	Largo batea [m]	d ₁₀₀ [m]	Razón Ap/d ₁₀₀	Razón Lb/d ₁₀₀	IC [eventos/1.000 t]
Sotomayor 2016	LHD	4,8	11,0	3,8	1,3	-	6,4
		4,8	11,0	4,8	1,0	-	8,3
López 2016		4,4	14,6	2,3	1,9	-	3,9
		4,4	14,6	2,3	1,9	-	5,0
		4,4	14,6	2,3	1,9	-	5,7
Henríquez 2017		4,8	14,0	1,6	3,1	-	0
		4,8	14,0	3,7	1,5	-	5,7
Sánchez 2017		4,5	14,6	3,0	1,5	-	5,1
Orellana 2012	MC	4,0	5	0,9	-	5,5	0
		4,0	5	2,1	-	2,4	1,5

4.2 Otras variables

En la Minería Continua y la minería subterránea en general, existen una serie de variables que condicionan la operación no solo en capacidad productiva, sino que tienen que ver con continuidad operacional, seguridad, entre otras. A continuación, se analizan brevemente distintas variables que afectan a la operación subterránea en general evaluándose desde el punto de vista particular de la Minería y Continua y su efecto en esta, a su vez, se interrelacionan las variables planteadas para comprender de mejor manera el efecto potencial sobre la operación de MC.

Un aspecto clave para el funcionamiento y cumplimiento de los objetivos operacionales y productivos de la Minería Continua tiene relación con la continuidad operacional que presenta el sistema. Esta continuidad, se encuentra condicionada tanto por factores propios de la MC, como sus componentes y equipos, y por factores relacionados al entorno, como lo son el macizo rocoso, la fragmentación, condición de agua y humedad de la mina, entre otros.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

4.2.1 Fragmentación, macizo rocoso y pre acondicionamiento

La fragmentación del mineral tiene gran importancia al momento de llevar a cabo la operación ya que condiciona, entre cosas, la continuidad del proceso de extracción y la frecuencia con la cual se producen colgaduras, como se mostró previamente. La fragmentación, se encuentra relacionada con la competencia del macizo rocoso, la cual define tanto el volumen esperado de colpas como la tasa a la cual se propaga el hundimiento (Laubscher, 1997-2000).

El pre acondicionamiento, como se definió, tiene el objetivo de reducir la fragmentación esperada del mineral por medio del debilitamiento del macizo rocoso y la generación de fracturas que promuevan y faciliten la propagación del hundimiento. En la Figura 35 se muestra una recopilación de información relativa a la tasa de propagación de hundimiento de distintas minas de caving en el mundo en función de la calidad del macizo rocoso, incluyéndose operaciones en donde se utilizó alguna técnica de PA y otras que no.

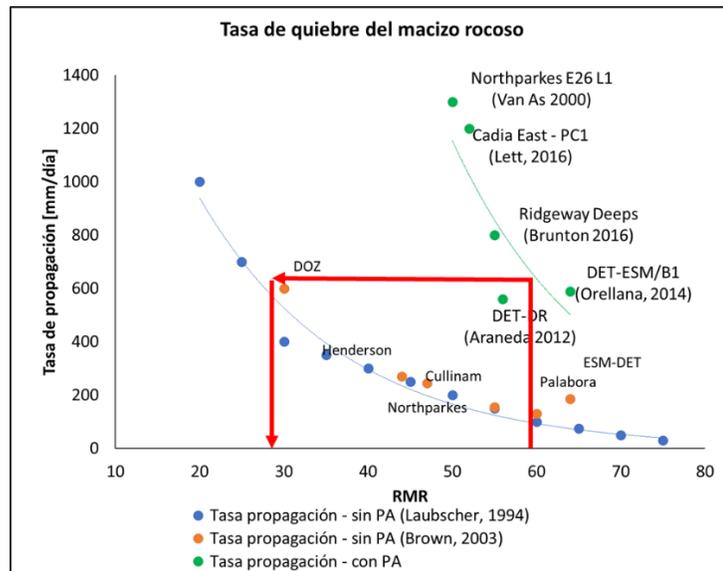


Figura 35.- recopilación tasas de propagación en minería subterránea. (BCTEC, 2017)

Se observa a modo de ejemplo que, en términos de tasa de propagación de caving, un macizo rocoso con un RMR de 60, sujeto a pre acondicionamiento, presente aproximadamente el mismo comportamiento que un yacimiento en donde no se aplicó pre acondicionamiento, que tiene un RMR de 30. Esto indica, que el pre acondicionamiento tiene la capacidad de disminuir la competencia del macizo rocoso y cambiar su comportamiento en cuanto a propagación de fracturas, lo cual puede disminuir la restricción de velocidad de extracción en quiebre.

4.2.2 Condición de agua, polvo y temperatura

Los aspectos descritos a continuación guardan directa relación con las condiciones de seguridad en la mina y la factibilidad de la operación.

4.2.2.1 Condición de agua

la presencia de agua en la mina junto con la existencia de material de fragmentación fina en la mina son dos de los factores que la posibilidad de formación de barro y eventuales escurrimientos (Butcher, 2005). El tipo de barro que se forme es función de la humedad presente, para humedades

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

altas (superiores a 11%) se espera que el mineral tenga un comportamiento fluido pudiendo generar bombeos o escurrimientos, mientras que para humedades bajas (entre 6% y 11%), se espera que se genere compactación, pudiendo detener el flujo de mineral a través de la columna de extracción y generando acumulaciones y colgaduras (BCTEC, 2017).

La naturaleza estacionaria de los equipos y componentes de la Minería Continua hacen que el sistema de extracción sea muy sensible ante eventos de agua-barro, ya que el sistema en sí no está diseñado para tratar material fluido o húmedo y no tiene la flexibilidad, como un sistema de extracción convencional con equipos LHD, como para abandonar sectores bajo agua-barro o realizar extracción remota con equipos tele comandados, debido a que sus equipos son fijos y no se pueden trasladar hacia otros sectores.

De acuerdo con información de División El Teniente, un yacimiento con un caudal de agua ingresando a la mina inferior a 120 l/s, posee un bajo riesgo de ingreso de agua-barro a la mina, por otra parte, si el caudal supera los 120 l/s se tiene un alto potencial de ingreso de agua barro, poniendo en riesgo la continuidad de la operación y la seguridad del personal presente en la mina.

4.2.2.2 Temperatura

La temperatura es un aspecto clave al momento llevar a cabo operaciones que consideran la participación de personas. Para el caso de la legislación chilena, el DS 72: Reglamento de Seguridad Minera, establece que “la temperatura máxima, medida en el termómetro de bulbo húmedo, en el interior de la mina no podrá exceder de treinta grados (30°) centígrados”. Por otra parte, en la mayoría de las zonas del planeta en las que no se tiene anomalías térmicas, el gradiente geotérmico oscila entre 25°C a 35°C/km (De Lima, 2005), significando aumentos de 2,5°C a 3,5°C cada 100 m de profundidad en la corteza terrestre.

La profundización de la minería subterránea trae consigo el desafío de enfrentar cada vez mayores temperaturas interior mina, requiriendo de importantes esfuerzos en refrigeración y ventilación para asegurar las condiciones de seguridad del personal y el adecuado funcionamiento de los equipos.

En este sentido, la Minería Continua, debido a su alto grado de automatización y su control y monitoreo de las operaciones a distancia, presenta ventajas con respecto a las operaciones convencionales actuales las cuales tienen alta participación de personal dentro de la operación.

4.2.2.3 Polvo

Contrario a la existencia de humedad o agua en la mina se encuentra el caso de un ambiente seco, el cual trae consigo la generación de polvo en suspensión, la cual afecta la visibilidad en el interior de la mina y puede además generar daños a la salud.

El principal problema a la salud que genera la presencia de polvo en suspensión en las faenas mineras corresponde a la silicosis, la cual es causada por la acumulación de sílice libre cristalizada que destruye progresivamente los pulmones del afectado, disminuyendo su capacidad respiratoria.

La constante exposición de personal a la inhalación de polvo de sílice, compuesto presente ampliamente en la corteza terrestre, genera un alto potencial de riesgo para contraer silicosis.

Ante este tipo de escenarios, la Minería Continua presenta una ventaja ya que en su planteamiento operacional no requiere de la intervención permanente de personal dentro de la operación misma,

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

lo que disminuye la exposición de las personas a las condiciones ambiente, limitando así el riesgo de contraer la enfermedad.

4.3 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se abordaron los diferentes aspectos en los cuales se involucra la Minería Continua, tanto en términos productivos, como operacionales y de seguridad. Con respecto al análisis de la capacidad productiva de la Minería Continua y sus condicionantes es posible concluir lo siguiente:

- La tasa de incorporación de área puede afectar de manera significativa la capacidad productiva de la MC y su tiempo de extracción, pudiendo generar rendimientos productivos inferiores con respecto al escenario de extracción con equipos LHD. Se concluye además que el efecto de la tasa de incorporación de área sobre la capacidad productiva promedio de la MC se acentúa a medida que aumenta el área del bloque, es decir, una disminución en este parámetro provoca una mayor disminución en la capacidad productiva media de la MC para un área de bloque más grande mientras que, por otra parte, su efecto disminuye a medida que aumenta la altura de columna extraíble. De lo anterior se deduce que para bloques con alturas de columna en torno a 100 m y área basal superior a 150 mil m² el efecto de la tasa de incorporación de área es más significativo que para yacimientos con mayores alturas de columna e inferior área basal como, por ejemplo, área de 80 mil m² y altura de columna de 300 m.
- La velocidad de extracción en quiebre condiciona fuertemente la capacidad productiva de la MC, teniendo efectos notorios en el tiempo necesario para la extracción. Para velocidades de extracción en quiebre permitidas inferiores a 0,12 t/m²-día no resulta aplicable la MC debido al bajo potencial productivo que puede alcanzar y exceso de periodos productivos requeridos (aumentando en más de 200% para una velocidad de 0,03 t/m²-día). Se recomienda manejar este parámetro por medio de la aplicación de técnicas de pre acondicionamiento.
- La velocidad de extracción en régimen, como principal característica distintiva de la MC, genera una condición de ventaja clara para la capacidad productiva de la MC, pudiéndose alcanzar tasas productivas superiores en un 15% con respecto a la extracción con LHD incluso cuando las velocidades de extracción máxima de ambos sistemas se igualan (en 0,6 t/m²-día). Lo anterior se debe al supuesto de que la liberación de la columna extraíble, debido a la utilización de PA, se produce anticipadamente en la MC con respecto a la extracción con LHD.
- El área de bloque tiene efectos significativos en la diferencia de capacidad productiva máxima de la MC con respecto a la extracción por medio de equipos LHD para alturas de columna extraíble superiores a 500 m, en donde se observó que la ventaja productiva de la MC con respecto a la extracción LHD disminuye a medida que aumenta el área de bloque, teniendo así una relación inversa. Para alturas de columna inferiores a 200 m, el área de bloque no muestra diferencias comparativas entre ambos tipos de extracción por lo que pierde valor como parámetro de análisis.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

- La altura de columna extraíble tiene claros efectos en la capacidad productiva de la Minería Continua y su potencial de desarrollo. Para alturas de columna inferiores a 100 m la MC no resulta viable ya que su capacidad productiva se ve igualada con la de los sistemas de extracción con equipos LHD, con respecto al caso base evaluado. Por otra parte, sobre 200 m de altura, la capacidad productiva de la MC supera ampliamente a la de los sistemas LHD alcanzando diferencias superiores a 300% entre ambas para el caso base. En términos más generales, se concluye que a medida que aumenta la altura de columna extraíble aumenta la ventaja productiva de la MC con respecto a la extracción LHD, mostrando una relación de proporcionalidad directa entre capacidad productiva y altura de columna. Esta es la variable geométrica más importante en el efecto sobre la capacidad productiva de la MC y sus ventajas comparativas con los equipos LHD.
- La continuidad operacional requerida para la MC se encuentra sujeta a la ocurrencia de 1 o menos eventos de colgadura cada 1.000 t extraídas. Esto se traduce en que el tamaño máximo esperado de colpa esperado en los puntos de extracción debe ser de 5 m³, pudiendo llegar a 15 m³, a costa de un aumento de los eventos de colgaduras esperados en un 50%.

En cuanto al análisis de las variables sin efecto directo en la capacidad productiva se concluye lo siguiente:

- La condición de agua comprende un aspecto prohibitivo para la aplicación de la MC debido al potencial riesgo de ingreso de agua-barro que existe en ambientes con alta tasa de infiltración y la poca flexibilidad del método MC para enfrentar dicho problema. Caudales de ingreso de agua a la mina superiores a 120 l/s significan una condición prohibitiva para la aplicación de la MC.
- La temperatura ambiente y las condiciones de polvo no comprenden un aspecto prohibitivo para la operación minera subterránea en sí, sin embargo, la MC presenta una ventaja comparativa con respecto a los sistemas de extracción convencionales debido a su alto grado de mecanización y automatización que permiten la operación a distancia y la baja exposición de personal a las condiciones mina.

En la Tabla 15 se muestran los principales criterios de aplicabilidad de la Minería Continua definidos a partir de los análisis realizados. Cabe mencionar que, a pesar de incluirse solo una variable que influye en la capacidad productiva de la MC, es preciso mantener conocimiento y control de las demás condiciones planteadas para el correcto control y aplicación de la MC como método de explotación.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DE LA MINERÍA CONTINUA

Tabla 15.- Criterios de aplicabilidad de la MC.

Variable	Clasificación		
Altura de columna extraíble [m]	<p>>200 m La MC puede alcanzar una capacidad productiva en régimen un 30% superior que un sistema por LHD</p>	<p>100-200 m La MC alcanza una capacidad productiva entre un 0-30% superior que un sistema LHD</p>	<p><100 m La MC tiene una capacidad productiva igual a un sistema de extracción con equipos LHD.</p>
d ₁₀₀ , tamaño máximo de colpa [m ³]	<p><5 m³ Se espera continuidad en la extracción de los dozer minimizando la ocurrencia de eventos de encadenamientos <1 eventos/1.000 ton extraídas.</p>	<p>5-15 m³ La continuidad de la operación se vería afectada por eventos de encadenamientos con una frecuencia de 1,5 eventos/1.000 ton extraídas.</p>	<p>>15 m³ Se espera que ocurran eventos de encadenamientos con una frecuencia >1,5 eventos/1.000 t extraídas lo que no permite asegurar la continuidad operacional en la extracción.</p>
Condición de agua	<p>Caudal ingresando a la mina <120 l/s Bajo riesgo de generación de eventos de barro</p>	<p>Caudal ingresando a la mina >120 l/s Alto riesgo de generación de eventos de barro</p>	
Temperatura/Polvo	<p>Presencia de altas temperaturas en el interior de la mina y riesgo de generación de polvo en suspensión representan situaciones favorables para la aplicación de la MC</p>		

5 BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

En el presente capítulo se describen brevemente una serie de yacimientos de block caving de Chile y el extranjero. La información reportada para cada uno de ellos corresponde a la más reciente disponible en el momento de la búsqueda.

Los yacimientos analizados en el presente benchmarking son:

- Cadia East – PC1, Australia
- Ridgeways Deeps – Lift 1, Australia
- Resolution Copper, EE. UU
- New Afton – C-zone, Canadá
- Oyu Tolgoi – Hugo Norte – Lift 1, Mongolia
- Grasberg Block Cave, Indonesia
- Palabora – Lift 1, Sudáfrica
- Chuquicamata Subterráneo, Chile
- Diamante, Chile
- Módulo MC Andina, Chile

5.1 Cadia East – PC1

Cadia East es una mina subterránea desarrollada mediante panel caving perteneciente a Cadia Valley Operations (CVO) y cuyo propietario es Newcrest. Se ubica a 25 km al oeste de New South Wales, Australia.

Cadia East se divide actualmente en dos bloques PC1 y PC2, a su vez cada uno se lleva a cabo en dos etapas variando la altura extraíble, como se muestra en la Figura 36. Los resultados que se presentan corresponde al primer bloque, con un método de explotación de panel caving en una sola frente, abarcando la etapa 1 y 2. La producción esperada para este cuerpo es de 72 ktpd (J.Lett, 2016).

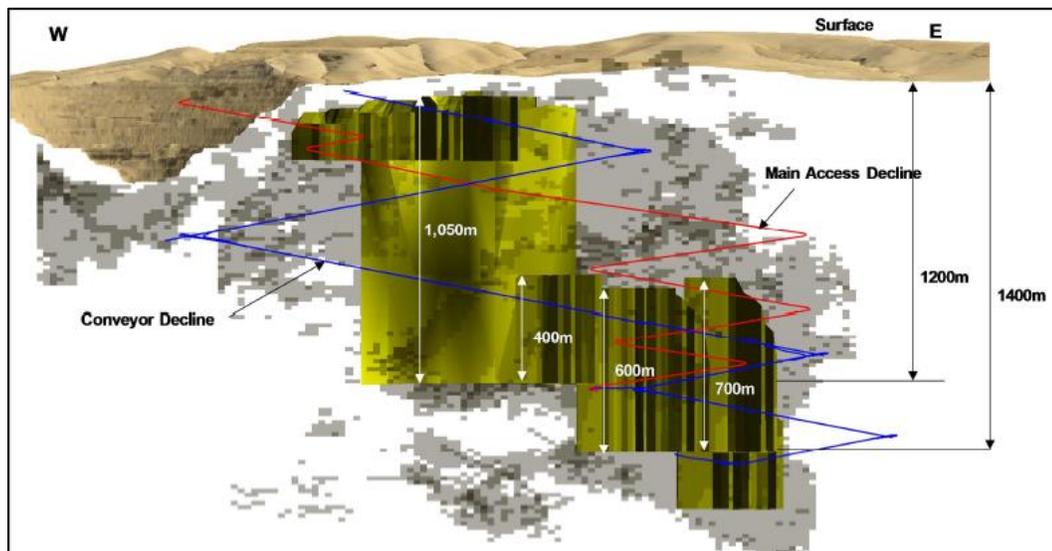


Figura 36.- Cadia East, vista isométrica. (Manca, 2013)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

5.1.1 Geometría

El footprint considerado para el PC1 comprende un área aproximada de 73.000 m² para la etapa 1 y 323.000 m² para la etapa 2, con altura de columna promedio de 1.000 m (BCTEC, 2017). Las reservas estimadas alcanzan los 1.000 Mton, con leyes de 0,6 g/t Au y 0,32% Cu (J.Lett, 2017).

Condición de esfuerzos

Los esfuerzos estimados a una profundidad aproximada de 1.200 m para PC1 se muestran en la Tabla 16. (J.Lett, 2016)

Tabla 16.- Condición de esfuerzos in situ Cadia East.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	62
σ_2	41
σ_3	35

5.1.2 Fragmentación

En la Figura 37 se muestra la fragmentación esperada en función del tonelaje extraído, considerando el tipo de roca volcánica y una altura extraída de 65 m. La Tabla 17 resume el volumen para los tamaños d₁₀₀, d₈₀ y d₅₀. El porcentaje de colpas con tamaño sobre 2 m³ es aproximadamente 5% (I. Brunton, 2016).

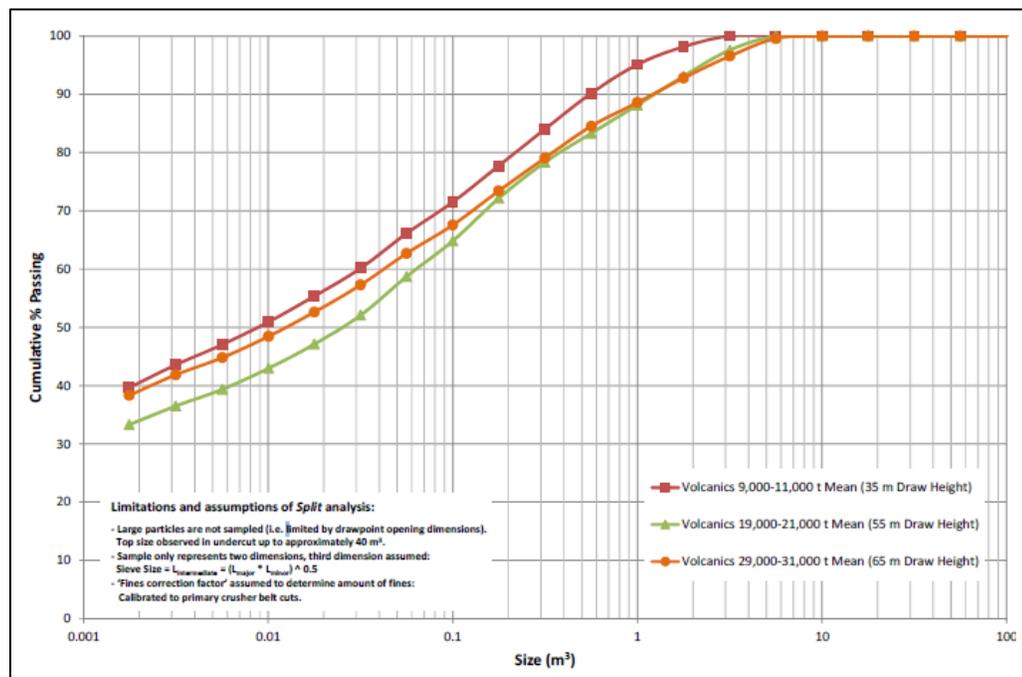


Figura 37.- Fragmentación primaria Cadia East - PC1. (Brunton, 2016)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

Tabla 17.- Tamaños característicos, fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	3
d ₈₀	0,3
d ₅₀	0,01

5.1.3 Macizo rocoso

El macizo rocoso presente en el PC1 se considera competente. La Tabla 18 resume los parámetros geotécnicos principales en función de las unidades geológicas presentes en el yacimiento, mostrando una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 150 MPa, con variaciones entre 145 y 169 MPa. Además la frecuencia de fracturas por metro varían entre 3,9 para el sedimento volcanoclástico hasta 5,7 para el pórfido superior promediando 4,5 con un RMR promedio de 58 (J.Lett, 2016).

Tabla 18.- Características macizo rocoso Cadia East - PC1.

Parámetro	Sedimento Volcanoclástico	Capa de pórfido inferior	Capa de pórfido superior
UCS [MPa]	169	145	145
ff/m	3,9	3,8	5,7
RMR	60	60	55

5.1.4 Condición de agua y otros

En Cadia Valley Operations se han registrado precipitaciones anuales de hasta 885 mm, en este sector las temperaturas máximas son de 25,9°C en promedio y temperaturas mínimas de 0,6°C.

5.2 Ridgeway Deeps – Lift 1

Ridgeway fue un depósito descubierto en 1996, consiste en un yacimiento con un contenido principalmente de oro y cobre. La minería comenzó en 2002 mediante el método SLC y en 2010 se inicia una nueva etapa mediante block caving, pasando a ser Ridgeway Deeps (RWD), con un nivel de extracción a 230 m bajo el último nivel del SLC y a 1.100 m desde la superficie. En RWD se alcanza un ritmo de producción de 23 ktpd (Larsen, 2012).

Junto con Cadia East corresponde a una de las operaciones de Cadia Valley Operations (CVO), cuyo propietario es Newcrest, está ubicada a 25 km al oeste de New South Wales, Australia. En la Figura 38 se muestra una vista en perfil del yacimiento.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

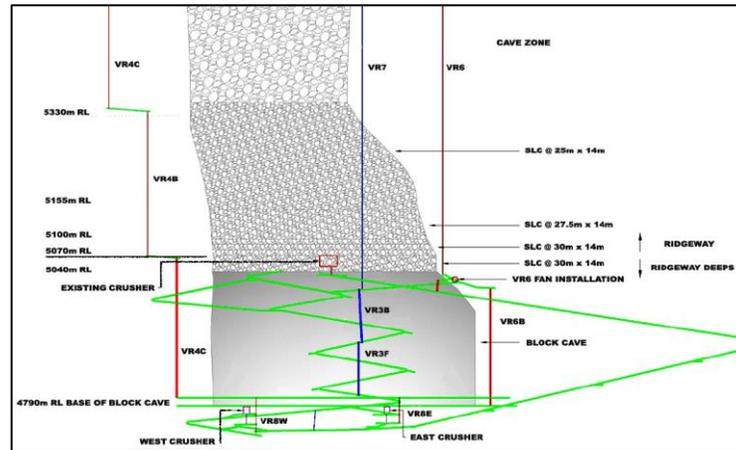


Figura 38.- Ridgeway Deeps, vista perfil. (Dunstan, 2016)

5.2.1 Geometría

RWD abarca un área aproximada de 79.000 m², con una altura extraíble de 220 m. Las reservas estimadas para el depósito alcanzan 51 Mton con leyes promedio de cobre de 0,37% y 0,83g/t de oro. (Larson, 2012)

5.2.2 Condición de esfuerzos

Dada la profundidad en la que se desarrolló RWD se espera una condición de altos esfuerzos in situ. En la Tabla 19 se muestra la magnitud medida para los esfuerzos principales.

Tabla 19.- Condición de esfuerzos in situ Ridgeway Deeps.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	51
σ_2	34
σ_3	29

5.2.3 Fragmentación

Los dominios geotécnicos predominantes en el cuerpo RWD corresponden a roca sedimentaria y volcánica, en la Figura 39 se muestra la curva de fragmentación primaria esperada en ambos dominios apreciando una clara diferencia entre las fragmentaciones, resultando una más gruesa para la roca volcánica, tal como se resume en la Tabla 20, cabe destacar que para la roca sedimentaria se espera un 5% mayor a 2 m³, y en el caso de la roca volcánica alrededor de un 15%. (Brunton, 2016)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

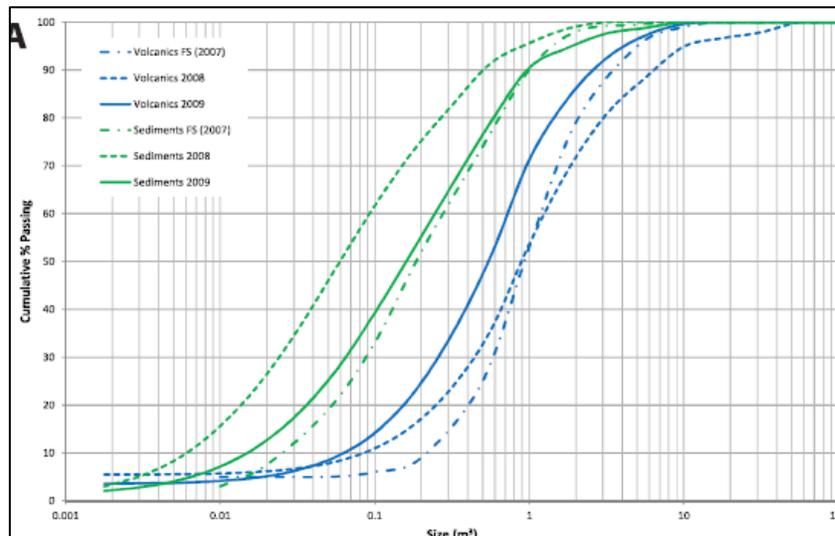


Figura 39.- Fragmentación primaria Ridgeway Deeps. (Brunton, 2016)

Tabla 20.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol [m ³] Sedimentaria	Vol [m ³] Volcánica
d ₁₀₀	2-10	10-50
d ₈₀	0,2-0,6	1-3

5.2.4 Macizo rocoso

El macizo rocoso presenta una variación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta entre 100 MPa y 120 MPa, con un promedio de 110 MPa. El RMR estimado para el macizo se encuentra entre un rango de 50-60 (Tabla 21), con una frecuencia de fracturas por metro promedio de 3,9. (Brunton, 2016)

Tabla 21.- Características macizo rocoso Ridgeway Deeps.

Parámetro	Volcánica	Sedimentaria
UCS [MPa]	120	100
ff/m	3,4	4,4
RMR	50	60

5.2.5 Condición de agua y otros

De manera análoga a Cadia East, se han registrado precipitaciones anuales de hasta 885mm, en un sector donde las temperaturas máximas son de 25,9°C en promedio y temperaturas mínimas de 0,6°C. Para el caso particular de RWD se han registrado caudales de 75 l/s de agua ingresando a la mina. (Larson, 2012)

5.3 Resolution Copper

Resolution corresponde a uno de los yacimientos de cobre de tipo porfídico más grandes del mundo. Se ubica en Arizona, Estados Unidos, cuyo actual dueño es Rio Tinto. El ritmo de explotación objetivo para el yacimiento alcanza 120 ktpd las cuales se sustentan por medio de la

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

explotación de 6 paneles. En la Figura 40 se muestra una vista isométrica del nivel de producción y hundimiento para el yacimiento. (RCTR, 2016)

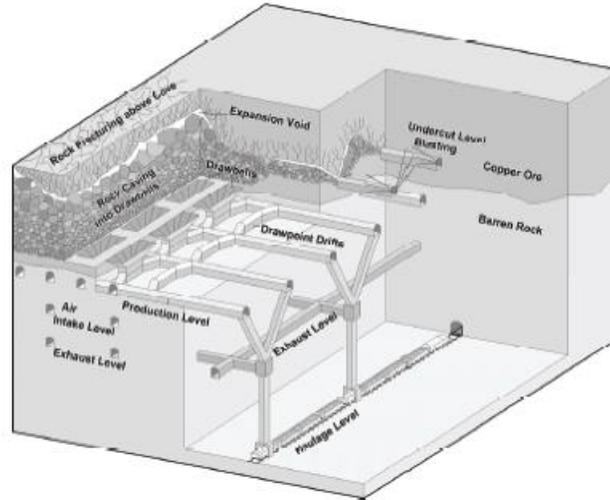


Figura 40.- Resolution Copper Mine, diseño. (Pascoe, 2008)

5.3.1 Geometría

Resolution posee un área basal de alrededor de 1.000.000 m², con una altura extraíble entre 200 a 500 m. Las reservas estimadas para el depósito llegan a 1.700 Mton. En la Figura 41 se muestra una vista en planta del yacimiento junto con la secuencia de hundimiento de los paneles que componen el layout de la mina. (RCTR, 2016)

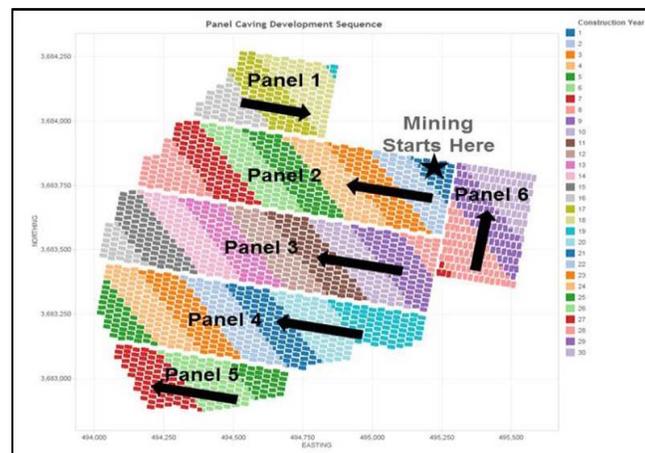


Figura 41.- Geometría y secuencia de explotación Resolution Copper Mine.

5.3.2 Condición de esfuerzos

Debido a la profundidad en la que se encuentra el depósito se espera una condición de altos esfuerzos in situ. En la Tabla 22 se muestra la magnitud medida para los esfuerzos principales.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

Tabla 22.- Condición de esfuerzos in situ Resolution Copper Mine.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	53
σ_2	31
σ_3	17

5.3.3 Fragmentación

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de simulaciones en BDF para fragmentación secundaria se espera que el 90% de las colpas presenten un volumen menor a 2 m³, con un tamaño máximo d₁₀₀ de 9 m³. En la Figura 42 se muestra la curva de fragmentación secundaria obtenida para Resolution por tipo de roca. (Hudson, 2012)

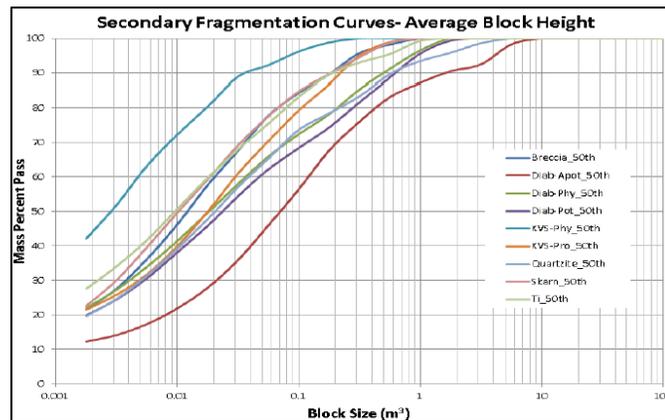


Figura 42.- Curva de fragmentación secundaria Resolution Copper Mine. (Hudson, 2012)

En la Tabla 23 se resumen los tamaños característicos d₁₀₀, d₈₀ y d₅₀ promedio de acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

Tabla 23.- Tamaños característicos fragmentación secundaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	9
d ₈₀	0,2
d ₅₀	0,02

5.3.4 Macizo rocoso

El macizo rocoso presenta diferentes unidades geológicas propias del tipo de mineralización porfídica entre las cuales se encuentran Brecha y Cuarcita, además de mineralización tipo skarn. En su conjunto, conforman un macizo rocoso de mediana competencia el cual presenta una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 75 MPa, con un RMR promedio de 60. En la Tabla 24 se muestra el rango de valores para ambos parámetros geotécnicos. (RCTR, 2016)

Tabla 24.- Características del macizo rocoso Resolution Copper Mine.

Parámetro	Valor
UCS [MPa]	50-100
RMR	50-70

5.3.5 Condición de agua y otros

Dada la profundidad de la mina, en torno a 2.000 m, se espera que la temperatura ambiente alcance los 80°C en promedio, lo cual significa una condición crítica para la operación con personal en terreno. Las precipitaciones anuales varían entre 200-500 mm/año. Debido a las condiciones de temperatura, baja humedad y fragmentación fina presente en la mina existe un potencial riesgo de generación de polvo y material particulado fino en suspensión.

5.4 New Afton – C zone

La mina de oro-cobre New Afton se ubica 10 km de Kamloops, British Columbia, Canadá. La operación ocupa el sitio de la histórica mina de rajo abierto de Afton, la cual operó entre los años 1977 y 1997. La presente mina subterránea fue construida por la compañía New Gold y comenzó su operación oficialmente en julio del año 2012.

El presente análisis, corresponde a la evaluación de la información obtenida para el cuerpo Zona C (C-Zone) del complejo subterráneo conformado por tres cuerpos, el cual corresponde a un proyecto de interés para la compañía y cuyo método de explotación propuesto es block caving, con una producción esperada de 15 ktpd. En la Figura 43 se muestra una vista hacia el norte de los tres cuerpos que conforman la mina New Afton. (Dennis, 2015)

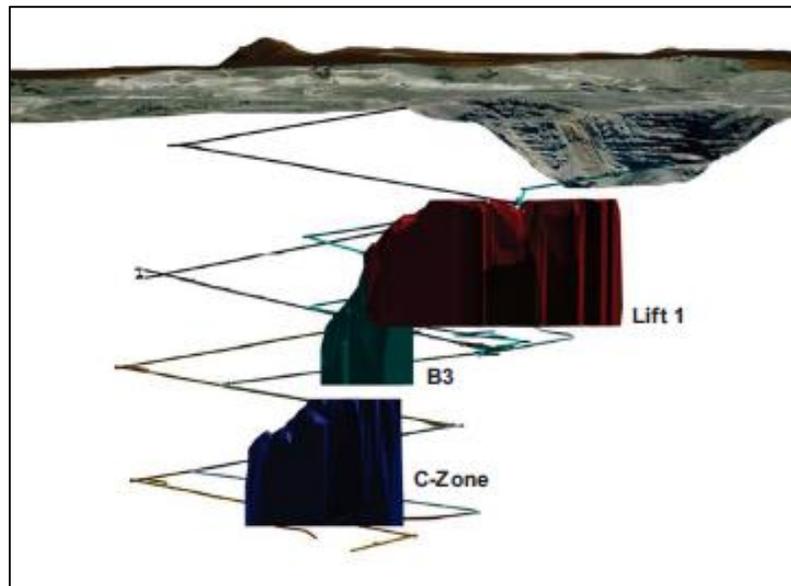


Figura 43.- New Afton, vista hacia el norte. (Dennis, 2015)

5.4.1 Geometría

La Zona C corresponde al cuerpo más profundo del complejo, éste se ubica a aproximadamente 1.100m de profundidad medidos desde la base del footprint. Las reservas estimadas para este cuerpo corresponden a 21 Mton de mineral, con leyes de 0,79% Cu, 0,75 g/t Au y 1,8 g/t Ag. El área basal del cuerpo mineralizados se encuentra en torno a 43.000 m², con altura de columna extraíble variables entre 50 m y 350 m, con un promedio de 250 m. En la Figura 44 se muestra una vista en planta del footprint propuesto y sus respectivas alturas de columna. (Dennis, 2015)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
P N																	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
P S			80	80	80	80	80	80	80	170	190	220	230	220	190	200	270	350	350	350	350	350	350	350	310	320	80	80	80	80		
Q N			200	50	50	80	80	170	210	230	210	240	260	260	270	290	310	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350		
Q S		220	240	250	250	230	210	220	250	280	290	290	310	340	330	340	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350		
R N		210	240	250	260	250	260	270	290	300	320	330	330	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	340	290		
R S			190	230	250	250	240	260	270	280	300	320	330	350	350	350	330	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	250	210	190	
S N			110	170	220	230	220	240	260	260	250	300	320	330	320	310	300	290	320	320	350	350	350	350	270	80	180	170	160	80		
S S						100	180	200	220	230	240	220	230	260	280	290	290	290														

Figura 44.- Altura de columna extraíble C-Zone. (Dennis, 2015)

5.4.2 Condición de esfuerzos

Los esfuerzos fueron determinados por medio de celdas CSIRO, durante los desarrollos de la mina subterránea y posteriormente calibrados con modelamiento en el software MAP3D. Las estimaciones indican que existe un esfuerzo vertical a razón de 0,0284 MPa/m, en donde el ratio “k” es de 1,7 (en dirección N-S) para el esfuerzo σ_2 y de 2,3 (en dirección E-W) para σ_1 . En la Tabla 25 se muestran los esfuerzos principales esperados para el nivel de producción en el cuerpo C-Zone. (Dennis, 2015)

Tabla 25.- Condición de esfuerzos in situ New Afton - C-Zone.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	70
σ_2	52
σ_3	30

5.4.3 Fragmentación

Se han identificado cinco sets estructurales principales en el entorno del footprint, los cuales presentan un espaciamiento promedio entre 0,1 m y 0,8 m. De acuerdo con resultados de fragmentación provenientes de la explotación de cuerpos previos, se espera que la fragmentación sea gruesa al comienzo de la extracción, tornándose fina a medida que madura la columna de extracción, afectada por el alto grado de fracturamiento del macizo. Se espera que el tamaño promedio de la fragmentación fina sea de 0,045 m³, mientras que para la roca moderadamente fracturada se espera un tamaño promedio de 0,32 m³. (Dennis, 2015)

5.4.4 Macizo rocoso

la presencia de sets estructurales en el entorno del cuerpo mineralizado y el grado de afectación de la roca genera una frecuencia de fracturas de 1 a 10 ff/m. En la Figura 45 se observa una vista N-S del complejo New Afton, en donde se aprecia el RMR de cada zona. Se observa para la Zona C que el RMR predominante se encuentra entre 40 y 60, mostrando una cantidad menor en el rango 60-80. La Tabla 26 muestra los parámetros geotécnicos de C-Zone disponibles.

Tabla 26.- Condiciones de macizo rocoso New Afton C-Zone.

Parámetro	Valor
ff/m	1-10
RMR	40-80

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

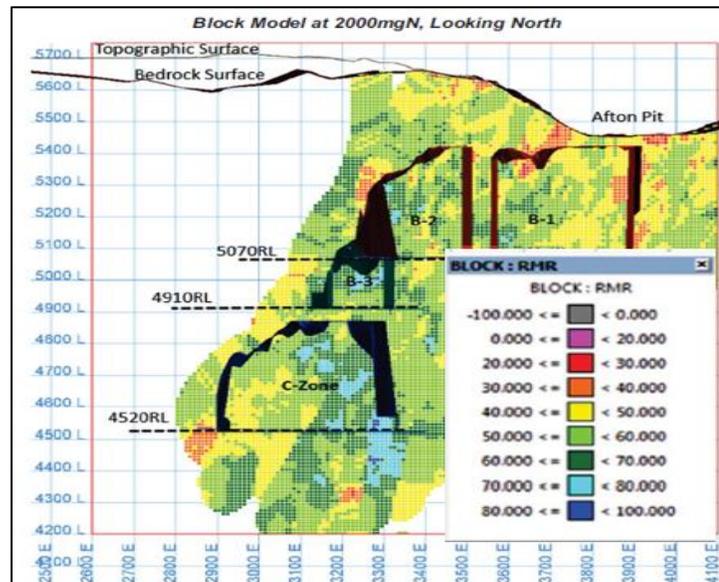


Figura 45.- Mapa RMR New Afton.

5.4.5 Condición de agua y otros

El área de Kamloops se ubica en la zona lluviosa de Coast Mountains. Las precipitaciones son moderadas, promediando 257 mm anualmente, de los cuales 157 mm corresponden a lluvia y lo restante a nieve caída durante el invierno. Las temperaturas en verano alcanzan los 38°C, mientras que los inviernos suelen ser fríos, pudiendo alcanzar temperaturas en periodos cortos inferiores a -29°C. Se espera un caudal de 6 l/s de agua ingresando a la mina, principalmente influenciado por la presencia del pit Afton.

5.5 Oyu Tolgoi – Hugo Norte – Lift 1

El proyecto minero de oro y cobre Oyu Tolgoi se ubica en la región de Gobi, en el sur de Mongolia y es desarrollado por Oyu Tolgoi LLC. Oyu Tolgoi consiste en una serie de depósitos los cuales contienen cobre, oro, plata y molibdeno. Los depósitos se ubican en un corredor estructural, abarcando amplio territorio, extendiéndose más de 12 km desde Hugo Norte, en la zona norte, hacia la zona sur adyacente, Hugo Sur, bajo Oyut y llegando hasta Heruga. (Peters, 2016)

La presente descripción corresponde a la caracterización del Lift 1 del cuerpo Hugo Norte del depósito Oyu Tolgoi, el cual tiene por objetivo dar inicio a la explotación subterránea de la zona norte del depósito teniendo como meta de producción 95 ktpd por medio de la explotación de dos paneles principales.

5.5.1 Geometría

El Lift 1 de Hugo Norte se ubica aproximadamente a 1.300 m bajo la superficie y posee dimensiones promedio de 2.000 m de largo por 280 m de ancho, abarcando así un área aproximada de 560.000 m². Su altura de extracción en las partes centrales del depósito alcanza los 500 m. las reservas estimadas para el depósito alcanzan 500 Mton con leyes promedio de cobre de 1,66% y 0,35g/t de oro. En la Figura 46 se muestra una vista perfil de Hugo Norte Lifts 1 y 2. (Peters, 2016)

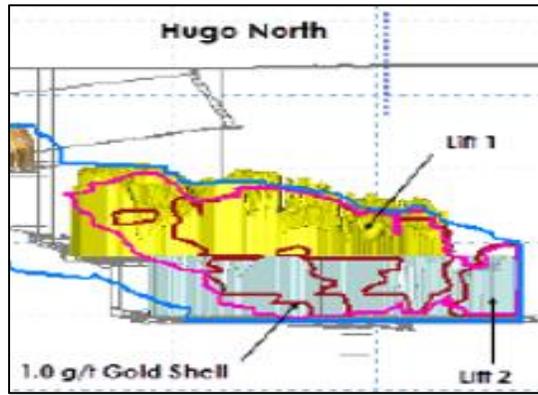


Figura 46.- Oyu Tolgoi - Hugo Norte, vista perfil. (Peters, 2016)

5.5.2 Condición de esfuerzos

Dada la profundidad de emplazamiento del depósito Hugo Norte se espera una condición de altos esfuerzos in situ. En la Tabla 27 se muestra la magnitud y orientación de los esfuerzos in situ calculados para las tres principales componentes en el entorno de Hugo Norte. (Peters, 2016)

Tabla 27.- Condición de esfuerzos in situ Oyu Tolgoi-Hugo Norte.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	58
σ_2	33
σ_3	27

5.5.3 Fragmentación

El dominio geotécnico predominante en el cuerpo Hugo Norte corresponde a la roca Cuarzo Monzodiorita (QMD), roca la cual se encuentra altamente fracturada, otorgándole así una clasificación de RMR al macizo rocoso de medio a pobre. En la Figura 47 se muestra la curva de fragmentación primaria esperada para Hugo Norte en base al dominio QMD, la cual presenta una fragmentación fina. (Peters, 2013)

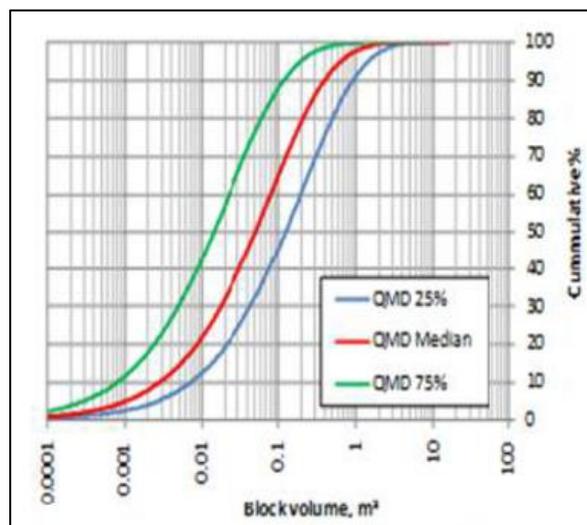


Figura 47.- Curva de fragmentación primaria QMD New Afton.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

La Tabla 28 muestra un resumen de los tamaños característicos esperados para la fragmentación. Cabe destacar que se espera que entre un 90% y un 100% de la roca fragmentada tenga un volumen inferior a 2 m³.

Tabla 28.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	2
d ₈₀	0,3
d ₅₀	0,06

5.5.4 Macizo rocoso

El macizo rocoso presentaría un comportamiento frágil mostrando una resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta de 133 MPa para su principal dominio geotécnico. Sin embargo, el RMR estimado para el macizo se encuentra entre un rango de 40 a 45, con una frecuencia de fracturas estimada de 5,3 ff/m. (Peters, 2016)

5.5.5 Condición de agua y otros

Las precipitaciones anuales promedian los 57 mm/año, de las cuales 90% corresponde a lluvia y lo restante a nieve. Las acumulaciones de nieve raramente exceden los 50 mm. Eventos de máxima lluvia que alcanzan 44 mm/h se observan una vez cada diez años.

Las temperaturas en la zona oscilan desde un rango máximo de 50°C entre los meses de junio y julio, con promedio de 25°C, hasta valores mínimos de -34°C, con promedios de -6°C durante los meses de octubre y abril, principalmente. Se espera la presencia de polvo en suspensión en el nivel de producción de la mina, principalmente en puntos de extracción y de descarga. (Peters, 2016)

5.6 Grasberg Block Cave

Grasberg, perteneciente a PT Freeport Indonesia, se ubica en la provincia de Papua, Indonesia, en uno de los lugares geográficamente más remotos y desafiantes del mundo. El Distrito Ertsberg fue descubierto en 1936, siendo reportada su superficie geológica y descrito como un skarn con mineralización de cobre de alta ley en el año 1960 por Freeport Minerals Corporation.

La operación del depósito Grasberg comenzó mediante explotación de rajo abierto, la cual posteriormente dará paso a una explotación subterránea, vía block caving, dando paso a Grasberg Block Cave Mine (GBC), la cual tiene como objetivo dar continuidad a la producción de PTFI, proyectando un ritmo de explotación de 160 ktpd mediante la explotación de 6 frentes de hundimiento. En la Figura 48 se muestra una vista isométrica del yacimiento subterráneo y su posición con respecto al pit. (Brannon, 2012)

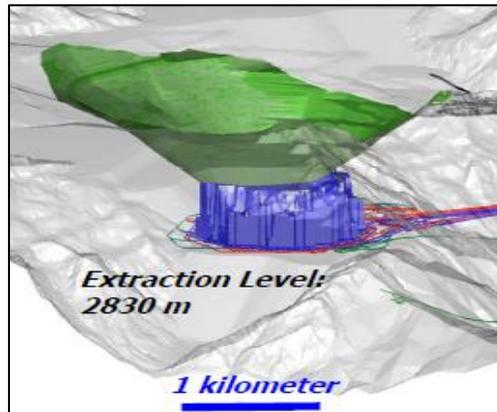


Figura 48.- Grasberg Block Cave, vista isométrica. (Brannon, 2012)

5.6.1 Geometría

El footprint considerado para GBC comprende un área aproximada de 700.000 m², con altura de columna promedio de 450m, ubicadas bajo el pit correspondiente a la mina Grasberg Open Pit. Las reservas estimadas alcanzan los 962 Mton y poseen leyes de 1,0% Cu y 1,78 g/t Au. (Brannon, 2016)

5.6.2 Condición de esfuerzos

Los esfuerzos fueron medidos a aproximadamente 540 m bajo el pit y dan cuenta de una condición pseudo hidrostática de bajos esfuerzos. Estos valores se resumen en la Tabla 29. (Srikant, 2007)

Tabla 29.- Condición de esfuerzos in situ GBC.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	18
σ_2	18
σ_3	12

5.6.3 Fragmentación

La estimación de la fragmentación primaria para GBC se basó en el análisis de datos de sondajes y sets estructurales utilizando el software *Core2Frag* (Figura 49). La fragmentación primaria está basada en los datos de la distribución de los fragmentos bajo el pit de los 50 m inferiores del block caving. Se espera que la fragmentación primaria para GBC sea relativamente gruesa, con sobre un 76% de los bloques con tamaño mayor a 2 m³. (Srikant, 2007)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

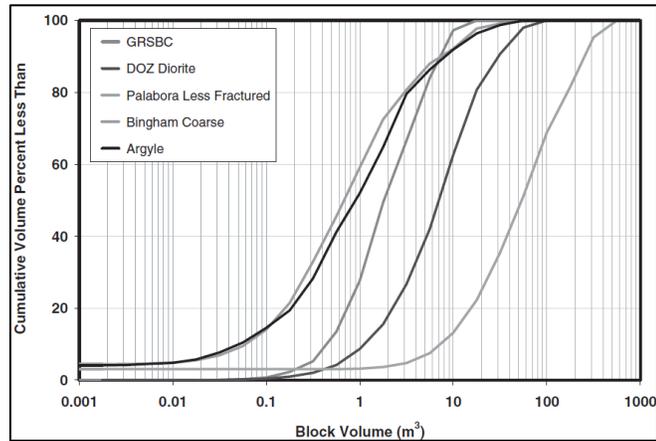


Figura 49.- Fragmentación primaria GBC simulada en Core2Frag. (Srikant, 2007)

En la Tabla 30 se muestran los valores para los tamaños característicos d_{100} , d_{80} y d_{50} para GBC, obtenidos a partir de la curva de fragmentación primaria.

Tabla 30.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d_{100}	17
d_{80}	5
d_{50}	2

5.6.4 Macizo rocoso

El macizo rocoso es relativamente competente, mostrando una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 80 MPa, con variaciones dependiendo de la mineralogía en valores entre 70 y 140 MPa. El mapeo geotécnico indica que el 80% de las muestras presentan un valor de RQD promedio de 100, con un RMR de 70, con algunas zonas de menor RQD. En la Figura 50 se muestra la distribución de RMR para la roca en GBC. (Srikant, 2007)

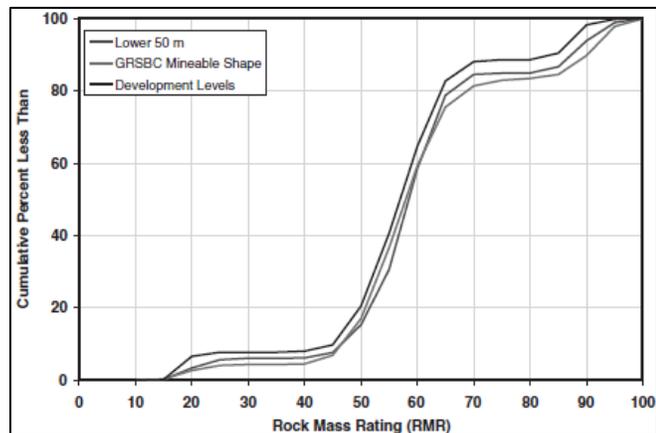


Figura 50.- Distribución RMR en GBC. (Srikant, 2007)

En la Tabla 31 se muestra un resumen de las principales características presentes en el macizo rocoso para GBC.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

Tabla 31.- Condiciones del macizo rocoso, GBC.

Parámetro	Valor
UCS [MPa]	63-134
RMR	60-80

5.6.5 Condición de agua y otros

El distrito se encuentra en un terreno altamente montañoso con elevaciones de entre 2.900 m y 4.200 m, en donde las precipitaciones anuales alcanzan los 5.000 mm, generando caudales de ingreso a la mina esperados por sobre 1.000 l/s (Srikant, 2007), esto trae consigo condiciones de agua barro, las cuales se han presentado en algunos sectores de la mina.

5.7 Palabora – Lift 1

La compañía minera Palabora se estableció a partir de un joint venture entre Rio Tinto y Newmont Mining Corporation en 1956 para explotar los recursos identificados en torno al cerro Loolekop. La mina se emplaza en la provincia norte de Sudáfrica a 560 km de Johannesburgo. La construcción del pit comenzó en el año 1963 posteriormente la construcción de la planta procesadora. Hacia el año 2003, la explotación en superficie terminó para dar paso a una explotación subterránea por block caving, dando paso al proyecto Palabora Underground, el cual tiene por objetivo sustentar una producción de 30 ktpd a través de dos frentes principales de explotación.

5.7.1 Geometría

La base del footprint para el Lift 1 de la mina se ubica a aproximadamente 1.200 m de profundidad, medidos desde la superficie y a unos 420 m del fondo del pit. Posee un área basal de 160.000 m², con altura de columna promedio de 500 m, totalizando aproximadamente 245 Mton en reservas cuya ley media de cobre corresponde a 0,68%. En la Figura 51 se muestra una vista isométrica de Palabora Underground Lift 1 y su siguiente etapa correspondiente al Lift 2. (Ngidi, 2011)

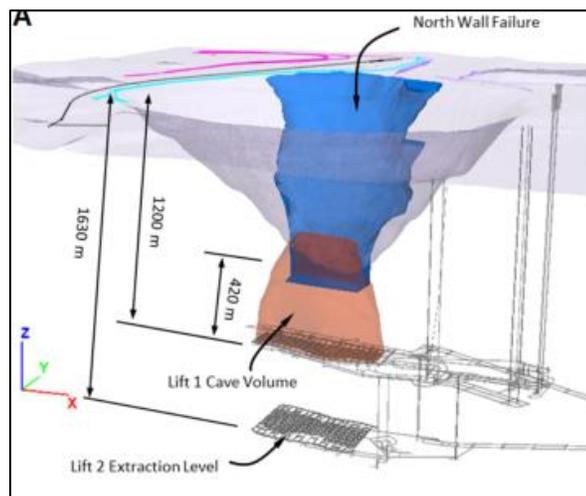


Figura 51.- Palabora - Lift 1, vista isométrica. (Sainsbury, 2016)

5.7.2 Condición de esfuerzos

La condición de esfuerzos in situ se asume que será hidrostática e igual a la sobre carga a la que está sujeta, correspondiendo a una presión de aproximadamente 38 MPa.

5.7.3 Fragmentación

Debido a la competencia del macizo rocoso se espera que la fragmentación sea gruesa (Srikant, 2007), especialmente durante los primeros metros de extracción, esperándose así que aproximadamente el 95% del mineral fragmentado esté sobre los 2 m³ en la zona poco fracturada. En la Figura 52 se muestra la curva de fragmentación primaria para Palabora en donde se observa que el tamaño máximo de bloque es superior a 150 m³.

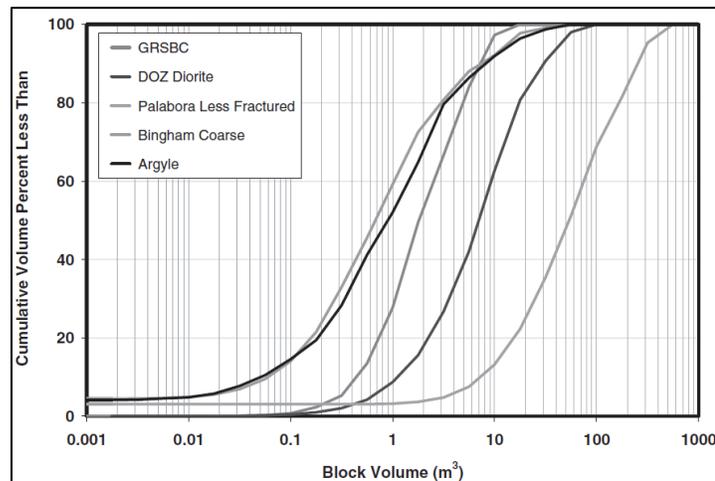


Figura 52.- Fragmentación primaria Palabora simulada en Core2Frag.

En la Tabla 32 se muestran los tamaños característicos para la fragmentación primaria esperada simulada para el Lift 1 en Palabora.

Tabla 32.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	150
d ₈₀	110
d ₅₀	50

5.7.4 Macizo rocoso

El macizo rocoso presente en Palabora corresponde a roca competente con alta resistencia a la compresión uniaxial promediando 200 MPa correspondiente a la litología predominante en el yacimiento, el RMR promedio se encuentra en torno a 50-70. En la Tabla 33 se muestra el rango de valores para las condiciones de macizo rocoso en Palabora. (Calder, 2001)

Tabla 33.- Condiciones de macizo rocoso, Palabora.

Parámetro	Valor
UCS [MPa]	90-300
MRMR	50-70

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

5.7.5 Condición de agua y otros

Las condiciones climáticas en la zona corresponden a las de un ambiente subtropical con precipitaciones anuales de 480 mm, los cuales generan un caudal de ingreso de agua a la mina, principalmente a través del pit, de 66 l/s aproximadamente.

5.8 Chuquicamata Subterráneo – N2

Chuquicamata Subterráneo (CHS) pasará a ser una mina explotada mediante block caving acorde a la finalización de la explotación por rajo. Se estima que CHS produzca 140.000 tpd de mineral.

5.8.1 Geometría

La explotación del yacimiento se realizará por macro bloques (MB) los cuales funcionarán como minas independientes, en términos productivos, en cada uno de los niveles. El nivel 2 posee en total 18 macro bloques con área basal de 35.000 m² aproximadamente, conformando un área total de 632.000 m². La altura de columna promedio de cada uno de los MB es de 260m y ostenta reservas por 446 Mton con ley promedio de cobre de 0,64%. En la Figura 53 se muestra una vista isométrica de la disposición de los MB para cada nivel de explotación.

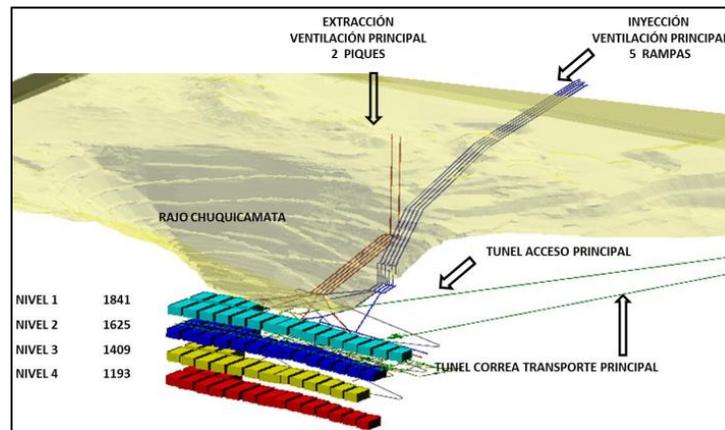


Figura 53.- Chuquicamata Subterráneo, vista isométrica.

5.8.2 Condición de esfuerzos

La condición de esfuerzos presente en la mina para el nivel analizado corresponde a un estado pseudo hidrostático. Las magnitudes para cada esfuerzo principal se muestran en la Tabla 34. (Itasca, 2014)

Tabla 34.- Condición de esfuerzos in situ CHS.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	22
σ_2	22
σ_3	20

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

5.8.3 Fragmentación

En la Figura 54 se muestra la curva de fragmentación secundaria esperada para CHS, se toma como referencia la UGBT cuarzo igual sericita (Q=S) por ser la unidad preponderante en el nivel de explotación. (Campbell, 2015)

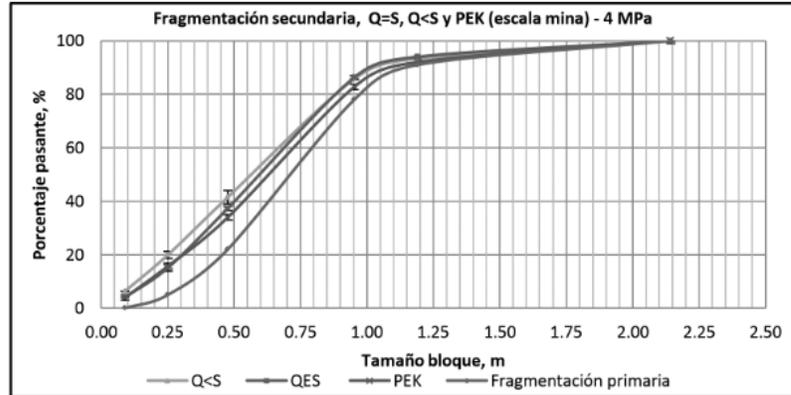


Figura 54.- Curva de fragmentación secundaria CHS. (Campbell, 2015)

En la Tabla 35 se muestra el tamaño máximo d_{100} esperado para cada una de las UGBT presentes en el cuerpo mineralizado de CHS. Se observa que el tamaño máximo esperado, correspondiente a la roca de mayor competencia es de 11 m^3 . Los valores mostrados no consideran el efecto de la aplicación del PA, sin embargo, para la nueva etapa del proyecto sí se considera aplicación de PA intensivo, con lo que se espera que el volumen máximo disminuya.

Tabla 35.- Tamaños característicos fragmentación secundaria.

Unidad	Vol max [m^3]
PEK	11
Q=S	8
Q<S	4

5.8.4 Macizo rocoso

Existen tres dominios geotécnicos preponderantes en la explotación, los cuales son Pórfido Este Potásico (PEK), cuarzo igual sericita (Q=S) y cuarzo menor sericita (Q<S), cuya distribución espacial se muestra en la Figura 55.

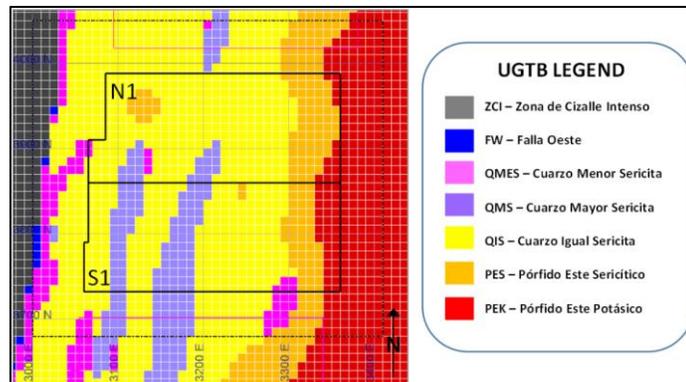


Figura 55.- Distribución de UGBT MB N1 y S1. (SRK, 2015)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

En la Tabla 36 se muestran las condiciones características más representativas del macizo rocoso presente en CHS, se observa una baja resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, correspondiente a una roca de comportamiento plástico, con un RMR de 46 el cual clasifica a la roca como de calidad media. (Campbell, 2015)

Tabla 36.- Condiciones de macizo rocoso, CHS.

Parámetro	Valor
UCS [MPa]	67
ff/m	3
RMR	46

5.8.5 Condición de agua y otros

Debido a la escasez de precipitaciones en la zona y baja humedad en el entorno se espera bajo caudal de ingreso de agua ingresando de aproximadamente 7 l/s. La condición de baja humedad mencionada, junto con la presencia de fragmentación fina provocará un alto riesgo de generación de polvo y material particulado fino en suspensión. (Codelco, 2016)

5.9 Diamante

El proyecto Diamante corresponde a la futura explotación por panel caving de División El Teniente ubicada en la cota Teniente 7 (2.070). El proyecto tiene 135 MTon en reservas de mineral con leyes de cobre de 0,95% y se planifica el inicio de su producción para el año 2022.

5.10 Geometría

La geometría del yacimiento está dada por un área de 288.000 m² y una altura de columna extraíble entre 160-210 m. Cabe destacar que se encuentra ubicado bajo el sector Esmeralda (Bloque 1 y 2), a una distancia de 160 m de columna in-situ. En la Figura 56 se muestra una vista isométrica con la disposición del sector Diamante.

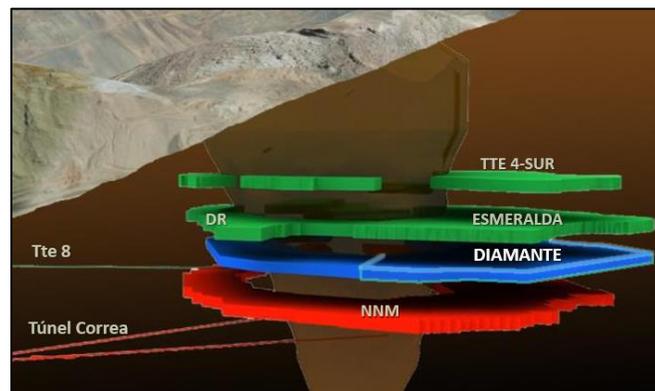


Figura 56.- Diamante, vista isométrica. (DET, 2017)

5.10.1 Condición de esfuerzos

La condición de esfuerzos para el sector se considera alta (ver Tabla 37). El esfuerzo mayor alcanza el valor de 55 MPa, mientras que le menor un valor de 20 MPa.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

Tabla 37.- Condición de esfuerzos in situ Diamante.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	55
σ_2	30
σ_3	20

5.10.2 Fragmentación

En la Figura 57 se muestra la fragmentación esperada para diferentes frecuencias de encadenamiento en Diamante, se espera que el d_{100} se encuentre en torno a 10 m^3 .

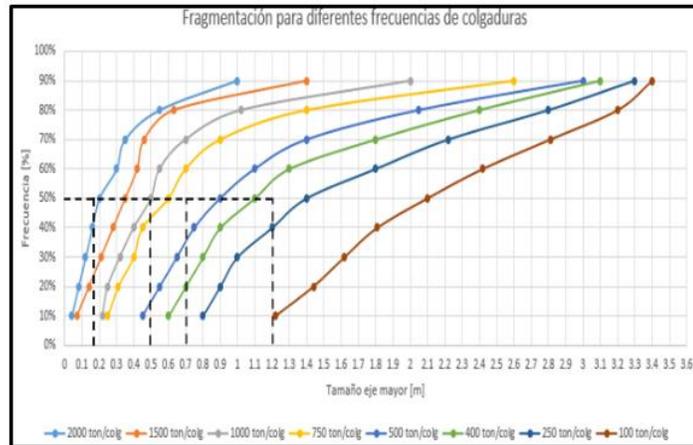


Figura 57.- Fragmentación esperada en función de la frecuencia de colgaduras, Diamante. (Codelco, 2017)

Tabla 38.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m^3]
d_{100}	>10
d_{80}	7
d_{50}	1

5.10.3 Macizo rocoso

El macizo rocoso en el sector Diamante está básicamente formado por el Complejo Máfico El Teniente (CMET) en sus extensiones patilla y cabeza (Fw y Hw). En la Tabla 39 se observa el UCS de la roca intacta y la frecuencia de fracturas por metro para el CMET y la tonalita presentes en el sector.

Tabla 39.- Condición de macizo rocoso, Diamante.

Unidad	UCS [MPa]	ff/m
CMET Hw	135	<1
CMET Fw	108	<1
Tonalita	162	<1

5.10.4 Condición de agua y otros

El sector Diamante se encuentra bajo el sector Esmeralda (Bloque 1 y Bloque 2) y está dentro de la zona definida como canalón. El canalón es una zona que tiene alto potencial de ingreso de agua-barro dado la condición de depresión topográfica que canaliza de manera preferencial los flujos de agua hacia la mina. En la Figura 58 izquierda se muestra la condición de canalón para todos los sectores de División El Teniente y en la Figura 58 derecha se muestra la condición de canalón para el sector Diamante. Se observa que un 50% del sector se encuentra bajo canalón, es decir, con alto potencial de ingreso de barro.

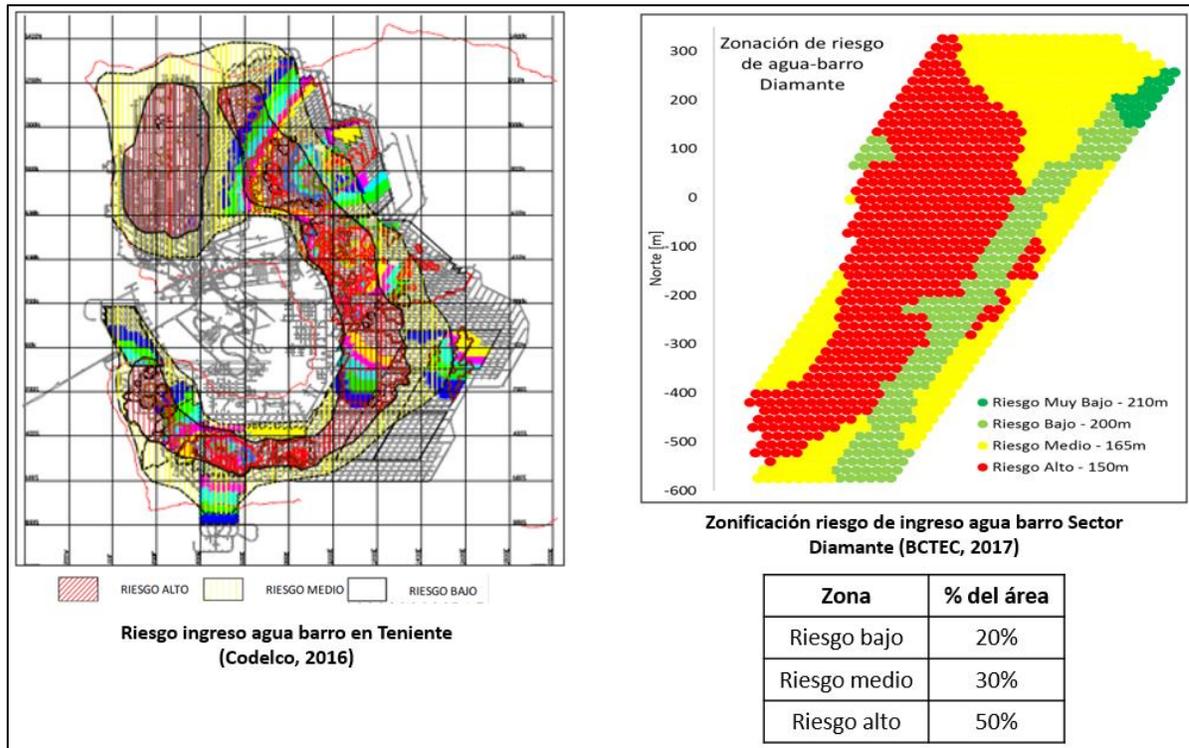


Figura 58.- Condición de canalón para los sectores de División El Teniente (izquierda) y para el sector Diamante (Derecha) (BCTEC, 2017).

5.11 Módulo de minería continua Andina

El módulo de minería continua MC Andina se encuentra ubicado en el sector oeste del actual III Panel Andina. Representa la primera prueba a escala industrial y posterior operación para la minería continua.

5.11.1 Geometría

El módulo considera sus reservas de mineral en roca primaria y secundaria. Comprende un área de 7.000 m² aproximadamente y una altura extraíble promedio de 300 m, la que incluye 150 m de mineral primario. En la Figura 59 se muestra una vista isométrica de la columna extraíble del módulo de MC.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

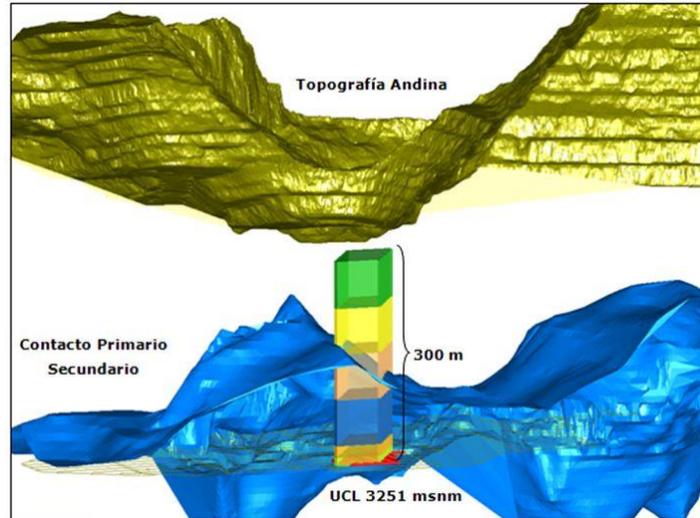


Figura 59.- Vista columna extraíble módulo de MC Andina (DAND, 2016).

5.11.2 Condición de esfuerzos

La condición de esfuerzos para el módulo de MC Andina se indica en la Tabla 40.

Tabla 40.- Condición de esfuerzos in situ módulo MC Andina.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	38
σ_2	21
σ_3	18

5.11.3 Fragmentación

La fragmentación para el módulo de MC se espera que sea gruesa (ver Figura 60). Se espera que el tamaño máximo sea igual a 400 m^3 (d_{100}), con un 40% de las colpas sobre 2 m^3 (Ortiz, 2014). En la Tabla 41 se muestran los tamaños característicos de la curva de fragmentación para el módulo de MC.

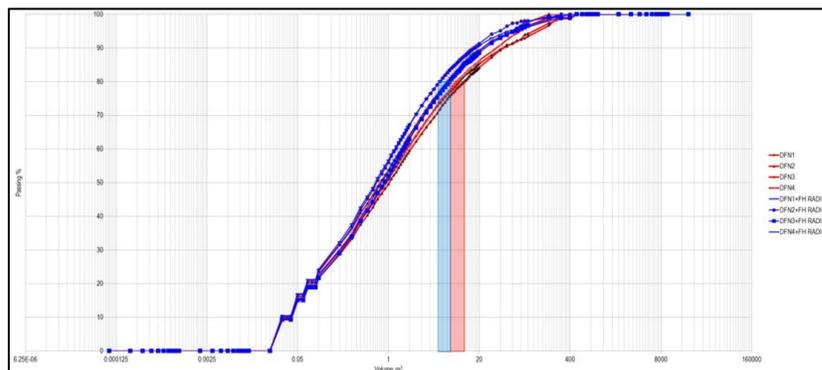


Figura 60.- Curva fragmentación primaria Módulo MC.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

Tabla 41.- Tamaños característicos fragmentación primaria.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	400
d ₈₀	18
d ₅₀	1

5.11.4 Macizo rocoso

Los parámetros del macizo rocoso de Andina se indican en la Tabla 42.

Tabla 42.- Condición de macizo rocoso MC Andina.

Parámetro	Valor
UCS [MPa]	>100
ff/m	<3
RMR	60-70

5.11.5 Condición de agua y otros

El módulo de MC Andina se encuentra ubicado en el III Panel Andina en el lado noroeste de este. El III Panel Andina ha tenido históricamente estimaciones de riesgo de ingreso de agua-barro a puntos de extracción mediante mediciones de humedad observada y porcentaje de finos en los puntos de extracción (Tapia y Martínez, 2011). Los puntos son clasificados en estados: sin riesgo de bombeo, en observación y con riesgo de bombeo según la clasificación actual utilizada en División Andina, ver Figura 61. En la Figura 62 se muestra una vista en planta del III Panel Andina donde se indica el riesgo de bombeo por puntos de extracción. Se puede observar que un 9% del área del panel se encuentra con alto potencial de bombeo, un 17% en observación y un 74% en zona sin riesgo de bombeo. Estos antecedentes indican que el III Panel Andina tiene una condición de riesgo de agua-barro baja, donde solo un 9% de su área se encuentra en condición con riesgo alto de bombeo, respecto de la condición de Diamante en División El teniente, donde un 50% del sector está en una condición de alto riesgo de barro. Cabe destacar que el módulo de MC tiene una altura de primario de 150 m y que no tiene sobre él un sector que haya sido explotado previamente.

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

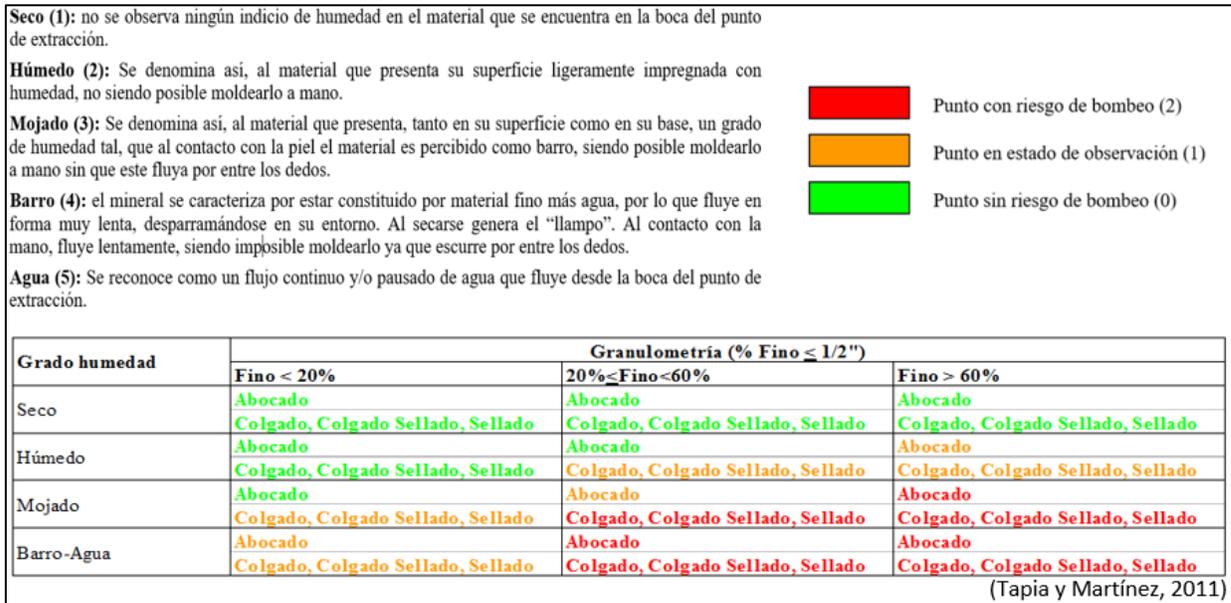


Figura 61.- Clasificación del riesgo de bombeo en puntos de extracción (Tapia y Martínez, 2011).

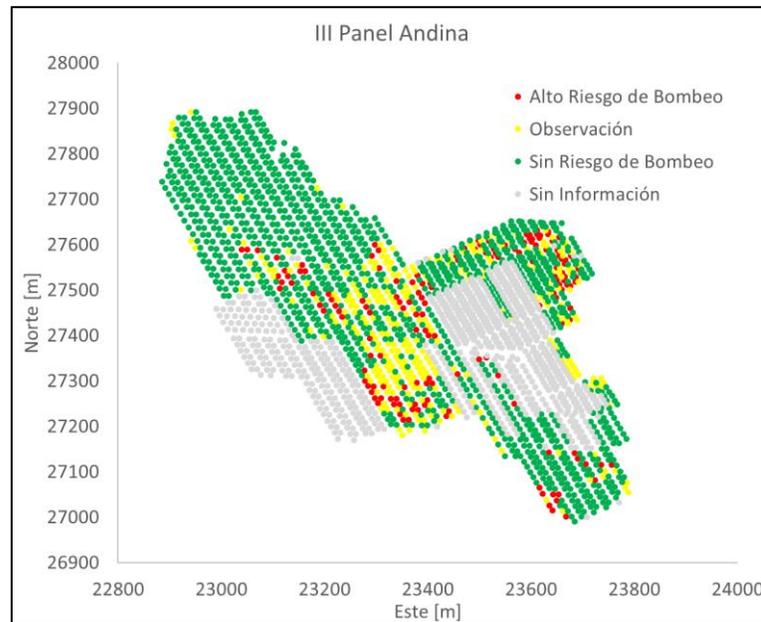


Figura 62.- Mapa de riesgo de bombeo según la clasificación de División Andina a Febrero-2017 (BCTEC, 2017).

5.12 Argyle

Argyle mine, cuyo propietario y operador corresponde a Rio Tinto, se ubica en la región Kimberley Este en el oeste de Australia. Desde el año 1983 ha producido más de 800 millones de carats de diamante bruto, siendo uno de los principales proveedores de diamantes a nivel mundial. A partir del año 2008 cesaron las actividades en el pit, dando paso a la operación de las reservas restantes via block caving definiendo una productividad de 26 ktpd.

5.12.1 Geometría

Las dimensiones del Footprint establecido para la explotación subterránea alcanzan 500 m de longitud por 170 m de ancho, con una altura de columna extraíble promedio de 280 m. Las reservas bordean 62 Mton con leyes de 2,33 ct/t. en la Figura 63 se muestra una vista en planta de la proyección del nivel de producción planificado para la explotación subterránea. (IMjan, 2009)



Figura 63.- Geometría Argyle, vista planta. (IMjan, 2009)

5.12.2 Condición de esfuerzos

La condición de esfuerzos en la mina es baja y está asociada principalmente a la sobrecarga de mineral que existe bajo el pit sobre el nivel de producción de la mina. En la Tabla 43 se muestran los esfuerzos principales a los que se encuentra sometida la roca.

Tabla 43.- Condición de esfuerzos in situ Argyle.

Esfuerzos	Valor [MPa]
σ_1	20
σ_2	12
σ_3	8

5.12.3 Fragmentación

La fragmentación esperada para Argyle, simulada a través del software *Core2Frag* se muestra en la Figura 64, en donde se observa que se esperaba un tamaño máximo de colpa d_{100} de 50 m³. Se espera que el 70% de los fragmentos presenten un volumen inferior a 2 m³. (Srikant, 2007)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

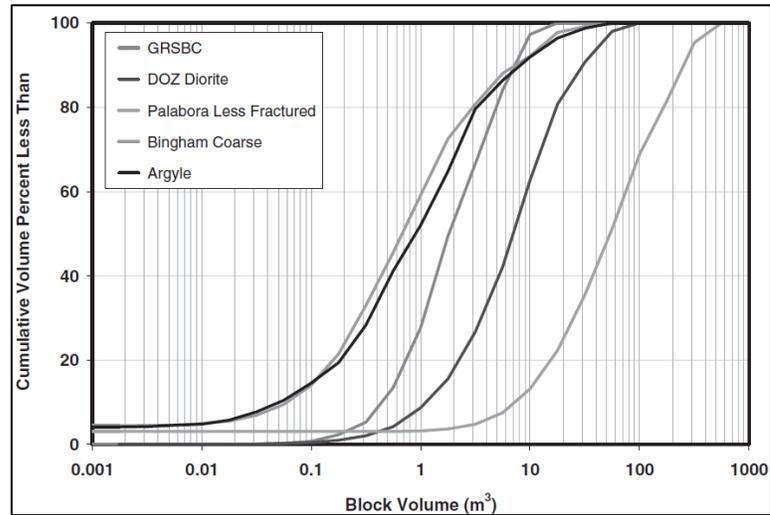


Figura 64.- Curva de fragmentación primaria Argyle, Core2Frag. (Srikant, 2007)

En la Tabla 44 se muestran los tamaños característicos para los fragmentos presentes en Argyle.

Tabla 44.- Tamaños característicos fragmentación primaria, Core2Frag.

Tamaño	Vol Max [m ³]
d ₁₀₀	50
d ₈₀	3
d ₅₀	1

5.12.4 Macizo rocoso

No se logró recolectar información relativa al macizo rocoso y sus características.

5.12.5 Condición de agua y otros

La ubicación de la mina, en torno al cinturón de formación de ciclones, genera una condición de temporadas altamente lluviosas que, eventualmente, podría infiltrar caudales de agua al interior de la mina a través del pit que deben ser manejados con sistemas de bombeo adecuado. El caudal estimado de ingreso de agua en condiciones regulares está entre 60 y 100 l/s. (IMjan, 2009)

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

En la Tabla 45 se muestra un resumen con la información de las principales características de cada yacimiento estudiado.

Tabla 45.- Resumen de benchmarking de yacimientos de block caving.

Mina	Operación / Proyecto	País / Propietario	Altura Extraíble [m]	Área [m ²]	Ritmo* [ktpd]	Fragmentación	UCS [MPa]	Esfuerzos [MPa]	$\sigma\theta$ /UCSis UCSmr/ σ_1	Condición de agua
Cadia East PC1 (S1)	Operación	Australia Newcrest	1.000	73mil	30 Bloque	(m) $d_{100}=3m^3$ $\%>2m^3 = 5\%$	150	$\sigma_1=62$ Mpa $\sigma_3=35$ Mpa	(frágil)	S.I.***
Ridgeways Deeps Lift 1	Operación	Australia Newcrest	220	79mil	23 Lift	(e) $d_{100}=10m^3$ $\%>2m^3 = 15\%$	110	$\sigma_1=51$ Mpa $\sigma_3=29$ Mpa	(frágil)	75 l/s
Resolution (1 panel/6)	Operación	EE. UU. Rio Tinto	300	180mil	30 Panel	(e) $d_{100}=9m^3$ $\%>2m^3 = 10\%$	75	$\sigma_1=53$ Mpa $\sigma_3=17$ Mpa	0,23 (plástico)	S.I.
New Afton C-Zone	Proyecto	Canadá New Gold	250	43mil	15 Bloque	(e) $d_{50}=0,3m^3$ $\%>2m^3 = 0\%$	S.I.	$\sigma_1=70$ Mpa $\sigma_3=30$ Mpa	S.I.	6 l/s
Oyu Tolgoi Hugo Norte (1panel/2)	Proyecto	Mongolia Rio Tinto	500	280mil	48 Panel	(e) $d_{100}=2m^3$ $\%>2m^3 = 0\%$	133	$\sigma_1=58$ Mpa $\sigma_3=27$ Mpa	(frágil)	90 l/s
Grasberg BC (1 panel/6)	Operación	Indonesia PTFI	450	140mil	32 Panel	(e) $d_{100}=17m^3$ $\%>2m^3 = 50\%$	80	$\sigma_1=18$ Mpa $\sigma_3=12$ Mpa	0,89 (plástico)	1000 l/s
Palabora Lift 1 (1 panel/4)	Operación	Sudáfrica Rio Tinto	500	47mil	15 Panel	(e) $d_{100}=150m^3$ $\%>2m^3 = 95\%$	200	$\sigma_1=38$ Mpa $\sigma_3=38$ Mpa	(frágil)	66 l/s
CHS N2 (1MB N2)	Proyecto	Chile Codelco	260	35mil	17,5 MB	(e) $d_{100}=8m^3$ $\%>2m^3 = 5\%$	67	$\sigma_1=22$ MPa $\sigma_3=22$ MPa	0,26 (plástico)	7 l/s
Diamante DET	Proyecto	Chile Codelco	40-210 Prom:160	288mil	35 Frente	(e) $d_{100}=10m^3$ $\%>2m^3 = 25\%$	120	$\sigma_1=55$ Mpa $\sigma_3=20$ Mpa	(frágil)	Bajo sectores A/B
MC Andina	Proyecto	Chile Codelco	300	7mil	14 Módulo	(e) $d_{100}=400m^3$ $\%>2m^3 = 40\%$	>100	$\sigma_1=38$ Mpa $\sigma_3=18$ Mpa	(frágil)	S.I.
Argyle (AK1)	Operación	Australia Rio Tinto	280	85mil	26 Frente	(e) $d_{100}=50m^3$ $\%>2m^3 = 30\%$	S.I.	$\sigma_1=20$ Mpa $\sigma_3=8$ Mpa	S.I.	60-100 l/s

* : Se indica la unidad de explotación que da origen al ritmo establecido

** : Se indica si es fragmentación esperada (e) o medida (m)

***: Sin información

5.13 Conclusiones del capítulo

En base a la información recopilada la cual dio forma al benchmarking, las principales conclusiones son las siguientes:

- Existe un amplio rango de altura de columna extraíble en los yacimientos de block caving en el mundo, abarcando desde los 160 m en promedio, como es el caso de Diamante de División El Teniente, Chile, hasta sobre 1.000 m, como es el caso de la mina Cadia East-PC1 en Australia. Sin embargo, el rango promedio de alturas de columna se encuentra entre 300 m y 500 m.
- Existe un amplio rango de tamaños de footprint, el cual varía entre 35.000 m² y 280.000 m² como unidad de explotación, el cual está dado principalmente por el tamaño y forma del cuerpo mineralizado.
- La condición de esfuerzos de cada mina es variable y depende tanto de la profundidad de emplazamiento de la operación como de la presencia de zonas superiores explotadas que generen relajación de esfuerzos. Existen yacimientos con condiciones aproximadamente hidrostáticas como es el caso de Palabora en Sudáfrica y Chuquicamata Subterráneo y otros con condiciones de esfuerzo no hidrostática como el caso de Resolution Copper. Existen yacimientos con condiciones de altos esfuerzos, como son New Afton y Cadia East,

CAPÍTULO 5: BENCHMARKING DE YACIMIENTOS DE BLOCK CAVING

ubicados a profundidades superiores a 1.000 m, y otros con bajos esfuerzos como Chuquicamata Subterráneo Grasberg Block Cave, teniendo estos dos últimos en común la presencia de un pit en la parte superior.

- El block caving es aplicado en yacimientos con un amplio espectro en el grado de competencia variando el UCS entre 60 MPa y 200 MPa. Esto es posible debido principalmente a la aplicación de técnicas de pre acondicionamiento que facilitan la fragmentación y flujo de mineral a medida que se lleva a cabo la operación.
- La fragmentación esperada varía ampliamente en los distintos yacimientos de block caving estudiado abarcando volúmenes desde menores a 2 m³ hasta superiores a 100 m³. Esto está estrechamente relacionado con la competencia de la roca en cada uno de los yacimientos y su grado de alteración.
- Actualmente se llevan a cabo operaciones de block caving con sistemas de extracción convencional en distintos rangos de humedad, yendo desde minas con condiciones ambientales secas, como Chuquicamata Subterráneo, hasta operaciones con altos caudales de agua como Grasberg Block Cave.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones

En base al estudio y análisis realizados a lo largo del presente se puede concluir lo siguiente:

Capacidad productiva de la MC y variables que afectan al sistema.

- La altura de columna extraíble corresponde a uno de los parámetros críticos en el desarrollo del potencial productivo de la MC, condicionando la capacidad productiva máxima alcanzable. Se observa, en términos generales que alturas de columna extraíble inferiores a 100 m resultan inviables para la aplicación de la MC, mientras que para columnas de entre 200 m y 300 m el efecto de la mayor capacidad productiva de la MC se presenta solo para áreas de bloque inferiores a 80 mil m². Para alturas de columna superiores es posible notar el efecto de la capacidad productiva para un mayor rango de área de bloque de extracción, siendo más significativo su efecto a nivel comparativo.
- La capacidad productiva de la MC se encuentra condicionada por la continuidad operacional y las velocidades de extracción en quiebre y régimen alcanzadas. Para velocidades de extracción en quiebre inferiores a 0,12 t/m²-día la MC pierde ventaja productiva con respecto a los sistemas de extracción convencionales, mientras que, globalmente, resulta tener mayor capacidad productiva incluso para velocidades de extracción en régimen de 0,6 t/m²-día (15% superior), correspondiente a la velocidad de extracción con equipos LHD utilizada. Es preciso mencionar que este mayor rendimiento se asocia directamente al menor porcentaje de liberación de columna debido a la utilización de PA. Para el caso particular analizado, se espera un aumento de la capacidad productiva promedio de la MC de un 44% y de su capacidad productiva máxima de un 25%.
- La capacidad productiva de la MC se encuentra limitada por la capacidad de incorporar área productiva (m²/mes). Siendo este efecto más claro para bloques de dimensiones inferiores a 100 m de altura extraíble y 150 m² de área basal.
- En términos generales, las características y método de operación propuesto por el sistema de MC sugieren aumentos significativos en la capacidad productiva de los yacimientos de block caving, pudiéndose lograr productividades superiores a las actualmente logradas con los actuales sistemas de extracción con LHD, teniendo mayores ventajas productivas de acuerdo con aspectos como la geometría del yacimiento, continuidad operacional, etc.

Aplicabilidad de la MC en yacimientos de block caving

- La Minería Continua posee un alto potencial de aplicabilidad para yacimientos de block caving tanto en Chile como en el resto del mundo.
- La Minería Continua es aplicable en distintos tipos de yacimientos, para un amplio rango de tamaños de footprint, desde sectores pequeños, modulares, hasta grandes extensiones y amplio rango de altura de columna.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

- La utilización de PA en el macizo rocoso como herramienta de control de la fragmentación se presenta como una alternativa útil para la aplicabilidad aumentar el rango de aplicabilidad de la MC en distintos tipos de yacimientos.
- La presencia de agua ingresando a la mina a tasas superiores a 120 l/s conforman una condición prohibitiva para la aplicación de la MC.
- De los once yacimientos estudiados la MC tiene potencial aplicabilidad en 9 de ellos (82%), siendo Diamante de División El Teniente y Grasberg Block Cave descartados por la condición de agua. En la Tabla 46 se muestra un resumen de los yacimientos estudiados y su potencial de aplicabilidad de la MC.

Tabla 46.- Resumen potencial de aplicabilidad de la MC.

Mina	País	Aplicabilidad
CHS	Chile	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
Andina	Chile	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
El Teniente	Chile	Se descarta la aplicación de MC debido a su condición de riesgo de agua/barro.
New Afton	Canadá	Es posible la aplicación de MC sin la necesidad de PA.
Resolution	EE. UU	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
Cadia East	Australia	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
Palabora	Sudáfrica	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
Argyle	Australia	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
R.D.	Australia	Posee potencial de aplicabilidad mediante el control de la fragmentación con PA
Oyu Tolgoi	Mongolia	Es posible la aplicación de MC sin la necesidad de PA.
Grasberg	Indonesia	Se descarta la aplicación de MC debido a su condición de riesgo de agua/barro.

6.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro, en línea con lo realizado, se plantea lo siguiente:

- Analizar distintos escenarios de las variables planteadas y ampliar el análisis de sensibilidad a otras variables, además de comparar los resultados obtenidos por los ejercicios realizados con valores reales de pruebas realizadas.
- Fomentar la realización de pruebas modulares y de escala industrial de MC para validar la capacidad productiva de la MC para identificar los principales problemas de ésta y optimizar su funcionamiento.
- Ampliar la búsqueda de yacimiento de block caving y actualizar la información para conocer el estado actual de la minería de caving en el mundo y analizar un mayor mercado potencial para la MC.
- Analizar un caso alternativo de la MC que incluya el uso de parrillas mecanizadas en lugar de alimentadores dozer.
- Realizar simulaciones de MC para obtener modelos predictivos del comportamiento de la capacidad productiva y otros aspectos.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Andina (2014). Actualización banda granulométrica in-situ modelo de fragmentación preliminar, Sector tercer Panel Extendida, Codelco, Chile.
- BCTEC (2017). Diagnóstico de riesgo de ingreso de barro al sector diamante, Proyecto alternativas de mallas de extracción para el proyecto diamante - División El Teniente, Ingeniería conceptual.
- BCTEC (2017). Informe Diagnostico de riesgo de ingreso de barro al sector Diamante. Informe BCTEC-DET-GPRO-RN-002. Alternativas de mallas de extracción para el proyecto Diamante – División El Teniente Ingeniería Conceptual.
- Beale, G. (S/F) Modelling approach to predict peak inflows at the Argyle block cave mine, Western Australia.
- Bluhm, S. Moreby, R. von Glehn, F. Pascoe, C. (2014). Life of mine ventilation and refrigeration planning for Resolution Copper Mine, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Brannon, C. (2016). Development & Construction Update of the Grasberg Block Cave Mine, Freeport-McMoRan.
- Brunton, I. Lett, J.L. Thornhill, T (2016). Full scale flow marker experiments at the Ridgeway Deeps and Cadia East cave operation, MassMining 2016.
- Calder, K. Townsend, P. Russell, F. (S/F). Palabora Underground Mine Project. Underground Mining Methods.
- Campbell, R. (2015). Chuquicamata Underground Project: 2015 Fragmentation Study Update for Initial and Experimental Macroblocs (DRAFT), SRK Consulting.
- Carrasco, F. Encina, V. Le-Féaux, R. (2004). Continuous mining for caving method, Mass Mining 2004.
- Castro, R. Riquelme, J. Widzyck-Capehart, E. Hekmat, A. Baraqui, J. (2015). Automation fundamentals of continuous mining system, International Journal of Mining, Reclamation and Environment.
- Dennis, R. Krutzmann, H. Rennie, D. (2015). Technical Report on the New Afton Mine, British Columbia, Canada, New Gold Incorporation.
- Encina, V. Baez, F. Geister, F. Steinberg, J. (2008). Mechanized continuous drawing system: A technical answer to increase production capacity for large block caving mines, Mass Mining 2008.
- Freznel, M. (2016). New Continuous Production System in Block Cave Mining - the Rock Flow System, Mass Mining 2016.
- Hatch (2014). Servicio de Ingeniería Explotación Cuerpos Subterráneos, Informe Final Ingeniería de Perfil, Codelco División Andina Chile.
- IM2 (2009). Informe de Cierre: Prueba de un sistema modular prototipo de extracción continua El Salvador, IM2.
- Lett, J.L. Brunton, I. Capes, G.W. Jager, A. (2016). Undercutting to surface breakthrough Cadia East Panel Cave (Stage 1), Mass Mining 2016.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

- Lowther, R.J. Oliver, L. Lett, J.L. Brunton, I. (2016). Implementation of a surface based hydraulic fracturing program to successfully propagate a large cave through hard competent near-Surface rock masses to achieve breakthrough, MassMining 2016.
- Orellana, L (2012). Evaluación De Variables De Diseño Del Sistema De Minería Continua A Partir De Experimentación En Laboratorio, Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil De Minas, Tesis Para Optar Al Grado De Magíster En Minería. Universidad de Chile.
- Pascoe, C. Oddie, M. Edgar, I. (2008). Panel caving at the Resolution Copper Project, Mass Mining 2008.
- Peters, B. (2014). Oyu Tolgoi Technical Report, Turquoise Hill Resources Ltd.
- Peters, B. (2016). Oyu Tolgoi Technical Report, Turquoise Hill Resources Ltd.
- Resolution Copper Mining (2016). General plan of operations, Resolution Copper Mining.
- Riquelme, J. (2014). Fundamentos operacionales, productivos y de automatización del sistema de Minería Continua, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Universidad de Chile.
- S/N. (2009). Argyle diamonds: World's biggest diamond pit goes underground, International Mining.
- S/N. (2011). Preacondicionamiento del macizo rocoso, Gerencia Proyecto Minería Subterránea, IM2, Codelco Chile.
- S/N. (2011). Preacondicionamiento del macizo rocoso, Gerencia Proyecto Minería Subterránea, IM2, Codelco Chile.
- S/N. (2016). Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo, Gerencia Minería Subterránea, División Chuquicamata.
- Sainsbury y otros, (2016). Caving-induced Subsidence Behaviour of Lift 1 at the Palabora Block Cave Mine. MassMin 2016, Sydney, Australia.
- Srikant, A. Brannon, C. Flint, D.C. Casten, T. (2007). Geotechnical characterization and design for the transition from the Grasberg Open Pit to the Grasberg Block Cave mine, Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands.

8 ANEXOS

8.1 Anexo A: Análisis conceptual de la estabilización de la capacidad productiva en función del área del bloque

La producción máxima que puede alcanzar un plan de producción depende de una serie de parámetros tanto de planificación como de diseño, dentro de los cuales se encuentran las velocidades de extracción en quiebre y régimen, la velocidad de incorporación de área, altura de columna considerada para la extracción y el área basal del bloque a explotar. Cada uno de los factores mencionados anteriormente tienen un límite de influencia sobre la capacidad productiva máxima del bloque.

A continuación, se realiza un análisis de la influencia del área y de la altura de columna del bloque como variables aisladas, considerando como parámetros de planificación una velocidad de extracción en quiebre v_q [t/m²-día] para el primer r% de la columna y una velocidad de extracción en régimen v_r [t/m²-día] para el tonelaje restante de dicha columna y una tasa de incorporación de área T_i [m²/mes].

8.1.1 Área del bloque

Para el análisis de la influencia del área del bloque en la capacidad productiva máxima se considerará una altura de columna de H [m], igual para todo el bloque, y velocidades de extracción v_q [t/m²-día] y v_r [t/m²-día], para las zonas en quiebre y régimen respectivamente. Se considerará además una tasa de incorporación T_i [m²/mes], fija.

En la Figura 65 se muestra esquemáticamente la evolución de la producción de un bloque en el tiempo, en función de la tasa de incorporación de área, representada por cada fila, y las velocidades de extracción. Se observa que para un área inicial A_1 [m²] se obtiene una producción máxima de P_1 [ktd], dada por el aporte de la totalidad de los sectores productivos activos en ese periodo, los cuales son extraídos a la velocidad de régimen. Al considerar un aumento del área basal a A_2 [m²] se observa, por una parte, que aumenta la cantidad de meses de incorporación de área y, por otra parte, la producción máxima alcanzada (P_2) en un periodo, debido a la mayor cantidad de sectores activos en extracción. La producción máxima alcanzada para el área A_2 se obtiene a partir de la combinación de sectores que se encuentran extrayendo a velocidad de quiebre y los sectores que se encuentran en etapa de régimen.

Finalmente, si se considera un área A_3 [m²], mayor a las anteriores, se observa que aumenta nuevamente el tiempo total de incorporación de área, sin embargo, la producción máxima alcanzada (P_3) en un período es igual a la alcanzada por A_2 (P_2), lo cual define un límite de influencia en la capacidad productiva máxima del área basal del bloque para una altura de columna dada.

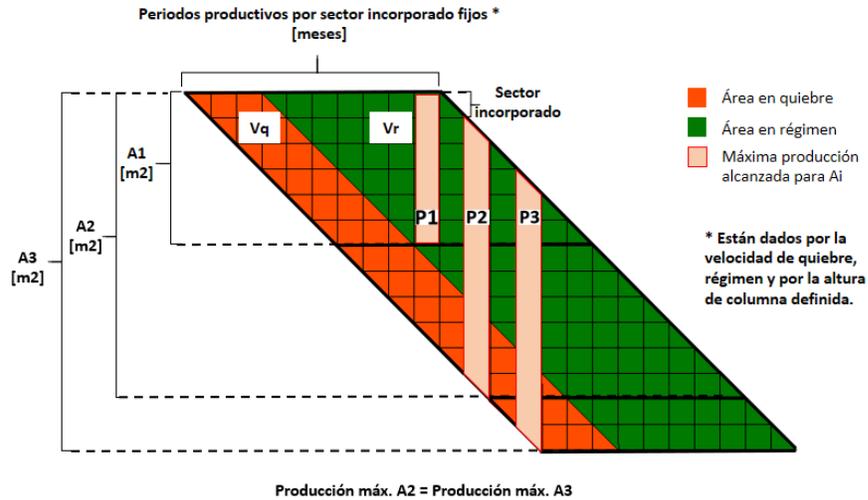


Figura 65.- Esquematización de variación de la capacidad productiva máxima en función del área del bloque, para una altura de columna H [m], v_q [t/m^2 -día] y v_r [t/m^2 -día] fijos.

A partir de lo anterior, se observa que un aumento de área del bloque a partir de A_2 no producirá un aumento en la capacidad productiva máxima por periodo, sino que prolongará la ocurrencia de dicho máximo en mayor cantidad de periodos, estabilizando la producción en tal máximo.

8.1.2 Altura de columna

De manera análoga al caso anterior, para este análisis se considerará un área de bloque de A [m^2] la cuál, en función de la tasa de incorporación de área T_i [m^2 /mes], definirá una cantidad fija de sectores a incorporar para cualquier altura de columna. Se consideran además las velocidades de extracción en quiebre y régimen mencionadas previamente.

En la Figura 66 se muestra un esquema correspondiente a la variación de la altura de columna para un bloque de área conocida A [m^2]. Se observa que para una altura de columna de H_1 [m] se alcanza una producción máxima de P_1 [ktd]. Por otra parte, si se aumenta la altura de columna a un valor de H_2 [m], se produce un aumento en el número de periodos de extracción además del aumento en el tiempo de extracción a velocidad de quiebre v_q , producto de la relación entre el tonelaje en quiebre y la altura de la columna. Lo anterior genera un aumento en la producción máxima hasta P_2 [ktd].

Finalmente, un aumento de la altura de columna hasta un valor de H_3 [m] no genera un aumento en la capacidad productiva máxima por periodo, generando solo una prolongación de dicho valor en el tiempo. Este resultado es similar al obtenido del análisis anterior y muestra un límite de influencia de la altura de columna sobre la capacidad máxima productiva para un área de bloque dada.

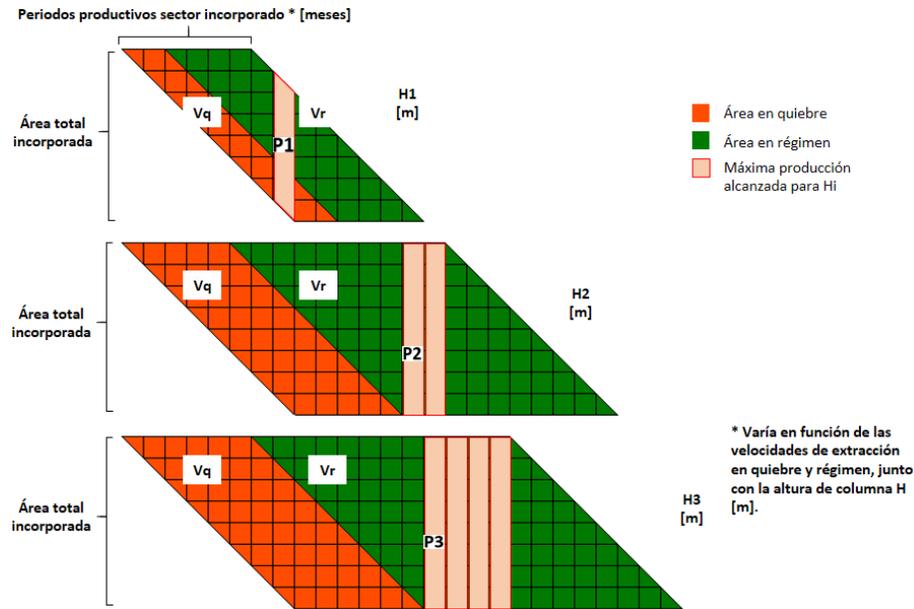


Figura 66.- Esquemática de variación de la capacidad productiva máxima en función de la altura de columna, para un área de bloque de A [m²], v_q [t/m²-día] y v_r [t/m²-día] fijos.

A continuación, en la Figura 67 y Figura 68 se muestra el efecto en la capacidad productiva máxima explicado anteriormente tanto para el sistema MC como para el sistema de extracción con equipos LHD.

Producción Máxima MC [ktpd]		ALTURA [m]								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
AREA [m ²]	10 mil	12	19	20	20	20	20	20	20	20
	20 mil	14	23	40	40	40	40	40	40	40
	40 mil	14	28	48	68	80	80	80	80	80
	80 mil	14	28	55	78	97	117	135	154	160
	120 mil	14	28	55	83	107	127	145	164	184
	160 mil	14	28	55	83	111	137	155	174	194
	200 mil	14	28	55	83	111	138	165	184	204
	240 mil	14	28	55	83	111	138	166	194	214
	280 mil	14	28	55	83	111	138	166	194	221
	320 mil	14	28	55	83	111	138	166	194	221
360 mil	14	28	55	83	111	138	166	194	221	

Figura 67.- Producción máxima alcanzable para el sistema de MC en función de principales parámetros geométricos del yacimiento. Valores de velocidades en quiebre y régimen correspondiente a los definidos para el caso base de la MC.

Producción Máxima LHD [ktpd]		ALTURA [m]								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
AREA [m2]	10 mil	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	20 mil	10	12	12	12	12	12	12	12	12
	40 mil	14	21	24	24	24	24	24	24	24
	80 mil	14	28	42	48	48	48	48	48	48
	120 mil	14	28	52	63	72	72	72	72	72
	160 mil	14	28	55	73	85	96	96	96	96
	200 mil	14	28	55	83	95	106	118	120	120
	240 mil	14	28	55	83	105	116	128	138	144
	280 mil	14	28	55	83	111	126	138	148	160
	320 mil	14	28	55	83	111	136	148	158	170
360 mil	14	28	55	83	111	138	158	168	180	

Figura 68.- Producción máxima alcanzable para el sistema LHD en función de principales parámetros geométricos del yacimiento. Valores de velocidades en quiebre y régimen correspondiente a los definidos para el caso base del sistema convencional LHD.

8.2 Anexo B: Efecto de la velocidad de extracción en la capacidad productiva de la MC

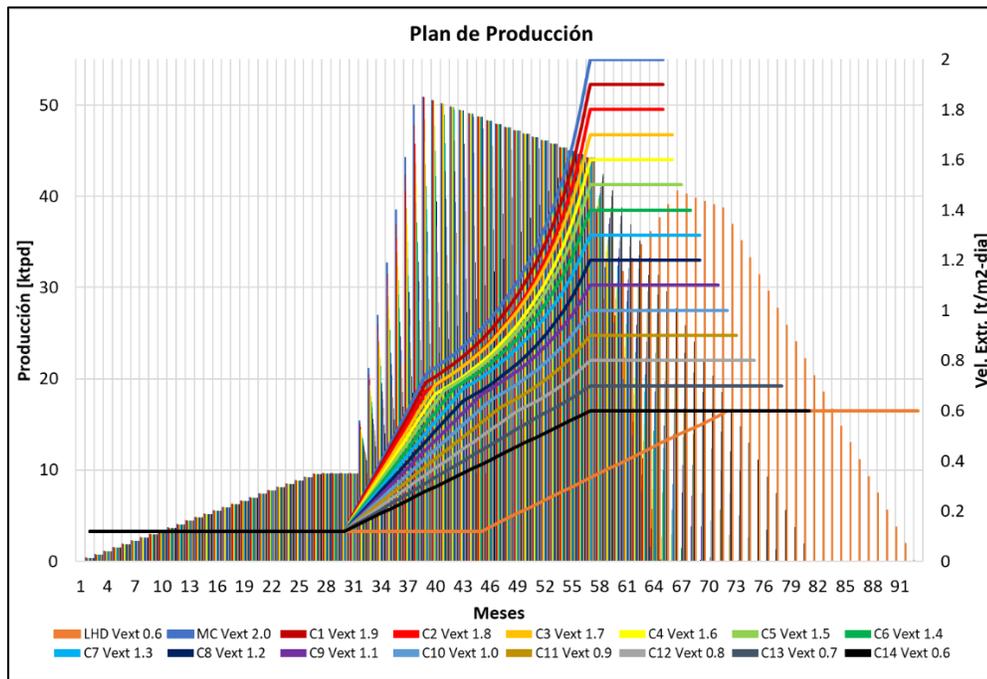


Figura 69.- Variación de la capacidad productiva de la MC en función de la velocidad de extracción en régimen.

8.3 Anexo C: Efectos de la tasa de incorporación de área en el tiempo de explotación de un bloque

Tabla 47.- Variación en el número de periodos productivos de un bloque en función de la tasa de incorporación de área para distintas geometrías de bloque.

Periodos [mes]	Área incorporada [m ² /mes]	Hcol = 150 m	Hcol = 200 m	Hcol = 300 m	Hcol = 600 m
		A= 100mil m ²	A= 80mil m ²	A= 150mil m ²	A= 40mil m ²
LHD	3.072	66	70	114	142
MC	3.072	50	50	82	80
	2.816	53	52	87	81
	2.560	57	55	92	82
	2.304	61	58	99	84
	2.048	66	63	107	86
	1.792	73	68	117	89
	1.536	83	76	131	93
	1.280	96	86	151	98
	1.024	115	102	180	106