



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería de Minas

# Desarrollo De Un Estándar De Extracción Ante Eventos No Planificados

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL DE MINAS

BAYRON GONZALO NAVARRETE HUENCHUAL

PROFESOR GUÍA:  
RODRIGO CORTES FRIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
KIMIE SUZUKI MORALES  
FRANCISCO ARMIJO ALLENDE

SANTIAGO DE CHILE  
2022

## DESARROLLO DE UN ESTÁNDAR DE EXTRACCIÓN ANTE EVENTOS NO PLANIFICADOS

En mayo de 1915 se puso en marcha la mina a rajo abierto más grande del mundo, Chuquicamata, división que actualmente está finalizando un lento proceso de transición desde una mina que ha sido explotada utilizando el método a rajo abierto por más de cien años a una mina subterránea explotada a través de un Panel Caving que permitirá la continuidad de la división por otros 50 años más. La explotación de la mina subterránea comenzó a mediados del año 2020, y actualmente se encuentra en pleno periodo de Ramp-Up que se espera finalice a principios del año 2024 alcanzando las 140,000 toneladas por día de mineral. En este contexto es imperativo controlar la geometría del caving usando una adecuada extracción del nivel de producción. La calidad de la extracción se puede medir con 3 parámetros: adherencia, utilización y uniformidad. En una operación perfecta, sin eventos no planificados y siguiendo correctamente la planificación prevista, estos indicadores deberían reflejar una correcta evolución del caving, generando el domo esperado como busca resguardar la operación de corto y largo plazo. No obstante, las minas que operan por hundimiento tienen un sinnúmero de eventos no planificados que interrumpen la continuidad operacional, estos constantes problemas en el tiempo generan dificultades para cumplir con lo planificado impactando directamente en los indicadores y por ende en la calidad de extracción, provocando ciertos problemas como lo son las colgaduras o la dilución no planificada.

Lo antes mencionado es justamente lo que ocurre actualmente en Chuquicamata Subterránea, razón por la cual este trabajo busca confeccionar un estándar de extracción que considere los eventos no planificados para minimizar el impacto en la calidad de extracción. Para ello se analizan y simulan 3 estrategias de extracción dando como resultado que la “estrategia optimizada” (consistente en sacar un baldada a toda la calle y luego extraer todo el punto intercalando orientación Norte-Sur) obtiene los mejores resultados en cuanto a uniformidad, adherencia y utilización. Alcanzando por ejemplo el 100% de la uniformidad en 3 horas de operación una vez iniciado el turno, y el 100% de utilización a las 4 horas de operación, siendo una estrategia óptima para asegurar la calidad de extracción cuando en un turno se tienen pocas horas de operación.

Para la confección del estándar se utiliza una estrategia combinada, esto es, mantener la estrategia de extracción actual cuando se tengan 5 o menos horas de detención, con la diferencia que primero se extraerá una baldada de cada punto para asegurar la utilización, y cuando se tengan más de 5 horas de detención se utilizara la estrategia optimizada, esto con el fin de equilibrar la calidad de extracción con la producción. Este estándar considera la uniformidad mínima requerida para evitar dilución no planificada, siendo ésta de un 90%. Este valor es obtenido al estudiar la uniformidad y dilución generada desde los inicios de las operaciones de extracción (Back-Analysis).

Finalmente, se determina que la aplicación de este estándar aumenta las ganancias mensuales a largo plazo en aproximadamente 2.3 MUSD. Además cuida la geometría del domo de extracción y busca minimizar procesos como colgaduras, dilución y en el peor de los casos el colapso de área en el macro bloque, dando validez a la estrategia de extracción seleccionada.

# DEVELOPMENT OF AN EXTRACTION STANDARD IN THE FACE OF UNPLANNED EVENTS

In May 1915, the largest open pit mine in the world, Chuquicamata, was started up, a division that is currently completing a slow transition process from a mine that has been exploited using the open pit method for more than one hundred years to a underground mine exploited through a Caving Panel that will allow the continuity of the division for another 50 years. The exploitation of the underground mine began in mid-2020, and is currently in the full Ramp-Up period, which is expected to end at the beginning of 2024, reaching 140,000 tons of ore per day. In this context it is imperative to control the geometry of the caving using adequate extraction from the production level. The quality of the extraction can be measured with 3 parameters: adherence, utilization and uniformity. In a perfect operation, without unplanned events and correctly following the planned schedule, these indicators should reflect a correct evolution of the caving, generating the expected dome as it seeks to protect the short and long term operation. However, the mines that operate by sinking have endless unplanned events that interrupt operational continuity, these constant problems over time generate difficulties in complying with what was planned, directly impacting the indicators and therefore the quality of extraction, causing certain problems such as hangings or unplanned dilution.

The aforementioned is precisely what is currently happening in Chuquicamata Subterránea, which is why this work seeks to prepare an extraction standard that considers unplanned events to minimize the impact on extraction quality. For this, 3 extraction strategies are analyzed and simulated, resulting in the "optimized strategy" (consisting of removing a shelf from the entire street and then extracting the entire point interspersing North-South orientation) obtaining the best results in terms of uniformity, adherence and use. Reaching, for example, 100% uniformity in 3 hours of operation once the shift has started, and 100% utilization at 4 hours of operation, being an optimal strategy to ensure extraction quality when in a shift there are few hours of operation.

For the preparation of the standard, a combined strategy is used, that is, maintaining the current extraction strategy when there are 5 or fewer hours of detention, with the difference that first a shelf will be extracted from each point to ensure use, and when have more than 5 hours of detention, the optimized strategy will be used, this in order to balance the extraction quality with the production. This standard considers the minimum uniformity required to avoid unplanned dilution, which is 90%. This value is obtained by studying the uniformity and dilution generated from the beginning of the extraction operations (Back-Analysis).

Finally, it is determined that the application of this standard increases long-term monthly earnings by approximately 2.3 MUSD. It also takes care of the geometry of the extraction dome and seeks to minimize processes such as hanging, dilution and, in the worst case, the collapse of areas in the macro block, validating the selected extraction strategy.

*“Somos del mismo material del que se tejen los sueños, nuestra pequeña vida está rodeada de sueños”*

*William Shakespeare.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero partir con un pequeño grupo de personas para las cuales un simple gracias queda muy lejos del sentimiento que realmente me inunda al pensar en ellos, estas personas son mi familia, mi madre Angélica Huenchual, mi padre Felipe Navarrete, mis hermanos Christopher y Camila Navarrete, y mis abuelos Juan Huenchual y Raquel Troncoso, quienes han estado siempre ahí para mí, quienes me han apoyado en cada momento difícil de mi vida, quienes han hecho que sea quien soy, y quienes siempre me entregaron su cariño y amor de manera incondicional. Cada logro en mi vida es gracias a ustedes, sobre todo a mis padres cuyos sacrificios en la vida jamás olvidare, los amo más que a mi vida y será así hasta el último de mis días.

Dicho esto quiero agradecer a mis amigos formados en la universidad, principalmente con quienes compartí los 4 años en minería: Francisco Vilches, Francisco Arévalo, Elías Riveros, Erick Sanhueza, Bastián Urrutia, Nicolas Lepiman y Moisés Miranda, les agradezco cada risa, cada una de las palabras, cada broma y cada momento que vivimos durante todos estos años. También le agradezco a aquellos que conocí y con quienes compartí los últimos años: Madeline Valdivia y Sebastián Caballero, jamás olvidare las largas noches que pase trabajando con cada uno de ellos entre risas y largas conversaciones.

Agradezco a mis amigos de plan común, Ignacio Muñoz, Alejandro Bull, Juan Pablo Villagrán, Matías Contreras, Freddy Cabrera, Gerardo Sepúlveda, Juan Pablo Brandt, Jean Pinaud, Jorge Méndez, todos ustedes fueron mi primer grupo de amigos en la universidad, fueron con quienes conviví los primeros años de universidad cuando era apenas un mechón que no conocía a nadie, y son el lindo recuerdo de esos martes de chorrillana.

Quiero agradecer también a un amigo muy importante en mi vida, a quién conocí como compañero en el Liceo Manuel Barros Borgoño, Ricardo Meza, a pesar de que te hable cada mil años agradezco mucho que nuestra amistad siga perdurando en el tiempo. Agradezco también a compañeros del colegio como Manuel Torres, Fernando Kurte, José Rubio, Ariel Sepúlveda entre otros, con quienes compartí grandes momentos.

Agradezco a mis profesores de la universidad quienes me formaron como un profesional integro, quienes me guiaron y ofrecieron siempre su ayuda, en especial a la profesora Kimie Suzuki, quien fue un apoyo enorme en todo mi periodo realizando mi trabajo de título, también agradezco las palabras del profesor Gonzalo Montes en la última presentación que tuve con él, jamás olvidare sus consejos.

También quiero agradecer a cada persona que conocí en Codelco, quienes me acogieron siempre como uno más y quienes cada día me enseñaron algo nuevo tanto personal como profesional. En particular le agradezco a mi tutor de memoria, Rodrigo Cortes, muchas gracias por el esfuerzo de formarme con tanta dedicación, por estar ahí siempre y por involucrarme en nuevos desafíos para mi desarrollo profesional, agradezco a Francisco Armijo quien fue mi tutor de práctica, por el apoyo, por todo lo que me enseñaste y por ser la primera persona en tenderme una mano en un mundo desconocido para mi en ese entonces. Agradezco enormemente al Gerente Juan Cristóbal Videla por acogerme en Chuquicamata Subterránea, por darme la oportunidad de estar ahí, por confiar en mí y por darse el tiempo de enseñarle a un simple memorista como yo. Le agradezco al Superintendente Nicolas Jamett por confiar en mi hasta el último minuto, por cada nueva

oportunidad que me entregó para continuar mejorando como profesional, jamás olvidare las palabras que me transmitió cuando solo era un practicante, el motivo del por qué estar ahí y hacer lo que hacemos, principios que pienso seguir durante toda mi carrera profesional. Le agradezco a Felipe Rodríguez por permitirme trabajar junto a él, le agradezco por la enorme paciencia que tuvo conmigo y por inculcarme la responsabilidad y dedicación por la labor que cumplimos. Le agradezco a Álvaro Berg por su ánimo, apoyo y enseñanzas. Y también le agradezco a cada persona que conocí en mi periodo como memorista, al jefe Efrén Rocco, a Camila Riveros, a René (Cuchillo), Cristóbal Cisterna, Barbara Mori, Erick Paredes, Rodrigo Madrid, Sergio Valencia, Alexis Araya, Katy, Tamara, Isa, Walter, Jorge, Flo, Daniela, Cristian y por último alguien que sin pedirlo me entrego su ayuda: Carlos Arias, muchas gracias por todo.

# TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción .....	1
1.1. Contexto .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	3
1.3. Alcances .....	3
2. Marco Teórico .....	4
2.1. Marco global de la mina .....	4
2.2. División Chuquicamata, Codelco, Chile .....	5
2.3. Geología y Geotecnia de Chuquicamata Subterránea .....	6
2.4. Método de Explotación .....	7
2.5. Diseño de la mina .....	16
2.6. Disminución del área disponible .....	18
2.7. Dilución .....	19
2.8. Indicadores de Calidad de Extracción .....	23
2.9. Disminución en la calidad de extracción .....	29
3. Metodología de Trabajo .....	30
3.1. Simulación de estrategias de extracción .....	30
3.2. Comparación de Estrategia Seleccionada vs Estrategia Actual .....	37
3.3. Definición de Uniformidad mínima resistida por el macizo rocoso .....	37
3.4. Definición de Estándar Final de extracción ante eventos no Planificados .....	39
3.5. Cálculo del beneficio económico de la aplicación del estándar .....	40
4. Resultados y Análisis .....	41
4.1. Simulación de Estrategias de Extracción .....	41
4.2. Estrategia Optimizada vs Estrategia Actual .....	45
4.3. Uniformidad mínima resistida por el macizo rocoso .....	48
4.4. Estándar Final de extracción ante eventos no Planificados .....	49
4.5. Beneficios económicos de la aplicación del estándar .....	52
5. Conclusiones .....	54
6. Bibliografía .....	56
Anexos .....	58
Anexo A.1 Geología Global .....	58

Anexo A.2 Equipos .....	63
Anexo A.3 Resultado de las Simulaciones.....	66
Anexo A.4 Simulación vs Realidad .....	67
Anexo A.5 Datos y Resultados Sobre el Estudio de la Dilución .....	67
Anexo A.6 Cuantificación Económica.....	72
Anexo A.7 Variables de Entrada para las simulaciones.....	73

## Tabla de Figuras

Figura 1 Unidades Geotécnicas Básicas y VIF macro bloques centrales, cota 1.841. ....	6
Figura 2 Orientación de los esfuerzos principales. Fuente: Vicepresidencia de Proyectos, 2014. ....	7
Figura 3 Método de Block Caving.....	8
Figura 4 Tipos de fragmentación.....	9
Figura 5 Modelo teórico del proceso de caving (Duplancic and Brady, 1999).....	11
Figura 6 Distribución de los macro bloque en el primer nivel de producción. ....	12
Figura 7 Método de hundimiento y su variante a aplicar en Chuquicamata Subterránea.....	14
Figura 8 Objetivos en cada una de las zonas definidas. ....	14
Figura 9 Panel caving convencional típico con sistema LHD. Fuente: Cavieres (1999).....	15
Figura 10 Cota de cada nivel de la mina (Fuente: Codelco). ....	16
Figura 11 Vista en planta macro-bloque N01-S01 (Fuente: Codelco).....	17
Figura 12 Mapa con el nombre de cada PEX. Elaboración Propia. ....	17
Figura 13 Mapa del MB, en verde los puntos actualmente disponibles. Elaboración Propia. ....	18
Figura 14 Fenómeno de Rilling. DeWolfe, 1981.....	20
Figura 15 Comparación dilución esperada vs dilución real. Fuente: GRMD, Codelco (Febrero, 2022). ....	22
Figura 16 Comportamiento de la entrada de dilución (Susaeta, 2004). ....	25
Figura 17 Relación de entrada de Dilución (flujo aislado) y el porcentaje de tonelaje extraído por columna en Andina. Susaeta 2004.....	27
Figura 18 Disminución de la calidad de extracción a medida que se cuentan con menos horas de operación (elaboración propia).....	29
Figura 19 Parte de una Cartilla de Tiraje típica de Chuquicamata Subterránea. ....	30
Figura 20 Secuencia de extracción en la estrategia actual, las flechas azules indican la completa extracción de un punto correspondiente a un turno dado.....	31
Figura 21 Secuencia de extracción en la estrategia optimizada. ....	33
Figura 22 Secuencia de extracción en la estrategia por bloques. ....	35
Figura 23 Secuencia de extracción en la estrategia intercalada. ....	36
Figura 24 Proceso de Simulación. ....	37
Figura 25 Dilución real vs Dilución planificada.....	38
Figura 26 Uniformidad planificada vs Uniformidad real para los meses de Mayo a Septiembre del 2021. ....	38
Figura 27 En rojo la cantidad de mineral extraído por punto hasta Octubre del 2021. ....	39
Figura 28 Utilización en el tiempo alcanzada por cada simulación. ....	41
Figura 29 Adherencia en el tiempo alcanzada por cada simulación.....	42
Figura 30 Uniformidad en el tiempo alcanzada por cada simulación. ....	43

Figura 31 Producción en el tiempo alcanzada por cada simulación. ....	44
Figura 32 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 18 a 24 horas de operación. ....	45
Figura 33 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 12 a 18 horas de operación. ....	46
Figura 34 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 6 a 12 horas de operación. ....	46
Figura 35 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para menos de 6 horas de operación. ....	47
Figura 36 Uniformidad real del macro bloque central en el tiempo. ....	48
Figura 37 Dilución vs Uniformidad hasta Febrero del 2022. ....	48
Figura 38 Estándar Final para la extracción de PEX ante eventos no planificados. ....	50
Figura 39 Ingreso económico por estrategia. ....	52
Figura 40 Diferencia entre el beneficio alcanzado cuando los puntos no son limitados por dilución no planificada. ....	53
Figura 41 Vista 3D de la forma del rajo de Chuquicamata. ....	58
Figura 42 Vista en planta de la ubicación geográfica y forma del rajo Chuquicamata. ....	59
Figura 43 Dominios estructurales proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. ....	62
Figura 44 Límites Dominios Estructurales nivel 1841 con la identificación de Estructuras Limite. ....	62
Figura 45 Equipo Sandvik LH621. ....	63
Figura 46 Equipo Sandvik LH514. ....	64
Figura 47 Equipo Caterpillar R3000H. ....	65
Figura 48 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en diciembre del 2021. ....	68
Figura 49 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en noviembre del 2021. ....	68
Figura 50 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en octubre del 2021. ....	69
Figura 51 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en septiembre del 2021. ....	69
Figura 52 Mapa de dilución no planificada (Enero 2022). ....	72
Figura 53 Plan de producción del año 2022. ....	72

## Índice de Tablas

Tabla 1 reservas, productividad y área total de cada macro bloque. ....	13
---	----

Tabla 2 Fragmentación esperada según factor de esponjamiento.....	21
Tabla 3 Altura teórica zona de interacción. ....	21
Tabla 4 Rangos de dilución.....	22
Tabla 5 Rangos y clasificación de la Uniformidad. ....	23
Tabla 6 Matriz de Uniformidad, adaptado de Susaeta (2004).....	26
Tabla 7 Variación porcentual entre caso con evento y casos con eventos (Elaboración propia).....	29
Tabla 8 Priorización de calles en la estrategia actual.....	32
Tabla 9 Cumplimiento promedio histórico de cada calle.....	34
Tabla 10 priorización de calles para la estrategia optimizada. ....	34
Tabla 11 Especificaciones técnicas del equipo Sandvik LH621. ....	63
Tabla 12 Especificaciones técnicas del equipo Sandvik LH514. ....	64
Tabla 13 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia por bloques.....	66
Tabla 14 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia optimizada.....	66
Tabla 15 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia actual. ....	66
Tabla 16 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia actual más la extracción del 120% por PEX. ....	66
Tabla 17 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia intercalada.....	66
Tabla 18 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia intercalada más la extracción del 120% por PEX. ....	66
Tabla 19 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 18 a 24 horas de operación. ....	67
Tabla 20 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 12 a 18 horas de operación. ....	67
Tabla 21 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 6 a 12 horas de operación. ....	67
Tabla 22 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen menos de 6 horas de operación. ....	67
Tabla 23 Puntos con dilución sobre la planificada a Enero del 2022. ....	67
Tabla 24 Detalle de cada PEX del MB central y sus vecinos. Parte 1. ....	70
Tabla 25 Detalle de cada PEX del MB central y sus vecinos. Parte 2. ....	71
Tabla 26 Calculo de ingresos por estrategia. ....	72
Tabla 27 Tiempos de ciclo promedio por cada PEX en calles 1N, 1S, 2N y 2S. ....	73
Tabla 28 Tiempos de ciclo promedio por cada PEX en calles 3N, 3S, 4N y 4S. ....	73

# 1. Introducción

Ante el eventual cierre del rajo de Chuquicamata, el futuro de la división recae sobre la recién creada mina Chuquicamata Subterránea explotada a través del método de Panel Caving, cuyo inicio de las operaciones comenzó a mediados del año 2019 con una producción inferior a las 10 ktpd. Actualmente la mina se conforma de 3 macrobloques (MB) de los cuales dos están en desarrollo (MB Norte y Sur) y uno en plena producción (MB central), entre los tres sectores a principios del año 2022 se bordean las 50 ktpd.

Eventos como la dilución temprana no planificada y la disminución del área disponible en el sector Oeste del macrobloque central ponen en jaque la actual operación de extracción, la cual debe ser capaz de identificar tanto sus aciertos como posibles inconvenientes con el fin de mejorar y minimizar estos problemas en el macro bloque central y en los futuros macrobloques en desarrollo. Aquí es donde entra en juego la calidad de extracción y como esta es afectada por diversos eventos no planificados que interrumpen la continuidad operacional y merman la correcta extracción. Por esta razón el siguiente estudio busca generar un estándar que incorpore la mejor estrategia de extracción ante estos eventos que interrumpen la continuidad operacional tales como:

- Correas fuera de servicio.
- Atollos en Chancador.
- Mantenimientos no programados.
- Baja disponibilidad de palas.
- Calles fuera de servicio.
- Etc.

Estos eventos provocan una disminución en las horas para operar, situación en la cual la disminución en la calidad de extracción (uniformidad, adherencia y utilización) debido a una incorrecta estrategia de extracción se acentúa.

## 1.1. Contexto

Con una Profundidad sobre los 1.100 metros, un largo mayor a 4.500 metros y un ancho aproximado de 3.000 metros, Chuquicamata es uno de los rajos abiertos más grandes del mundo con una historia de más de 100 años. Lamentablemente alcanzó su límite económico esta última

década y su cierre está programado para los próximos años. Es en este contexto que nace el proyecto de Chuquicamata Subterráneo. Con más de 4.300 Mt de recursos geológicos por debajo del pit final que contienen cobre y molibdeno, el método block/Panel Caving ofrece altas tasas de producción y bajos costos para la explotación de este yacimiento masivo.

Chuquicamata Subterráneo cuenta con 1.701 Mt de reservas mineras que contienen 0.7% de Cobre y 521 ppm de molibdeno, se pronostica un Ramp-Up de 7 años (actualmente se está gestionando bajar este Ramp-Up a 5 años) para alcanzar una producción de 140,000 tpd con una vida útil de 40 años, esta mina que en su fase inicial es explotada bajo el método de Block Caving con variante de Macro Bloques contara con 3 niveles de explotación y con 2 niveles operando simultáneamente con una secuencia de explotación que va desde el centro hacia el Norte y Sur. Por nivel se planifica el desarrollo de 10 macrobloques, de los cuales 3 están en producción o en desarrollo a enero del 2022.

Los diferentes estudios que se han realizado en Chuquicamata subterránea a razón de la disminución del área disponible, la entrada temprana de la dilución y la alta cantidad de colgaduras, muestran una correlación directa entre la baja calidad de extracción que propician estas condiciones y diversos eventos no planificados que disminuyen los tiempos efectivos de operación. Por esta razón, es clave conocer qué condiciones desmedran la calidad de extracción y definir cómo enfrentar este tipo de eventos dado que pronto se abrirán más macrobloques, en los cuales no se puede repetir las mismas operaciones que conllevaron a la disminución de área disponible, al aumento de colgaduras y la entrada temprana de dilución en el macro bloque central.

## 1.2. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de este trabajo.

### 1.2.1. Objetivo General

- Generar un estándar de extracción que asegure una mínima calidad de extracción ante eventos no planificados que interrumpan la continuidad operacional.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Simular varias estrategias de extracción en el macrobloque (MB) central para determinar aquella que genere la mayor calidad de extracción.
- Identificar el umbral de pérdida permitido en la calidad de extracción desde donde no hay recuperación.
- Estandarizar un plan de acción frente a eventos de pérdida en el plan de producción.

### 1.3. Alcances

Este trabajo abarca solo el macro bloque central de la mina Chuquicamata Subterránea, quedando fuera del estudio los actuales macrobloques Norte (N2N3) y Sur (S2S3) que se encuentran en crecimiento.

La información encontrada abarca desde el comienzo de la producción en 2019 hasta Diciembre del año 2021. Los indicadores de calidad de extracción son calculados desde el inicio de la producción, no obstante, la información sobre los eventos no planificados solo abarca el año 2021.

La información sobre los eventos no planificados se basa en los escasos registros existentes, por lo cual muchos eventos (desde el inicio de las operaciones en el año 2019 en adelante) no identificados o no registrados en su momento quedarán fuera del estudio.

Las secuencias de extracción simuladas corresponden a las utilizadas actualmente y algunas propuestas en este trabajo. No hay un estudio profundo en términos de secuencias de extracción.

Las simulaciones se hacen solo en una planilla de Excel.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Marco global de la mina

Chuquicamata Subterránea se localiza bajo el histórico rajo de la división Chuquicamata que operó por más de 100 años sin interrupción, pero que ha alcanzado su máximo potencial económico debido al alto costo de seguir profundizando en este, por esta razón nace el proyecto de Chuquicamata subterránea que busca aprovechar la gran cantidad de recursos aun existentes bajo el rajo.

Para esta explotación se utiliza el método Block/Panel Caving con un diseño consistente en Macro Bloques (MB) independientes con sus propias operaciones unitarias. Los MB son Unidades de Explotación Independientes con áreas de 35.000 metros cuadrados y con pilares entre los MB de 30 metros, el diseño contempla un primer nivel con 20 Macro Bloques de 4 calles cada uno, los cuales utilizan una malla Teniente de 16 m x 16 m. En base a los colapsos ocurridos en el MB central, el diseño de los siguientes MB utilizara una malla de 16 m x 20 m. Se tiene contemplado una Tolva de 500 toneladas de capacidad cada 2 MB.

Actualmente solo están en producción los Macro Bloques S01-N01 (completo), S02-S03 y los N02-N03 (incorporando área), pertenecientes al primer nivel que se encuentra entre 200 y 400 metros bajo el Rajo.

Dentro de la preparación de los Macro Bloques está el Pre-Acondicionamiento intensivo del macizo rocoso a través de un fracturamiento hidráulico descendente (desde 150 a 200 metros) y una tronadura confinada ascendente, con el objetivo de mejorar la hundibilidad y fragmentación del macizo rocoso. Dado los malos resultados de estos métodos se determinó no utilizar pre-acondicionamiento en los siguientes macro bloques, esto por las condiciones especiales de Chuquicamata que cuenta con una roca de mala calidad.

Cada macrobloques cuenta con 6 niveles importantes: el nivel de hundimiento en la cota 1.841, el nivel de Producción en la cota 1.823, la sala de Chancado en la cota 1.809, el nivel de inyección en la cota 1.802, el nivel de extracción en la cota 1.776 y por último el nivel de transporte intermedio en la cota 1.716 (Vicepresidencia de Proyectos, 2017).

## 2.2. División Chuquicamata, Codelco, Chile

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa del Estado de Chile líder en la producción mundial de cobre, con unas reservas de cobre que representan el 6% a nivel mundial. Esta empresa fue creada en 1971, y hasta el año 2021 ha generado excedentes de más de 122 mil millones de dólares. Con una producción de 1.618.266 tmf, las ventas en el año 2021 alcanzaron los 20 mil millones de dólares generando excedentes de 7.394 millones de dólares, lo que representa un 256% superior al año anterior.

Codelco actualmente cuenta con siete divisiones mineras, estas son Chuquicamata, Ministro Hales, Radomiro Tomic, Gabriela Mistral, Salvador, Andina y El Teniente, a estas se suman la Fundición y Refinería Ventanas, y la Casa Matriz en Santiago encargada de coordinar la estrategia corporativa.

Misión de Codelco: Maximizar, de manera competitiva y sustentable, el valor económico de la empresa y su aporte al Estado en el largo plazo, a través de la explotación del cobre.

En particular la División Chuquicamata es una mina de cobre y oro a rajo abierto ubicada a 15 km al norte de Calama en la Región de Antofagasta. Sus operaciones iniciaron en mayo de 1915, con sus instalaciones ubicadas en la comuna de Calama, a 1.650 kilómetros al norte de la capital de Chile y a 2.870 metros sobre el nivel del mar.

Después de 104 años de operación sin interrupción del rajo abierto, en agosto de 2019 se inaugura Chuquicamata Subterránea, un proyecto estructural que explota la reserva de mineral ubicada a poco más de un kilómetro de profundidad bajo el actual yacimiento de Chuquicamata. Las reservas de este yacimiento alcanzan las 1.028 millones de toneladas de mineral con una ley del 0,82%, con lo que se asegura la continuidad de la división por al menos 50 años más.

En 2021 Chuquicamata produjo 319.280 toneladas métricas de cobre fino y 265.842 mil kilos de plata, entre otros subproductos. La producción de cobre generada por la División Chuquicamata representa casi el 20% del total producido por Codelco en el año 2021.

## 2.3. Geología y Geotecnia de Chuquicamata Subterránea

La condición del macizo rocoso está caracterizada como un conjunto de rocas medianamente competentes con indicadores de frecuencia de fracturas (FF) entre 2 y 4 fracturas por metro e indicadores de calidad del macizo rocoso RMR (Rock Mass Rating) entre 40 y 55 (en una escala de 100) (Barindelli, 2016).

Destacan 5 unidades principales, el pórfido este potásico (PEK), pórfido este sericítico (PES) Cuarzo igual Sericita (QIS), Cuarzo mayor Sericita (QMS) y Cuarzo menor Sericita (QMES), las cuales tiene diferente resistencia a la compresión uniaxial. La roca PEK tiene un UCS de 96,5 Mpa siendo la roca más resistente, sin embargo, la mineralogía con mejores leyes está emplazada principalmente en el sector compuesto por roca Cuarzo-Sericita, la cual tiene una UCS variable entre 20,3 a 67,2 Mpa. Estas unidades se pueden ver en la siguiente imagen:

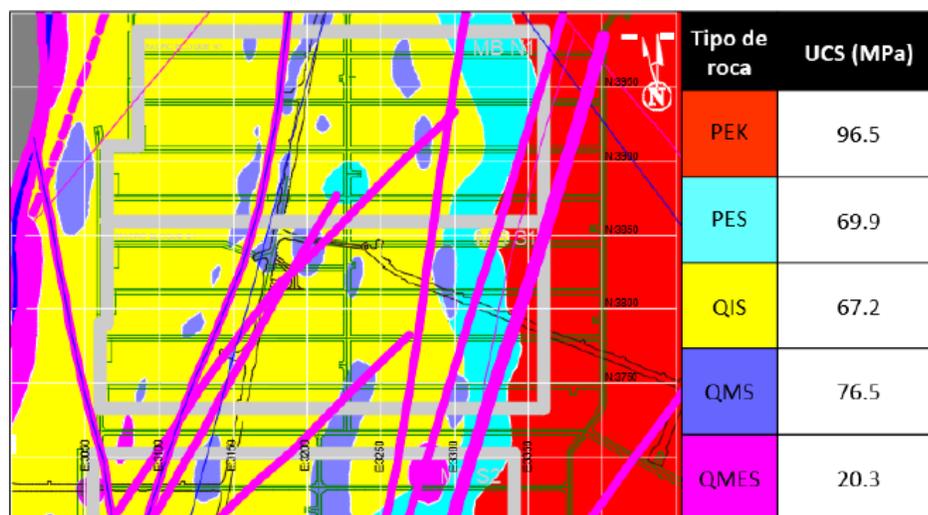


Figura 1 Unidades Geotécnicas Básicas y VIF macro bloques centrales, cota 1.841.

En esta imagen se puede apreciar las fallas VIF (very important fault), las cuales son fallas proyectadas desde el rajo, y que tiene una dirección más o menos parejas entre N20E y N40E.

En cuanto al nivel de hundimiento de los macro-bloques N01-S01, se puede apreciar que su composición es mayoritariamente QIS (72%) seguido de PES (13%) y en menor medida, QMS (8%) y PEK (7%), siendo representativo un UCS de 67-70 Mpa en este nivel.

En relación a la magnitud de los esfuerzos in situ que presenta Chuquicamata, estos varían dependiendo la zona del yacimiento dado que, por la presencia del rajo, las columnas de sobrecarga

de mineral son de diferentes alturas. La Ilustración 6 presenta la orientación del esfuerzo principal mayor y el esfuerzo principal menor, los cuales presentan una magnitud cercana a los 30 y 23 MPa, respectivamente.

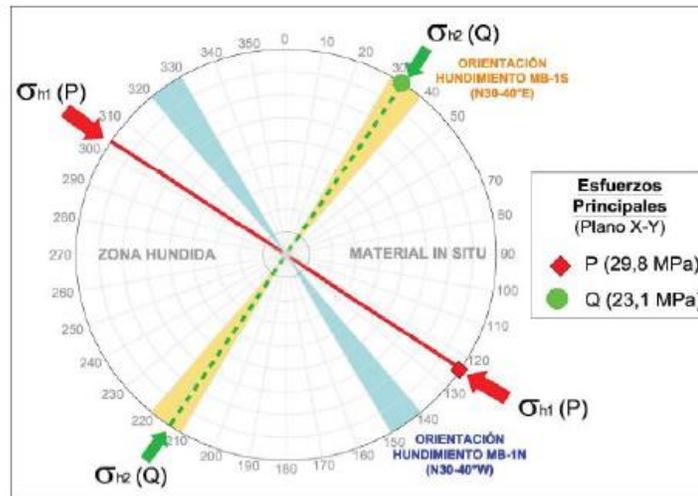


Figura 2 Orientación de los esfuerzos principales. Fuente: Vicepresidencia de Proyectos, 2014.

## 2.4. Método de Explotación

El método de explotación inicial y utilizado en el macrobloque central corresponde a un Block Caving con variante de macro bloques utilizando hundimiento convencional. La secuencia de explotación es la siguiente:

- Desarrollo y construcción de galerías en Niveles de Hundimiento y Producción y su posterior fortificación.
- Apertura de bateas desde el Nivel de Producción, delante del frente de socavación.
- Tronadura de hundimiento con avance desde el Oeste al Este.
- Repele de bates y de tronaduras de hundimiento bajo ciertos parámetros, posterior a los cuales se incorporan las bateas a la producción.

Según la literatura tenemos diferentes definiciones de lo que es el método de Block Caving:

El método de block caving es una forma de explotación por hundimiento en que el cuerpo mineralizado se derrumba naturalmente por efecto de la gravedad y de los esfuerzos locales generados, luego de haber sido socavado en su base. La propagación del caving es un efecto de la inestabilidad interna del macizo rocoso, producto de la constante extracción del mineral desde el punto de extracción hacia los puntos de vaciados (Brown, 2003).

Según Brady y Brown (Brady & Brown, 2004), el método de extracción denominado Block Caving o hundimiento por bloques es una forma de explotación en minería subterránea en donde el macizo colapsa por su propio peso de manera controlada. El método consiste en dividir el macizo rocoso en bloques rectangulares, los cuales son fragmentados mediante explosivos colocados en sus bases para luego extraer el mineral desde la parte inferior a través de embudos o zanjas recolectoras. Una vez removida el área basal, el bloque comienza a hundirse por acción de la gravedad, por lo que el vacío generado es llenado por material superior del bloque.

En ambas definiciones se hace énfasis en la utilización de la gravedad como medio de colapso luego de socavar la base del macizo rocoso.

En la siguiente figura se ilustra el método de Block Caving con hundimiento convencional:

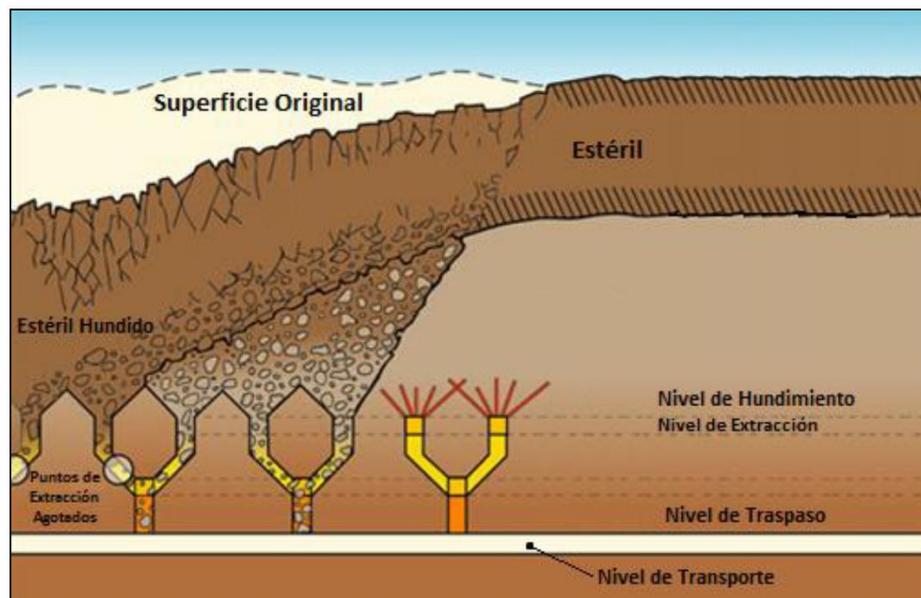


Figura 3 Método de Block Caving.

En cuanto a la fragmentación de la roca causada por este método Laubscher (Laubscher, 1994) dice lo siguiente: En el nivel de hundimiento de una mina explotada por block caving, es posible

identificar distintos tipos de fragmentación de roca, es decir, bloques o porciones de roca en distintos estados y con diferente granulometría, estos son:

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

En la siguiente imagen se puede apreciar la distribución de los distintos tipos de fragmentación:

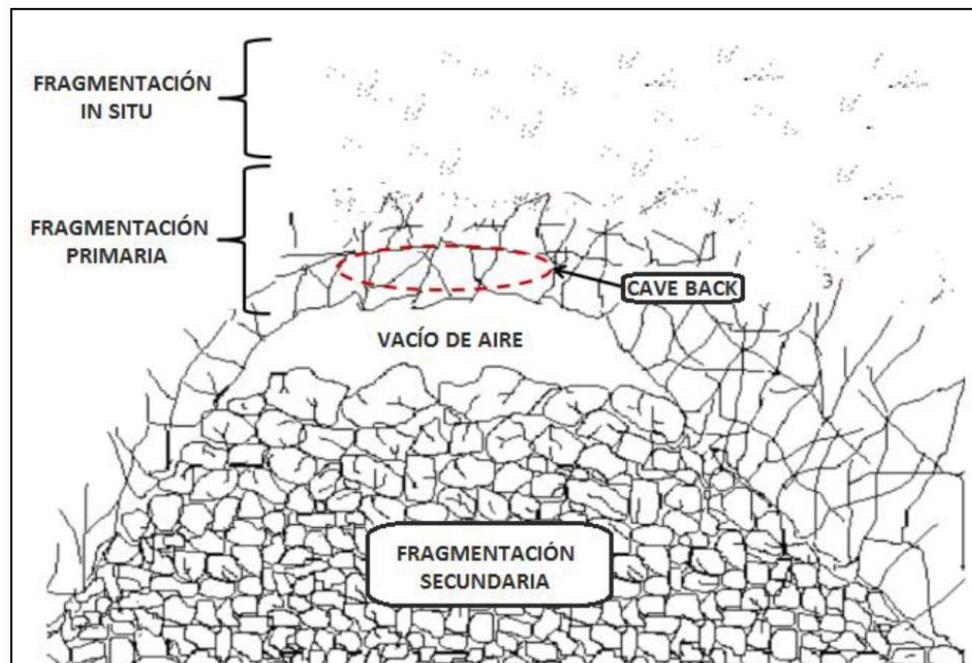


Figura 4 Tipos de fragmentación.

Es importante mencionar que al iniciar el hundimiento, los primeros metros extraídos corresponden a roca primaria dado que el Cave Back que se muestra en la imagen se encuentra relativamente cerca de las bateas en producción.

Otro autor, Brown, señala que hay tres mecanismos principales del caving (Brown, 2007):

- Gravity or Stress release caving: Mecanismo favorecido bajo condiciones de esfuerzos bajos o de tensión, además la orientación y resistencia de las discontinuidades en el macizo rocoso deben ser tales que los bloques caigan o se deslicen desde el cave-back debido a los esfuerzos antes mencionados. Es más probable su ocurrencia en cuerpos mineralizados más débiles, con varias discontinuidades y sometidos a bajos niveles de esfuerzos.
- Stress caving: Producido principalmente por esfuerzos compresivos, tan altos como para producir un deslizamiento en las discontinuidades pre-existentes o para fracturar la roca intacta. Este mecanismo es aplicable principalmente a cuerpos mineralizados con roca más competente que están sometidos a condiciones de esfuerzos altos.
- Subsidence caving: Produce que una gran masa de roca hunda rápidamente como el resultado de una falla de cizalle en los bordes verticales del bloque.

Mientras tanto Duplancic y Brady, a través del monitoreo sísmico en las primeras etapas del caving generaron el siguiente modelo (Duplancic and Brady, 1999):

- Caved zone (zona hundida): Zona compuesta por los bloques que cayeron desde el “cave back”. Esta zona provee soporte a las paredes del hundimiento.
- Air gap (vacío de aire): Durante el hundimiento la altura del vacío será dependiente de la tasa de extracción del material hundido.
- Zone of discontinuous deformation (zona de deformación discontinua): Esta zona ya no provee soporte al macizo rocoso circundante. Aquí es donde ocurre los desprendimientos de roca (desintegración del macizo). No existe sismicidad en esta área.
- Seismogenic zone (zona sísmica): Frente sísmico activo debido al deslizamiento de las discontinuidades y fallas frágiles de la roca. Se produce lo anterior debido a los cambios de las condiciones de esfuerzos causados por la socavación y el progreso del hundimiento.

- Surrounding rock mass (macizo rocoso circundante): Ocurre deformación elástica en el macizo rocoso delante del frente sísmico y el hundimiento circundante.

Esto se puede apreciar en la siguiente imagen:

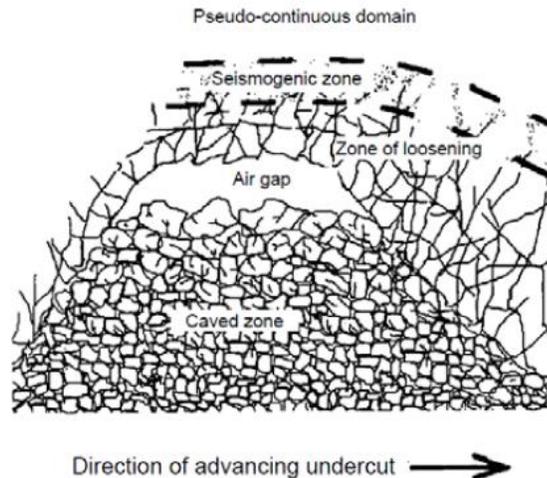


Figura 5 Modelo teórico del proceso de caving (Duplancic and Brady, 1999).

La selección de este método se justifica en que presenta varias ventajas frente a otros métodos de explotación, el más importante es que no se utilizan explosivos (aparte de los utilizados para generar la socavación) para fragmentar el macizo rocoso, ya que es la propia gravedad la que se encarga de esto. Gracias a esto el método de hundimiento por bloques reduce enormemente los costos de minado (perforación y tronadura principalmente) en comparación con otros métodos de explotación subterráneos. Esto ubica al block caving como el de menor costo de producción por tonelada (Pillar, 1981; Tobie and Julin, 1982). Adicionalmente, debido a que es un método masivo, el block caving es actualmente una de las más importantes fuentes de producción subterránea de minerales a escala mundial (Laubscher, 1994; Wattimena, 2003).

Además, según Brown (Brown, 2007), este método de explotación tiene las siguientes ventajas:

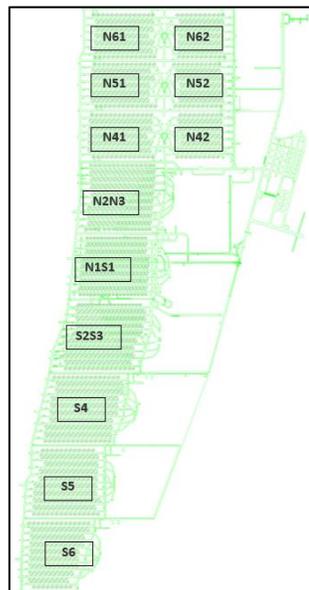
- Se puede explotar de manera rentable cuerpos de minerales masivos de baja ley.
- Costos mina más bajos en comparación a otros métodos subterráneos, incluso llegando a ser comparables con minería a cielo abierto.
- Alta productividad por trabajador.

- Existen grandes oportunidades de automatización.
- Mejora continua del entendimiento en diferentes áreas, técnicas y sistemas que ayudan a reducir los riesgos asociados a este tipo de minería.

Según la literatura hay un acuerdo en los beneficios que reporta la minería de Block caving por su alta productividad y sus bajos costos.

En Chuquicamata en particular se utiliza una variante de este método que consiste en dividir el macizo rocoso en macro bloques, donde cada macro bloque se define como una unidad básica de explotación donde en cada uno y de manera independiente a los otros se realizan las actividades de preparación, socavación y producción. Las áreas de estos Mbs varían entre 20.000 y 55.000 metros cuadrados que son separados por pilares destinados a mantener la estabilidad de estos.

En la figura 10 se muestra la cantidad de macrobloques contemplados en el primer nivel de producción y su distribución geográfica. En la Tabla 1 se detalla la entrada en producción de cada Mb, la malla utilizada, el área que abarcan, las reservas y la producción que se espera una vez que se encuentren en régimen.



*Figura 6 Distribución de los macro bloque en el primer nivel de producción.*

Macro Bloque	Inicio producción	Malla	Área total , m <sup>2</sup>	Reservas	Producción Régimen , ktpd
N2N3	Noviembre 21	16x16 16x20	82.048	51 Mt @ 1.09 % CuT	40
S2S3	Noviembre 21	16x16 16x20	87.611	58 Mt @ 0.97 % CuT	39
N41	Agosto 2023	16x20	53.120	35 Mt @ 0.9 % CuT	24
N42	Agosto 2023	16x20	37.120	21 Mt @ 0.7%CuT	22
S04	Enero 2024	16x20	85.760	74 Mt @ 0.78% CuT	36
N51	Febrero 2025	16x20	51.200	40 Mt @ 0.83% CuT	20
N52	Febrero 2025	16x20	39.680	22 Mt @ 0.68% CuT	16
S5	Septiembre 2025	16x20	77.760	81 Mt @ 0.71%CuT	33
N61	Noviembre 2026	16x20	49.920	50 Mt @ 0.61%CuT	22
N62	Noviembre 2026	16x20	39.680	26 Mt @ 0.62%CuT	15
S6	Febrero 2027	16x20	64.320	77 Mt @ 0.73%CuT	30

*Tabla 1 reservas, productividad y área total de cada macro bloque.*

Para los nuevos macrobloques (desde el N2N3 y S2S3) el método de explotación cambia a un Panel Caving con Hundimiento Convencional sin Pre-acondicionamiento.

Esta variante de explotación se divide en tres zonas denominadas:

- Zona de Extracción: Donde se realiza la extracción del mineral en el área incorporada a producción
- Zona de Crecimiento: Donde se realiza las operaciones unitarias de P&T relacionadas a bateas, paradas de hundimiento y extracción de repele
- Zona de Preparación: Donde se desarrollan las galerías y se construyen las OO.CC.

A continuación se muestra una visualización de este método:

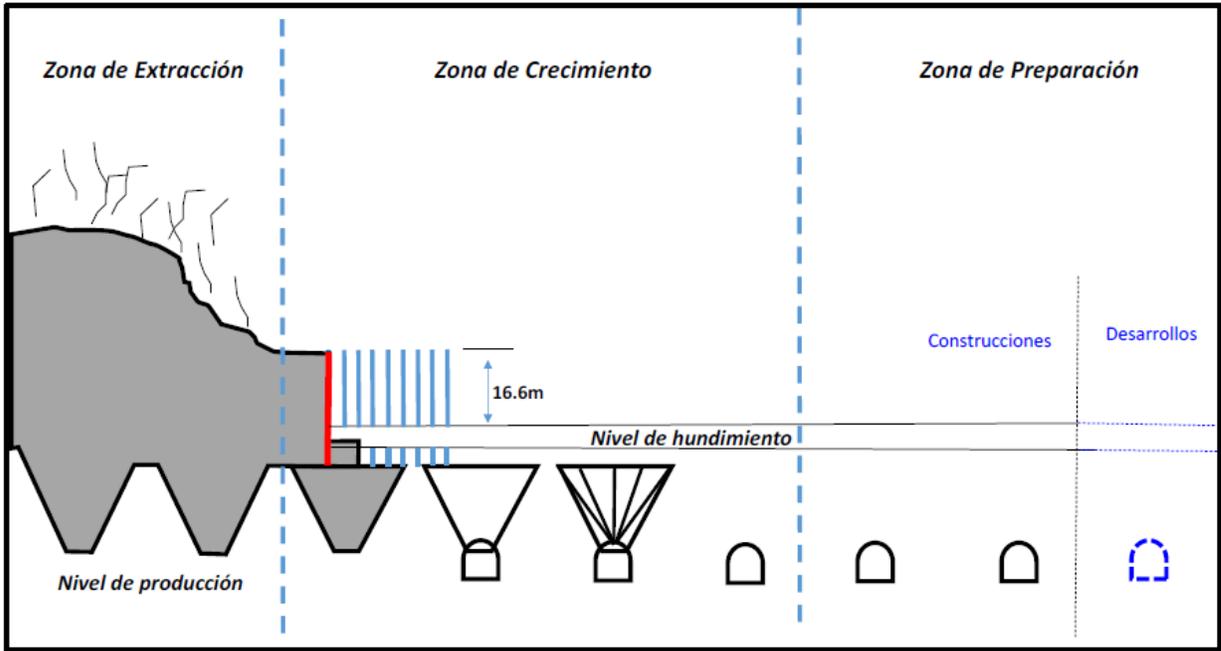


Figura 7 Método de hundimiento y su variante a aplicar en Chuquicamata Subterránea.

Cada una de estas zonas tiene una función específica detallados en la siguiente ilustración:

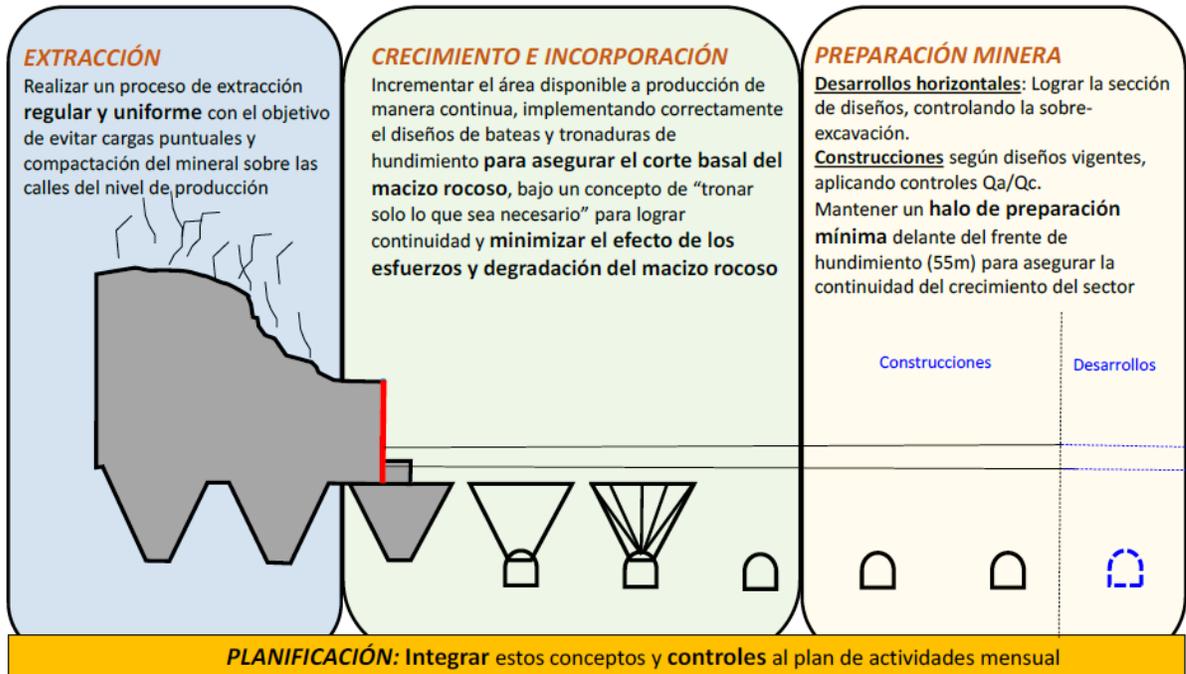


Figura 8 Objetivos en cada una de las zonas definidas.

Según Cavieres (Cavieres, 1999), el panel caving convencional tiene una secuencia operacional bien definida. Primero se desarrollan y construyen las galerías del nivel de producción para luego socavar el nivel de hundimiento, y finalmente extraer el mineral. Sin embargo, este orden de los trabajos genera un daño en las galerías ubicadas delante del frente de socavación debido a la redistribución de esfuerzos en el entorno del área hundida. Además, las tronaduras de socavación del nivel de hundimiento y para incorporar la batea a la producción, provocan una actividad sísmica que, a su vez, debilita el macizo y por ende las galerías haciendo necesaria una fortificación definitiva.

En la siguiente imagen se puede visualizar este método en tres dimensiones y en una vista en planta:

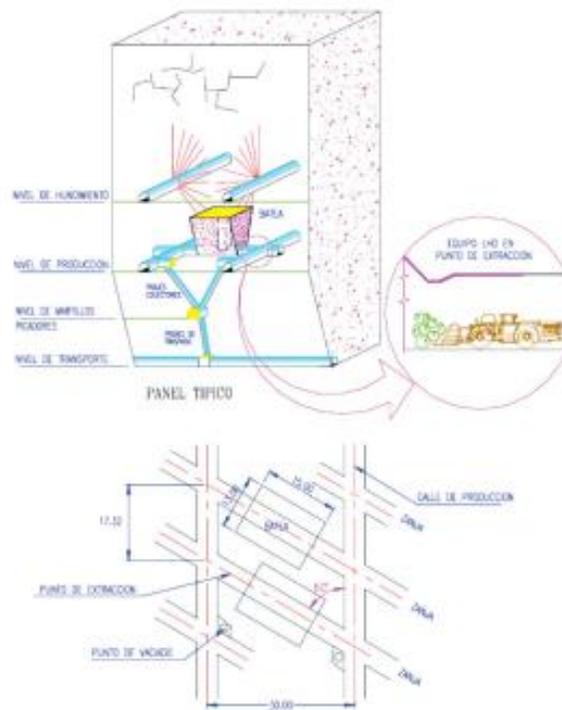


Figura 9 Panel caving convencional típico con sistema LHD. Fuente: Cavieres (1999).

## 2.5. Diseño de la mina

A continuación se presenta un esquema del diseño de la mina por niveles:

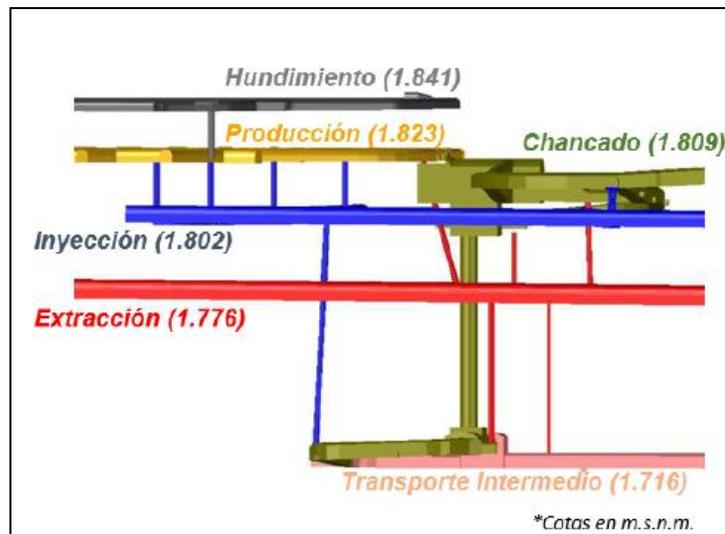


Figura 10 Cota de cada nivel de la mina (Fuente: Codelco).

Como se aprecia en la imagen, el nivel más alto corresponde al de Hundimiento en la cota 1.841 donde se produce la socavación, seguido del nivel de producción en la cota 1.823 donde las palas transportan el mineral desde las bateas o PEX hacia una tolva que conecta con el chancador en la cota 1.809, finalmente el material cae por un pique bajo el chancador al nivel de transporte intermedio en la cota 1.716. Entre el chancado y el transporte intermedio nos encontramos con dos niveles más, el de inyección de aire en la cota 1.802 que recorre la mina de Este a Oeste, y el nivel de extracción en la cota 1.776.

En cuanto al diseño del macro bloque central, como se aprecia en la Ilustración 15, se compone de 4 calles al sur numeradas del 1 al 4, y 4 calles al norte numeradas igualmente del 1 al 4, todas ellas se conectan al Este en una calle denominada Cabecera 2, desde donde se puede acceder a 4 dedos que desembocan en la tolva. Los siguientes macro bloques siguen el mismo diseño básico con pequeños ajustes.

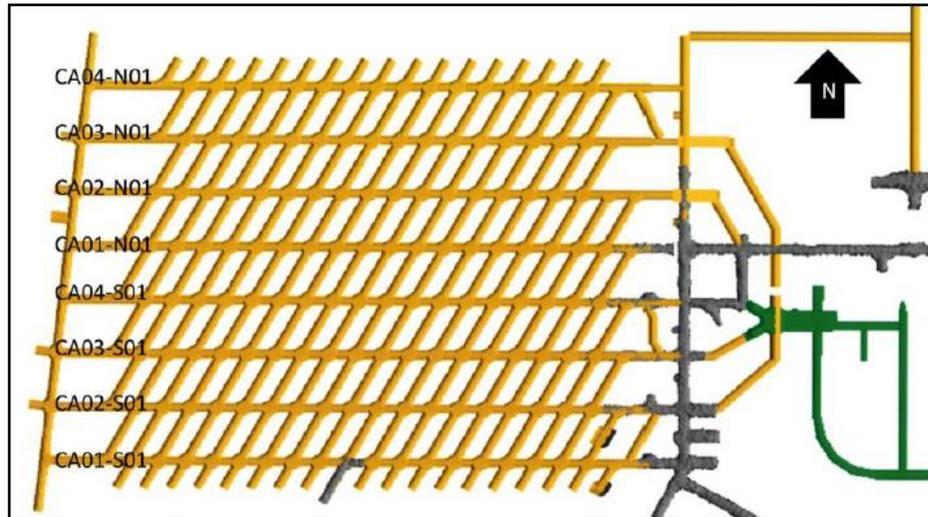


Figura 11 Vista en planta macro-bloque N01-S01 (Fuente: Codelco).

Este MB central está compuesto por 291 puntos de extracción distribuidos en 8 calles como ya se mencionó, la nomenclatura de estos puntos es la siguiente 01XYZ, donde X puede ser N o S dependiendo si nos referimos a las calles del norte o del sur, Y representa el numero de la zanja que va desde el 01 al 26 dependiendo de la calle, y por último Z representa la orientación de la zanja pudiendo ser N o S. El 01 inicial representa el número del macrobloque, forma en la que se diferencia de los siguientes MB en crecimiento, preparación y desarrollo.

A continuación se presenta el mapa del MB con el nombre de cada uno de sus puntos de extracción:

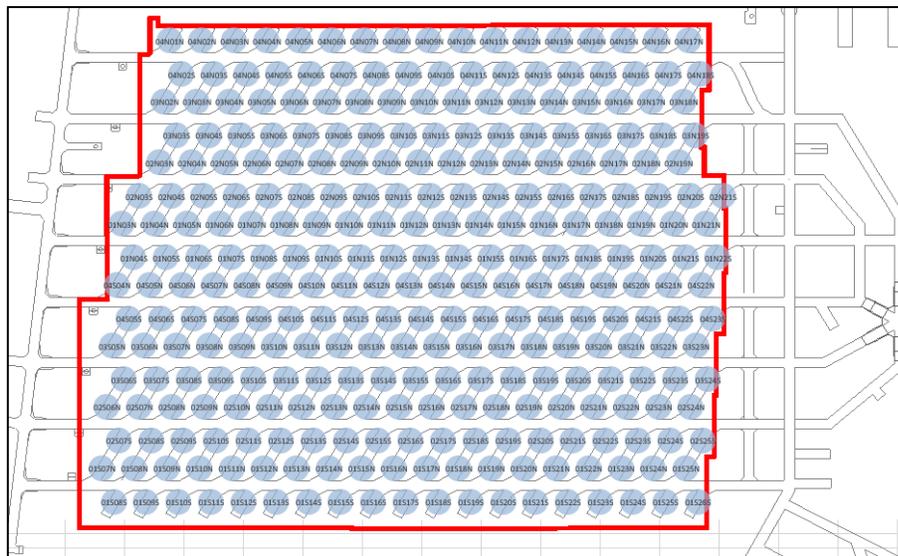
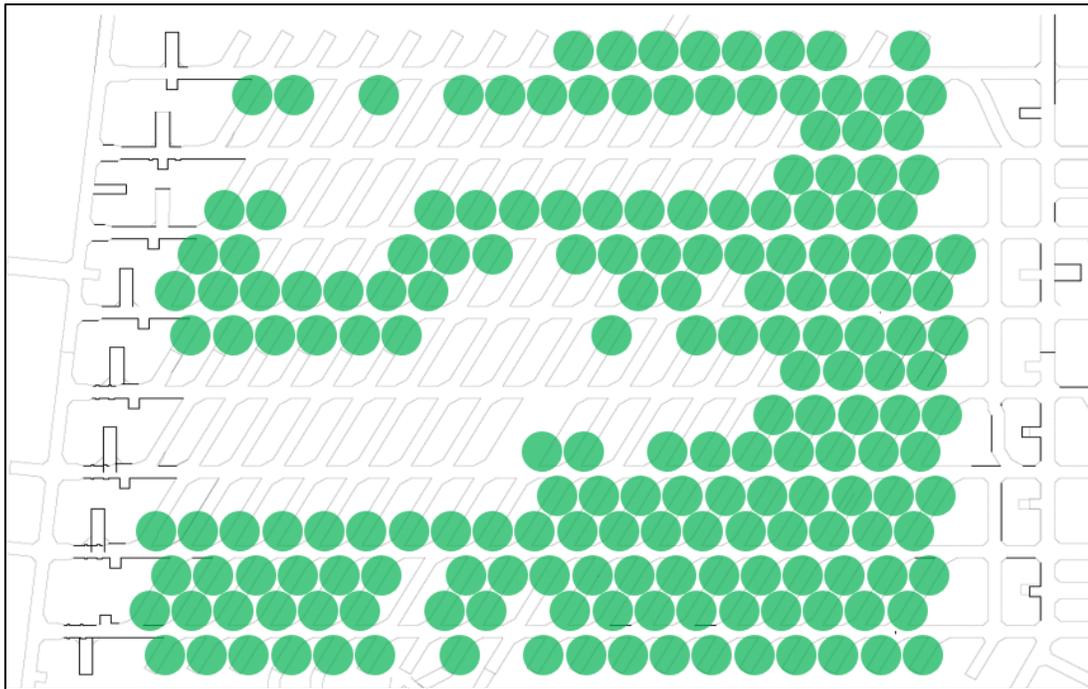


Figura 12 Mapa con el nombre de cada PEX. Elaboración Propia.

## 2.6. Disminución del área disponible

El año 2020, la mina sufrió una importante disminución del área disponible en el sector Oeste del MB central, disminuyendo los puntos disponibles de 291 a 187 puntos. Las calles que se vieron más afectadas corresponden a la calle N03, S03 y S04.

Los puntos actualmente disponible se pueden apreciar en la siguiente imagen:



*Figura 13 Mapa del MB, en verde los puntos actualmente disponibles. Elaboración Propia.*

En base a los estudios realizados, una de las causas principales de esta disminución del área disponible se debe a una inadecuada operación en el MB central, a esto se le suman problemas de diseño, mal diagnóstico geo mecánico, mapeo incompleto de estructuras, monitoreo deficiente, fortificación inadecuada, entre otros de menor importancia. Debido a esto cobra suma relevancia mantener una buena calidad de extracción para disminuir las probabilidades de una futura disminución de área.

## 2.7. Dilución

### Dilución en la literatura

Durante la extracción minera, un yacimiento explotado por hundimiento, está sometido al proceso de mezcla de los distintos materiales presentes en la columna de mineral y sobre ella, si el mineral se mezcla con material estéril o de baja ley, se produce una disminución de la ley insitu, provocándose el fenómeno de dilución de las reservas insitu.

Durante el proceso de mezcla de los materiales se pueden distinguir las siguientes tres situaciones:

- Columna de mineral insitu, con material proveniente del cráter sobre el depósito con ley inferior a la ley de cierre.
- Columna de mineral insitu, con dos tipos de materiales provenientes del cráter. El primero con ley superior a la ley de cierre y sobre éste, material proveniente del cráter con ley inferior a la ley de cierre.
- Columna de mineral insitu, con material insitu de ley inferior a la ley de cierre sobre el mineral.

Un concepto fundamental cuando hablamos de dilución es el Punto de Entrada de la Dilución (PED) que define un punto de mezcla y corresponde al momento en que el material estéril o de baja ley, aparece por primera vez en los puntos de extracción. En este momento comienza la dilución de un punto de extracción o sector productivo, iniciándose el proceso irreversible de pérdida de fino y disminución de la recuperación de reservas. El punto de entrada de la dilución se expresa como porcentaje de extracción y corresponde al porcentaje de extracción del punto de extracción, al cual aparece el material diluyente en los puntos de tiraje.

La literatura indica que existe un conjunto de elementos que afectan la entrada y contenido total de dilución extraída en una operación de caving, los cuales varían desde aquellos relativos a la geometría, geología y geomecánica, hasta el diseño minero y la planificación. Según estudios realizados por Laubscher (2000), los principales parámetros que afectan la dilución corresponden a los siguientes:

- Razón volumen de mineral y área de contacto entre mineral y diluyente.
- Disposición y forma del material diluyente.
- Diferencias de fragmentación entre mineral y el material diluyente.

- Diferencias entre densidad de mineral y diluyente.
- Interacción de los elipsoides de extracción y dirección del flujo.
- Variante de hundimiento utilizada (Block o Panel Caving).

DeWolfe (DeWolfe, 1981) plantea que es indispensable para el control de la entrada de dilución realizar una extracción tal que el espacio vacío que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea favorable para la propagación de la fragmentación de material in-situ sin que el volumen facilite el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado. Dicho fenómeno se conoce como “rilling”.

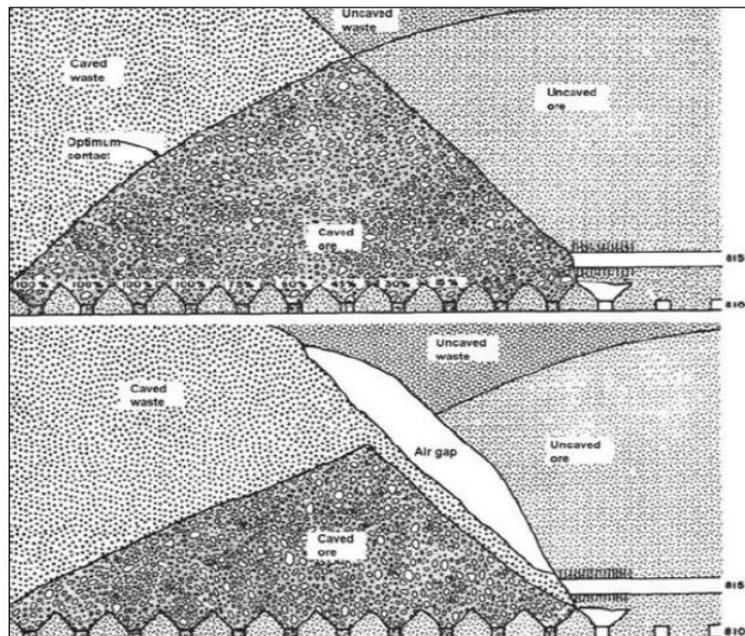


Figura 14 Fenómeno de Rilling. DeWolfe, 1981.

Laubscher (Laubscher, 1994) propone una ecuación para determinar el punto de entrada de dilución (PED), la cual está basada en curvas empíricas que contemplan una serie de parámetros y reglas de dedo comprimidas en la siguiente ecuación:

$$PED(\%) = \frac{H_c \times S - HIZ}{H_c \times S} \times DFC \times 100$$

Donde:

- PED (%): Porcentaje de columna extraída cuando comienza la entrada de dilución.
- Hc: Altura que va desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/diluyente.

- S: Esponjamiento, el cual es dependiente de la fragmentación esperada. Laubscher (1994) propone que los factores de esponjamiento típicos según el tipo de fragmentación esperada de la roca corresponden a:

<b>fe</b>	<b>Fragmentación</b>
1,16	fina
1,12	media
1,08	gruesa

*Tabla 2 Fragmentación esperada según factor de esponjamiento.*

- HIZ: Altura de interacción de elipsoides de extracción. Laubscher afirma que es en función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el RMR del material diluyente y el mineral, contemplando también el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor.

	<b>METROS</b>									
<b>Máxima distancia entre puntos de extracción</b>	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
<b>Altura teórica zona de interacción</b>	14	20	27	34	41	48	55	62	68	75

*Tabla 3 Altura teórica zona de interacción.*

- DFC: Diferencias de tonelajes entre un punto y sus vecinos en un determinado período de tiempo, basada en la desviación estándar de los tonelajes extraídos. Laubscher (1994) propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje.

Es importante considerar que esta ecuación es una aproximación determinista para un largo plazo basada en reglas empíricas, dejando fuera parámetros que él mismo propone y otros relevantes que no se menciona. Por lo tanto con este modelo se tendrá el mismo PED independiente de la dirección de avance de la extracción y la potencial dilución lateral que se pueda producir.

## 🚧 Dilución en Chuquicamata Subterránea

- El 23 de agosto del año 2021 los resultados de un mapeo indican dilución en algunos puntos (esto se confirma en terreno).
- El 30 de agosto el punto 03S20S es declarado con dilución, se comienzan a limitar puntos, se comienza a muestrear cada 250 toneladas pasadas.
- Desde el 09 de septiembre se comienza un plan de seguimiento, actualización de la dilución y control de esta.
- El 30 de septiembre el Plan Mensual (PAM) incorpora protocolo de extracción para puntos con dilución.

Los resultados de la dilución se muestran a continuación:

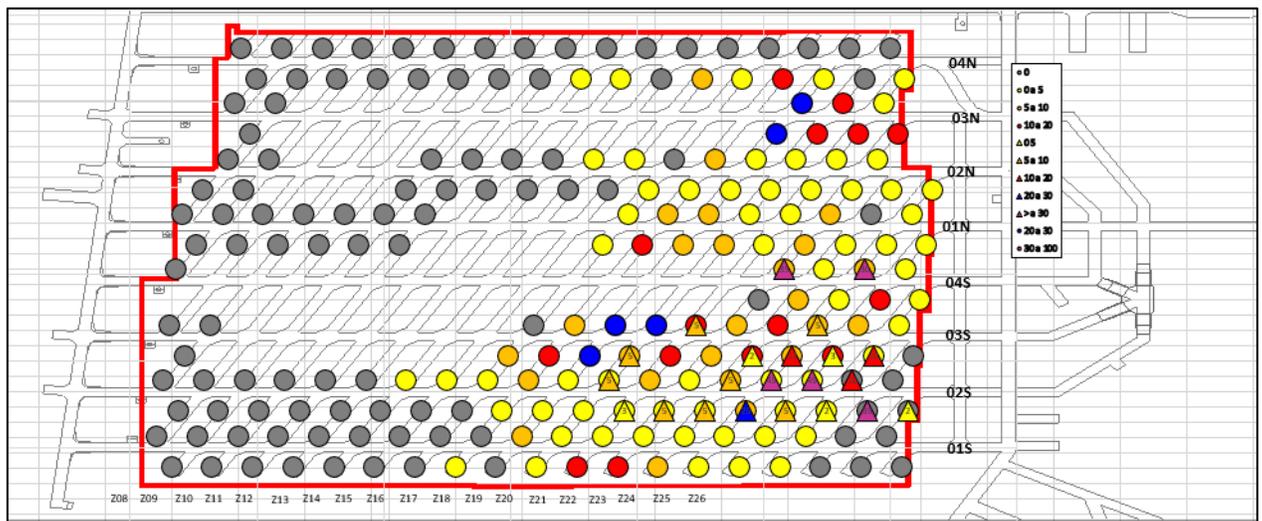


Figura 15 Comparación dilución esperada vs dilución real. Fuente: GRMD, Codelco (Febrero, 2022).

% Dilución MBD	
0	%
0-5	%
5-10	%
10-20	%
20-30	%
>30	%

Tabla 4 Rangos de dilución.

Como se aprecia en la imagen los sectores más afectados son las calles 02S, 03S y 04S por el sector Este. La explicación de esta inconsistencia entre la dilución planificada y la observada se debe a las malas estrategias de extracción llevadas a cabo, sumado a esto los colapsos ocurridos en el

sector Oeste en el año 2020 potenciaron el desbalance en la extracción de cada punto, causando una mayor extracción en el sector Este lo que acelero la entrada de dilución.

## 2.8. Indicadores de Calidad de Extracción

- Uniformidad

La división El Teniente describe a la Uniformidad como un concepto que relaciona la extracción de un punto y sus vecinos en función del tiempo, de modo que se logre la interacción y se define como la razón entre la diferencia de tonelaje extraído entre un punto de extracción y la media de sus vecinos, en un período determinado, con la media de sus vecinos. Su fórmula es la siguiente:

$$U = \frac{[TEP - TMEV]}{TMEV}$$

Donde:

- U = Uniformidad.
- TEP = Tonelaje extraído en el punto analizado.
- TMEV = Tonelaje medio extraído de los vecinos del punto analizado.

Los resultados de este indicador se clasifican de la siguiente manera:

RANGO	DESCRIPCIÓN	VALOR ESPECÍFICO	DESCRIPCIÓN
$1 < U < 0$	Menor tiraje que sus vecinos. Se considera tiraje uniforme.	1	El punto no se tiró en el período.
$0 < U < 1$	Tiraje uniforme.	0	Tiraje perfectamente uniforme.
$1 < U < 2$	Sobre tiraje	1	Límite superior para considerar uniformidad.
$U \geq 2$	Tiraje aislado		

*Tabla 5 Rangos y clasificación de la Uniformidad.*

La Uniformidad utilizada en Chuquicamata y por ende la utilizada en este estudio corresponde a la uniformidad derivada del modelo de Susaeta (Susaeta, 2004), este propone que existe una relación entre la uniformidad con la que se extrae el tonelaje de un punto con respecto a sus vecinos y el tipo de flujo que ocurre en su columna, creando un índice para cuantificarla.

Susaeta (2004) utiliza como base de su trabajo los diversos estudios que se habían desarrollado hasta la fecha. Entre las consideraciones tomadas se encuentran los siguientes puntos:

- El tiraje aislado de un punto de extracción implica que sobre éste se formará un flujo aislado.
- El diámetro del tiraje aislado (diámetro del elipsoide de extracción en flujo aislado) es función de la fragmentación de la roca y la humedad en la columna de extracción.
- El tiraje uniforme permite postergar el punto de entrada de la dilución y minimizar la cantidad total de dilución extraída.
- El diámetro de tiraje aislado no depende del ancho de carguío.
- El espaciamiento de los puntos de extracción es inversamente proporcional a la recuperación de mineral.
- La altura de columna es inversamente proporcional a la dilución total extraída.
- La fragmentación del material en la columna de extracción aumenta con la extracción.
- Existirá interacción si dos puntos poseen un espaciamiento menor a 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado.

Con estas consideraciones Susaeta plantea que el flujo gravitacional se puede modelar en función del comportamiento del flujo masivo, propiedades del material fragmentado y parámetros de caracterización de la extracción y alusivos a la geometría de los puntos de extracción. En su estudio se establecen dos velocidades de flujo gravitacional, la velocidad de tiraje aislado o  $V_{ta}$  que representa la velocidad de las partículas dentro del elipsoide de flujo aislado, y la velocidad de tiraje interactivo o  $V_{ti}$  que representa la velocidad de las partículas que viajan fuera de la zona de baja densidad que forma el elipsoide de flujo aislado.

En base a lo anterior el comportamiento del flujo es clasificado en 3 categorías dependiendo de la diferencia entre la velocidad de tiraje aislado y la velocidad de tiraje interactivo.

- Tiraje Aislado: Representa la condición de flujo donde la velocidad de tiraje aislado es mayor que cero y la velocidad de tiraje interactivo es igual a cero.

- Tiraje Aislado-Interactivo: Condición de flujo donde la velocidad de tiraje aislado es mayor que la velocidad de tiraje interactivo cuando ambas son mayores a cero.
- Tiraje Interactivo: Por último, esta condición de flujo representa el caso donde la velocidad de tiraje aislado es igual a la velocidad de tiraje interactivo cuando ambas son mayores a cero.

En base a este modelo Susaeta propone que a medida que el comportamiento del flujo sea más Interactivo, la dilución generada en el punto de extracción será menor. Además, postula que cuando el flujo se comporta como tiraje Aislado-Interactivo y tiraje Interactivo, la dilución que se genera al principio de la extracción del punto corresponderá a la dilución lateral, y luego comenzará el ingreso del material diluyente ubicado sobre las columnas de extracción (vertical). Por lo tanto para el caso de tiraje Aislado, la dilución inicial en un punto cualquiera provendrá del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción (vertical), y el contenido de dilución observado será creciente en la medida en que se siga realizando la extracción de forma más agresiva que para los otros casos.

En la siguiente Ilustración se puede observar el comportamiento de los tres tipos de flujo en un punto de extracción:

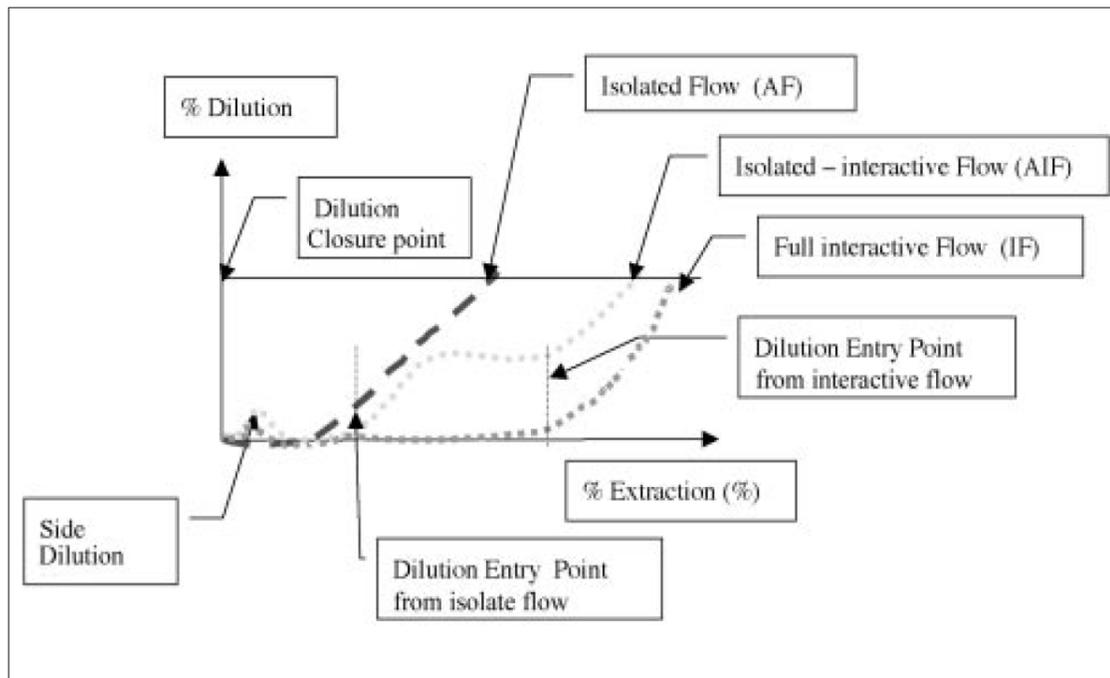


Figura 16 Comportamiento de la entrada de dilución (Susaeta, 2004).

A partir de esto el autor define el “índice de uniformidad” y el “porcentaje de uniformidad” con la finalidad de caracterizar la forma en que se realiza la extracción sobre un punto con respecto a sus vecinos.

Este índice de uniformidad queda determinado por un vector compuesto por dos dimensiones, la primera dimensión corresponde al número de vecinos inactivos del punto ( $\Delta$ ), mientras que la segunda dimensión se denomina “índice de uniformidad específico”. Lo anterior se puede apreciar en la siguiente ecuación correspondiente al cálculo del índice de uniformidad:

$$I.U. = \Delta + \tau \times \frac{(T_p - T_{min})}{T_{max}^2 \times n} \times \sum_{i=1}^n (T_{max} - T_i)$$

Donde:

- I.U. = Índice de Uniformidad.
- $\Delta$ : Número de vecinos inactivos.
- $\tau$ : Factor de normalización.
- $T_p$ : Tonelaje extraído del punto en un período determinado.
- $T_{min}$ : Tonelaje mínimo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $T_{max}$ : Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $T_i$ : Tonelaje extraído en un período de tiempo determinado para el punto i, el cual es perteneciente a la vecindad del punto en cuestión.
- $n$ : Número de puntos pertenecientes a la vecindad en cuestión.

Susaeta (2004) utiliza la siguiente matriz para determinar en qué estado o condición de tiraje se encuentra cada punto de extracción a partir de cierto índice de uniformidad y número de puntos inactivos en la vecindad geométrica.

Número de Puntos Inactivos en la Vecindad	Índice Específico de Uniformidad				
	0,0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0
0	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme
1	Uniforme	Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme
2	Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Aislado
3	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Aislado	Aislado
4	Semi-Uniforme	Semi-Uniforme	Aislado	Aislado	Aislado
5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

Tabla 6 Matriz de Uniformidad, adaptado de Susaeta (2004).

Además, Susaeta (2004) incorpora el concepto de “porcentaje de uniformidad” ya mencionado anteriormente, el cual representa el porcentaje de tiempo (o de toneladas extraídas) durante el cual un punto ha sido extraído de forma uniforme, semi-uniforme o asilado.

Susaeta (2004) comprueba que es posible pasar de un tipo de comportamiento de flujo a otro a través de los parámetros que controlan la extracción, esto gracias a estudios del grado de interacción realizados en El Teniente y del cálculo del punto de entrada de dilución para sectores del El Salvador y El Teniente, y de estudios del comportamiento de la dilución en el sector Parrillas de Andina.

Los estudios realizados muestran que a menor uniformidad menor es el grado de interacción (esto quiere decir que más aislado es el flujo que se produce). Otra conclusión tiene relación con el punto de entrada de dilución, donde se tiene que para distintos sectores de El Salvador y El Teniente este tiene una dependencia directa con el I.U cuando los puntos poseen un porcentaje de uniformidad superior al 70%.

Por último, Susaeta (2004) descubre una relación entre el Pedza (punto de entrada de la dilución en flujo aislado) y el índice de uniformidad, confirmando la hipótesis del retraso del punto de entrada de la dilución con el aumento del porcentaje de uniformidad. Esto se visualiza en la siguiente imagen:

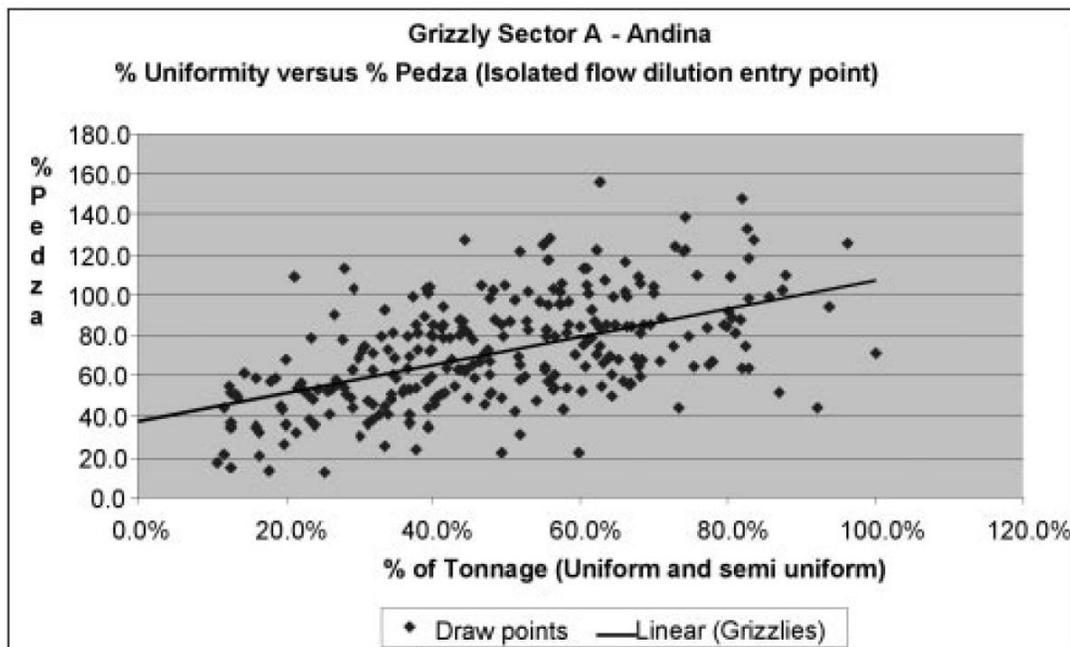


Figura 17 Relación de entrada de Dilución (flujo aislado) y el porcentaje de tonelaje extraído por columna en Andina. Susaeta 2004.

Esta metodología para el cálculo y control de la Uniformidad es utilizada por sobre la metodología de El Teniente dada la cantidad de variables que incorpora el modelo, entregando un resultado y clasificación más precisa en función de las condiciones específicas de cada mina.

No obstante, se realiza una pequeña modificación al modelo, utilizando tan solo dos clasificaciones en vez de tres como propone Susaeta, estas son la categoría de punto aislado y uniforme, quedando la categoría de semi uniforme dentro de la categoría de aislado, esto para mantener una clasificación más estricta entre lo que se considera como uniforme y lo que no.

- Adherencia

La adherencia es la razón en porcentaje entre la cantidad de baldadas extraídas (sin considerar excesos) versus las baldadas programadas en la cartilla de tiraje.

- Utilización

La división El Teniente define a la utilización de área como la razón entre el área disponible y el área utilizada expresada como porcentaje, donde el área disponible es el área promedio diario del conjunto de puntos de extracción que están en condiciones de ser extraídos en cualquier momento y su estado es: O (operativo), L (limitado), C (cerrado) o S (reabierto), en cuanto al área utilizada esta es el área promedio diario, del conjunto de puntos de extracción a los cuales se les ha extraído más de 15 toneladas en el día, en sectores convencionales (Block Caving) y 70 toneladas día, en sectores LHD (Panel Caving).

En Chuquicamata Subterránea representa el porcentaje de puntos planificados en la cartilla de tiraje que efectivamente fueron movidos (con al menos una baldada).

Si bien, ambas definiciones apuntan a lo mismo tienen pequeñas variaciones, ya que en el Teniente la utilización depende del área disponible y el tonelaje extraído y en Chuquicamata depende de la cartilla de tiraje (que puede o no coincidir con el área disponible) y con las baldadas realizadas.

## 2.9. Disminución en la calidad de extracción

Estudios sobre la calidad de extracción cuando existen eventos que interrumpen la continuidad operacional denotan claramente la forma drástica en la que esta disminuye, esta situación refleja lo inviable que es seguir manteniendo la misma estrategia de extracción cuando estos eventos suceden. A continuación se presenta la magnitud de esta situación:

	Diferencia con Caso Base		
	Utilización Promedio	Uniformidad Promedio	Adherencia Promedio
Caso Base (Sin Eventos)	87%	81%	75%
Con eventos	-3%	-6%	-11%
Mantenimiento No Planificado	-30%	-28%	-43%
Atollo CHSMM	-12%	-11%	-26%
Ch + Co + At fs	-7%	-10%	-17%
Correa y Chancado fs	-6%	-10%	-13%
Trabajos en Calles	1%	-5%	-4%
Baja dis. LHD y palas fs	4%	4%	-2%
Falta de Marinas	6%	10%	-1%

Tabla 7 Variación porcentual entre caso con evento y casos con eventos (Elaboración propia).

Al observar la tabla se puede apreciar la magnitud porcentual con la cual disminuye cada indicador con distintos eventos no planificados, siendo los más relevantes aquellos relacionados con el área de chancado, correas y mantenimientos no planificados.

Ahora bien, al analizar la data más abundante en los registros (correspondiente a los eventos relacionados a chancado y correas) es posible calcular la calidad de extracción promedio que se obtuvo esos días para distintos tiempos de operación:

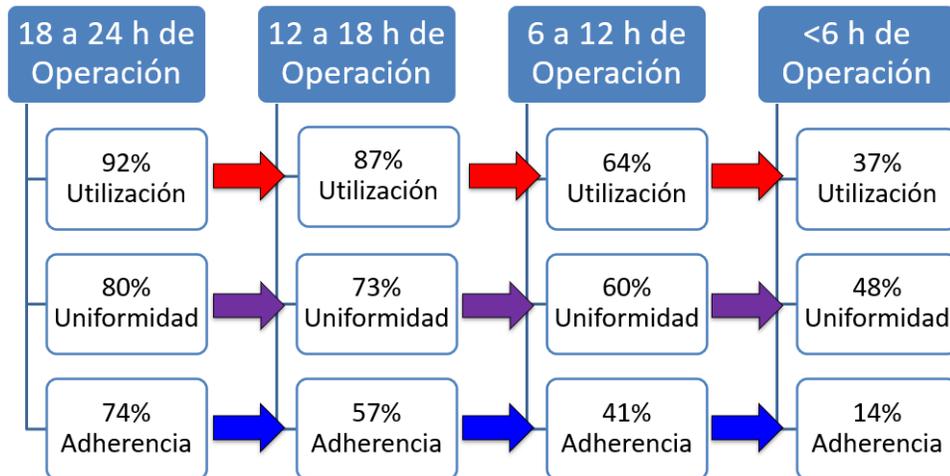


Figura 18 Disminución de la calidad de extracción a medida que se cuentan con menos horas de operación (elaboración propia).

La ilustración anterior muestra como disminuye de un 92% a un 37% la utilización y de un 80% a un 48% la uniformidad cuando se pasa de 18-24h a menos de 6h de operación, lo cual poco a poco genera un daño acumulativo a la geometría del domo y distorsiona las predicciones de los planes respecto a las columnas de mineral.

### 3. Metodología de Trabajo

Para el presente trabajo se procede a realizar una secuencia de 4 pasos cuyo objetivo es la formulación de un plan de acción ante eventos no planificados desde el área de extracción junto a una cuantificación de los beneficios que su aplicación reportará.

Estos pasos son:

- 1) Simular y comparar estrategias de extracción.
- 2) Definir mínima calidad de extracción a exigir.
- 3) Crear estándar.
- 4) Cuantificar beneficios del estándar.

En las siguientes secciones se desarrolla en profundidad la metodología utilizada en cada paso.

#### 3.1. Simulación de estrategias de extracción

Cuando hablamos de estrategia nos referimos al plan de acción que se sigue en el día a día para extraer el mineral desde los puntos de extracción, este plan de corto plazo se acuerda con el jefe de turno y lo lleva a cabo un operador. Es importante destacar que el plan de corto plazo debe ir de la mano con el plan mensual y anual de la mina.

La estrategia de extracción debe responder a la cartilla de tiraje (figura 19), la cual indica las baldadas programadas a extraer en cada punto para ambos turnos (turno A y B).

Cartilla de Tiraje - Macrobloque Central Mina Chuquicamata Subterránea												
	Baldadas Programadas	Baldadas Reales			Baldadas Programadas	Baldadas Reales				Cumplimiento cartir		
	TA	18t	15t	PALA	TB	18t	15t	PALA	comentarios	TA	TB	día
01N03N	8	9		LE007	7	5		LE010		113%	71%	93%
01N04N	8	9		LE007	7	5		LE010		113%	71%	93%
01N04S	8	9		LE007	7	10		LE010	Prioridad	113%	143%	127%
01N05N	8	9		LE007	7	5		LE010	Prioridad	113%	71%	93%
01N05S	8	9		LE007	7	10		LE010		113%	143%	127%
01N06N	8	5		LE007	7	1		LE010	Prioridad	63%	14%	40%
01N06S	8	9		LE007	7	8		LE010		113%	114%	113%
01N07S	8				7	1		LE010			14%	7%
01N08N	8	9		LE007	7	6		LE010		113%	86%	100%
01N08S	8	9		LE007	7	10		LE010		113%	143%	127%
01N09N	8	9		LE007	7	7		LE010		113%	100%	107%
01N09S	8	9		LE007	7	10		LE010		113%	143%	127%
01N14N	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N14S	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N15N	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N15S	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N16N	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N16S	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N17N	2	2		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N17S	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N18N	1	1		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N18S	2	2		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N19N	2	2		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N19S	2	2		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N20N	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N20S	2	2		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N21N	1	1		LE007	1	1		LE010		100%	100%	100%
01N21S	4	4		LE007	4	6		LE010		100%	150%	125%
01N22S	3	3		LE007	3	4		LE010		100%	133%	117%

Figura 19 Parte de una Cartilla de Tiraje típica de Chuquicamata Subterránea.

Se seleccionan 4 estrategias de extracción cuya base proviene del estudio en terreno de las condiciones de Chuquicamata Subterránea que cuenta con 8 calles paralelas, con un punto de descarga en el sector Este y con una importante disminución del área disponible (como se observa en la figura 13). Las 4 estrategias se detallan a continuación:

1) Estrategia Actual:

Como su nombre lo indica, corresponde a la estrategia que utilizan tanto los jefes de turno como los operadores de Chuquicamata subterránea en un turno habitual. En la figura 19, se presenta el diagrama de extracción, las flechas azules indican el paso de la pala por cada punto, además indican la completa extracción de ese punto en base a la cartilla de tiraje para el turno en particular (que varía en general entre 1 a 15 baldadas por turno).

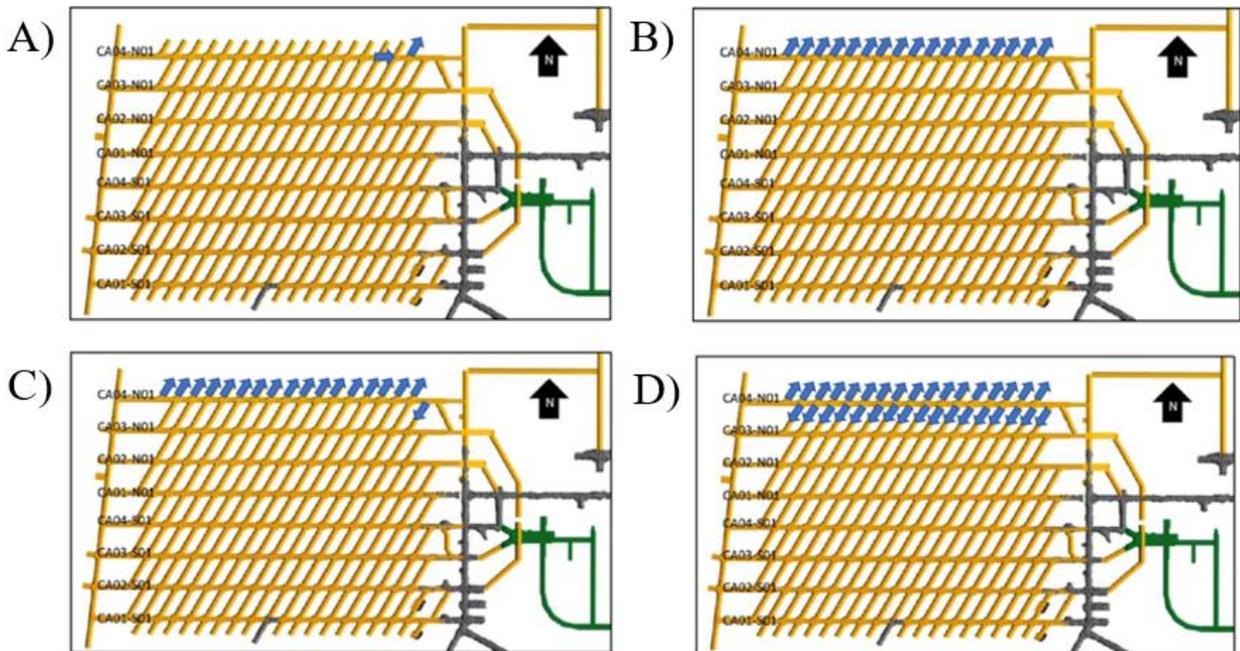


Figura 20 Secuencia de extracción en la estrategia actual, las flechas azules indican la completa extracción de un punto correspondiente a un turno dado.

Como se aprecia en la ilustración, esta estrategia consiste en que para una calle en particular, se comienza la extracción de Este a Oeste extrayendo primero los puntos con orientación hacia el Norte (Figura 20A), esto dado que se evita girar el equipo con cada baldada para ir a depositar el material en la tolva que conecta con el chancador. Una vez que se han extraído todos o casi todos los puntos con orientación Norte (Figura 20B) se comienza a extraer los puntos con orientación Sur (Figura 20C) siguiendo la misma secuencia de Este a Oeste (Figura 20D). Cuando se cuenta con el parque completo de palas, este mismo proceso se lleva en paralelo en las 8 calles.

La simulación considera todos los puntos disponibles de cada calle (Ver Figura 13) y una disponibilidad de 6 palas por turno, correspondiente al promedio histórico, por tanto se extraen 6 calles en paralelo y una vez que una de estas sea completada la pala asignada en aquella calle se

moverá a la siguiente hasta completar la extracción de las 8 calles. A continuación se muestra la priorización de calles:

Prioridad	Calle
1	3N
2	4S
3	3S
4	1N
5	2S
6	2N
7	1S
8	4N

*Tabla 8 Priorización de calles en la estrategia actual.*

Esta priorización de calles corresponde a la ocupada actualmente (no planificada) por los operarios de palas y los jefes de turno.

## 2) Estrategia Optimizada:

Para esta estrategia se busca la optimización de la calidad de extracción dando como prioridad a la utilización de área, para esto se procede extrayendo tan solo una baldada (representado con un cilindro azul en la figura 20) de Este a Oeste (con las palas de 21 toneladas, Anexo B) comenzando con orientación Norte (Figura 20B) y terminando con orientación Sur (Figura 20C). Cuando a todos los puntos a extraer de la calle se les saca una baldada se prosigue con una extracción de Este a Oeste (Figura 20D) intercalando orientación de Norte a Sur (Figura 20E y 20F). La extracción completa del punto se representa nuevamente con una flecha azul.

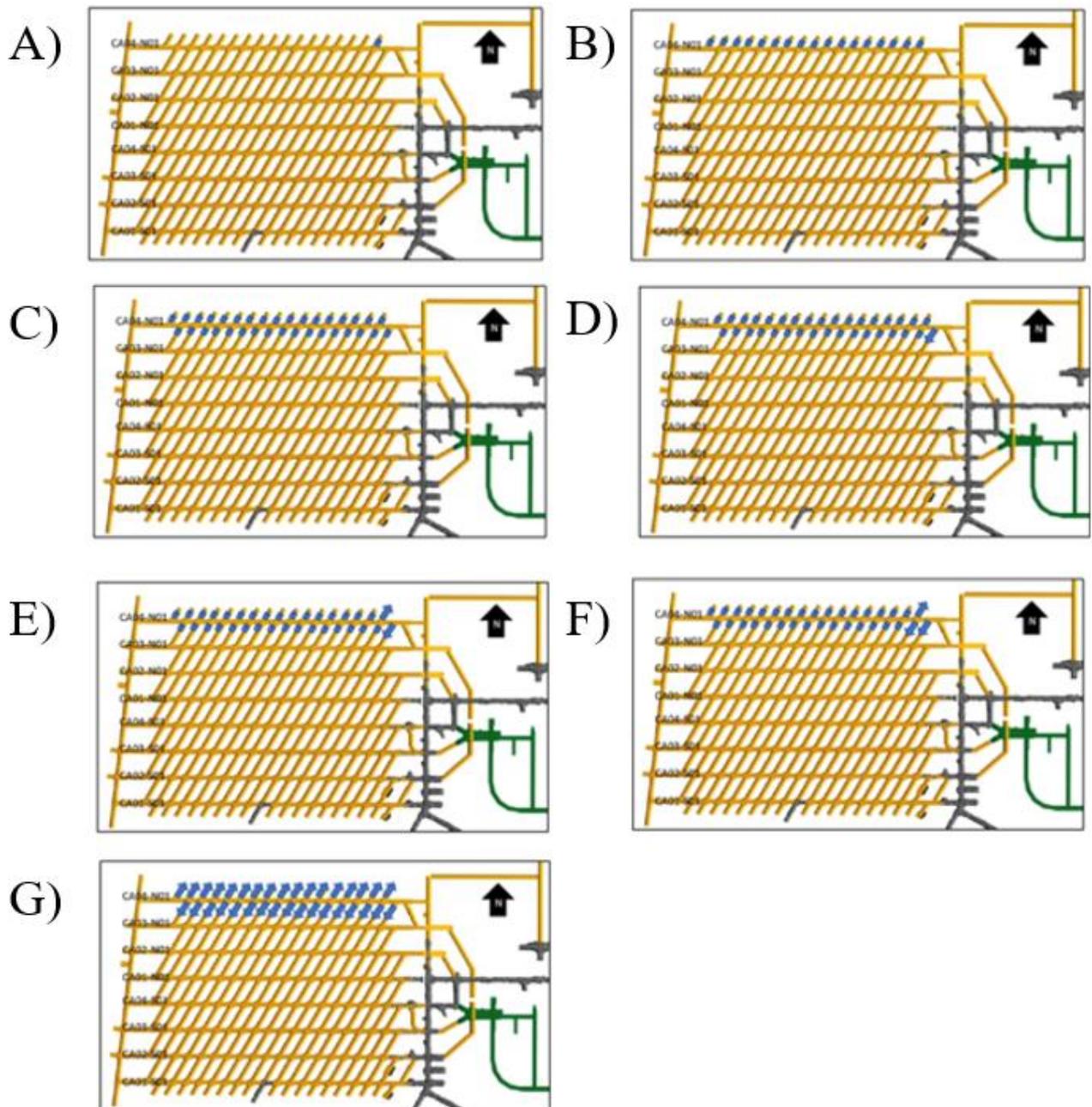


Figura 21 Secuencia de extracción en la estrategia optimizada.

En cuanto a la priorización de calles, para esta simulación se utiliza el cumplimiento promedio histórico por calle en función de los planes diarios para darle prelación a cada una en la asignación de palas. El cumplimiento histórico se presenta en la siguiente imagen:

Cumplimiento Promedio	
1N	82%
2N	80%
3N	81%
4N	67%
1S	77%
2S	80%
3S	83%
4S	88%

*Tabla 9 Cumplimiento promedio histórico de cada calle.*

Este cumplimiento corresponde al porcentaje promedio que representan las baldadas reales extraídas cada día con respecto a las baldadas planificadas por día desde el inicio de las operaciones.

Por tanto, para compensar aquellas calles con menor cumplimiento, la priorización queda de la siguiente manera:

Prioridad	Calle
1	4N
2	1S
3	2N
4	2S
5	3N
6	1N
7	3S
8	4S

*Tabla 10 priorización de calles para la estrategia optimizada.*

### 3) Estrategia por Bloques:

La estrategia por bloques consiste, como su nombre lo indica, en dividir cada una de las calles en bloques de extracción, la división se realiza en 3 cuadrantes correspondientes a las tres zonas del domo que se espera generar, por tanto están divididas en función de la velocidad de extracción de cada punto. La división y la secuencia de extracción es mostrada en la siguiente ilustración utilizando la calle 4N:

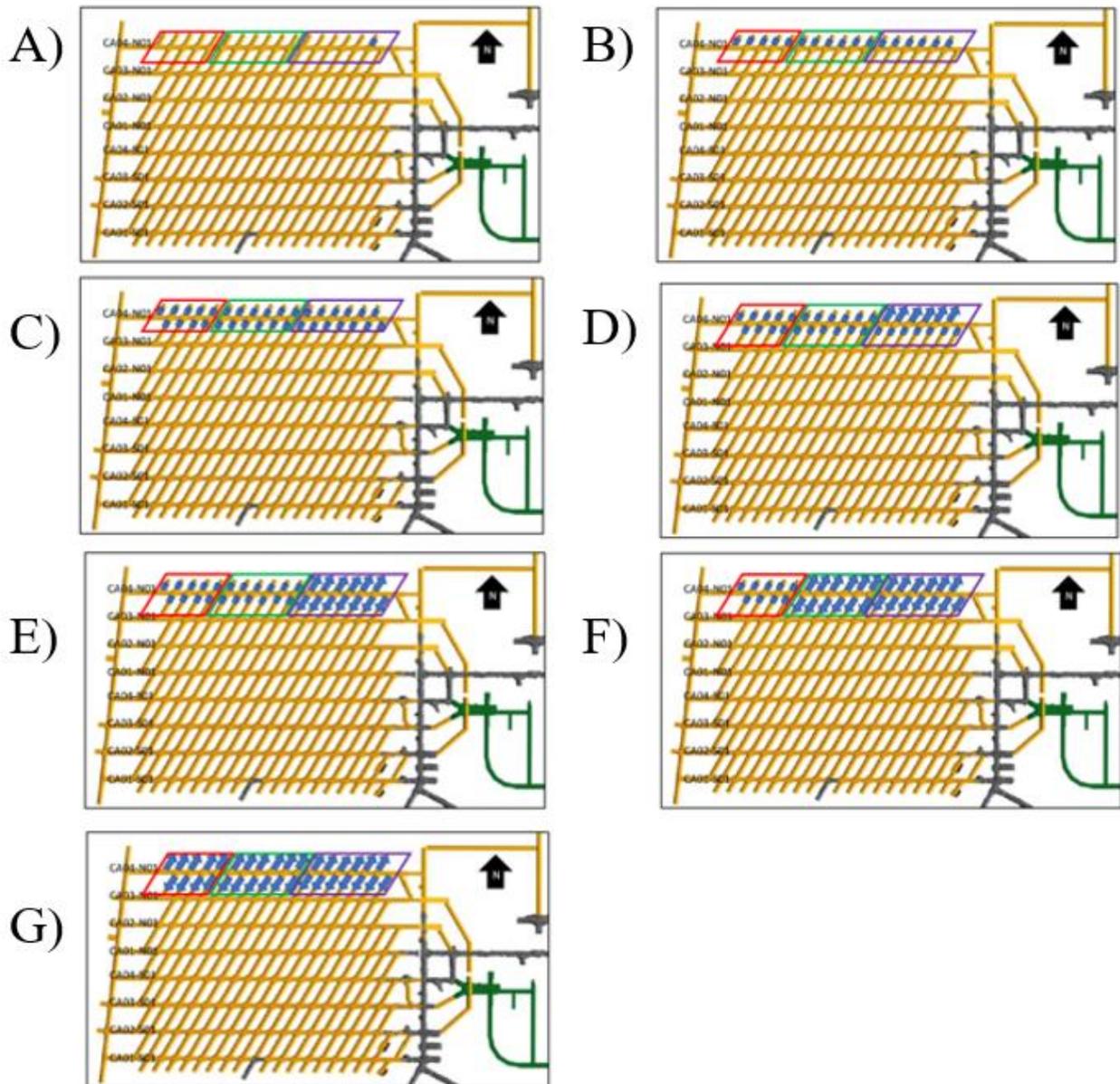


Figura 22 Secuencia de extracción en la estrategia por bloques.

La estrategia por bloques al igual que la optimizada busca generar un 100% de utilización en la menor cantidad de horas posibles, por esta razón se comienza la operación del turno extrayendo una baldada a cada punto para luego continuar la extracción de cada bloque de Este a Oeste como se aprecia en la ilustración.

Por otro lado, la priorización de calles utilizada en la simulación corresponde a la misma empleada en la estrategia optimizada.

#### 4) Estrategia Intercalada:

La última estrategia que se utilizara corresponde a la intercalada cuyo procedimiento es muy sencillo y se basa en intercalar un punto norte y uno sur (Figura 23A y 23B) de una misma calle hasta extraer la totalidad de puntos disponibles (Figura 23E).

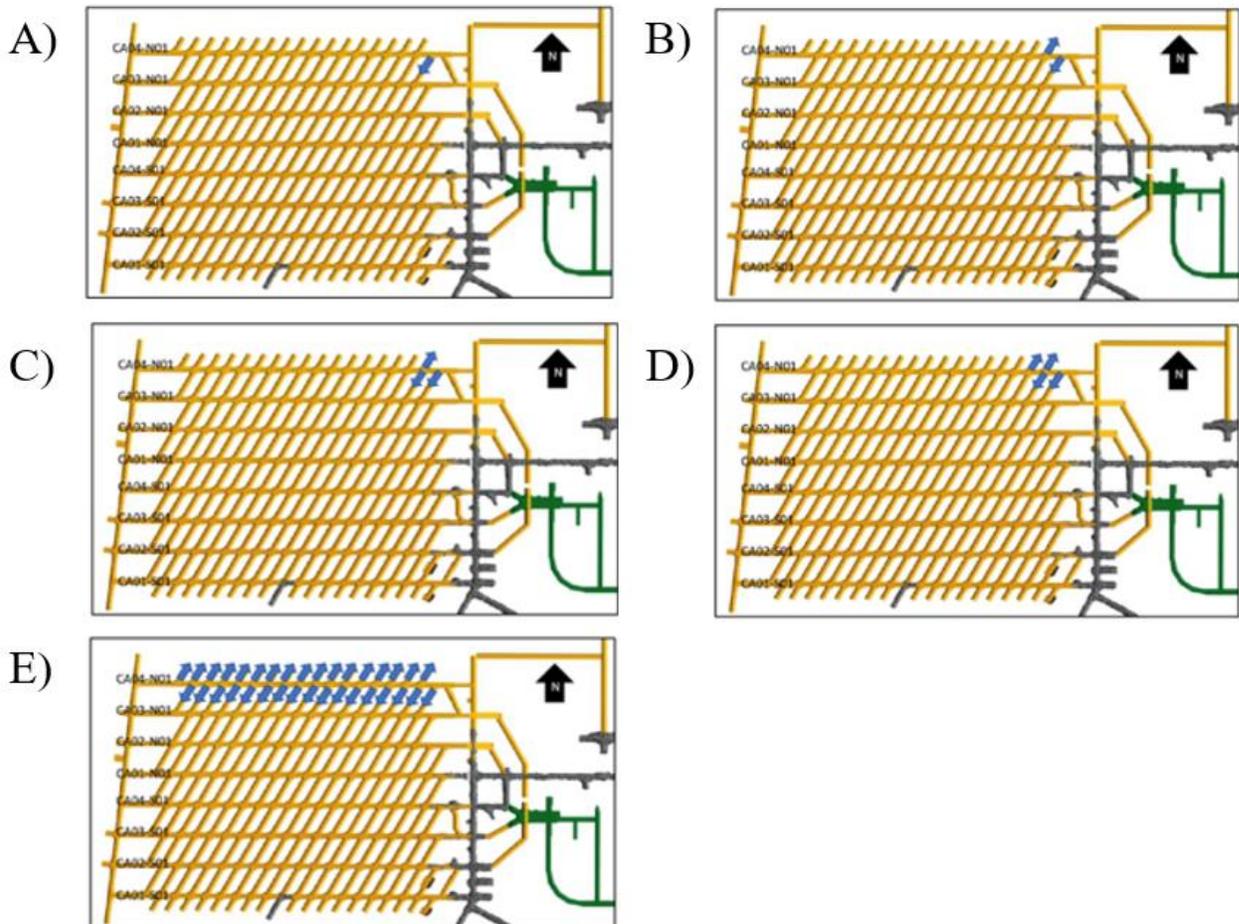


Figura 23 Secuencia de extracción en la estrategia intercalada.

En esta estrategia se intercala la orientación del equipo después de completar la extracción de cada punto para continuar la extracción del punto que está justo frente al que se acaba de extraer (Figura 23C y 23D), de esta forma se avanza de Este a Oeste en una sola frente de extracción. Finalmente, la priorización de calles utilizada en esta simulación corresponde a la misma empleada en la estrategia actual.

Una vez definidas estas 4 estrategias se procede a utilizar unas planillas de simulación de creación propia utilizando la herramienta Excel, el proceso que realizan se muestra en el siguiente diagrama:



Figura 24 Proceso de Simulación.

La simulación se divide en 3 partes, la primera consiste en definir las variables de entrada, estas son: el tiempo de ciclo de los equipos, obtenido a través de la plataforma OneMine de Codelco, y la cartilla de tiraje del día proveniente del área de planificación de la Gerencia de Recursos Mineros y de Desarrollos (GRMD). Estas dos variables son ingresadas en las planillas de Excel que calculan de manera automática cada uno de los indicadores de calidad de extracción junto a la producción obtenida por turno para cada una de las estrategias estudiadas.

Los resultados de cada simulación entregan dos valores para cada indicador de calidad, el primero y mas importante para el análisis es la calidad y producción promedio obtenido por hora de operación, el segundo corresponde a la calidad y producción mínima obtenida en cualquier intervalo de horas que se seleccione.

Con los resultados de la calidad y producción promedio se selecciona la estrategia que optimice la calidad de extracción generando el menor impacto en la producción.

### 3.2. Comparación de Estrategia Seleccionada vs Estrategia Actual

Una vez seleccionada la mejor estrategia se discretiza el tiempo operacional en 4 escenarios:

- De 18 a 24 horas de operación.
- De 12 a 18 horas de operación.
- De 6 a 12 horas de operación.
- Menos de 6 horas de operación.

En cada escenario se determina la calidad de extracción promedio y mínima de la estrategia seleccionada en base a las simulaciones realizadas, las que son comparadas con la calidad promedio que ha sido obtenida según la información histórica de Chuquicamata en cada ocasión que hubo un evento no planificado generando una disminución de las horas operativas.

Con esto se decide si la nueva estrategia efectivamente genera mejoras en la calidad de extracción del macro bloque central o si por el contrario mantener la actual es lo mejor.

### 3.3. Definición de Uniformidad mínima resistida por el macizo rocoso

Un aspecto fundamental a la hora de generar de un estándar de este tipo es determinar la mínima calidad de extracción a exigir en base a las características propias del macizo rocoso y a los planes definidos para la mina. Dado que la cartilla de tiraje contempla una extracción del 100% de lo planificado, se exige una adherencia y utilización de área del 100%. Para el caso de la uniformidad,

se realiza un estudio de la dilución no planificada o superior a la planificada para determinar la correlación que existe entre la dilución y la uniformidad. Para esto se genera un gráfico de dispersión entre la dilución no planificada hasta febrero del 2022 y la uniformidad promedio de cada punto desde el inicio de las operaciones de extracción. Con esta información se busca la uniformidad mínima, la cual representa el punto desde el cual se evita en su totalidad la dilución no planificada en consecuencia de una mala estrategia de extracción.

Para el análisis de la uniformidad vs dilución, se utiliza la siguiente información:

- 1) Dilución: Se utiliza la base de datos progresiva generada por el área de gerencia de recursos mineros y de desarrollos (GRMD), desde el mes de Septiembre del 2021 hasta Febrero del 2022. A continuación se muestra un ejemplo de esta información:

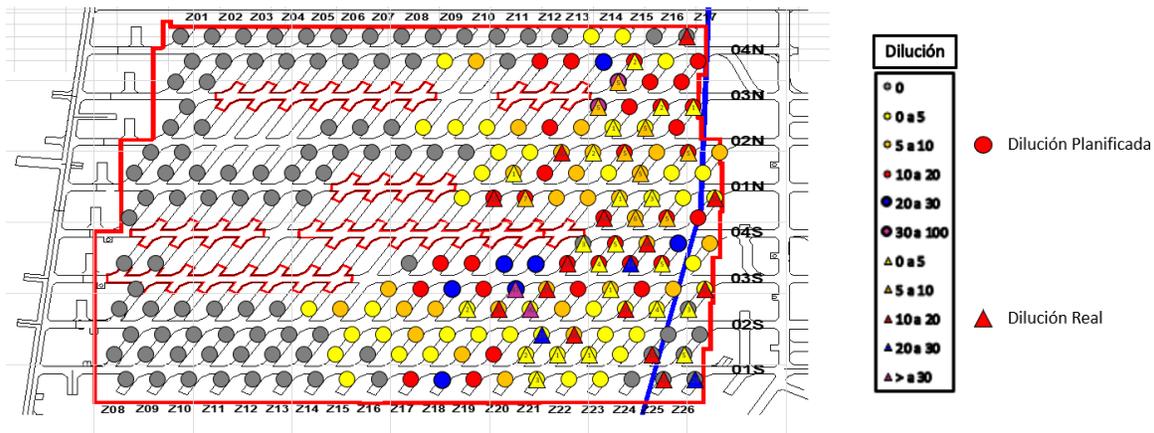


Figura 25 Dilución real vs Dilución planificada.

- 2) Uniformidad: Se utiliza la información entregada por GRMD con la uniformidad planificada y real, no obstante, esta última se corrige utilizando el método de Susaeta (Susaeta, 2004) a partir de la base de datos del software OneMine desde inicios de la operación.

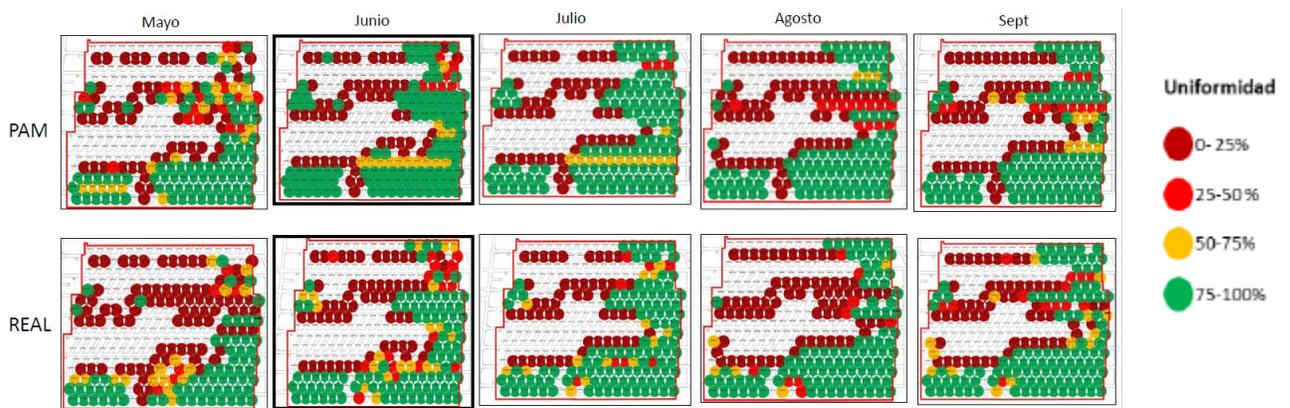


Figura 26 Uniformidad planificada vs Uniformidad real para los meses de Mayo a Septiembre del 2021.

En la figura 26 se compara la uniformidad esperada en los planes mensuales (PAM) y la obtenida en la práctica para los meses anteriores al descubrimiento de la dilución en octubre del 2021.

- 3) Mineral extraído: La altura extraída se obtiene de la plataforma CPCH de Codelco, la cual es utilizada para correlacionar este parámetro con la entrada de dilución. La figura 27 muestra un ejemplo de esto para un caso particular en la calle 2S:

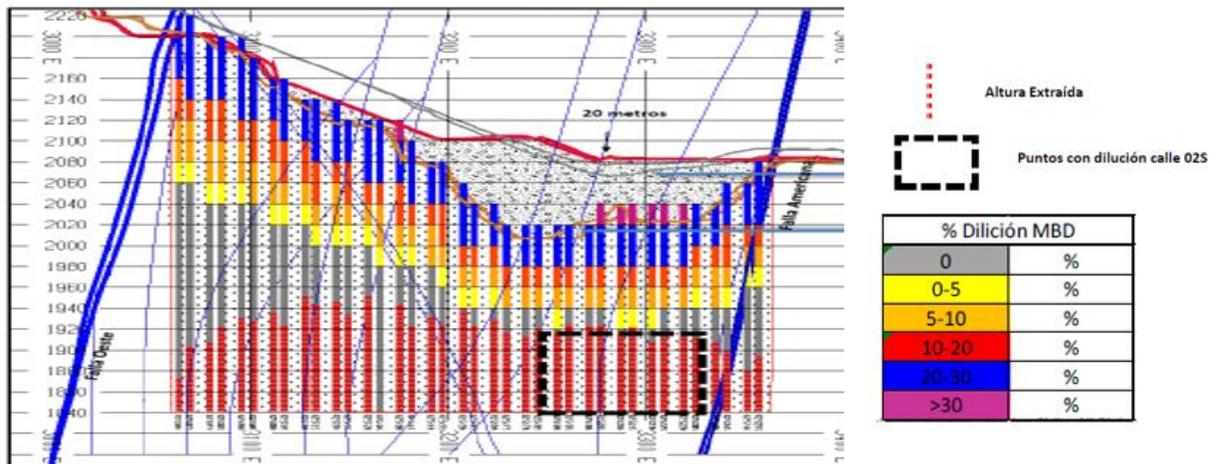


Figura 27 En rojo la cantidad de mineral extraído por punto hasta Octubre del 2021.

### 3.4. Definición de Estándar Final de extracción ante eventos no Planificados

Uno de los objetivos de este trabajo es generar un estándar que pueda ser usado por la operación. El estándar debe ser simple, directo y fácil de entender por cualquier trabajador implicado directa o indirectamente en el proceso de extracción.

La estrategia o las estrategias que formarán parte del estándar final serán elegidas en base a los resultados de los puntos anteriores. Para ello se selecciona aquella que obtiene los mejores indicadores de calidad de extracción por tramo de horas operacionales (mostradas en el punto 3.2 de esta sección) dándole prioridad a la uniformidad seguido de la utilización. No obstante, si alguna estrategia con los mejores indicadores genera una producción acumulada menor a las 2,000 toneladas en comparación a la actual se optará desde ese punto por la estrategia actual dado que las pérdidas económicas serían muy altas.

### 3.5. Cálculo del beneficio económico de la aplicación del estándar

El último punto por evaluar tiene relación con el impacto económico que supone la aplicación de la estrategia generada. Para esto se realizan dos evaluaciones económicas detalladas a continuación:

- ✚ Producción: Cuantificar las ganancias provenientes de la producción utilizando la estrategia combinada vs las ganancias de mantener la estrategia actual. Para esto se utiliza un intervalo de tiempo de un mes.
- ✚ Dilución: Cuantificar las ganancias obtenidas en un mes de producción por los puntos limitados entre los meses de Enero y Febrero del 2022 y las ganancias que se podrían haber obtenido en ese mismo mes de no haber sido limitados esos puntos por la dilución no planificada.

Para ambos procedimientos se utilizan los siguientes supuestos:

- Una recuperación metalúrgica del 86% y una ley de cobre del 0.99%, datos extraídos en base a la proyecciones del área de planificación para el año 2022.
- El precio del cobre se fija en 4.4 US\$/lb según las proyecciones de Cochilco.

En base a estos resultados se determina la viabilidad del estándar y de la estrategia propuesta o por el contrario, su ineficacia para generar un impacto sustantivo que justifique su aplicación.

## 4. Resultados y Análisis

En la siguiente sección se presentan y discuten los resultados obtenidos en base a la metodología desarrollada en la sección anterior.

### 4.1. Simulación de Estrategias de Extracción

La realización de las distintas simulaciones entrega como resultado una determinada utilización, uniformidad, adherencia y producción por estrategia de extracción adoptada, el desglose comparativo de estos resultados se muestra a continuación:

#### Utilización:

La Figura 28 muestra la utilización promedio alcanzada en cada hora de operación una vez iniciado un turno de 12 horas utilizando las 4 estrategias seleccionadas. Para más detalles sobre la definición de utilización revisar página 28.

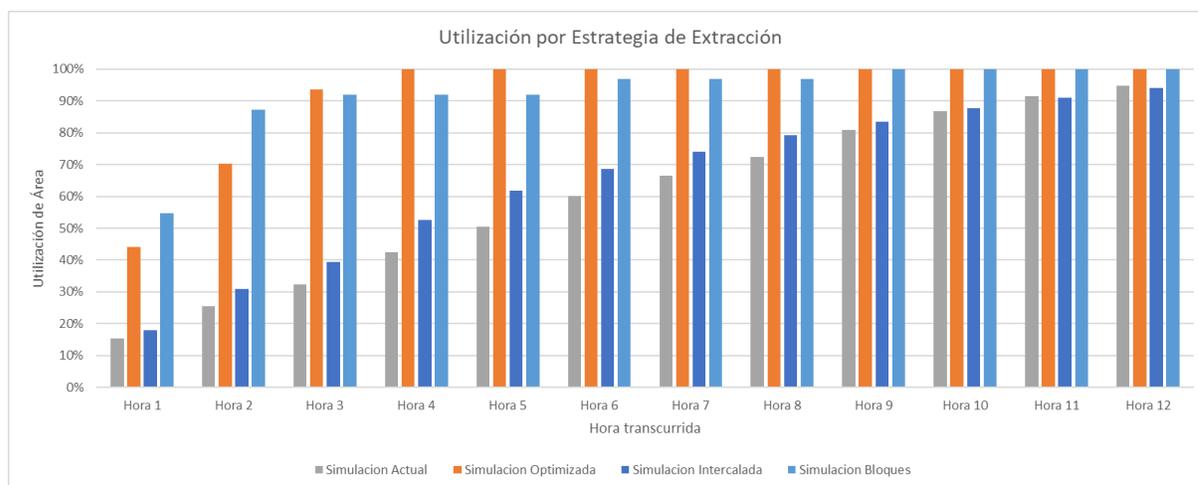


Figura 28 Utilización en el tiempo alcanzada por cada simulación.

Como se puede apreciar del gráfico, existen 2 estrategias que maximizan la utilización de área en muy pocas horas. Esto corresponde a las estrategias por “bloques” y “optimizada”, las cuales en 4 horas de operación alcanzan niveles superiores al 90%, en particular la estrategia “optimizada” alcanza en estas 4 horas el 100% de utilización, esto es lógico ya que su construcción fue hecha para optimizar la utilización, alcanzando está en el menor tiempo posible. Luego, tenemos a las estrategias “normal” e “intercalada”, las cuales presentan una evolución casi lineal de la utilización a medida que aumentan las horas de operación, y muy por debajo de los resultados obtenidos por las estrategias anteriores. Por ejemplo, a las mismas 4 horas de operación, ambas estrategias no llegan ni al 50% de utilización de área, es más, a las 12 horas de operación (turno completo), ni siquiera han llegado al 100% de utilización, alcanzando apenas un 95% utilización aproximadamente.

Con estos resultados vemos claramente la ventaja en términos de utilización que poseen la estrategia por “bloques” y “optimizada”, siendo esta última levemente superior en este aspecto.

Adherencia:

La figura 29 muestra la adherencia promedio que obtienen las 4 estrategias de extracción desde el inicio al término de un turno de 12 horas. Para más detalles sobre la definición de adherencia revisar página 28.

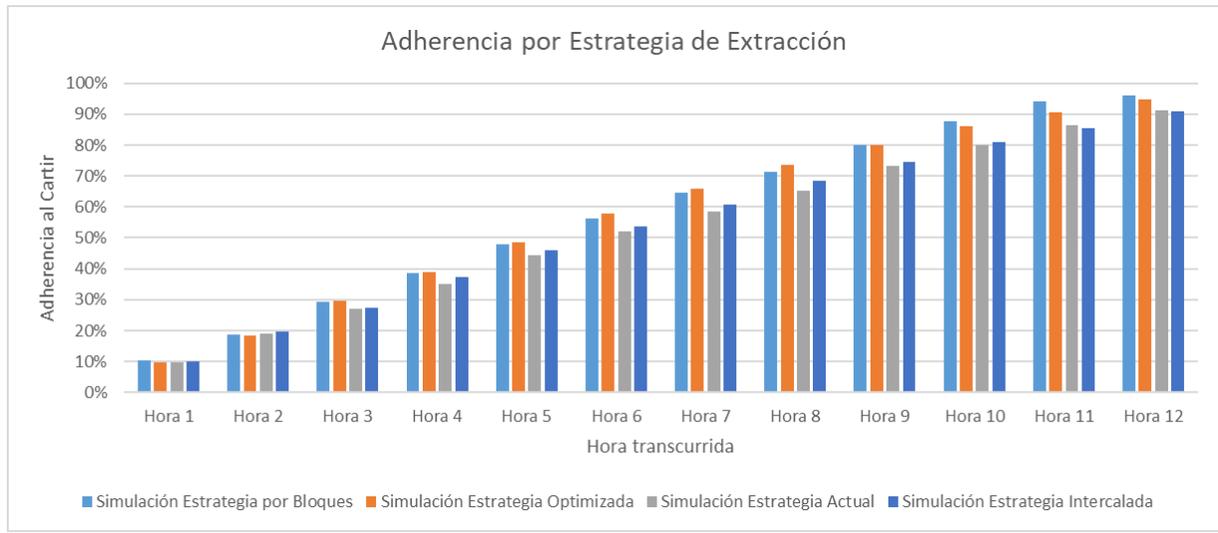


Figura 29 Adherencia en el tiempo alcanzada por cada simulación.

Si miramos a la adherencia las diferencias entre todas las estrategias es muy poca (en contraposición a lo que ocurre con la utilización de área). No obstante, se puede observar una leve ventaja tanto de la estrategia por “bloques” como de la estrategia “optimizada”, revelando una mayor adherencia al plan que sus contrapartes. En esta línea tenemos que el 80% de la adherencia se alcanza a las 9 horas de operación en el caso de la estrategia por “bloques” y “optimizada”, y a las 10 horas de operación para la estrategia “normal” e “intercalada”.

Es importante destacar que dado los tiempos medios actuales de las palas LHD, es imposible físicamente alcanzar el 100% de adherencia. Esto se hace a propósito en el plan diario para dar la suficiente holgura durante la operación dada la variabilidad de los tiempos de ciclo.

## Uniformidad:

La Figura 30 muestra la uniformidad promedio de las 4 estrategias por hora de operación, nuevamente para un turno de 12 horas. Para más detalles sobre la definición de uniformidad revisar página 28.

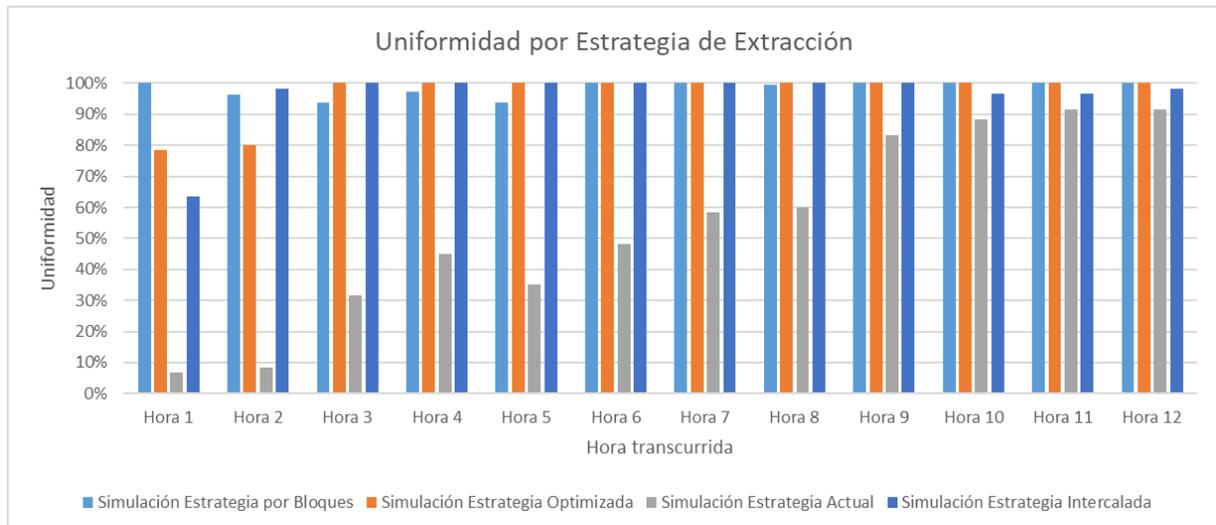


Figura 30 Uniformidad en el tiempo alcanzada por cada simulación.

Si analizamos el gráfico de uniformidad encontramos importantes conclusiones, la primera es que la estrategia por “bloques” necesita tan solo 1 hora de operación para alcanzar el 100% de uniformidad, pero desde las 2 horas de operación hasta las 5 Horas de operación esta baja y se mantiene en un rango entre el 95% y 99% de uniformidad, para luego mantenerse en una uniformidad constante del 100% desde las 6 horas de operación hasta las 12 horas de operación. La causa de este efecto se debe a la construcción de la estrategia de construcción, la cual mantienen tan solo un frente de tiraje a medida que se avanza por el macro bloque de Este a Oeste, frente que representa la única zona de des uniformidad del sistema, dando por definición de uniformidad un 100% de ésta independiente del tiempo de operación en el cual nos paremos. Exactamente lo mismo ocurre con la estrategia “optimizada” e “intercalada”, que mantienen este único frente de extracción en su avance, pero con un impacto menor debido a la naturaleza de la estrategia de cada una.

La peor estrategia corresponde a la estrategia “normal” que muestra un aumento de la uniformidad sumamente lento a medida que las horas de operación también aumentan, es tan lento el crecimiento de la uniformidad que son necesarias 11 horas de operación para alcanzar el 95% de ésta. Este comportamiento tiene su causa raíz en la forma de operar de esta estrategia que consiste en extraer en orientación Norte y luego en orientación Sur en cada calle, generando por tanto muchos frente de des uniformidad. Este punto es sumamente importante, ya que si tenemos un evento no planificado que interrumpe la continuidad operacional a la mitad del turno se genera un desbalance importante en las columnas de mineral. Si esto se vuelve repetitivo aumenta enormemente la probabilidad de tener dilución sobre la planificada.

## Producción por Turno:

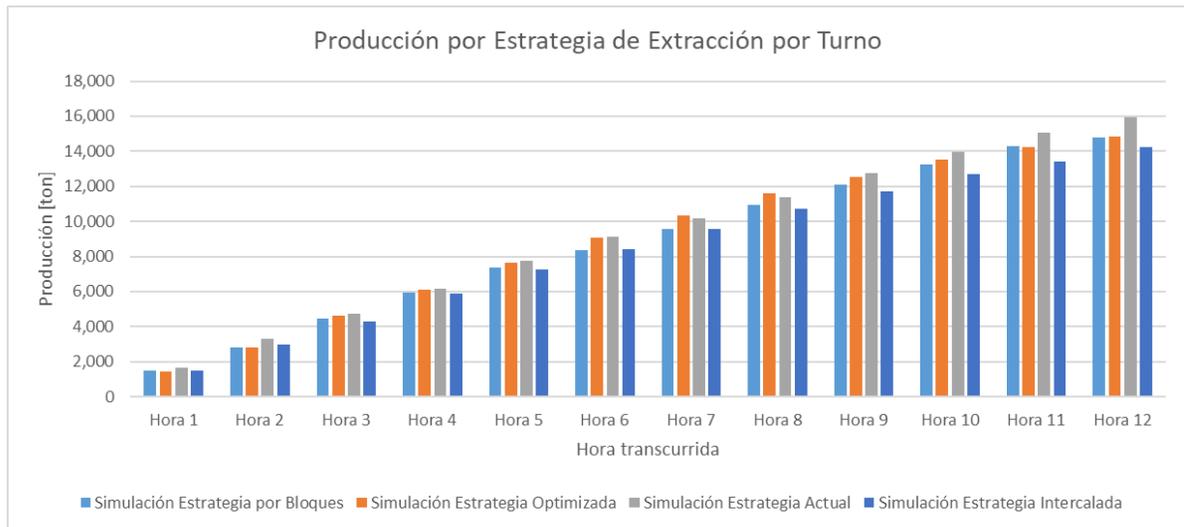


Figura 31 Producción en el tiempo alcanzada por cada simulación.

Por último tenemos el gráfico de producción vs horas de operación donde se observan pequeñas diferencias al inicio que se van acrecentando con el pasar de las horas. La estrategia que ofrece mayores beneficios corresponde productivos corresponde a la “normal”, ya que optimiza el tiempo de operación reduciendo los tiempos de giro con la pala para cambiar de orientación, caso contrario ocurre con la estrategia “intercalada” y en menor medida con la “optimizada” y por “bloques”, donde el constante giro del equipo genera pérdidas operacionales que se ven reflejadas al final del día en la producción.

Tomando en cuenta todos estos resultados, la mejor estrategia corresponde a la “optimizada”, ya que maximiza los indicadores de uniformidad y utilización de área permitiendo reducir de manera considerable problemas como dilución no planificada o colgaduras en los puntos de extracción, alcanzando el 100% de estos indicadores en tiempo récord dentro de la operación. Además de esto, es la segunda mejor estrategia en términos de producción y adherencia, manteniendo una diferencia mínima con la mejor en casi todas las horas de operación.

## 4.2. Estrategia Optimizada vs Estrategia Actual

Dado los resultados anteriores se compara la estrategia optimizada (dado que genera los mejores resultados en cuanto a calidad de extracción) con la calidad de extracción histórica obtenida desde los inicios de las operaciones utilizando la estrategia actual (desde ahora en adelante llamada “real” para diferenciar con los obtenidos a través de la simulación). La comparación se realiza en 4 escenarios operativos dando los siguientes resultados:

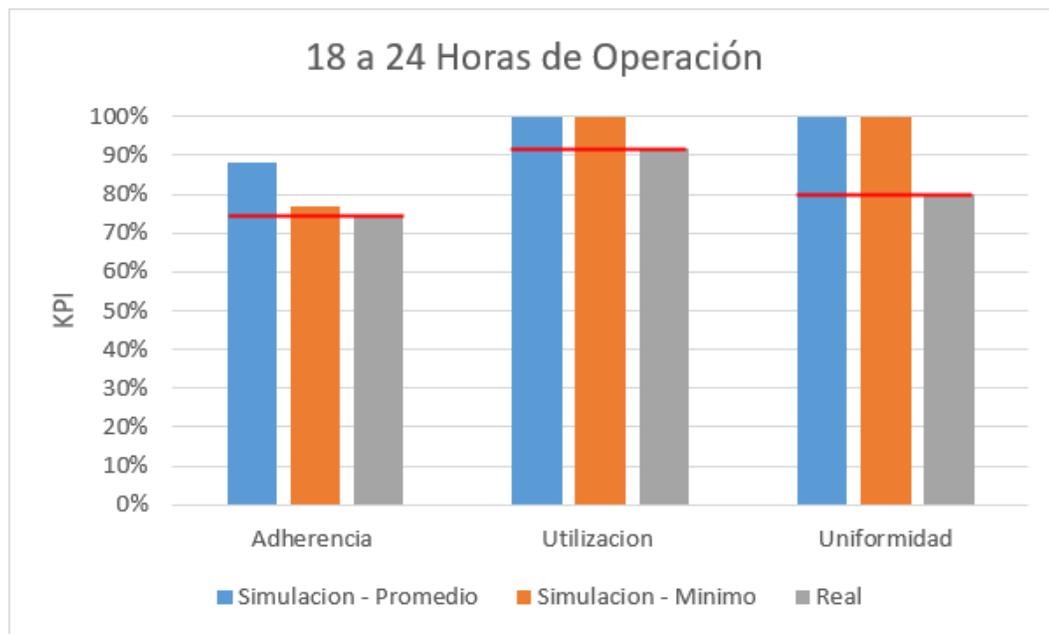


Figura 32 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 18 a 24 horas de operación.

Cuando tenemos horas de operación casi sin interrupciones los resultados promedios de la simulación son bastante superiores a los obtenidos de acuerdo a la data histórica. Y no solo eso, sino que los indicadores mínimos obtenidos por esta estrategia son todos mayores a los que se obtienen actualmente, es decir, en el peor de los casos la simulación sigue siendo una mejor opción.

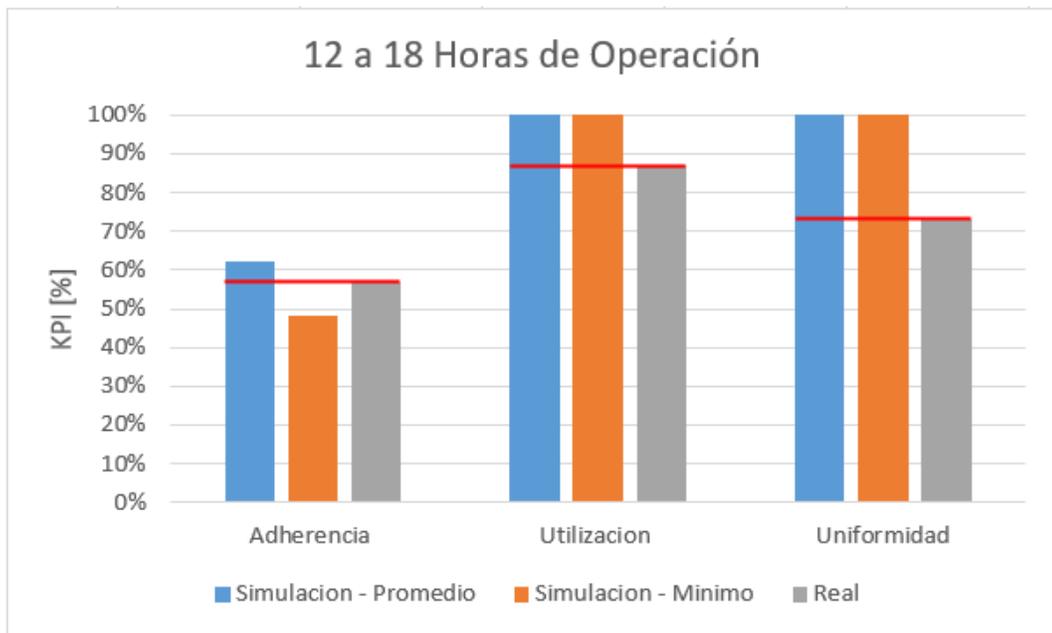


Figura 33 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 12 a 18 horas de operación.

Para horas de operación que van desde 12 a 18 horas, es decir, entre un turno y un turno y medio, se repite el mismo escenario, donde en promedio la simulación “optimizada” entrega los mejores resultados en comparación a los datos reales.

Para el caso de la utilización y uniformidad las diferencias se acentúan, sin embargo la adherencia de la estrategia “optimizada” y la data histórica se acercan bastante, siendo esta última incluso superior a la que se obtendría en el peor de los casos en la estrategia “optimizada”.

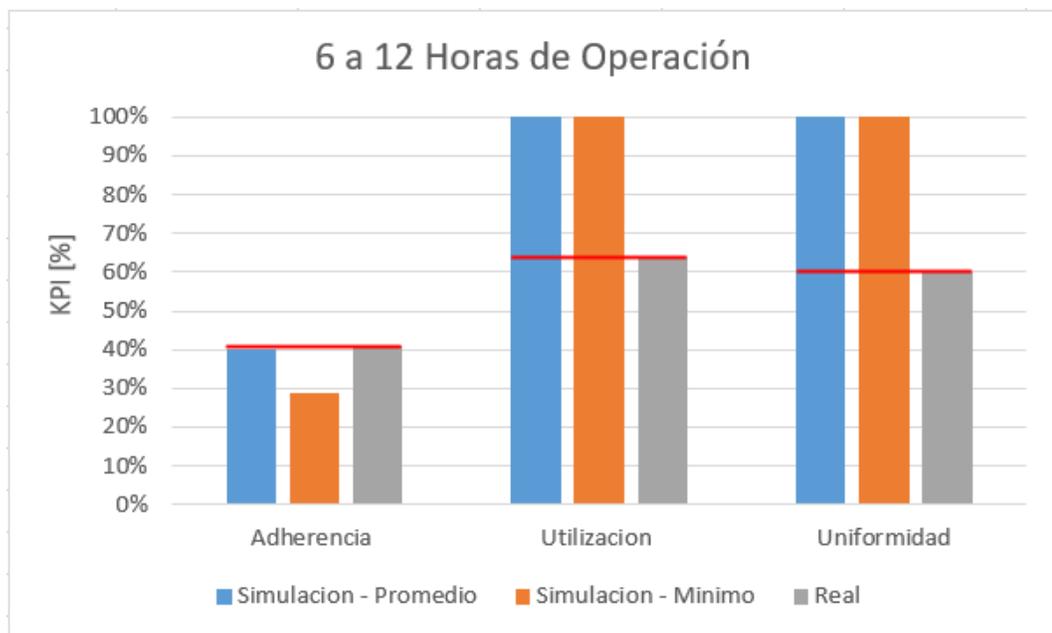


Figura 34 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para 6 a 12 horas de operación.

Cuando las horas operativas se reducen a un intervalo entre 6 a 12 horas la diferencia entre utilización y uniformidad de la estrategia “optimizada” y la data histórica continúa incrementándose, mientras que la adherencia es casi igual en ambas rondando el 40%.

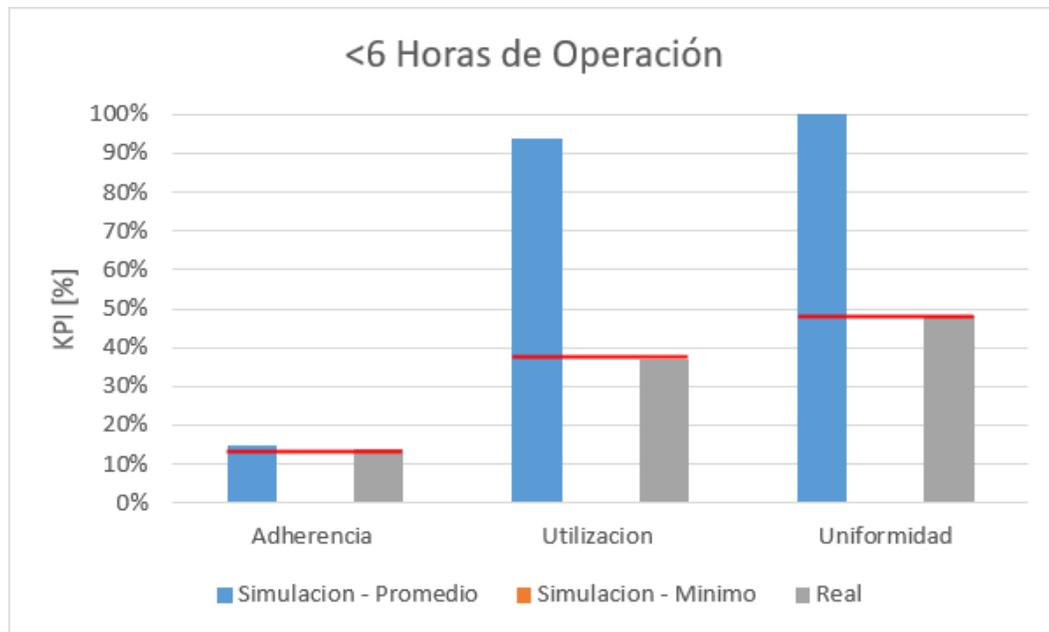


Figura 35 Comparación entre Simulación Optimizada y Operación Actual para menos de 6 horas de operación.

Finalmente, cuando se tienen menos de 6 horas de operación, la estrategia “optimizada” vuelve a revelar la resistencia que posee frente a distintos eventos no planificados que interrumpen la continuidad operacional, manteniendo indicadores claves como la utilización y uniformidad mayores al 90% a diferencia de lo que históricamente ha ocurrido cuando suceden estos eventos donde estos indicadores disminuyen drásticamente a causa de una inadecuada estrategia de extracción.

En cuanto a la adherencia, en ambos casos se ve que en promedio ronda el 15%, esto es normal independiente de la estrategia que se adopte, ya que este indicador es directamente proporcional a las horas operativas y no de la estrategia en si misma.

En base a estos resultados se concluye que la estrategia “optimizada” efectivamente mejora drásticamente los indicadores de calidad de extracción cuando existen eventos no planificados que disminuyen las horas operativas, por lo cual su implementación es sumamente beneficiosa y debe ser incorporada en el estándar.

### 4.3. Uniformidad mínima resistida por el macizo rocoso

A continuación, se presentan las correcciones a la uniformidad utilizando la metodología de Susaeta (Susaeta, 2004):

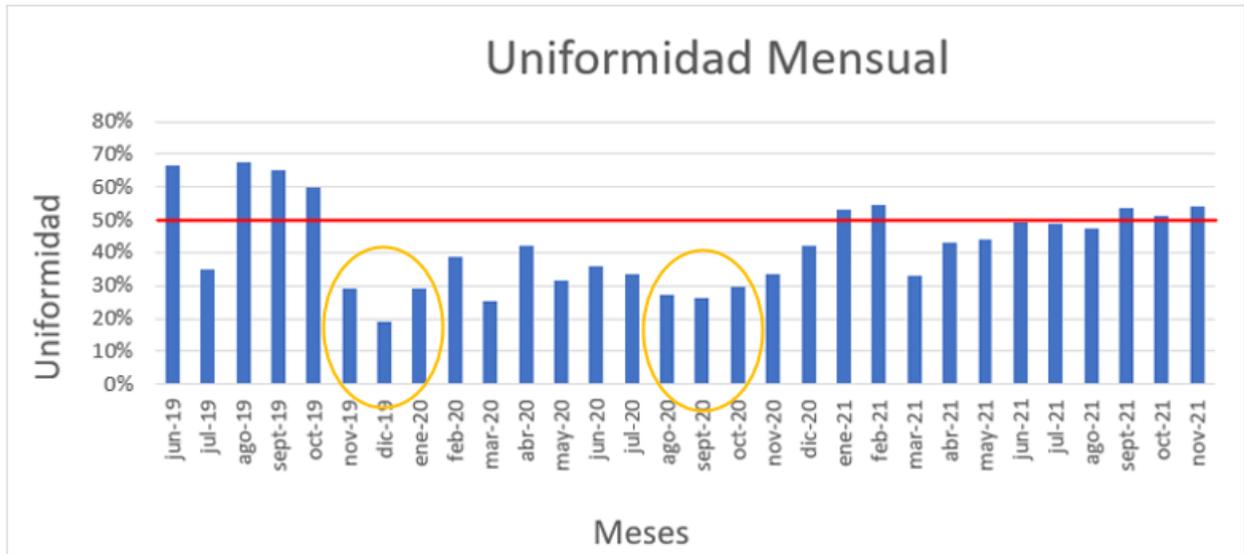


Figura 36 Uniformidad real del macro bloque central en el tiempo.

En el gráfico se observa la evolución en el tiempo de la uniformidad, en la cual se aprecian dos caídas importantes, la primera entre noviembre del 2019 y enero del 2020, debido a la sucesiva incorporación de puntos de extracción, y una segunda en los periodos donde comienza la reducción del área disponible entre agosto y septiembre del 2020. Sumado a esto la media general no superaba el 50% de uniformidad global en el macro bloque central.

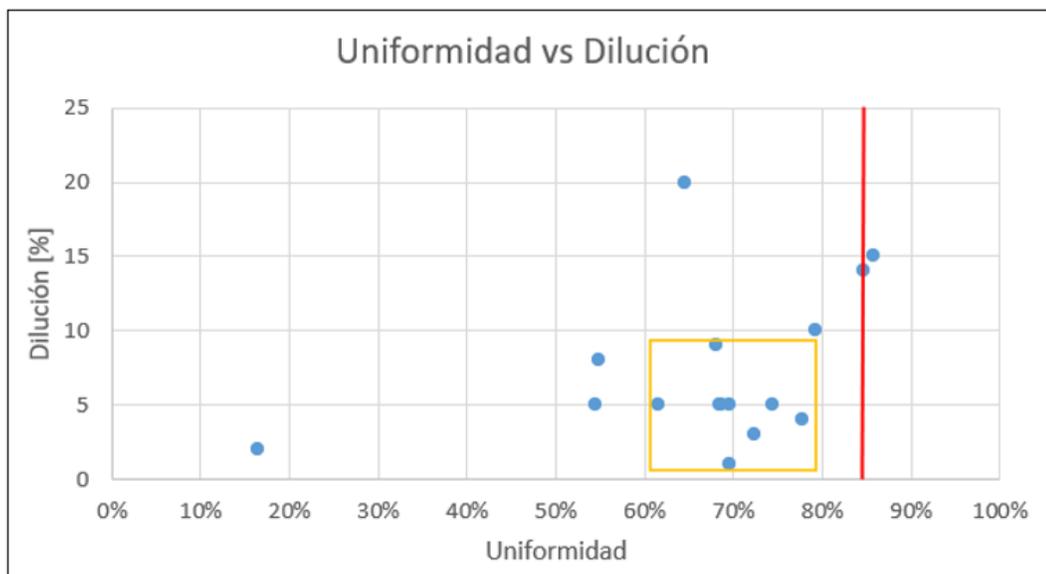


Figura 37 Dilución vs Uniformidad hasta Febrero del 2022.

El gráfico expuesto nos muestra la uniformidad de cada punto de extracción que ha sufrido una dilución por sobre la planificada desde el inicio de las operaciones hasta febrero del año 2022. Se ve claramente una concentración de puntos con dilución entre 0 y 10% que presentan una uniformidad que va del 60 al 80%, y esto es muy importante y relevante ya que nos indica el rango de uniformidad donde actualmente el macrobloque comienza a diluir por sobre lo planificado.

Otro resultado muy importante es la línea roja en el gráfico, ya que marca la uniformidad bajo el cual se encuentra el 94% de los puntos diluidos, es decir, si se tiene una uniformidad mayor al 85% existe una alta probabilidad de que el punto nunca diluya por sobre lo planificado, es más, si esa uniformidad es superior al 90% bajo las condiciones actuales de la mina Chuquicamata Subterránea los puntos no deberían diluir nunca por sobre lo planificado a razón de una inadecuada estrategia de extracción.

Otro resultado relevante del estudio es que el 94% de los puntos diluidos tiene al menos 1 vecino con dilución, esto independiente de la uniformidad que presenten. Por lo tanto, cada punto diluido no solo afecta a ese punto en particular sino también a su vecindad más próxima.

#### 4.4. Estándar Final de extracción ante eventos no Planificados

Finalmente el estándar se compone de dos casos, esto por un motivo simple, debe ser algo sencillo para los operadores y jefes de turno quienes lo vayan a aplicar ante un evento no planificado y porque de esta manera se maximiza tanto la producción como la calidad de extracción sin sacrificar ninguna.

De esta manera el estándar final es el que se muestra en la siguiente página:

1

Gerencia: MCHS  
 SI: Operaciones  
 Área : Extracción

Estándar extracción de PEX ante interrupción operativa por eventos no planificados.

2



Objetivo	Resp. Estándar	Resp. Ejecución	KPI Asociado
<div style="border: 1px solid orange; padding: 2px; width: 15%; text-align: center; font-weight: bold;">3</div> Mantener calidad de extracción los días que en que cualquier evento no planificado interrumpa la continuidad operacional.	Jefe de Extracción	Jefe de Turno	Utilización Uniformidad Adherencia

❖ Para aquellos turnos en que supervisor chancado informa a supervisor operaciones que Chancado y/o Correas quedará fuera de servicio, la estrategia de extracción será la siguiente dependiendo del tiempo de detención:

➤ Detención menor a 5 Horas y turno anterior sin detención :

- 1.- Mover 1 baldada a todos los puntos.
- 2.- Continuar extracción de Este a Oeste comenzando la extracción con orientación norte.

5

➤ Detención entre 5 a 12 Horas y/o detención del turno anterior entre 5 a 12 Horas:

- 1.- Mover 1 baldada a todos los puntos.
- 2.- Continuar extracción de Este a Oeste intercalando orientación entre Norte y Sur.
- 3.- Prioridad de calles:
  - I. Calle 04 del N01
  - II. Calle 01 del S01
  - III. Calle 02 del S02
  - IV. Calle 02 del N01
  - V. Calle 01 del N01
  - VI. Calle 03 del S01
  - VII. Calle 04 del S01
  - VIII. Calle 03 del N01

6

Creado : Bayron Navarrete, Memorista de Operaciones  
 Validado : Rodrigo Cortes, Supervisor de Extracción  
 Fecha, Versión : 01-04-2022  
 Aprobado : Nicolás Jamett, Superintendente Operaciones



4

Figura 38 Estándar Final para la extracción de PEX ante eventos no planificados.

El estándar presenta la siguiente información:

- 1) Gerencia, superintendencia y área en donde será aplicada (Figura 38, 1).

La ilustración muestra un extracto del estándar que indica la aplicación del estándar en el área de extracción perteneciente a la superintendencia de operaciones de la gerencia mina de Chuquicamata subterránea

- 2) Nombre del estándar (Figura 38, 2).

En este apartado se expone el título del estándar puntualizando a la unidad perteneciente, en este caso a operaciones.

- 3) Objetivo del estándar, el responsable del estándar, el responsable de su ejecución y los KPI que busca maximizar (Figura 38, 3).

En esta sección se detalla el objetivo que busca el estándar, el cual es mantener una buena calidad de extracción los días donde un evento no planificado interrumpe la normalidad de las operaciones, además especifica cuales son los KPI que determinan esta calidad, los cuales corresponden a la utilización de área, la uniformidad y la adherencia a la cartilla de tiraje, por último, se indica al responsable del estándar y al responsable de su aplicación, siendo estos el jefe de extracción y el jefe de turno respectivamente.

- 4) El cuerpo del estándar entrega el contexto de aplicación de este y la división en dos casos (Figura 38, 4).

Finalmente tenemos el cuerpo del estándar que describe una serie de pasos a realizar en caso de que ocurra un evento no planificado (contexto detallado en la ilustración).

- 5) Caso 1: Para pocas horas de detención (5 horas o menos) (Figura 38, 5).

El caso 1 es aplicado como se ve en la ilustración cuando la detención supone una pérdidas menor a 5 horas y cuando el turno anterior no presento ninguna detención operativa. En este caso se procede moviendo 1 baldada a todos los puntos para luego continuar la extracción de Este a Oeste con orientación norte para asegurar utilización y producción.

- 6) Caso 2: Para varias horas de detención (6 horas o más) (Figura 38, 6).

El caso 2 es aplicado cuando la detención supera las 5 horas o si en el turno anterior se superaron estas 5 horas de detención. El procedimiento por realizar en este caso consiste nuevamente en la extracción de 1 baldada a todos los puntos para continuar la extracción de Este a Oeste, pero en este caso en vez de extraer primero los puntos con orientación Norte se va a intercalar la extracción entre Norte y Sur sucesivamente hasta completar la calle. Además, se priorizan las calles que

históricamente han tenido el menor cumplimiento comparado con los planes mensuales desde el inicio de las operaciones.

### 4.5. Beneficios económicos de la aplicación del estándar

A continuación, se presentan los resultados de la cuantificación económica entre la estrategia actual y la combinada del estándar junto al desglose por horas operativas:

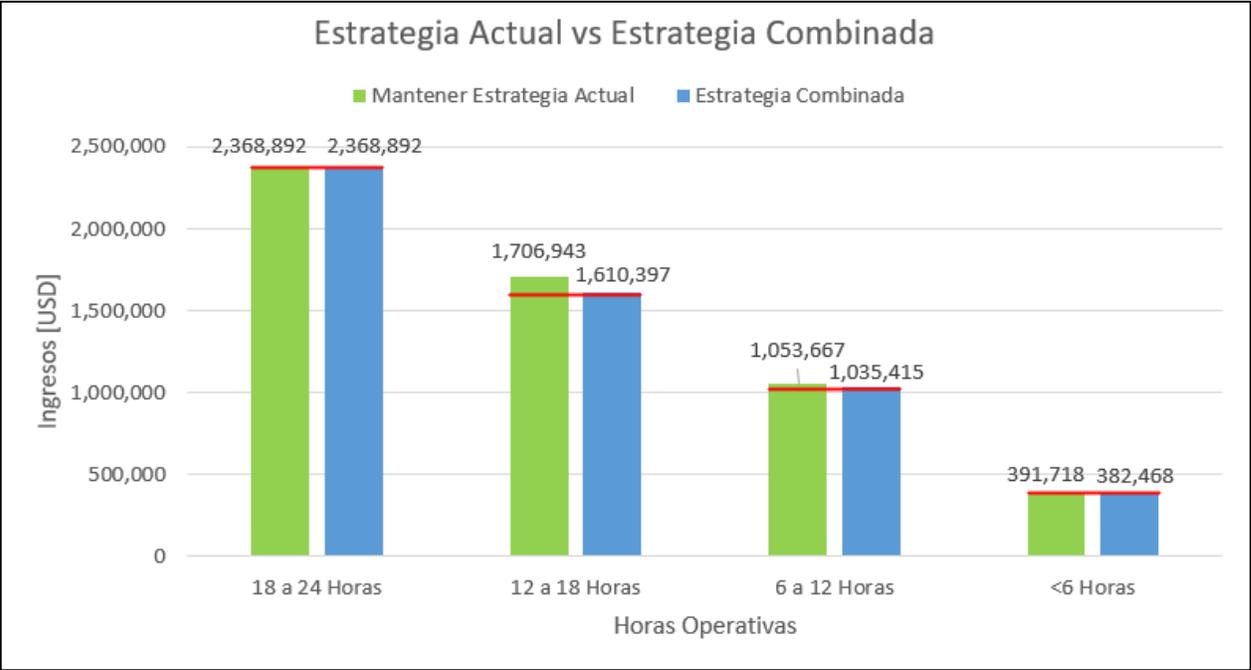


Figura 39 Ingreso económico por estrategia.

Analizando los resultados de la cuantificación económica ligada a la producción de cada estrategia, obtenemos que mantener la estrategia actual de extracción supone ganancias de 96 kUSD en días de 12 a 18 horas de operación y en promedio supone ganancias de 31 kUSD considerando todo el espectro de horas operativas. Por tanto las ganancias de realizar este cambio hacia una estrategia combinada deben suponer ganancias por sobre este valor para ser viable a largo plazo.

Se revisa entonces que sucede con uno de los eventos directos producidos por una mala extracción: la dilución, cuya entrada prematura o desajustada a los planes es causada por un mala uniformidad a la hora de extraer las columnas de mineral.

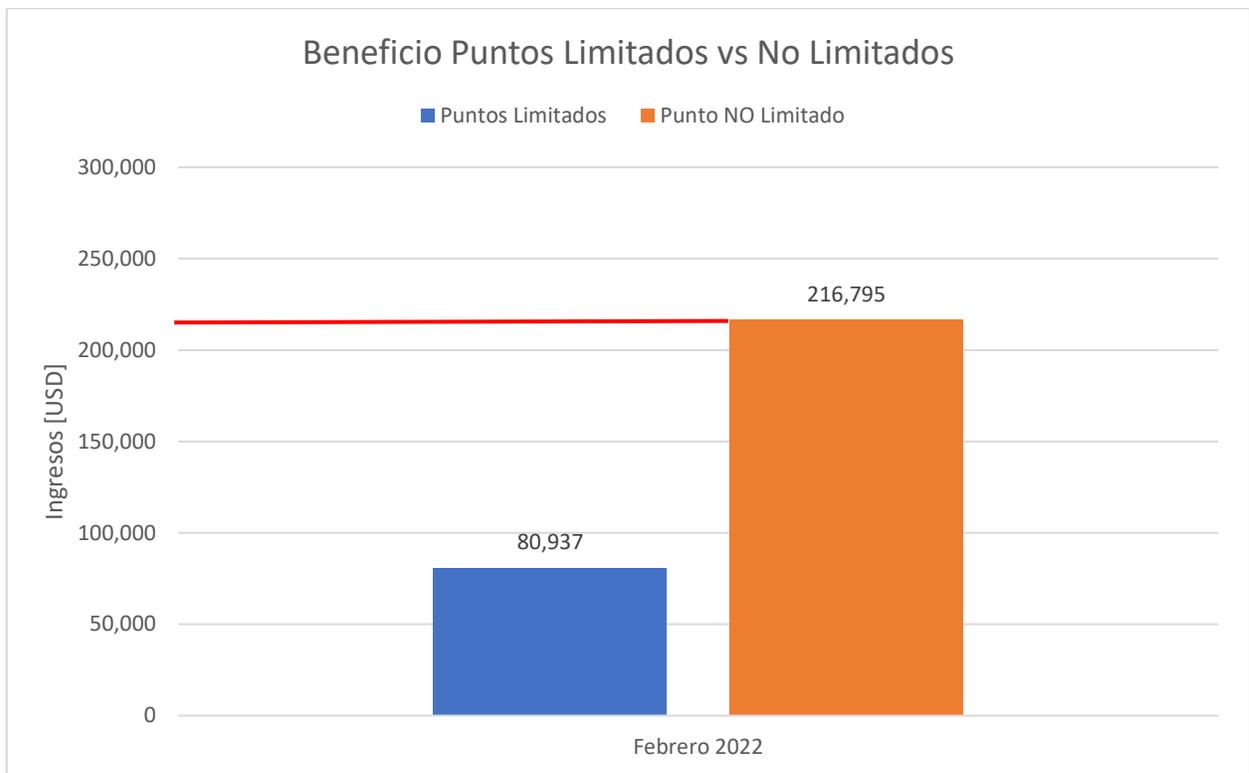


Figura 40 Diferencia entre el beneficio alcanzado cuando los puntos no son limitados por dilución no planificada.

El gráfico de barras muestra en azul los ingresos diarios percibidos durante febrero del 2022 por los puntos limitados a causa de la dilución no planificada, y en naranja se visualizan los ingresos de estos mismos puntos de no haber sido limitados, la diferencia alcanza los 135 mil 858 dólares diarios.

Ahora bien, si consideramos los 31 mil 012 dólares en promedio que la estrategia actual genera por sobre la estrategia combinada y la comparamos con los 135 mil 858 dólares que supone limitar puntos por dilución no planificada obtenemos una diferencia de 104 mil 846 dólares.

Asumiendo un caso hipotético donde todo un mes se generan eventos no planificados que interrumpen la continuidad operativa (lo cual es bastante improbable dadas las tendencias actuales) lo cual obliga a los operadores bajo el estándar expuesto en la sección anterior a utilizar la estrategia combinada, se tendrían en promedio en ese mes pérdidas de 961 mil 372 dólares, pero actualmente tan solo por dilución las pérdidas al mes independiente de que hayan o no hayan interrupciones operativas ascienden a 3,250,226 dólares, es decir, aplicar el estándar en el peor de los casos entrega ganancias de 2,288,854 dólares al mes.

## 5. Conclusiones

Este trabajo evaluó 4 estrategias de extracción en un macrobloque para ver cuál es su impacto en la calidad de extracción y en la producción: la primera estrategia es la utilizada actualmente en la operación de Chuquicamata Subterránea, la segunda fue la “optimizada” que busca optimizar la calidad de extracción dando como prioridad a la utilización de área, la tercera fue la estrategia por “bloque” que divide las calles en bloques de extracción y por último la estrategia “intercalada” que consiste en cambiar la orientación del equipo cuando termine la extracción de cada punto para continuar con el que está justo en frente de este.

En base al estudio realizado en esta memoria se concluye que de las cuatro estrategias analizadas, aquella que muestra los mejores resultados en cuanto a la calidad de extracción en promedio por turno de operación corresponde a la estrategia optimizada. Esta estrategia alcanzó valores de utilización de un 100% en tan solo 4 horas y una adherencia del 80% en 9 horas de operación por turno. En cuanto a la uniformidad, se consigue estabilizarla en un 100% desde la hora 3 de operación hasta el final del turno. No obstante, la producción se ve afectada dados los consecutivos cambios de orientación del equipo provocando que al final del turno se produzcan en promedio 1 kton menos de los producidos utilizando la estrategia actual.

Al analizar los resultados históricos que han obtenido utilizando la estrategia actual cuando las operaciones son interrumpidas por un evento no planificado, y al compararla con los resultados entregados por la estrategia optimizada, se concluye que el uso de esta última aumenta la calidad de extracción drásticamente a menos horas disponibles para operar se tengan. Ejemplo de esto son la uniformidad y la utilización que no superan el 50% en promedio cuando se tienen menos de 6 horas de operación, en cambio la estrategia optimizada las mantiene sobre el 90%.

Por otra parte, se concluye que la mínima uniformidad resistida por las columnas de mineral en Chuquicamata Subterránea corresponde al 90%, valor con el cual es posible evitar en su totalidad la dilución no planificada por parte del área de operaciones.

Finalmente, como resultado de este trabajo también se define un estándar de extracción ante eventos no planificados presentado en la página 51 el cual se divide en dos partes. La primera corresponde a los casos en donde la interrupción operacional no excede las 5 horas, caso en el cual se sigue el siguiente proceso:

- 1.- Mover 1 baldada a todos los puntos.
- 2.- Continuar extracción de Este a Oeste comenzando la extracción con orientación norte.

La segunda parte corresponde a los casos donde la interrupción operacional excede las 5 horas, en cuyo caso se sigue el siguiente procedimiento:

- 1.- Mover 1 baldada a todos los puntos.
- 2.- Continuar extracción de Este a Oeste intercalando orientación entre Norte y Sur.
- 3.- Prioridad de calles:
  - i. Calle 04 del N01
  - ii. Calle 01 del S01
  - iii. Calle 02 del S02

- iv. Calle 02 del N01
- v. Calle 01 del N01
- vi. Calle 03 del S01
- vii. Calle 04 del S01
- viii. Calle 03 del N01

Por último, se concluye que la utilización de este estándar permite controlar de mejor manera la dilución lo que permite aumentar las ganancias mensuales a largo plazo en 2,288,854 USD, además, de cuidar la geometría del domo de extracción y minimizar procesos como colgaduras y en el peor de los casos el colapso de áreas en el MB.

Se recomienda utilizar el estándar en la operación y corroborar que los supuestos son válidos a medida que se tengan más datos de la operación. Se recomienda analizar la correlación entre utilización de área y colgaduras. Es importante reanalizar el estándar para cada MB que se abra para asegurar su validez en cada uno de ellos. Por último, cabe destacar que la aplicación del estándar es muy importante para controlar la calidad de extracción, controlar y minimizar la dilución y las colgaduras, proteger el MB de colapsos de área, y en consecuencia mejora las ganancias diarias y beneficiar al negocio minero en su globalidad.

## 6. Bibliografía

- Julian R. Ballard, J. Michael Palin, Ian S. Williams, Ian H. Campbell, Alejandro Faunes; Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology* 2001.
- CODELCO (Chile). Vicepresidencia de Proyectos. Explotación Chuquicamata Subterránea - Proyecto: Explotación Minera y Reservas Minerales. Calama: CODELCO, 2017. Informe técnico: N14MS03-I2-N14MS03-70100-INFMD02-2000-008.
- Mardones L. (2020). capturando las mejoras en diseño, procedimientos y planificación de las obras de construcción – proyecto mina chuquicamata subterránea (pmchs). memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile. Santiago.
- Barindelli, G. (2016). Propiedades de Roca Intacta Macrobloques Centrales. Codelco.
- Brown, E. (2007). Cave Initiation by Undercutting. En *Rock Mechanics for underground mining*.
- Vicepresidencia de Proyectos. (2013). SIC Inversional, Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo. Codelco.
- Brady B H, and Brown E T. 2004, longwall and Caving Mining Methods. *Proceedings Rock mechanics for underground mining, third edition*.
- Vicepresidencia de Proyectos. (2014). Geomecánica y geotecnia PMCHS. Codelco.
- Laubscher, D. 1994. “Cave Mining – the state of the art”. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Laubscher, D. (2000). Block Caving manual. Prepared for the International Caving Study. JKMRC and Itasca Consulting Group.
- DeWolfe, V., 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. *Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines*, (Ed: D. R. Stewart). Society of Mining Engineers, USA.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (Part 1 & Part 2). Chile: MassMin 2004.
- Brown E.T., 2003. *Block Caving Geomechanics*, second edition. JKMRC The University of Queensland.

- Cavieres P. (1999). Curso de Gestión de la innovación tecnológica. En: Programa de especialización en innovación tecnológica geomecánica y geotecnia aplicada a la minería, Curso 5 - Módulo I. Santiago, Chile.
- Duplancic P., Brady B, 1999. Characterization of caving mechanics by analysis of seismicity and rock stress.
- Wattimena, R. K. 2003. Designing Undercut and Production Level Drifts of Block Caving Mines. PhD Thesis. JKMRC School of Engineering The University of Queensland. Chapters 1, 2 y 3.
- Tobie, R.L. and Julin, D.E., (1982), "Block caving", in: Underground mining methods handbook, Editor: Hustrulid, W.A., Sec. 4, Chap. 1, PP 967- 972.

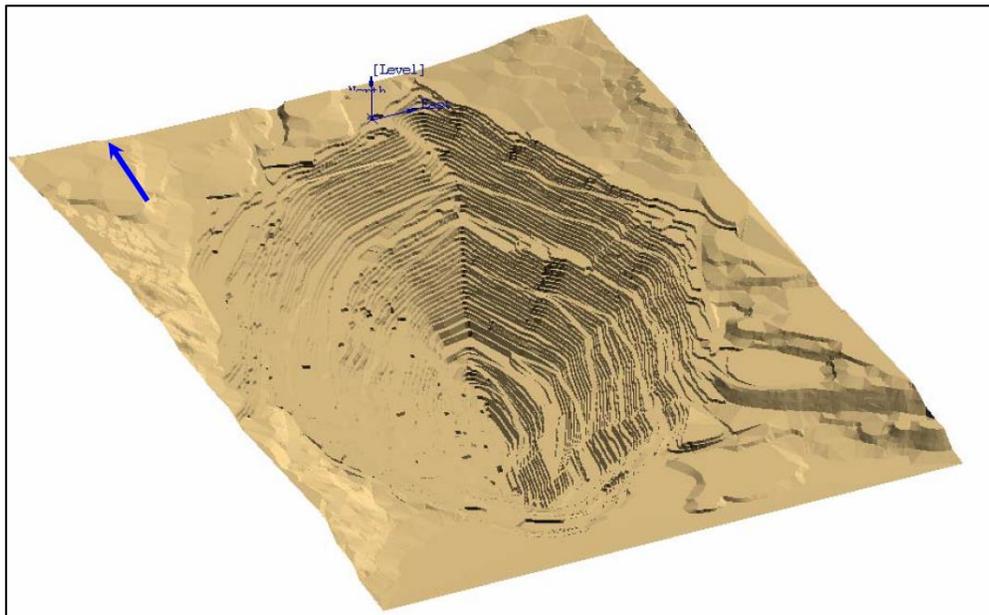
## Anexos

### Anexo A.1 Geología Global

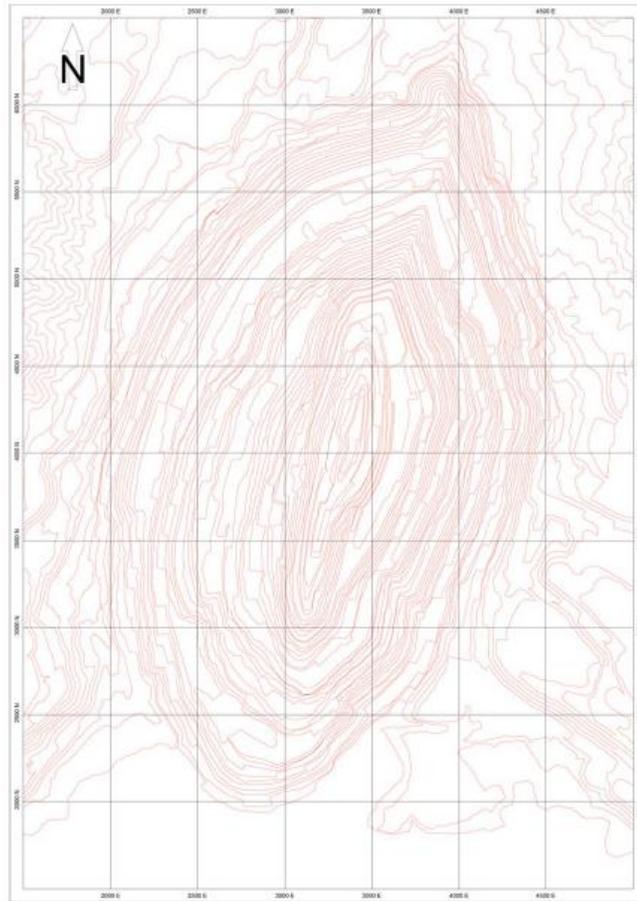
El Distrito Codelco Norte es parte de una franja de pórfidos cupríferos alineados según el Sistema de Falla Domeyko. La Falla Oeste, importante rama del Sistema de Falla Domeyko en el distrito, es una estructura regional N-S con movimiento post-mineral, que divide el depósito Chuquicamata, separando el Pórfido Chuqui intensamente mineralizado, por el Este, del estéril Complejo Intrusivo Fortuna, por el Oeste.

En esta franja se encuentra el rajo de Chuquicamata ubicado entre las coordenadas 1.800-4.600 E y 2.000-6.300 N. Sus dimensiones actuales alcanzan los 4.900 m de longitud N-S, 3.400 m de ancho W-E y una profundidad aproximada de 1.020 m. La cota superior del rajo esta aproximadamente entre los 2.900-3.100 m s.n.m. La cota inferior es de 2.080 m s.n.m.

En las ilustraciones 1 y 2 se pueden apreciar las vistas 3D y en planta del rajo de Chuquicamata:



*Figura 41 Vista 3D de la forma del rajo de Chuquicamata.*



*Figura 42 Vista en planta de la ubicación geográfica y forma del rajo Chuquicamata.*

Chuquicamata es un depósito mineral, cuyas dimensiones son de 4 kilómetros de largo, 300 a 900 metros de ancho en dirección Este-Oeste, y una profundidad de la mineralización económica reconocida de al menos 1.600 m (Siña, 2003).

El yacimiento mineralizado está hospedado en un complejo intrusivo, que a nivel distrital corresponde a un cuerpo tabular irregular, elongado en dirección NNE, subvertical manteniendo levemente al Oeste. Dicho complejo denominado “Pórfido Chuqui”, está constituido principalmente por el Pórfido Este y de forma subordinada por los Pórfidos Oeste y Banco, intruye a un basamento ígneo-metamórfico paleozoico, a rocas granodioríticas triásicas, a sedimentitas y volcanitas mesozoicas con metamorfismo de contacto y a los intrusivos terciarios del complejo intrusivo Fortuna por el Oeste, y la Granodiorita Elena por el Este (Faunes et. al., 2000).

El Pórfido Este corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita, con textura fanerítica a levemente porfídica, de grano medio. Está intruido localmente por pequeños cuerpos

de los Pórfidos Banco y Oeste, situados principalmente en la parte norte del depósito. La edad de cristalización del Pórfido Este está datada en 34,6 Ma (Ballard et al., 2001)

El depósito está limitado por fallas importantes; por el Oeste la Falla Oeste, por el Este la Zona de Deformación Este y por el Sur la Zona de Falla Portezuelo donde este complejo intrusivo se acuña estructuralmente, hasta alcanzar la forma de un pequeño dique de unos 30-40 m de potencia adosado a la Falla Oeste. Hacia el Norte, el complejo intrusivo tiene continuidad más allá del depósito Chuquicamata, abarcando incluso el yacimiento Radomiro Tomic (Siña, 2003).

Sobre la base de la geología del depósito es posible elaborar una síntesis de la evolución geológica que condujo finalmente a la formación de un yacimiento gigante, de la magnitud de Chuquicamata. Algunos de los eventos han sido datados y se mencionarán sus edades; los eventos que no han sido datados serán presentados con edades relativas y ubicados entre eventos con edades absolutas (Siña, 2003).

- 34,6 Ma: Intrusión del Pórfido Este
- 34 – 33,4 Ma: Intrusión del Pórfido Oeste – Evento Potásico de Fondo
- 33,3 Ma: Intrusión del Pórfido Banco
- Eventos de Alteración Potásica Intensa: Ocurren entre la intrusión del Pórfido Banco y el emplazamiento de las vetas de cuarzo-molibdenita.
- 32 Ma: Emplazamiento de Vetas y Vetillas de Cuarzo-Molibdenita
- 32 – 31,1 Ma: Deformación Post - Mineralización Temprana en que el depósito fue sometido a importantes deformaciones tectónicas.
- 31.1 Ma: Evento de Alteración Cuarzo-Sericítica Tardía
- Deformación Post – Mineralización Tardía en que ocurren reactivaciones de las Fallas Estanques Blancos, Oeste y en el juego de fallas NNW.
- P19 – 15 Ma: Procesos Supérgenos.

## Caracterización Geotécnica Global

Para la caracterización geotécnica de Mina Chuquicamata, a partir del año 1999, se ha desarrollado el concepto de Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB), las que consisten en cuerpos relativamente homogéneos y que son el resultado de la superposición de las unidades de alteración a las unidades litológicas. En base a lo antes mencionado, en Chuquicamata se reconocen doce UGTB y que son las que se mencionan y describen a continuación:

- Granodiorita Fortuna (GDF)
- Zona de Cizalle Moderado (ZCM)
- Zona de Cizalle Intenso (ZCI)
- Pórfido Este Sericítico (PES)
- Pórfido Este Potásico (PEK)
- Pórfido Este Clorítico (PEC)
- Metasedimentos (MET)
- Granodiorita Elena Sur (GES)
- Brecha Entre Fallas (BEF)
- Cuarzo Mayor Sericita ( $Q>S$ )
- Cuarzo Igual a Sericita ( $Q=S$ )
- Cuarzo Menor a Sericita ( $Q<S$ )

## Caracterización de los Dominios Estructurales

Los Dominios Estructurales identificados en la Mina Chuquicamata son: Dominio Mesabi, Dominio Noroeste, Dominio Balmaceda, Dominio Estanques Blancos, Dominio Zaragoza y Dominio Americana. Mientras que en el Talud Oeste se encuentran los Dominios Fortuna Norte y Fortuna Sur, tal como se aprecia en la ilustración 3 y 4.

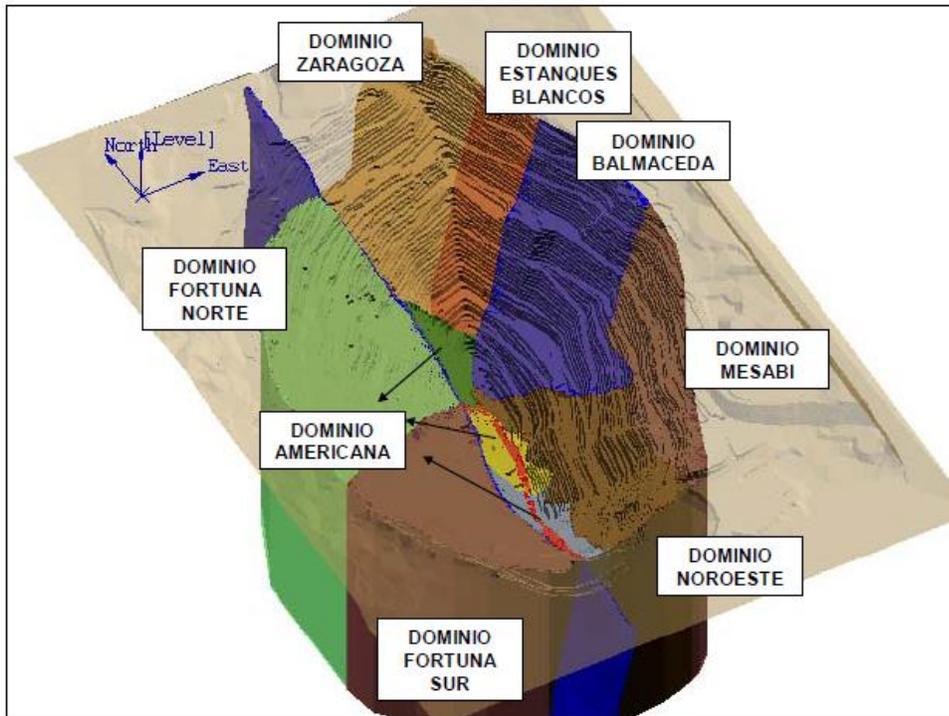


Figura 43 Dominios estructurales proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

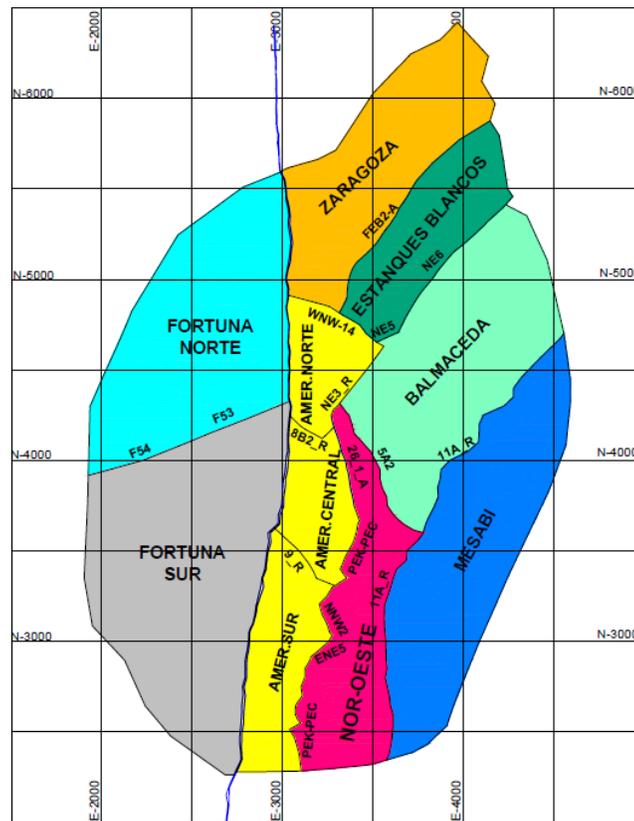


Figura 44 Límites Dominios Estructurales nivel 1841 con la identificación de Estructuras Limite.

## Anexo A.2 Equipos

### ➤ Sandvik LH621



Figura 45 Equipo Sandvik LH621.

El equipo Sandvik LH621 cuenta con una capacidad de 21 toneladas métricas, integrando las funciones de cargador y transportador subterráneo, entre sus ventajas más importantes se encuentran:

- La gran capacidad para maximizar la producción de la mina.
- La cabina del operador esta certificada con los sistemas ROPS y FOPS.
- Incorpora un sistema de control inteligente para diagnósticos rápidos y sencillos.
- Posee un motor con bajo nivel de emisiones.

A continuación se presentan sus especificaciones técnicas:

Dimensiones (Longitud – Ancho – Altura)	12 x 3,5 x 3 m
Capacidad	21 toneladas métricas
Rango del cucharón	8 – 10,7 m <sup>3</sup>
Peso (Operativo)	56.800 kg
Fuerza de arranque hidráulico – levantamiento	38.500 kg
Fuerza de arranque hidráulico – inclinación	35.100 kg
Potencia del motor	352 kW
Velocidad (con carga)	33,9 km/h

Tabla 11 Especificaciones técnicas del equipo Sandvik LH621.

Si bien su tonelaje nominal es de 21 toneladas, en base a los ajustes mensuales realizados por la GRMD, actualmente la capacidad real de estos equipos corresponde a 17,5 toneladas métricas. Estos datos técnicos son sumamente importantes a la hora de estimar las producciones que se obtendrán en distintos escenarios como se verá en capítulos futuros. Chuquicamata Subterránea cuenta con 8 de estos equipos.

➤ Sandvik LH514



*Figura 46 Equipo Sandvik LH514.*

Sandvik LH514 es un cargador subterráneo compacto con una capacidad de 14 toneladas métricas cuyas principales ventajas se detallan a continuación:

- El tamaño de la caja pequeño y el radio de giro permiten una fácil navegación.
- La cabina del operador está certificada con los sistemas ROPS y FOPS.
- Cuenta con un sistema de control inteligente para diagnósticos rápidos y sencillos.
- Motor con bajo nivel de emisiones.

A continuación se presentan los datos técnicos de este equipo:

Dimensiones (Longitud – Ancho – Altura)	10,5 x 3 x 3 m
Capacidad	14 toneladas métricas
Rango del cucharón	4,6 – 7 m <sup>3</sup>
Peso (Operativo)	38.100 kg
Fuerza de arranque hidráulico – levantamiento	28.000 kg
Fuerza de arranque hidráulico – inclinación	23.500 kg
Potencia del motor	256 kW
Velocidad (con carga)	32,7 km/h

*Tabla 12 Especificaciones técnicas del equipo Sandvik LH514.*

Como también ocurre con la pala anterior, GRMD realiza ajustes para determinar la capacidad efectiva de este equipo siendo de 10,2 toneladas métricas. Actualmente la mina cuenta con 2 de estos equipos.

➤ Caterpillar R3000H



*Figura 47 Equipo Caterpillar R3000H.*

Equipo de capacidad nominal de 20 toneladas, de diseño compacto, de alto rendimiento y mantenimiento sencillo. Si bien la GRMD determino que su capacidad real corresponde a 17,5 toneladas igual que los equipos Sandvik LH621, actualmente se obtienen tonelajes menores a estos, por lo cual hay una investigación en curso junto con Caterpillar para determinar la causa de esto.

Especificaciones técnicas:

- Fuerza de arranque: 28.020 kg.
- Peso bruto de la máquina: 80.410 kg.
- Tiempo total del ciclo hidráulico (elevación, descarga y bajada en vacío): 14,2 segundos.
- Cuarta marcha de avance: 31,6 km/h.
- Cuarta marcha atrás: 33,8 km/h.

Actualmente la mina cuenta con 4 de estos equipos, y se están haciendo las gestiones para la compra de más de 20 de estas palas.

## Anexo A.3 Resultado de las Simulaciones

Simulacion Bloques	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	55%	87%	92%	92%	92%	97%	97%	97%	100%	100%	100%	100%
Adherencia	10%	19%	29%	39%	48%	56%	64%	71%	80%	88%	94%	96%
Uniformidad	100%	96%	94%	97%	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produccion	1,803	3,290	5,093	6,738	8,365	9,503	10,885	12,425	13,755	15,033	16,240	16,783
Produccion Corregida	1,496	2,797	4,481	5,929	7,361	8,362	9,579	10,934	12,104	13,229	14,291	14,769
Produccion Dia	2,992	5,593	8,963	11,858	14,722	16,724	19,158	21,868	24,209	26,457	28,582	29,537

Tabla 13 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia por bloques.

Simulacion Optimizada	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	44%	70%	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Adherencia	10%	18%	29%	39%	49%	58%	66%	74%	80%	86%	91%	95%
Uniformidad	78%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produccion	1,715	3,220	5,145	6,808	8,470	10,098	11,498	12,863	13,930	14,998	15,820	16,520
Produccion Corregida	1,458	2,801	4,631	6,127	7,623	9,088	10,348	11,576	12,537	13,498	14,238	14,868
Produccion Dia	2,916	5,603	9,261	12,254	15,246	18,176	20,696	23,153	25,074	26,996	28,476	29,736

Tabla 14 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia optimizada.

Simulacion Actual	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	15%	26%	32%	43%	51%	60%	66%	72%	81%	87%	91%	95%
Adherencia	10%	19%	27%	35%	45%	52%	58%	65%	73%	80%	86%	91%
Uniformidad	7%	8%	32%	45%	35%	48%	58%	60%	83%	88%	92%	92%
Produccion	1,680	3,308	4,743	6,143	7,770	9,100	10,185	11,375	12,758	13,983	15,085	15,925
Produccion Dia	3,360	6,615	9,485	12,285	15,540	18,200	20,370	22,750	25,515	27,965	30,170	31,850

Tabla 15 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia actual.

Simulacion Actual + 120%	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	13%	22%	29%	39%	47%	52%	61%	67%	71%	79%	84%	89%
Adherencia	7%	15%	23%	31%	40%	47%	53%	59%	64%	71%	77%	83%
Uniformidad	8%	10%	18%	52%	47%	40%	53%	65%	65%	78%	92%	93%
Produccion	1,488	3,185	4,813	6,353	8,173	9,590	10,938	12,233	13,318	14,630	15,820	17,115
Produccion Dia	2,975	6,370	9,625	12,705	16,345	19,180	21,875	24,465	26,635	29,260	31,640	34,230

Tabla 16 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia actual más la extracción del 120% por PEX.

Simulacion Intercalada	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	18%	31%	39%	53%	62%	69%	74%	79%	84%	88%	91%	94%
Adherencia	10%	20%	27%	37%	46%	54%	61%	68%	75%	81%	85%	91%
Uniformidad	63%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	97%	98%
Produccion	1,768	3,448	4,795	6,528	8,050	9,363	10,605	11,935	13,020	14,123	14,910	15,838
Produccion Corregida	1,502	2,999	4,316	5,875	7,245	8,426	9,545	10,742	11,718	12,710	13,419	14,254
Produccion Dia	3,005	5,999	8,631	11,750	14,490	16,853	19,089	21,483	23,436	25,421	26,838	28,508

Tabla 17 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia intercalada.

Simulacion Intercalada + 120%	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Utilizacion	18%	30%	38%	48%	56%	64%	69%	74%	79%	84%	88%	90%
Adherencia	9%	17%	24%	33%	41%	49%	55%	62%	69%	75%	81%	85%
Uniformidad	30%	63%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	97%	93%
Produccion	1,715	3,448	4,935	6,720	8,348	10,185	11,375	12,810	14,105	15,558	16,678	17,518
Produccion Corregida	1,458	2,999	4,442	6,048	7,513	9,167	10,238	11,529	12,695	14,002	15,010	15,766
Produccion Dia	2,916	5,999	8,883	12,096	15,026	18,333	20,475	23,058	25,389	28,004	30,020	31,532

Tabla 18 Producción y calidad de extracción obtenida por hora con la simulación de la estrategia intercalada más la extracción del 120% por PEX.

## Anexo A.4 Simulación vs Realidad

18 a 24 Horas	Adherencia	Utilizacion	Uniformidad
Simulacion - Promedio	88%	100%	100%
Simulacion - Minimo	77%	100%	100%
Real	74%	92%	80%

Tabla 19 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 18 a 24 horas de operación.

12 a 18 Horas	Adherencia	Utilizacion	Uniformidad
Simulacion - Promedio	62%	100%	100%
Simulacion - Minimo	48%	100%	100%
Real	57%	87%	73%

Tabla 20 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 12 a 18 horas de operación.

6 a 12 Horas	Adherencia	Utilizacion	Uniformidad
Simulacion - Promedio	40%	100%	100%
Simulacion - Minimo	29%	100%	100%
Real	41%	64%	60%

Tabla 21 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen de 6 a 12 horas de operación.

<6 Horas	Adherencia	Utilizacion	Uniformidad
Simulacion - Promedio	15%	94%	100%
Simulacion - Minimo	0	0	0
Real	14%	37%	48%

Tabla 22 Calidad de extracción entre simulación y data histórica cuando se tienen menos de 6 horas de operación.

## Anexo A.5 Datos y Resultados Sobre el Estudio de la Dilución

Punto	Uniformidad	Dilucion [%]	% Extracción	Vecino 1	Vecino 2	Vecino 3	Vecino 4	Vecino 5	Vecino 6
01S25S	86%	15	33						
03S21S	85%	14	55				03S21N		
02S19N	79%	10	60	02S19S				03S18S	
02S19S	78%	4	63				02S19N		02S18S
02S23S	74%	5	48						02S22S
02S22S	72%	3	55			02S23S			
02S17N	70%	5	56		02S18S		03S17S		
02S18S	70%	1	60			02S19S		02S17N	
03S18S	69%	5	73		02S19N				03S17S
03S17S	68%	5	70	02S17N		03S18S			
02N19S	68%	9	56	01N19N					
03S21N	65%	20	62	03S21S				04S20S	
04S20N	62%	5	51	04S20S					
01N19N	55%	8	62				02N19S		
04S20S	54%	5	57		03S21N		04S20N		04S19S
04S19S	16%	2	32			04S20S			

Tabla 23 Puntos con dilución sobre la planificada a Enero del 2022.

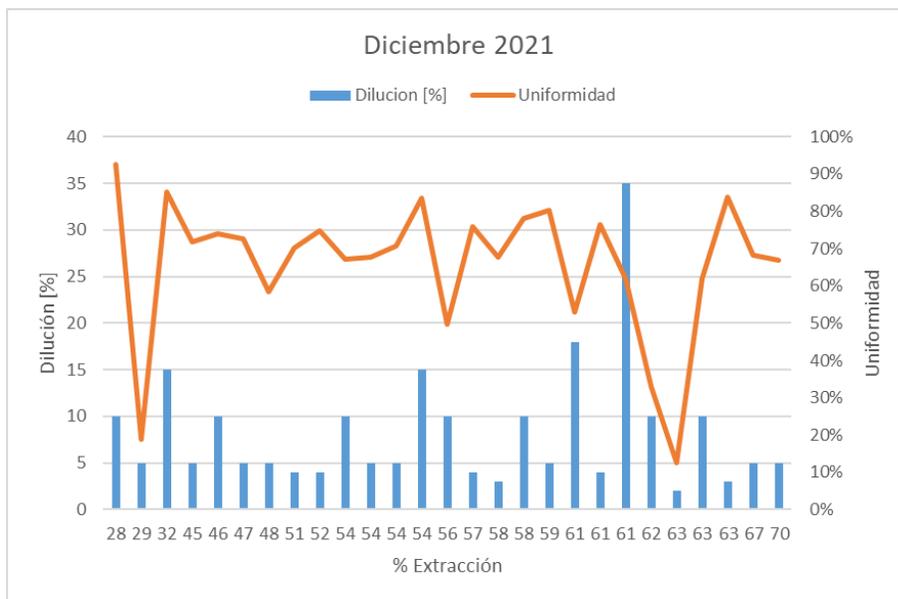


Figura 48 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en diciembre del 2021.

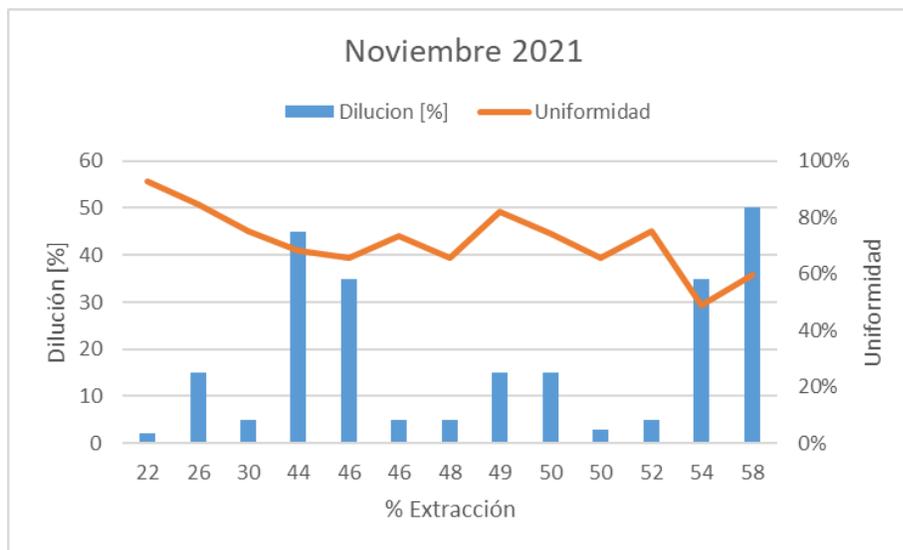


Figura 49 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en noviembre del 2021.

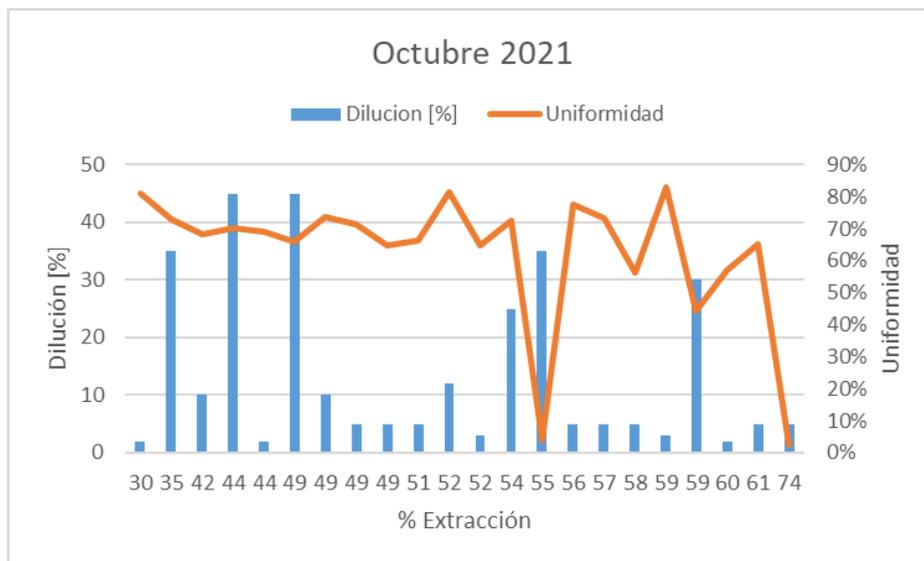


Figura 50 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en octubre del 2021.

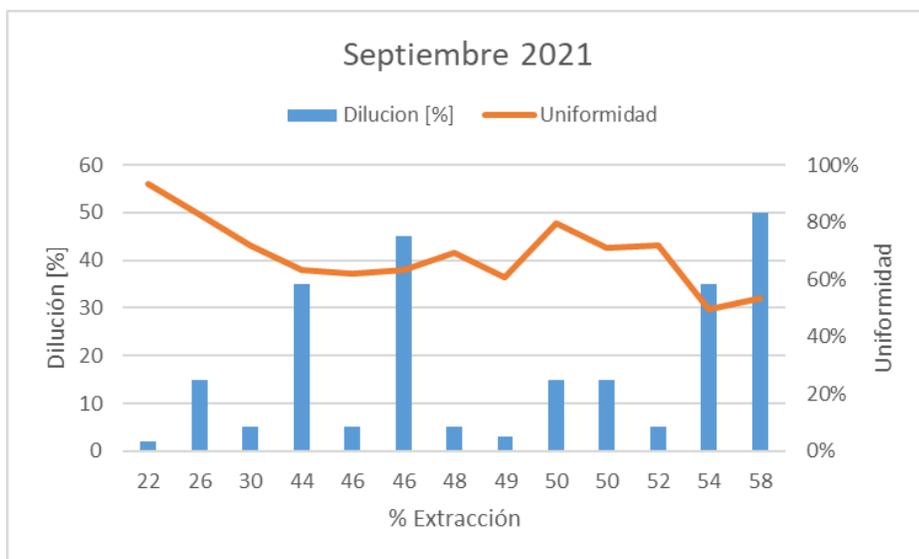


Figura 51 Correlación entre dilución, uniformidad y porcentaje de extracción por PEX en septiembre del 2021.

puntos	vecino 1	vecino 2	vecino 3	vecino 4	vecino 5	vecino 6	puntos	vecino 1	vecino 2	vecino 3	vecino 4	vecino 5	vecino 6
01508S			01509S	01508N	01507N		03506S	02506N	02507N	03507S	03506N	03505N	
01509S			01510S	01509N	01508N	01508S	03507S	02507N	02508N	03508S	03507N	03506N	03506S
01510S			01511S	01510N	01509N	01509S	03508S	02508N	02509N	03509S	03508N	03507N	03507S
01511S			01512S	01511N	01510N	01510S	03509S	02509N	02510N	03510S	03509N	03508N	03508S
01512S			01513S	01512N	01511N	01511S	03510S	02510N	02511N	03511S	03510N	03509N	03509S
01513S					01512N	01512S	03511S	02511N	02512N	03512S	03511N	03510N	03510S
01515S			01516S	01515N	01514N		03512S	02512N	02513N	03513S	03512N	03511N	03511S
01516S			01517S	01516N	01515N	01515S	03513S	02513N	02514N	03514S	03513N	03512N	03512S
01517S			01518S	01517N	01516N	01516S	03514S	02514N	02515N	03515S	03514N	03513N	03513S
01518S			01519S	01518N	01517N	01517S	03515S	02515N	02516N	03516S	03515N	03514N	03514S
01519S			01520S	01519N	01518N	01518S	03516S	02516N	02517N	03517S	03516N	03515N	03515S
01520S			01521S	01520N	01519N	01519S	03517S	02517N	02518N	03518S	03517N	03516N	03516S
01521S			01522S	01521N	01520N	01520S	03518S	02518N	02519N	03519S	03518N	03517N	03517S
01522S			01523S	01522N	01521N	01521S	03519S	02519N	02520N	03520S	03519N	03518N	03518S
01523S			01524S	01523N	01522N	01522S	03520S	02520N	02521N	03521S	03520N	03519N	03519S
01524S			01525S	01524N	01523N	01523S	03521S	02521N	02522N	03522S	03521N	03520N	03520S
01525S			01526S	01525N	01524N	01524S	03522S	02522N	02523N	03523S	03522N	03521N	03521S
01526S					01525N	01525S	03523S	02523N	02524N	03524S	03523N	03522N	03522S
01507N		01508S	01508N	02507S			03524S	02524N				03523N	03523S
01508N	01508S	01509S	01509N	02508S	02507S	01507N	03505N		03506S	03506N	04505S		
01509N	01509S	01510S	01510N	02509S	02508S	01508N	03506N	03506S	03507S	03507N	04506S	04505S	03505N
01510N	01510S	01511S	01511N	02510S	02509S	01509N	03507N	03507S	03508S	03508N	04507S	04506S	03506N
01511N	01511S	01512S	01512N	02511S	02510S	01510N	03508N	03508S	03509S	03509N	04508S	04507S	03507N
01512N	01512S	01513S		02512S	02511S	01511N	03509N	03509S	03510S	03510N	04509S	04508S	03508N
01514N			01515S	01515N	02514S		03510N	03510S	03511S	03511N	04510S	04509S	03509N
01515N	01515S	01516S	01516N	02515S	02514S	01514N	03511N	03511S	03512S	03512N	04511S	04510S	03510N
01516N	01516S	01517S	01517N	02516S	02515S	01515N	03512N	03512S	03513S	03513N	04512S	04511S	03511N
01517N	01517S	01518S	01518N	02517S	02516S	01516N	03513N	03513S	03514S	03514N	04513S	04512S	03512N
01518N	01518S	01519S	01519N	02518S	02517S	01517N	03514N	03514S	03515S	03515N	04514S	04513S	03513N
01519N	01519S	01520S	01520N	02519S	02518S	01518N	03515N	03515S	03516S	03516N	04515S	04514S	03514N
01520N	01520S	01521S	01521N	02520S	02519S	01519N	03516N	03516S	03517S	03517N	04516S	04515S	03515N
01521N	01521S	01522S	01522N	02521S	02520S	01520N	03517N	03517S	03518S	03518N	04517S	04516S	03516N
01522N	01522S	01523S	01523N	02522S	02521S	01521N	03518N	03518S	03519S	03519N	04518S	04517S	03517N
01523N	01523S	01524S	01524N	02523S	02522S	01522N	03519N	03519S	03520S	03520N	04519S	04518S	03518N
01524N	01524S	01525S	01525N	02524S	02523S	01523N	03520N	03520S	03521S	03521N	04520S	04519S	03519N
01525N	01525S	01526S		02525S	02524S	01524N	03521N	03521S	03522S	03522N	04521S	04520S	03520N
02507S	01507N	01508N	02508S	02507N	02506N		03522N	03522S	03523S	03523N	04522S	04521S	03521N
02508S	01508N	01509N	02509S	02508N	02507N	02507S	03523N	03523S	03524S		04523S	04522S	03522N
02509S	01509N	01510N	02510S	02509N	02508N	02508S	04505S	03505N	03506N	04506S	04505S	04504N	
02510S	01510N	01511N	02511S	02510N	02509N	02509S	04506S	03506N	03507N	04507S	04506N	04505N	04505S
02511S	01511N	01512N	02512S	02511N	02510N	02510S	04507S	03507N	03508N	04508S	04507N	04506N	04506S
02512S	01512N			02512N	02511N	02511S	04508S	03508N	03509N	04509S	04508N	04507N	04507S
02514S	01514N	01515N	02515S	02514N	02513N		04509S	03509N	03510N	04510S	04509N	04508N	04508S
02515S	01515N	01516N	02516S	02515N	02514N	02514S	04510S	03510N	03511N	04511S	04510N	04509N	04509S
02516S	01516N	01517N	02517S	02516N	02515N	02515S	04511S	03511N	03512N	04512S	04511N	04510N	04510S
02517S	01517N	01518N	02518S	02517N	02516N	02516S	04512S	03512N	03513N	04513S	04512N	04511N	04511S
02518S	01518N	01519N	02519S	02518N	02517N	02517S	04513S	03513N	03514N	04514S	04513N	04512N	04512S
02519S	01519N	01520N	02520S	02519N	02518N	02518S	04514S	03514N	03515N	04515S	04514N	04513N	04513S
02520S	01520N	01521N	02521S	02520N	02519N	02519S	04515S	03515N	03516N	04516S	04515N	04514N	04514S
02521S	01521N	01522N	02522S	02521N	02520N	02520S	04516S	03516N	03517N	04517S	04516N	04515N	04515S
02522S	01522N	01523N	02523S	02522N	02521N	02521S	04517S	03517N	03518N	04518S	04517N	04516N	04516S
02523S	01523N	01524N	02524S	02523N	02522N	02522S	04518S	03518N	03519N	04519S	04518N	04517N	04517S
02524S	01524N	01525N	02525S	02524N	02523N	02523S	04519S	03519N	03520N	04520S	04519N	04518N	04518S
02525S	01525N				02524N	02524S	04520S	03520N	03521N	04521S	04520N	04519N	04519S
02506N		02507S	02507N	03506S			04521S	03521N	03522N	04522S	04521N	04520N	04520S
02507N	02507S	02508S	02508N	03507S	03506S	02506N	04522S	03522N	03523N	04523S	04522N	04521N	04521S
02508N	02508S	02509S	02509N	03508S	03507S	02507N	04523S	03523N				04522N	04522S
02509N	02509S	02510S	02510N	03509S	03508S	02508N	04504N		04505S	04505N	01N04S		
02510N	02510S	02511S	02511N	03510S	03509S	02509N	04505N	04505S	04506S	04506N	01N05S	01N04S	04504N
02511N	02511S	02512S	02512N	03511S	03510S	02510N	04506N	04506S	04507S	04507N	01N06S	01N05S	04505N
02512N	02512S		02513N	03512S	03511S	02511N	04507N	04507S	04508S	04508N	01N07S	01N06S	04506N
02513N		02514S	02514N	03513S	03512S	02512N	04508N	04508S	04509S	04509N	01N08S	01N07S	04507N
02514N	02514S	02515S	02515N	03514S	03513S	02513N	04509N	04509S	04510S	04510N	01N09S	01N08S	04508N
02515N	02515S	02516S	02516N	03515S	03514S	02514N	04510N	04510S	04511S	04511N	01N10S	01N09S	04509N
02516N	02516S	02517S	02517N	03516S	03515S	02515N	04511N	04511S	04512S	04512N	01N11S	01N10S	04510N
02517N	02517S	02518S	02518N	03517S	03516S	02516N	04512N	04512S	04513S	04513N	01N12S	01N11S	04511N
02518N	02518S	02519S	02519N	03518S	03517S	02517N	04513N	04513S	04514S	04514N	01N13S	01N12S	04512N
02519N	02519S	02520S	02520N	03519S	03518S	02518N	04514N	04514S	04515S	04515N	01N14S	01N13S	04513N
02520N	02520S	02521S	02521N	03520S	03519S	02519N	04515N	04515S	04516S	04516N	01N15S	01N14S	04514N
02521N	02521S	02522S	02522N	03521S	03520S	02520N	04516N	04516S	04517S	04517N	01N16S	01N15S	04515N
02522N	02522S	02523S	02523N	03522S	03521S	02521N	04517N	04517S	04518S	04518N	01N17S	01N16S	04516N
02523N	02523S	02524S	02524N	03523S	03522S	02522N	04518N	04518S	04519S	04519N	01N18S	01N17S	04517N
02524N	02524S	02525S		03524S	03523S	02523N	04519N	04519S	04520S	04520N	01N19S	01N18S	04518N

Tabla 24 Detalle de cada PEX del MB central y sus vecinos. Parte 1.

puntos	vecino 1	vecino 2	vecino 3	vecino 4	vecino 5	vecino 6	puntos	vecino 1	vecino 2	vecino 3	vecino 4	vecino 5	vecino 6
04S20N	04S20S	04S21S	04S21N	01N20S	01N19S	04S19N	02N16N	02N16S	02N17S	02N17N	03N16S	03N15S	02N15N
04S21N	04S21S	04S22S	04S22N	01N21S	01N20S	04S20N	02N17N	02N17S	02N18S	02N18N	03N17S	03N16S	02N16N
04S22N	04S22S	04S23S		01N22S	01N21S	04S21N	02N18N	02N18S	02N19S	02N19N	03N18S	03N17S	02N17N
01N04S	04S04N	04S05N	01N05S	01N04N	01N03N		02N19N	02N19S	02N20S		03N19S	03N18S	02N18N
01N05S	04S05N	04S06N	01N06S	01N05N	01N04N	01N04S	03N03S	02N03N	02N04N	03N04S	03N03N	03N02N	
01N06S	04S06N	04S07N	01N07S	01N06N	01N05N	01N05S	03N04S	02N04N	02N05N	03N05S	03N04N	03N03N	03N03S
01N07S	04S07N	04S08N	01N08S	01N07N	01N06N	01N06S	03N05S	02N05N	02N06N	03N06S	03N05N	03N04N	03N04S
01N08S	04S08N	04S09N	01N09S	01N08N	01N07N	01N07S	03N06S	02N06N	02N07N	03N07S	03N06N	03N05N	03N05S
01N09S	04S09N	04S10N	01N10S	01N09N	01N08N	01N08S	03N07S	02N07N	02N08N	03N08S	03N07N	03N06N	03N06S
01N10S	04S10N	04S11N	01N11S	01N10N	01N09N	01N09S	03N08S	02N08N	02N09N	03N09S	03N08N	03N07N	03N07S
01N11S	04S11N	04S12N	01N12S	01N11N	01N10N	01N10S	03N09S	02N09N	02N10N	03N10S	03N09N	03N08N	03N08S
01N12S	04S12N	04S13N	01N13S	01N12N	01N11N	01N11S	03N10S	02N10N	02N11N	03N11S	03N10N	03N09N	03N09S
01N13S	04S13N	04S14N	01N14S	01N13N	01N12N	01N12S	03N11S	02N11N	02N12N	03N12S	03N11N	03N10N	03N10S
01N14S	04S14N	04S15N	01N15S	01N14N	01N13N	01N13S	03N12S	02N12N	02N13N	03N13S	03N12N	03N11N	03N11S
01N15S	04S15N	04S16N	01N16S	01N15N	01N14N	01N14S	03N13S	02N13N	02N14N	03N14S	03N13N	03N12N	03N12S
01N16S	04S16N	04S17N	01N17S	01N16N	01N15N	01N15S	03N14S	02N14N	02N15N	03N15S	03N14N	03N13N	03N13S
01N17S	04S17N	04S18N	01N18S	01N17N	01N16N	01N16S	03N15S	02N15N	02N16N	03N16S	03N15N	03N14N	03N14S
01N18S	04S18N	04S19N	01N19S	01N18N	01N17N	01N17S	03N16S	02N16N	02N17N	03N17S	03N16N	03N15N	03N15S
01N19S	04S19N	04S20N	01N20S	01N19N	01N18N	01N18S	03N17S	02N17N	02N18N	03N18S	03N17N	03N16N	03N16S
01N20S	04S20N	04S21N	01N21S	01N20N	01N19N	01N19S	03N18S	02N18N	02N19N	03N19S	03N18N	03N17N	03N17S
01N21S	04S21N	04S22N	01N22S	01N21N	01N20N	01N20S	03N19S	02N19N				03N18N	03N18S
01N22S	04S22N				01N21N	01N21S	03N02N		03N03S	03N03N	04N02S		
01N03N		01N04S	01N04N	02N03S			03N03N	03N03S	03N04S	03N04N	04N03S	04N02S	03N02N
01N04N	01N04S	01N05S	01N05N	02N04S	02N03S	01N03N	03N04N	03N04S	03N05S	03N05N	04N04S	04N03S	03N03N
01N05N	01N05S	01N06S	01N06N	02N05S	02N04S	01N04N	03N05N	03N05S	03N06S	03N06N	04N05S	04N04S	03N04N
01N06N	01N06S	01N07S	01N07N	02N06S	02N05S	01N05N	03N06N	03N06S	03N07S	03N07N	04N06S	04N05S	03N05N
01N07N	01N07S	01N08S	01N08N	02N07S	02N06S	01N06N	03N07N	03N07S	03N08S	03N08N	04N07S	04N06S	03N06N
01N08N	01N08S	01N09S	01N09N	02N08S	02N07S	01N07N	03N08N	03N08S	03N09S	03N09N	04N08S	04N07S	03N07N
01N09N	01N09S	01N10S	01N10N	02N09S	02N08S	01N08N	03N09N	03N09S	03N10S	03N10N	04N09S	04N08S	03N08N
01N10N	01N10S	01N11S	01N11N	02N10S	02N09S	01N09N	03N10N	03N10S	03N11S	03N11N	04N10S	04N09S	03N09N
01N11N	01N11S	01N12S	01N12N	02N11S	02N10S	01N10N	03N11N	03N11S	03N12S	03N12N	04N11S	04N10S	03N10N
01N12N	01N12S	01N13S	01N13N	02N12S	02N11S	01N11N	03N12N	03N12S	03N13S	03N13N	04N12S	04N11S	03N11N
01N13N	01N13S	01N14S	01N14N	02N13S	02N12S	01N12N	03N13N	03N13S	03N14S	03N14N	04N13S	04N12S	03N12N
01N14N	01N14S	01N15S	01N15N	02N14S	02N13S	01N13N	03N14N	03N14S	03N15S	03N15N	04N14S	04N13S	03N13N
01N15N	01N15S	01N16S	01N16N	02N15S	02N14S	01N14N	03N15N	03N15S	03N16S	03N16N	04N15S	04N14S	03N14N
01N16N	01N16S	01N17S	01N17N	02N16S	02N15S	01N15N	03N16N	03N16S	03N17S	03N17N	04N16S	04N15S	03N15N
01N17N	01N17S	01N18S	01N18N	02N17S	02N16S	01N16N	03N17N	03N17S	03N18S	03N18N	04N17S	04N16S	03N16N
01N18N	01N18S	01N19S	01N19N	02N18S	02N17S	01N17N	03N18N	03N18S	03N19S		04N18S	04N17S	03N17N
01N19N	01N19S	01N20S	01N20N	02N19S	02N18S	01N18N	04N02S	03N02N	03N03N	04N03S	04N02N	04N01N	
01N20N	01N20S	01N21S	01N21N	02N20S	02N19S	01N19N	04N03S	03N03N	03N04N	04N04S	04N03N	04N02N	04N02S
01N21N	01N21S	01N22S		02N21S	02N20S	01N20N	04N04S	03N04N	03N05N	04N05S	04N04N	04N03N	04N03S
02N03S	01N03N	01N04N	02N04S	02N03N			04N05S	03N05N	03N06N	04N06S	04N05N	04N04N	04N04S
02N04S	01N04N	01N05N	02N05S	02N04N	02N03N	02N03S	04N06S	03N06N	03N07N	04N07S	04N06N	04N05N	04N05S
02N05S	01N05N	01N06N	02N06S	02N05N	02N04N	02N04S	04N07S	03N07N	03N08N	04N08S	04N07N	04N06N	04N06S
02N06S	01N06N	01N07N	02N07S	02N06N	02N05N	02N05S	04N08S	03N08N	03N09N	04N09S	04N08N	04N07N	04N07S
02N07S	01N07N	01N08N	02N08S	02N07N	02N06N	02N06S	04N09S	03N09N	03N10N	04N10S	04N09N	04N08N	04N08S
02N08S	01N08N	01N09N	02N09S	02N08N	02N07N	02N07S	04N10S	03N10N	03N11N	04N11S	04N10N	04N09N	04N09S
02N09S	01N09N	01N10N	02N10S	02N09N	02N08N	02N08S	04N11S	03N11N	03N12N	04N12S	04N11N	04N10N	04N10S
02N10S	01N10N	01N11N	02N11S	02N10N	02N09N	02N09S	04N12S	03N12N	03N13N	04N13S	04N12N	04N11N	04N11S
02N11S	01N11N	01N12N	02N12S	02N11N	02N10N	02N10S	04N13S	03N13N	03N14N	04N14S	04N13N	04N12N	04N12S
02N12S	01N12N	01N13N	02N13S	02N12N	02N11N	02N11S	04N14S	03N14N	03N15N	04N15S	04N14N	04N13N	04N13S
02N13S	01N13N	01N14N	02N14S	02N13N	02N12N	02N12S	04N15S	03N15N	03N16N	04N16S	04N15N	04N14N	04N14S
02N14S	01N14N	01N15N	02N15S	02N14N	02N13N	02N13S	04N16S	03N16N	03N17N	04N17S	04N16N	04N15N	04N15S
02N15S	01N15N	01N16N	02N16S	02N15N	02N14N	02N14S	04N17S	03N17N	03N18N	04N18S	04N17N	04N16N	04N16S
02N16S	01N16N	01N17N	02N17S	02N16N	02N15N	02N15S	04N18S	03N18N				04N17N	04N17S
02N17S	01N17N	01N18N	02N18S	02N17N	02N16N	02N16S	04N01N		04N02S	04N02N			
02N18S	01N18N	01N19N	02N19S	02N18N	02N17N	02N17S	04N02N	04N02S	04N03S	04N03N			04N01N
02N19S	01N19N	01N20N	02N20S	02N19N	02N18N	02N18S	04N03N	04N03S	04N04S	04N04N			04N02N
02N20S	01N20N	01N21N	02N21S		02N19N	02N19S	04N04N	04N04S	04N05S	04N05N			04N03N
02N21S	01N21N				02N20S		04N05N	04N05S	04N06S	04N06N			04N04N
02N03N	02N03S	02N04S	02N04N	03N03S			04N06N	04N06S	04N07S	04N07N			04N05N
02N04N	02N04S	02N05S	02N05N	03N04S	03N03S	02N03N	04N07N	04N07S	04N08S	04N08N			04N06N
02N05N	02N05S	02N06S	02N06N	03N05S	03N04S	02N04N	04N08N	04N08S	04N09S	04N09N			04N07N
02N06N	02N06S	02N07S	02N07N	03N06S	03N05S	02N05N	04N09N	04N09S	04N10S	04N10N			04N08N
02N07N	02N07S	02N08S	02N08N	03N07S	03N06S	02N06N	04N10N	04N10S	04N11S	04N11N			04N09N
02N08N	02N08S	02N09S	02N09N	03N08S	03N07S	02N07N	04N11N	04N11S	04N12S	04N12N			04N10N
02N09N	02N09S	02N10S	02N10N	03N09S	03N08S	02N08N	04N12N	04N12S	04N13S	04N13N			04N11N
02N10N	02N10S	02N11S	02N11N	03N10S	03N09S	02N09N	04N13N	04N13S	04N14S	04N14N			04N12N
02N11N	02N11S	02N12S	02N12N	03N11S	03N10S	02N10N	04N14N	04N14S	04N15S	04N15N			04N13N
02N12N	02N12S	02N13S	02N13N	03N12S	03N11S	02N11N	04N15N	04N15S	04N16S	04N16N			04N14N
02N13N	02N13S	02N14S	02N14N	03N13S	03N12S	02N12N	04N16N	04N16S	04N17S	04N17N			04N15N
02N14N	02N14S	02N15S	02N15N	03N14S	03N13S	02N13N	04N17N	04N17S	04N18S				04N16N
02N15N	02N15S	02N16S	02N16N	03N15S	03N14S	02N14N							

Tabla 25 Detalle de cada PEX del MB central y sus vecinos. Parte 2.

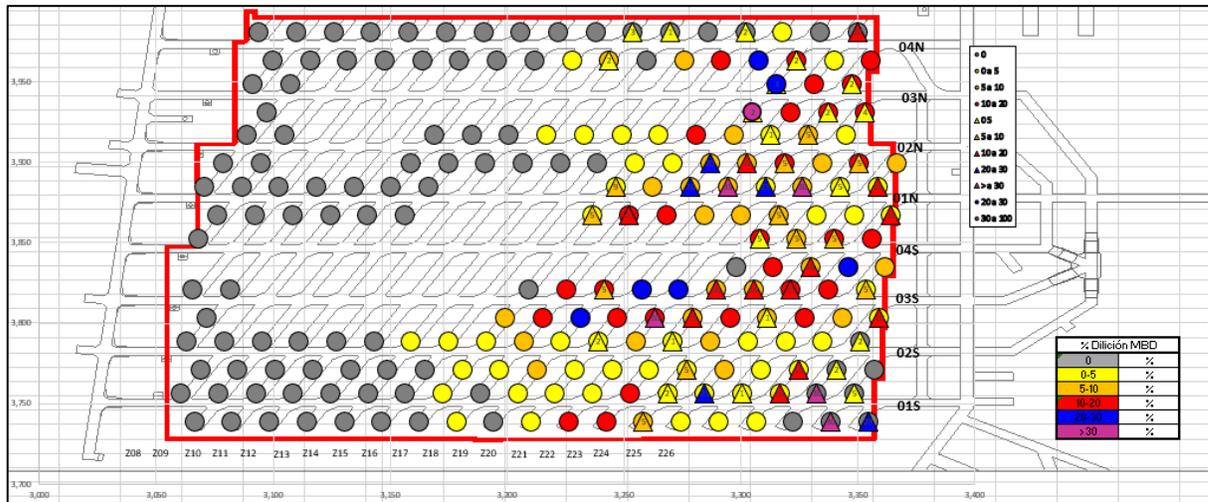


Figura 52 Mapa de dilución no planificada (Enero 2022).

## Anexo A.6 Cuantificación Económica

	Estrategia Combinada	Cobre Catodico	Ingresos	Mantener Estrategia Actual	Cobre Catodico	Ingresos
18 a 24 Horas	28,683	244	2,368,892	28683	244	2,368,892
12 a 18 Horas	19,499	166	1,610,397	20668	176	1,706,943
6 a 12 Horas	12,537	107	1,035,415	12758	109	1,053,667
<6 Horas	4,631	39	382,468	4743	40	391,718

Tabla 26 Calculo de ingresos por estrategia.

	Unidad	Ene 2022	Feb 2022	Mar 2022	Abr 2022	May 2022	Jun 2022	Jul 2022	Ago 2022	Sep 2022	Oct 2022	Nov 2022	Dic 2022	2022
<b>Días Operación</b>		<b>30</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>27.7</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>30.3</b>	<b>361.0</b>
Mineral Acarreado	tms	1,192,613	1,081,304	1,529,084	1,642,839	1,794,280	1,884,219	1,988,678	2,118,025	2,025,889	2,449,803	2,488,821	2,616,069	22,811,624
	ktpd	39.75	38.62	49.33	54.76	57.88	62.81	64.15	68.32	73.14	79.03	82.96	86.34	63.19
	%CuT	0.97	0.96	0.92	0.92	0.91	0.90	0.91	0.92	0.92	0.94	0.94	0.95	0.93
	%MoT	0.060	0.058	0.053	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.055
	tCuF	11,523	10,340	14,043	15,055	16,320	16,977	18,072	19,451	18,718	22,941	23,499	24,960	211,897
tMoF	718	631	809	893	933	955	1,021	1,109	1,089	1,381	1,449	1,544	12,533	
Extracción Mina	tms	967,613	871,304	1,296,584	1,417,839	1,561,780	1,659,219	1,756,178	1,885,525	1,818,139	2,217,303	2,263,821	2,388,819	20,104,124
	ktpd	32.25	31.12	41.83	47.26	50.38	55.31	56.65	60.82	65.64	71.53	75.46	78.84	55.69
	%CuT	1.07	1.07	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.99	1.00	0.99
	%MoT	0.065	0.063	0.056	0.057	0.054	0.052	0.053	0.054	0.056	0.058	0.060	0.061	0.057
	tCuF	10,398	9,290	12,880	13,930	15,157	15,852	16,910	18,289	17,679	21,778	22,374	23,824	198,360
tMoF	632	552	721	807	844	870	933	1,021	1,010	1,293	1,363	1,458	11,504	
Desarrollos	tms	225,000	210,000	232,500	225,000	232,500	225,000	232,500	232,500	207,750	232,500	225,000	227,250	2,707,500
	ktpd	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
	%CuT	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	%MoT	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
	tCuF	1,125	1,050	1,163	1,125	1,163	1,125	1,163	1,163	1,039	1,163	1,125	1,136	13,538
tMoF	86	80	88	86	88	86	88	88	79	88	86	86	1,029	
Area incorporada	m2	7,424	8,448	9,472	8,448	7,456	9,940	7,872	8,128	9,312	7,638	9,181	8,918	102,238
Area activa	m2	67,600	72,976	79,376	86,032	91,952	100,357	98,245	104,069	111,589	116,667	124,312	131,694	131,694
Area cerrada	m2	3,072	3,072	1,792	1,536	1,536	3,584	8,704	1,792	2,560	1,536	1,536	2,048	32,768
Velocidad de extracción	t/m2-d	0.588	0.529	0.621	0.637	0.629	0.626	0.653	0.657	0.655	0.677	0.667	0.656	0.480

Figura 53 Plan de producción del año 2022.

## Anexo A.7 Variables de Entrada para las simulaciones

Punto	Tiempo Promedio (segundos)						
01N03N	175	01S07N	176	02N03N	174	02S06N	159
01N04N	165	01S08N	167	02N03S	209	02S07N	156
01N04S	135	01S08S	151	02N04N	180	02S07S	160
01N05N	148	01S09N	150	02N04S	160	02S08N	166
01N05S	145	01S09S	150	02N08N	167	02S08S	162
01N06N	175	01S10N	143	02N08S	133	02S09N	140
01N06S	184	01S10S	134	02N09N	153	02S09S	153
01N07N	155	01S11N	131	02N09S	140	02S10N	122
01N07S	153	01S11S	172	02N10N	146	02S10S	140
01N08N	133	01S12N	138	02N10S	141	02S11N	136
01N08S	130	01S12S	157	02N11N	129	02S11S	139
01N09N	143	01S13S	120	02N12N	138	02S12N	133
01N09S	131	01S14N	134	02N12S	138	02S12S	121
01N14N	114	01S15N	123	02N13N	116	02S13N	124
01N14S	103	01S15S	129	02N13S	138	02S14N	113
01N15N	109	01S17N	120	02N14N	124	02S14S	124
01N15S	115	01S17S	117	02N14S	123	02S15N	116
01N16N	106	01S18N	112	02N15N	125	02S15S	119
01N16S	106	01S18S	100	02N15S	118	02S16N	110
01N17N	110	01S19N	115	02N16N	122	02S16S	109
01N17S	103	01S19S	115	02N16S	142	02S17N	106
01N18N	99	01S20N	110	02N17N	120	02S17S	117
01N18S	95	01S20S	95	02N17S	121	02S18N	108
01N19N	83	01S21N	110	02N18N	98	02S18S	99
01N19S	96	01S21S	127	02N18S	120	02S19N	106
01N20N	91	01S22N	95	02N19N	106	02S19S	108
01N20S	101	01S22S	96	02N19S	112	02S20N	117
01N21N	88	01S23N	119	02N20S	125	02S20S	94
01N21S	83	01S23S	100	02N21S	98	02S21N	110
01N22S	85	01S24N	74			02S21S	113
		01S24S	93			02S22N	119
		01S25N	73			02S22S	110
		01S25S	84			02S23N	81
		01S26S	88			02S23S	96
						02S24N	144
						02S24S	88
						02S25S	80

Tabla 27 Tiempos de ciclo promedio por cada PEX en calles 1N, 1S, 2N y 2S.

Punto	Tiempo Promedio (segundos)						
03N16N	176	03S14N	178	04N01N	201	04S19N	92
03N16S	198	03S15N	121	04N02N	199	04S19S	114
03N17N	158	03S15S	106	04N02S	165	04S20N	86
03N17S	153	03S16S	105	04N03N	193	04S20S	102
03N18N	140	03S17N	125	04N03S	169	04S21N	89
03N18S	150	03S17S	132	04N04N	188	04S21S	108
03N19S	165	03S18N	111	04N05S	157	04S22N	102
		03S18S	100	04N07S	140	04S22S	96
		03S19N	113	04N08S	145	04S23S	101
		03S19S	94	04N09N	149		
		03S20N	97	04N09S	133		
		03S20S	96	04N10N	127		
		03S21N	96	04N10S	128		
		03S21S	101	04N11N	156		
		03S22N	92	04N11S	128		
		03S22S	84	04N12N	145		
		03S23N	80	04N12S	153		
		03S23S	87	04N13N	149		
		03S24S	79	04N13S	132		
				04N14N	127		
				04N14S	114		
				04N15N	122		
				04N15S	107		
				04N16N	100		
				04N16S	110		
				04N17N	321		
				04N17S	104		
				04N18S	121		

Tabla 28 Tiempos de ciclo promedio por cada PEX en calles 3N, 3S, 4N y 4S.