



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

# SIMULACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE MINERAL SATURADO EN MINERÍA DE CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

**SEBASTIÁN IGNACIO ROSSELLÓ MARTÍNEZ**

PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FRANCISCO ARMIJO ALLENDES  
CARLOS CASTILLO CARO

SANTIAGO DE CHILE  
2017



## RESUMEN

El objetivo de esta memoria es proponer y evaluar distintas formas de operar equipos LHD tele-asistidos para extraer el agua/barro en minería de caving. Los eventos de agua/barro son definidos como una mezcla de material de granulometría fina con agua, que tiene un potencial para escurrir repentinamente de puntos de extracción u otra excavación subterránea. Estos eventos pueden presentarse como una amenaza a la seguridad en minas subterráneas, por lo que se prohíbe la extracción de sectores que presenten esta condición con LHD manuales (Samosir, et al, 2008).

La forma de operar será llamada “modelo operacional o estrategia de extracción de agua/barro” y es definido por las siguientes reglas operacionales que serán evaluadas en un nivel de producción: razón de mezcla en el pique de traspaso, número de turnos de estabilización y chequeo, número de equipos LHD tele-asistidos disponibles y velocidad de extracción mínima, máxima diaria y promedio mensual. El modelo operacional es evaluado en simulaciones de eventos discretos, para un sector representativo de 3 calles (41, 43 y 45) de la Fase II de la mina Diablo Regimiento y los periodos de simulación corresponden a un mes (30 días). Los resultados del modelo operacional corresponden al tonelaje mensual extraído, la uniformidad y la velocidad de extracción promedio para los puntos en estado seco, limitado y agua/barro.

La comparación del modelo de simulación con la realidad se realizó en base a las horas de trabajo por pala en un turno. Se utilizó la base de datos de extracción de octubre 2013 con extracción manual y el resultado fue de 5 horas con un error del 2% al predecir el tonelaje extraído del mes. Se selecciona este mes debido a que se extraen 81.377 toneladas, valor más cercano al promedio de extracción del sector evaluado que corresponden a 92.460 toneladas.

En una etapa posterior se realizó la comprobación del modelo donde se muestra que es capaz de predecir con un error de un  $5 \pm 6\%$  el tonelaje real extraído para meses futuros con la extracción de equipos LHD manuales. Las herramientas de planificación actuales presentan un error de un  $22 \pm 4\%$  para los periodos simulados. En base a este resultado se concluye que la simulación presenta un error cuatro veces menor que el sistema de planificación actual.

En una última etapa se realizó la evaluación de las estrategias de extracción de agua/barro con equipos LHD tele-asistidos. La principal ventaja de las estrategias propuestas son la posibilidad de recuperar reservas de agua/barro con velocidades de extracción promedio que van de 0,10 a 0,29 [t/m<sup>2</sup>-día]. Por otro lado, en base a un estudio de los eventos de agua/barro de mina Esmeralda, se determinó que la extracción por sobre un 50% de uniformidad disminuye el riesgo de un evento de agua/barro, los resultados del estudio muestran que con 2 LHD tele-asistidos ésta se encuentra en el rango de [48-78%]. Por lo tanto, se minimiza la ocurrencia de un evento de agua/barro.

Finalmente se concluye que el resultado más importante del estudio es una guía de planificación que permite escoger aquel modelo que minimice el riesgo de eventos de agua/barro y entregue los mejores resultados de acuerdo al tonelaje de mineral extraído.

Las principales recomendaciones de este estudio son:

- Colectar información de eventos de agua/barro para poder construir una matriz de riesgo de producir uno y ser implementada en la simulación.
- Implementar la simulación como herramienta de planificación que permita tener una mejor estimación de la producción que se puede alcanzar.

## ABSTRACT

The main purpose of this report is to propose and evaluate different ways of operating tele-assisted LHD equipment to extract water/mud in caving mining. Water/mud events are defined as a mixture of fine granulometry material with water, which has the potential risk to suddenly run out of the extraction points or any other subterranean excavation. These events can be presented as the main threat to safety in an underground mine. Thus prohibiting the extraction of sectors that present this condition with manual LHD equipment (Samosir, et al, 2008).

The way to operate will be called "operational model or strategy of extraction of water/mud" and is defined by the following operational rules: mixing ratio at the transfer point, number of stabilization and checking shifts, number of tele-assisted LHDs operating simultaneously and minimum, daily maximum and monthly average extraction speed. The operational model is evaluated in discrete event simulations for a representative sector of 3 streets (41, 43 and 45) of Fase II of the Diablo Regimiento mine and the simulation periods correspond to one month (30 days). The results of the operational model correspond to the monthly tonnage extracted, the uniformity and the average extraction speed for the points in dry, limited and water/mud state.

The comparison of the simulation model with the reality was made based on the hours of work by shovel in a shift. The extraction database of October 2013 with manual extraction was used and the result was 5 hours with a 2% error when predicting the tonnage extracted this month. This month is selected due to the extraction of 81,377 tonnes, the closest value to the average of extraction of the evaluated sector corresponding to 92,460 tonnes.

In a later stage, the model was verified, showing that it can be predicted with an error of  $5 \pm 6\%$  the actual tonnage extracted for future months with the extraction of manual LHD equipment. The current planning tools present an error between planned and actual tonnage extracted of  $22 \pm 4\%$  for the simulated periods. Based on this result it is concluded that the simulation presents an error four times lower than the current planning system.

In the last stage, the assessment of water/mud extraction strategies was carried out with tele-assisted LHD equipment. The main advantage of the proposed strategies is the possibility of recovering water/mud reserves with average extraction speeds ranging from 0.10 to 0.29 [t/m<sup>2</sup>-day]. On the other hand, based on a study of the Esmeralda mine water/mud events, it was determined that the extraction over 50% of uniformity decreases the risk of a water/mud event. The results of this study show that with 2 tele-assisted LHDs the uniformity is in the range of [48-78%]. Therefore, the occurrence of a water/mud event is minimized.

Finally, we concluded that the most important result of the study is a planning guide that allows choosing the operating model that minimizes the risk of water/mud events and provides the best results according to the tonnage extracted.

The main recommendations of this study are:

- Collect information from water/mud events to be able to build a risk matrix to predict these events and be implemented in the simulation.
- Implement the simulation as a planning tool that allows a better estimate of the production that can be achieved.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, papá, mamá, mi hermana Daniela y mis abuelos que me han dado su cariño y apoyo desde siempre en todas las metas que me he propuesto tanto fuera como dentro de la universidad.

A mis profesores y compañeros, en particular quienes me acompañaron al final de este proceso en BCTec y el BCLab. Gracias por compartir sus conocimientos y sabiduría.

A la comisión de esta memoria: Raúl C., Francisco A. y Carlos C. quienes se mantuvieron siempre presentes y me guiaron en la elaboración de este trabajo a través de sus conocimientos y respondiendo siempre a mis preguntas.

A todos ustedes les doy las gracias.

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	MOTIVACIÓN .....	1
1.2	OBJETIVOS DEL TRABAJO DE MEMORIA .....	4
1.2.1	Objetivo General .....	4
1.2.2	Objetivos Específicos .....	4
1.3	ALCANCES .....	4
1.4	METODOLOGÍA DEL TRABAJO .....	5
CAPÍTULO 2	ESTADO DEL ARTE .....	6
2.1	INTRODUCCIÓN .....	6
2.2	ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DIVISIÓN EL TENIENTE .....	6
2.2.1	Modelo operacional con equipos LHD manuales en DET .....	6
2.2.2	Modelo operacional empleado en la prueba de Fase I de DR .....	9
2.2.3	Análisis extracción tele-comandada en sectores DR y RENO .....	10
2.2.4	Análisis de eventos de barro en Bloque 1 – Esmeralda .....	12
2.3	ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DOZ DE FREEPORT .....	13
2.3.1	Estrategia de extracción de agua/barro .....	13
2.3.2	Razón de mezcla en piques de traspaso .....	14
2.4	RESUMEN DE LA EXTRACCIÓN EN DET Y DOZ .....	15
2.5	TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO .....	16
2.6	SIMULACIÓN DE PROCESOS .....	17
2.6.1	Elementos clave en un modelo de simulación .....	18
2.7	ANTECEDENTES DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO (PT FREEPORT, INDONESIA) .....	19
2.7.1	Objetivo del modelo de simulación de PT Freeport para DOZ y ESZ .....	19
2.7.2	Metodología para la construcción del modelo de simulación .....	19
2.7.3	Descripción del Sistema .....	20
2.7.4	Resultados de la simulación .....	21
2.7.5	Conclusiones del estudio (J. Botha, 2008) .....	21
2.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	22
CAPÍTULO 3	CASO DE ESTUDIO, SECTOR DIABLO REGIMIENTO .....	23
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....	26
4.1	INTRODUCCIÓN .....	26
4.2	METODOLOGÍA PROPUESTA .....	26
4.2.1	Etapa 1: Recopilación de antecedentes de extracción de material saturado .....	26
4.2.2	Etapa 2: Colección base de datos .....	26
4.2.3	Etapa 3: Generación del modelo conceptual .....	27
4.2.4	Etapa 4: Construcción modelo simulación .....	27
4.2.5	Etapa 5: Calibración y Comprobación del modelo de simulación .....	27
4.2.6	Etapa 6: Simulaciones del modelo operacional .....	27
4.2.7	Etapa 7: Análisis de resultados .....	27
4.2.8	Etapa 8: Documentación y Conclusiones .....	28
CAPÍTULO 5	MODELO CONCEPTUAL DE SIMULACIÓN .....	29
5.1	INFRAESTRUCTURA DE LA MINA .....	29

5.2	ENTIDADES OPERATIVAS .....	29
5.3	ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	30
5.3.1	Puntos de Extracción .....	30
5.3.2	Calles de Producción .....	31
5.3.3	Piques de traspaso .....	32
5.3.4	Mineral .....	32
5.3.5	Equipo LHD manual y tele-asistido .....	32
5.3.6	Operación de descuelgue y reducción secundaria sin extracción de agua/barro .....	35
5.3.7	Turnos de extracción, estabilización y chequeo para extracción de agua/barro.....	36
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	38
CAPÍTULO 6 CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL .....		39
6.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL .....	39
6.1.1	Componentes del modelo .....	40
6.2	DATOS DE ENTRADA PARA LA CALIBRACIÓN .....	41
6.2.1	Equipos LHD Manuales .....	42
6.2.2	Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños .....	42
6.2.3	Frecuencia de fallas y mantenencias de equipos, calles y piques .....	43
6.2.4	Velocidad de extracción planificada y máxima.....	44
6.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	45
6.3.1	Número de réplicas.....	48
6.3.2	Análisis de sensibilidad.....	49
6.3.3	Comprobación del modelo .....	49
6.3.4	Conclusiones .....	50
CAPÍTULO 7 SIMULACIONES DEL MODELO OPERACIONAL .....		51
7.1	SELECCIÓN SECTOR PARA LA SIMULACIÓN: FASE II, MINA DIABLO REGIMIENTO.....	51
7.2	REGLAS OPERACIONALES DE EXTRACCIÓN CON EQUIPOS LHD TELE-ASISTIDOS.....	52
7.3	PLAN DE SIMULACIONES .....	55
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	56
7.4.1	Tonelaje Mensual Extraído [Ton] .....	56
7.4.2	Uniformidad Del Tiraje [%].....	60
7.4.3	Velocidad De Extracción Media [t/m <sup>2</sup> -Día] .....	64
7.4.4	Tonelaje Mensual De Finos Extraídos [Ton] .....	70
7.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	72
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		74
CAPÍTULO 9 BIBLIOGRAFÍA.....		77
ANEXO A	CÁLCULO DE UNIFORMIDAD DEL TIRAJE .....	79
ANEXO B	DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN (OCTUBRE 2013 Y DICIEMBRE 2015)	80
ANEXO C	DISPERSIÓN PUNTO A PUNTO DE LA CALIBRACIÓN.....	82
ANEXO D	RESULTADOS DE RÉPLICAS.....	84
ANEXO E	CÁLCULO DE INTERVALO DE CONFIANZA Y DISTRIBUCIÓN T DE	85
STUDENT		
ANEXO F	ESTRATEGIAS DE TURNOS CON TELE-ASISTIDO .....	87
ANEXO G	CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL.....	89
ANEXO H	LEY DE CU % POR PUNTO DE EXTRACCIÓN .....	99

# I. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2017 (2016). .....	1
Figura 2: Tasa de declaración de puntos en estado agua/barro y limitados en función de la utilización de equipos tele-comando. (BCTEC, 2016).....	2
Figura 3: Principales etapas de la metodología propuesta.....	5
Figura 4: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2016 (2016). .....	7
Figura 5: Ubicación Fases DR – Estado de los Puntos. Mina Diablo Regimiento. 31/07/2012. (García P., 2012).....	9
Figura 6: Configuración de ubicación de puertas. (García, 2012).....	9
Figura 7: Histograma de la velocidad de extracción mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016).....	10
Figura 8: Velocidad de extracción en función de la humedad. Puntos extraídos mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016) .....	11
Figura 9: Esquematización sistema de traspaso – Buzones. Tradicional, IOZ con placa y DOZ sin placa directo a camiones. (BCTEC, 2016) .....	14
Figura 10: Componentes de un equipo LHD tele-comandado (Dadhich 2016). .....	16
Figura 11: Cañón de agua MacLean WC3. ....	17
Figura 12: Layout de producción (DOZ/ESZ). (J. Botha, 2008).....	20
Figura 13: Proceso de producción Diablo Regimiento. (Paillacan, 2010) .....	23
Figura 14: Ubicación Mina Diablo Regimiento (Pardo, C., Rojas, E. 2016).....	24
Figura 15: Etapas de la metodología de simulación propuesta. ....	26
Figura 16: Secuencia de extracción de equipos LHD manual y tele-asistido (no indica número de baldadas por punto). ....	34
Figura 17: Ejemplo de escenarios para determinar si debe intervenir la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria. ....	35
Figura 18: Modelamiento de asignación de equipos LHD tele-asistido a puntos de extracción... ..	37
Figura 19: Esquema del modelo de simulación construido de 3 calles de producción. ....	39
Figura 20: Estado de puntos de extracción calles 41, 43 y 45 mina Diablo Regimiento, octubre 2013. ....	41
Figura 21: Frecuencia de colgaduras de mineral grueso y sobre-tamaños. (Guerrero, 2014 y Hurtado, 2014).....	42
Figura 22: Fase II mina Diablo Regimiento, condición a diciembre del 2015.....	51
Figura 23: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido. ....	87
Figura 24: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos. ....	87
Figura 25: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido. ....	88
Figura 26: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos. ....	88
Figura 27: Vista de PROMODEL .....	89



## II. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Recuperación de tonelaje planificado en sectores DET (BCTEC, 2016).....	2
Tabla 2: Descripción de los estados de los puntos de extracción de la mina Esmeralda (BCTEC, 2016).....	7
Tabla 3: Velocidad de extracción aplicada a los puntos según su estado (análisis de la extracción del Bloque 1 de Esmeralda) (BCTEC, 2016) .....	8
Tabla 4: Uniformidad del PAM, CARTIR y tonelaje real extraído. Resultados basados en el análisis de la base de datos de extracción del Bloque 1 de Esmeralda. (BCTEC, 2016) .....	8
Tabla 5: Secuencia de extracción con 1 LHD-SA. (García, 2012).....	10
Tabla 6: Clasificación cualitativa de la humedad – GRMD-SGP-I-027-/2016 (Codelco, 2016)..	11
Tabla 7: Velocidades de puntos extraídos con LHD tele-comandos en función de la humedad observada en el punto. (BCTEC, 2016).....	11
Tabla 8: Uniformidad para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016) .....	12
Tabla 9: Velocidad máxima para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016).....	12
Tabla 10: Velocidades de extracción diaria [t/m2-día] con equipos tele-comando para DOZ. (BCTEC, 2016).....	13
Tabla 11: Resumen Modelos Operacionales. (BCTEC, 2016).....	15
Tabla 12: Descripción de tecnologías para la operación de equipos LHD (Dadhich, 2016). .....	16
Tabla 13: Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños según tipo de roca. (Toneladas entre eventos) (J. Botha, 2008) .....	20
Tabla 14: Resultados de simulación. (J. Botha, 2008) .....	21
Tabla 15: Remanente por calle, DR, Fase II (GRMD, CODELCO 2016). .....	24
Tabla 16: Cálculo del número crítico de puntos disponibles. ....	36
Tabla 17: Dos turnos de estabilización para un caso de 2 equipos LHD tele-asistidos. ....	36
Tabla 18: Componentes del modelo de simulación.....	40
Tabla 19: Características principales del equipo LHD de 13 yd3 (catálogo Sandvik Toro 0010). Se considera una distribución uniforme con el valor promedio más y menos un 20% de variación para cada parámetro.....	42
Tabla 20: Altura de columna extraída promedio para las calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento (Dic. 2015) .....	43
Tabla 21: Tiempos y tasa de falla de largaduras y reducción secundaria (Maass, 2013) y (Guerrero, 2014).....	43
Tabla 22: Frecuencias y tiempos de mantención de equipos LHD, calles y piques de traspaso (PPM mensual ES Bloque 1 y 2 mes de agosto-2015, Informe mensual de maquinarias Geovita Sept-Oct 2015).....	44
Tabla 23 Velocidad de extracción planificada y máxima para la operación manual. (PAM y CARTIR Octubre 2013, CODELCO) .....	44
Tabla 24: Tonelaje extraído simulado por sector de 3 calles para el mes de octubre 2013. ....	46
Tabla 25: Error del tonelaje extraído por punto simulado para el mes de octubre del 2013.....	47

Tabla 26: Resultados de replicaciones de la simulación. ....	48
Tabla 27: Resultados análisis de sensibilidad.....	49
Tabla 28: Tonelaje planificado y extraído para el mes de diciembre del 2015.....	52
Tabla 29: Reglas de operación con equipos LHD tele-asistidos. ....	52
Tabla 30: Continuación de la tabla anterior.....	53
Tabla 31: Continuación de la tabla anterior.....	54
Tabla 32: Dos turnos de estabilización para el caso de 2 equipos tele-asistidos.....	54
Tabla 33: Estrategias de extracción con equipos LHD tele-asistidos.....	55
Tabla 34 Resultados de tonelaje total extraído (Puntos operativos, barro y total). ....	59
Tabla 35: Uniformidad del tiraje [%]. ....	63
Tabla 36: Velocidad de extracción [t/m2-día].....	67
Tabla 37: Resumen de resultados para 2 turnos de estabilización. ....	68
Tabla 38: Resumen de resultados para 1 turno de estabilización. ....	69
Tabla 39: Fino de Cu extraído en el periodo simulado para cada estrategia [ton]. ....	70
Tabla 40: Datos de entrada por punto de extracción. (Calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento) .....	80
Tabla 41: Nomenclatura de los estados de puntos de extracción. ....	81
Tabla 42: Tonelaje extraído por la simulación, para cada replica con distinta semilla.....	84
Tabla 43: Distribución de t-student. ....	86
Tabla 44: Ley de Cu % por punto de extracción. ....	99

### III. ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tonelaje extraído simulado versus horas de trabajo de palas por turno.....	45
Gráfico 2: Error respecto del tonelaje real extraído por punto [%] v/s horas de trabajo por pala [h]. .....	46
Gráfico 3: Comparación punto a punto entre tonelaje simulado por punto y tonelaje extraído real. .....	47
Gráfico 4: Histograma de réplicas de la simulación.....	48
Gráfico 5: Comprobación del modelo de simulación.....	50
Gráfico 6: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Turnos de estabilización.....	56
Gráfico 7: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m2-día]. .....	57
Gráfico 8: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Número de equipos LHD tele-asistidos.....	57
Gráfico 9: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).....	58
Gráfico 10: Uniformidad del tiraje [%] v/s Turnos de estabilización. ....	60
Gráfico 11: Uniformidad del tiraje [%] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m2-día]....	60
Gráfico 12: Uniformidad del tiraje [%] v/s Número de LHD tele-asistidos. ....	61
Gráfico 13: Uniformidad del tiraje [%] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo). ....	62
Gráfico 14: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización. ....	64
Gráfico 15: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización (caso 1 LHD tele-asistido). ....	65

Gráfico 16: Velocidad de extracción media [ton/m <sup>2</sup> -día] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m <sup>2</sup> -día].	65
Gráfico 17: Velocidad de extracción media [ton/m <sup>2</sup> -día] v/s Número de equipos LHD teleasistidos.	66
Gráfico 18: Velocidad de extracción media [ton/m <sup>2</sup> -día] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).	66
Gráfico 19: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 1 y 2 horas de trabajo de palas por turno.	82
Gráfico 20: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 3 y 4 horas de trabajo de palas por turno.	82
Gráfico 21: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 4,5 y 5,5 horas de trabajo de palas por turno.	83
Gráfico 22: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 6 y 7 horas de trabajo de palas por turno.	83

#### **IV. ÍNDICE DE FÓRMULAS**

Fórmula 1: Número crítico de puntos disponibles para la entrada de la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria.	35
Fórmula 2: Cálculo del índice de uniformidad [%].	79
Fórmula 3: Intervalo de confianza para una distribución normal.	85

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

División El Teniente (DET) es un complejo minero metalúrgico de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). Esta mina subterránea es explotada por el método Block/Panel Caving y está ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes, entre los 2.200 y los 3.200 metros sobre el nivel del mar. Está distante a 54 kilómetros de Rancagua, capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Es la mina subterránea de cobre más grande del mundo y entre sus sectores productivos destacan las minas Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y Teniente 4 Sur.

Históricamente en la Mina El Teniente han ocurrido eventos de agua/barro. El evento de agua/barro es definido como una mezcla de material de granulometría fina con agua, que tiene un potencial para escurrir repentinamente (bombeo) de los puntos de extracción o cualquier otra excavación subterránea (Samosir, et al, 2008).

La extracción de material saturado (con alta humedad) puede producir eventos de agua/barro y la compactación de material fino. Estos eventos afectan la productividad del sector en donde ocurren y la seguridad de las personas que se encuentren en el sector.

Diablo Regimiento, se encuentra ubicado bajo sectores anteriormente ya explotados y con ocurrencia de agua/barro. En el año 2009 fueron reportados los primeros puntos con presencia de agua/barro que hasta hoy han sido responsables por pérdidas considerables de reservas extraíbles (5,5 Mt) y también precursores de bombeos.

## 1.1 MOTIVACIÓN

En la actualidad División El Teniente presenta sectores de producción con mineral saturado. Para evaluar el riesgo de ingreso de agua/barro se utiliza la matriz de criticidad (Figura 1, GRMD-SGP-I-027-2016). Un punto con humedad 4 es considerado en estado agua/barro, este es cerrado y los puntos que se encuentran en torno a este son limitados.

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% ≤ G(x) < 50%	50% ≤ G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad cualitativa	H0: Seco	Normal	Normal	Normal	Normal
	H1: Levemente húmedo	Normal	Normal	Observación	Observación
	H2: Húmedo	Normal	Observación	Observación	Observación
	H3: Barro incipiente	Normal	Observación	Alerta	Alerta
	H4: Barro	Observación	Alerta	Alerta	Alerta
	A: Agua	Normal	Normal	Observación	Alerta

Figura 1: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2017 (2016).

Actualmente el sector Diablo Regimiento es extraído con equipos LHD manuales. Entre los años 2010 y 2012 División El Teniente realizó la extracción de este tipo de material (agua/barro) en modo de pruebas de extracción con equipos LHD tele-comandos en los sectores Diablo Regimiento y RENO.

Tabla 1: Recuperación de tonelaje planificado en sectores DET (BCTEC, 2016)

Sector	Plan PND 2016	Tonelaje Planificado [Mt]	Recuperación del Tonelaje Planificado [%]	Tonelaje Recuperado antes de la entrada de agua/barro [Mt]
ES(B1)	Ene-2016 / Nov-2037	14,0	80%	11,2
DR	Ene-2016 / Dic-2029	61,6	91%	56,1
RENO	Ene-2016 / May-2027	80,9	77%	62,2

En un estudio realizado por la empresa consultora BCTEC se determinó que la no extracción de agua/barro se traduce en una disminución de las reservas futuras, por ejemplo Diablo Regimiento planificó 61,6 Mt de las cuales solo se pueden recuperar 56,1 Mt debido al ingreso de agua/barro (ver Tabla 1).

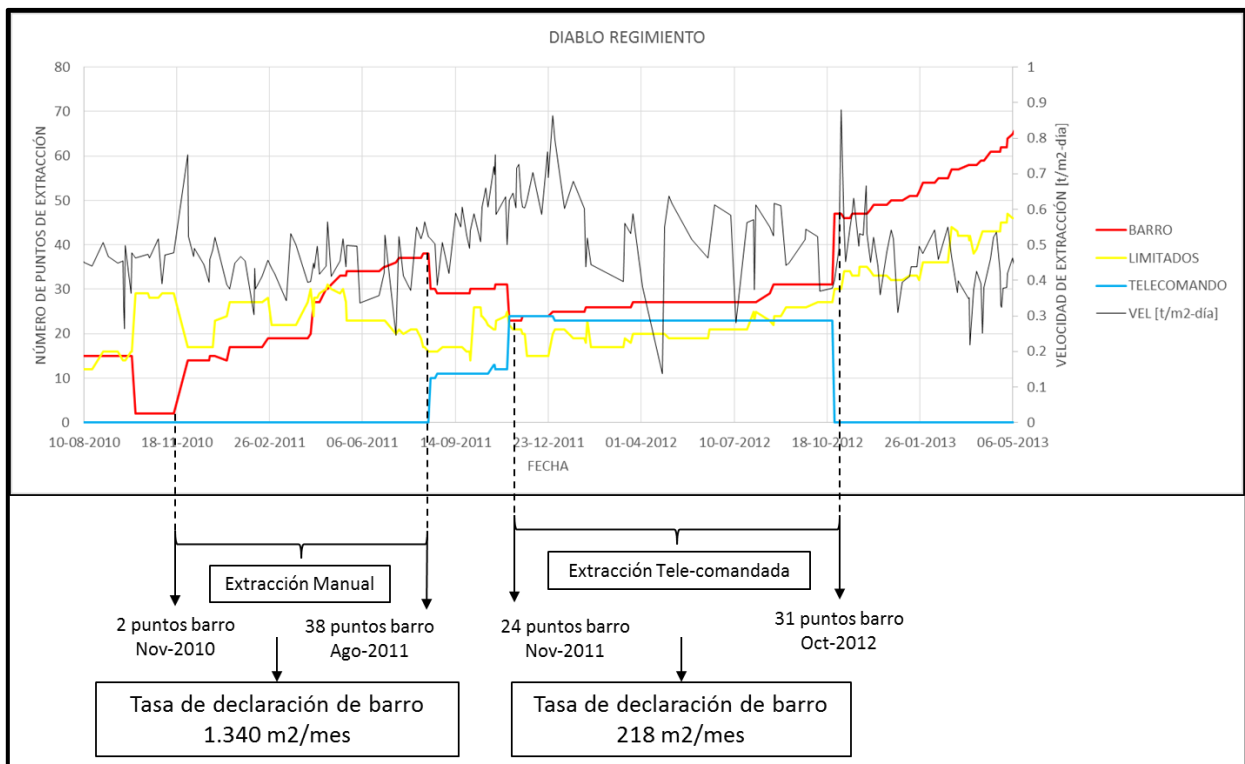


Figura 2: Tasa de declaración de puntos en estado agua/barro y limitados en función de la utilización de equipos tele-comando. (BCTEC, 2016)

La Figura 2 muestra en color rojo el número de puntos en estado de agua/barro (eje izquierdo) versus la fecha (eje abscisa), mientras que la línea celeste muestra el número de puntos que es extraído con equipos tele-comando. Como se puede observar entre noviembre del año 2011 y octubre del año 2012 hubo extracción de 22 puntos con tele-comando, en este periodo la tasa de declaración de puntos en estado agua/barro en la Fase I de mina Diablo Regimiento, fue seis veces menor a la de extracción manual registrada entre noviembre del año 2010 y agosto del año 2011. A partir de esto, se concluye que la extracción con equipos tele-comando genera mejores condiciones de drenaje en la mina y la recuperación de mineral desde sectores que se encuentran abandonados por la presencia de agua/barro. (García P., 2012 & BCTEC, 2016)

División El Teniente está estudiando la aplicación de equipos LHD tele-asistidos, para la extracción de mineral saturado de puntos de extracción en sectores bajo condición de agua/barro (entre estos Esmeralda, Diablo Regimiento y RENO). En esta memoria se propone un modelo operacional para la extracción con equipos LHD tele-asistidos de sectores bajo condición de agua/barro. El modelo operacional debe definir cómo hacer la extracción de agua/barro respondiendo las siguientes interrogantes:

1. ¿Cuáles son las reglas operacionales de extracción que deben ser consideradas en la extracción tele-asistida de agua/barro en un sector bajo condición de agua/barro?
2. ¿Cuál es la velocidad de extracción mínima y máxima [ $t/m^2$ -día] permitida para la extracción de agua/barro mediante equipos tele-asistidos?
3. ¿Cuál es la uniformidad del tiraje [%] mínima permitida para la extracción de agua/barro mediante equipos tele-asistidos?
4. ¿Cuál es la razón entre mineral seco y húmedo de la mezcla de mineral que debe ser vaciado en los piques de traspaso, para no provocar bombeos de agua/barro en el nivel de transporte?
5. ¿Cuándo (turno/día) y dónde (puntos/calle) deben operar los equipos LHD tele-asistidos y manuales?
6. ¿Qué cantidad de reservas podrían ser extraídas?
7. ¿Cuál es la mejor estrategia de extracción en términos económicos?

En esta memoria se presenta la evaluación técnica de distintos modelos operacionales, propuestos para la extracción tele-asistida de agua/barro de un sector bajo condición de agua/barro. El modelo operacional será evaluado en simulaciones de eventos discretos. Las estrategias de tiraje con equipos LHD tele-asistidos son evaluadas para un sector representativo de 3 calles (41, 43 y 45) de la Fase II de la mina Diablo Regimiento.

## 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE MEMORIA

### 1.2.1 Objetivo General

Proponer y evaluar a nivel conceptual, estrategias para la extracción con equipos LHD tele-asistidos de mineral saturado (agua/barro).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Definir estrategias de tiraje de mineral saturado, de acuerdo a las variables o reglas operacionales de corto plazo, que determinan la extracción de un sector bajo condición de agua/barro.
- ii. Construir un modelo de simulación de un sector de producción representativo, que incorpore la extracción con LHD tele-asistidos del mineral saturado.
- iii. Calibrar y comprobar el modelo de simulación respecto de un caso real de extracción, mediante la comparación con las bases de datos de extracción histórica, para evaluar la capacidad predictiva del modelo de simulación.
- iv. Realizar un análisis de resultados en términos de: velocidad de extracción promedio, mínima y máxima alcanzada [t/m<sup>2</sup>-día], uniformidad del tiraje promedio, mínima y máxima [%] y producción [ton/mes].

## 1.3 ALCANCES

Los alcances de este trabajo de memoria se indican a continuación:

- Las estrategias propuestas y su evaluación son conceptuales para un sector de 3 calles de producción y consideran un periodo de tiempo de un mes. Las estrategias de tiraje propuestas se encuentran a escala diaria.
- Las simulaciones corresponden al sistema de manejo de materiales del nivel de producción, es decir, desde el carguío del mineral mediante el LHD hasta su vaciado en el pique de traspaso.
- Los escenarios que serán evaluados se encuentran limitados por las siguientes variables de la planificación: número de equipos LHD asignados por módulo de 3 calles, número de turnos sin ingreso de personal, razón de mezcla entre mineral seco y húmedo y velocidad mínima y máxima de extracción.
- La información recopilada pertenece a la Fase II de mina Diablo Regimiento, además este sector presenta ingreso de agua/barro por lo cual se utilizará como caso de estudio para esta memoria.

## 1.4 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Para alcanzar los objetivos planteados en este estudio, se plantea la siguiente metodología. A continuación, se enlistan los pasos a seguir:

**Etapa 1<sup>1</sup>:** Recopilación de información bibliográfica para la investigación, esto es:

- Modelo operacional para la extracción tele-asistida de agua/barro en otras faenas.
- Estudios previos de aplicaciones de modelos de simulación para la producción minera.
- Base de datos de extracción histórica, estado de los puntos de extracción, área de los puntos de extracción, layout del nivel de producción, y tiempos y frecuencias de coladuras y mantenciones.

**Etapa 2<sup>2</sup>:** Formulación de metodología para la creación del modelo de simulación, basado en el nivel de producción de mina Diablo Regimiento.

**Etapa 3<sup>3</sup>:** Aplicación de la metodología utilizando un software de eventos discretos:

- Definir variables de entrada, salida y alcances del modelo de simulación.
- Generar el modelo de simulación que considere interferencias y la aplicación de las distintas estrategias de extracción.
- Calibrar y comprobar el modelo de simulación.
- Determinar los escenarios que serán simulados.
- Simular los distintos escenarios para las estrategias de extracción.

**Etapa 4:** Análisis de resultados de la simulación<sup>4</sup>.

**Etapa 5:** Definir cuál es el modelo operacional a seguir<sup>5</sup>.

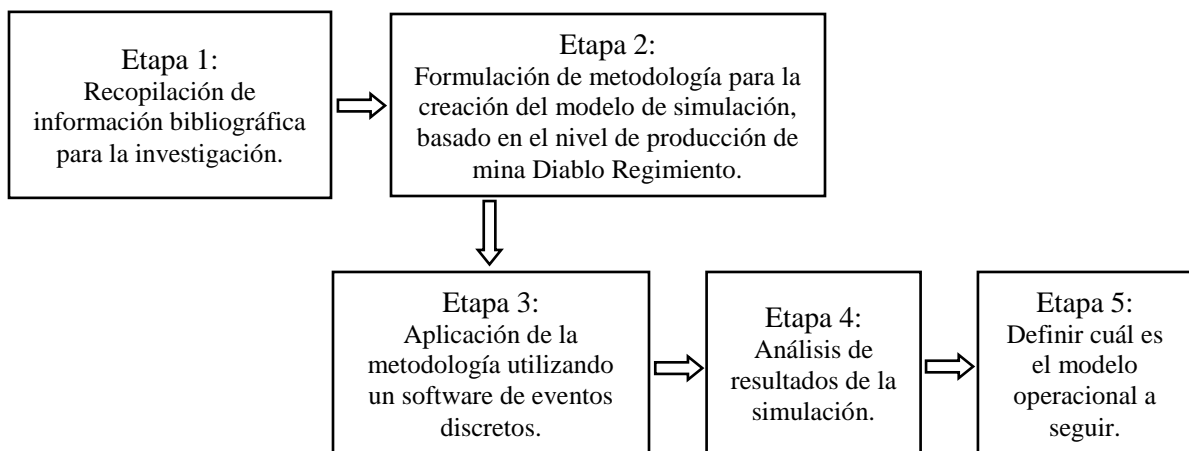


Figura 3: Principales etapas de la metodología propuesta.

<sup>1</sup> CAPÍTULO 2, 3 y 6

<sup>2</sup> CAPÍTULO 4 y 5

<sup>3</sup> CAPÍTULO 6 y 7

<sup>4</sup> CAPÍTULO 7

<sup>5</sup> CAPÍTULO 8



## CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realizará una revisión de la utilización que han tenido los equipos LHD tele-comando y su impacto en la extracción de agua/barro en DET, DOZ e IOZ. También se realizará una revisión de las tecnologías que existen y modelos de simulación realizados para la extracción de agua/barro.

Actualmente División El Teniente ha realizado pruebas para la extracción de agua/barro en la Fase 1 de Diablo Regimiento y RENO (Reservas Norte). En base a estos estudios se han realizado análisis estadísticos, los cuales se presentarán en este capítulo.

Las minas IOZ y DOZ de Freeport también realizan la extracción de material saturado, principalmente, debido a las condiciones climáticas que suceden en su entorno. En este capítulo se incluirá un resumen de la experiencia operacional bajo condición de agua/barro empleada en IOZ y DOZ, y un análisis a la extracción histórica realizada con LHD tele-comando.

En relación a las tecnologías que existen para la extracción de agua/barro se presenta una tabla comparativa.

### 2.2 ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DIVISIÓN EL TENIENTE

Se realizará un resumen del modelo operacional actual empleado en la División El Teniente, además de estudios preliminares para la extracción de agua/barro en la Fase I de Diablo Regimiento, resultados de las pruebas con LHD tele-comandados realizadas en RENO y Diablo Regimiento y los análisis estadísticos realizados a los eventos de agua/barro ocurridos en el Bloque 1 de Esmeralda.

#### 2.2.1 Modelo operacional con equipos LHD manuales en DET

Actualmente División El Teniente extrae todos los sectores con equipos LHD manuales, excepto en Pilar Norte, donde la extracción se realiza mediante equipos tele-comando. En la extracción manual, la humedad del mineral extraído va desde seco a una humedad de 3, según la matriz de criticidad empleada en la División (GRMD-SGP-I-027-2017). Un mineral con humedad 4 es considerado en estado agua/barro, éste no es extraído y los puntos de extracción son cerrados (ver Figura 4). División El Teniente clasifica en distintos estados los puntos de extracción (ver Tabla 2).

Según el análisis del Plan Mensual del Bloque 1 de Esmeralda, para abril 2016 la velocidad planificada para los puntos en estado régimen es de 0,62 [t/m<sup>2</sup>-día] y 0,26 [t/m<sup>2</sup>-día] para puntos limitados como promedio mensual. Si bien estas son las velocidades planificadas, en la Tabla 3 se muestran las velocidades de extracción reales aplicadas a puntos del Bloque 1 de Esmeralda según su estado. Los resultados están basados en el análisis de la base de datos histórica de extracción del Bloque 1 a escala diaria.

Tabla 2: Descripción de los estados de los puntos de extracción de la mina Esmeralda (BCTEC, 2016)

Estado	Descripción
<b>Barro o barrera (agua/barro)</b>	Puntos de extracción que han sido declarados en estado agua/barro porque su condición de humedad y % de finos hacen riesgosa la extracción de mineral. Estos puntos no son extraídos una vez que son declarados. Un punto es declarado barro cuando su humedad categórica medida en el punto y el porcentaje de finos observado indican que el punto se encuentra en la zona roja (alerta) de la matriz de criticidad actual utilizada por DET (GRMD-SGP-I-027-2017, ver Figura 4).
<b>Limitado</b>	Puntos de extracción del entorno inmediato de los puntos con barro, el cual tienen como objetivo limitar el movimiento del barro hacia puntos que se encuentran operativos. Son declarados en estado limitado una vez que un punto de su entorno (entorno definido por 6 puntos de extracción) es declarado en estado barro. Estos puntos se extraen a una velocidad de extracción menor a los puntos operativos. Estos puntos pueden o no presentar gran cantidad de finos o humedad.
<b>Quiebre</b>	Puntos de extracción operativos; Puntos los cuales su porcentaje de extracción de la columna de mineral in-situ no supera el 30% (se consideran en quiebre, donde la conexión a topografía o un nivel superior antiguo se produce al 30% de extracción acumulada de la columna in-situ). Tienen una menor velocidad de extracción que los puntos en régimen.
<b>Régimen</b>	Puntos de extracción operativos; Puntos los cuales su porcentaje de extracción de la columna de mineral in-situ ha superado el 30% (la conexión ya se ha producido). Tienen una mayor velocidad de extracción que los puntos en quiebre.

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% ≤ G(x) < 50%	50% ≤ G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad cualitativa	H0: Seco	Normal	Normal	Normal	Normal
	H1: Levemente húmedo	Normal	Normal	Observación	Observación
	H2: Húmedo	Normal	Observación	Alerta	Alerta
	H3: Barro incipiente	Observación	Alerta	Alerta	Alerta
	H4: Barro	Alerta	Alerta	Alerta	Alerta
	A: Agua	Normal	Normal	Observación	Alerta

	Normal
	Observación
	Alerta

Figura 4: Matriz de criticidad, GRMD-SGP-I-027-2016 (2016).

Tabla 3: Velocidad de extracción aplicada a los puntos según su estado (análisis de la extracción del Bloque 1 de Esmeralda) (BCTEC, 2016)

<b>Estado</b>	<b>Velocidad de extracción [t/m2-día]</b>	<b>Toneladas/día</b>	<b>Baldadas/día</b>
<b>Barro o barrera</b>	0	0	0
<b>Limitado</b>	0,11 ± 0,08	38 ± 27	5,4 ± 3,8
<b>Quiebre</b>	0,41 ± 0,48	140 ± 116	20,0 ± 16,2
<b>Régimen</b>	0,58 ± 0,49	198 ± 168	28,2 ± 24,0

Además de la velocidad de extracción, existe el concepto de “uniformidad del tiraje”, este se puede definir como la razón entre la diferencia de tonelaje extraído entre un punto de extracción y la media de sus vecinos, en un periodo determinado (ver ANEXO A). La uniformidad del tiraje no es considerada en la construcción del PAM (planificación mensual), del CARTIR (planificación diaria) ni en la operación. Sin embargo, cuando se analiza la uniformidad desde la base de datos los valores difieren para cada caso. En la Tabla 4 se muestra el porcentaje de uniformidad para cada caso. El análisis está realizado para la extracción histórica de los puntos de extracción del Bloque 1 de Esmeralda. Se puede observar que en promedio el PAM se construye con una mayor uniformidad (89%), en comparación al CARTIR (52%) y al tonelaje real extraído en la operación (31%).

Tabla 4: Uniformidad del PAM, CARTIR y tonelaje real extraído. Resultados basados en el análisis de la base de datos de extracción del Bloque 1 de Esmeralda. (BCTEC, 2016)

	<b>PAM</b>	<b>CARTIR</b>	<b>EXTRAÍDO</b>
mín.	72%	26%	13%
máx.	100%	94%	50%
promedio	89%	52%	31%
desviación	12%	22%	14%

Respecto de la mezcla de mineral que se vacía en el pique de vaciado, actualmente no existe un procedimiento establecido que indique cuál debe ser la razón de mezcla entre mineral seco y húmedo debido a que hoy no se hace la extracción agua/barro. En cuanto al descuelgue de puntos en mineral grueso tampoco existe un procedimiento establecido. Actualmente no existe un procedimiento establecido que indique cuál es la estrategia más efectiva (conversación con personal de DET, 2016).

## 2.2.2 Modelo operacional empleado en la prueba de Fase I de DR

En el 2012 se realizó una prueba de extracción tele-comandada de barro en la Fase I de Diablo Regimiento. En la Figura 5 se observa la ubicación de la Fase I en el layout del nivel de producción y la condición de los puntos de extracción a la fecha del 31/07/2012.

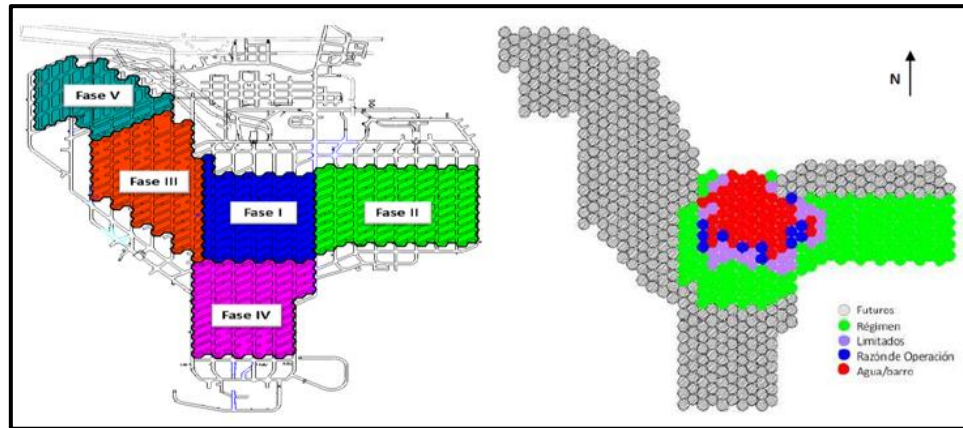


Figura 5: Ubicación Fases DR – Estado de los Puntos. Mina Diablo Regimiento. 31/07/2012.  
(García P., 2012)

P. García (2012) definió las siguientes reglas operacionales para la extracción con equipos tele-comandos:

- Baldadas por punto de extracción: se propone tasas de extracción de 4 baldadas/día por punto de extracción (0,1 ton/m<sup>2</sup>-día).
- Mezcla de materiales razón de 1:1 (material seco / material húmedo).
- Cantidad de equipos: el material húmedo va a ser cargado y transportado por 1 LHD tele-comandado por calle.
- Puertas de aislamiento: instalaciones de puertas de contención al norte y al sur. Nueve puertas conectadas directamente a las calles de producción y dos puertas de aislamiento conectadas al acceso al chancador de la Fase I (Figura 6).

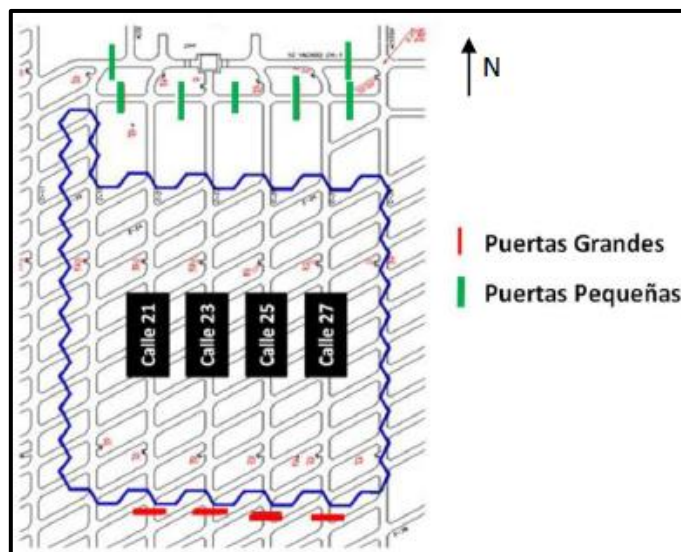


Figura 6: Configuración de ubicación de puertas. (García, 2012)

- Secuencia de extracción por turnos: para poder lograr un procedimiento de extracción de agua/barro, se establece una secuencia de extracción por calle/turno (Tabla 5), es decir, se estableció secuencialmente que un turno se destine a la producción, un turno para la descolgadura y dos turnos para la estabilización. El turno de estabilización se define como un periodo en el cual no hay entrada de personas o equipos en el sector de extracción de agua/barro, este periodo sin movimiento es considerado por el riesgo de escurrimiento.

Tabla 5: Secuencia de extracción con 1 LHD-SA. (García, 2012)

Días	Turnos	Calle - 21	Calle - 23	Calle - 25	Calle - 27
Día 1	A	Producción			
	B	Largadura Punto	Producción		
	C	Estabilización	Largadura Punto	Producción	
Día 2	A	Estabilización	Estabilización	Largadura Punto	Producción
	B	Producción	Estabilización	Estabilización	Largadura Punto
	C	Largadura Punto	Producción	Estabilización	Estabilización

	Producción
--	------------

	Largadura Punto
--	-----------------

	Estabilización
--	----------------

### 2.2.3 Análisis extracción tele-comandada en sectores DR y RENO

A continuación, se muestra el análisis a la extracción de mineral saturado (agua/barro) en los sectores Diablo Regimiento y Reservas Norte entre los años 2010-2012 con LHD tele-comandados. En la Figura 7 se muestra un gráfico de distribución de frecuencia relativa de la velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día] aplicadas a puntos en las minas DR y NN por día. Se puede observar que la máxima extracción que se aplicó a un punto en un día fue de 1,63 [t/m<sup>2</sup>-día], la mínima fue de 0,002 [t/m<sup>2</sup>-día], mientras que el promedio y la desviación fueron de 0,18 ± 0,32 [t/m<sup>2</sup>-día].

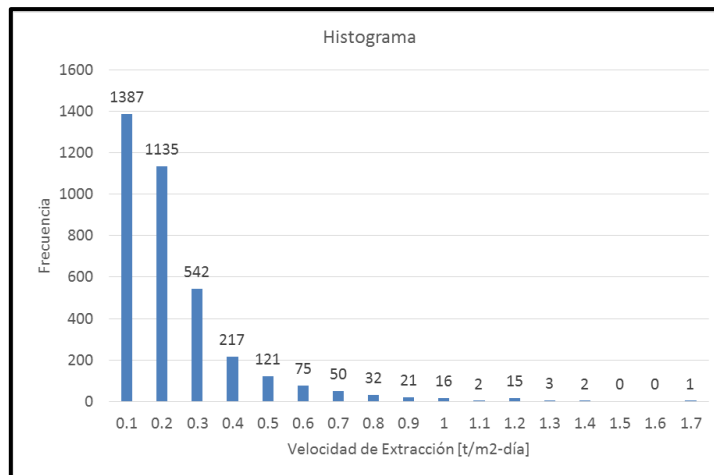


Figura 7: Histograma de la velocidad de extracción mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016)

En la Figura 8 se muestra la velocidad de extracción de los puntos extraídos con equipos LHD tele-comandos en función de la humedad observada (Tabla 6).

Tabla 6: Clasificación cualitativa de la humedad – GRMD-SGP-I-027-/2016 (Codelco, 2016)

Humedad	Descripción
0	Punto de extracción con mineral seco.
1	Punto de extracción con baja humedad.
2	Punto de extracción con humedad.
3	Punto de extracción con barro incipiente.
4	Punto de extracción con Barro.

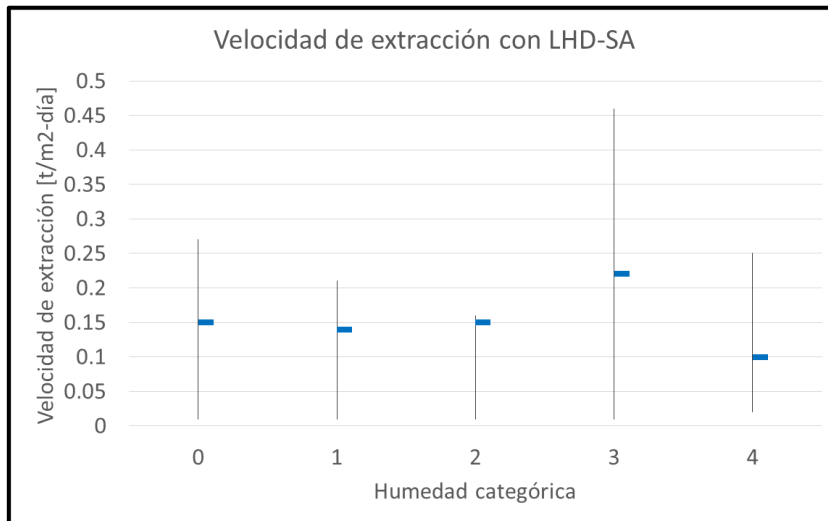


Figura 8: Velocidad de extracción en función de la humedad. Puntos extraídos mediante equipos LHD tele-comandos. (BCTEC, 2016)

Se puede observar que para humedades 0, 1, 2, 3 y 4 las velocidades de extracción presentan un valor similar, en torno a 0,15-0,20 [t/m2-día]. La alta desviación para cada caso no permite establecer diferencias claras. En la Tabla 7 se muestra los valores mínimos, máximo, promedio y desviación de las velocidades en función de la humedad observada.

Tabla 7: Velocidades de puntos extraídos con LHD tele-comandos en función de la humedad observada en el punto. (BCTEC, 2016)

Humedad	Velocidad de Extracción [t/m2-día]		
	Mínimo	Máximo	Promedio
<b>0</b>	0,01	1,16	0,15 ± 0,12
<b>1</b>	0,01	0,56	0,14 ± 0,07
<b>2</b>	0,01	1,63	0,15 ± 0,01
<b>3</b>	0,01	1,32	0,22 ± 0,24
<b>4</b>	0,02	1,17	0,10 ± 0,15

Los resultados obtenidos muestran que no existe una correlación entre la humedad observada y la velocidad de extracción, en puntos extraídos mediante equipos LHD tele-comandos.

## 2.2.4 Análisis de eventos de barro en Bloque 1 – Esmeralda

Basado en el estudio realizado por BCTEC “Análisis de escurrimientos/bombeos del Bloque 1 Sector Esmeralda BCTEC-DET-GMIN-A/B-001”, se realizó un análisis de la uniformidad del tiraje [%] y velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día] para los puntos donde se han registrado escurrimientos y bombeos de barro. La Tabla 8 muestra que los puntos de extracción que sólo son declarados barro registran una uniformidad del 42%, mayor a la registrada por los puntos que presentaron escurrimiento, 34%, y mayor que los puntos que registraron eventos de bombeo de barro, 23%.

Tabla 8: Uniformidad para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016)

	Puntos estado barro		Puntos Escurrimientos		Puntos Bombeo	
	Uniforme	Aislado	Uniforme	Aislado	Uniforme	Aislado
Número de datos	12		5		2	
Promedio	42%	58%	34%	66%	23%	77%

La Tabla 9 muestra como la velocidad máxima aplicada aumenta a medida que aumenta la gravedad del evento, declaración barro – escurrimiento – bombeo. Se puede observar que velocidades sobre 1,5 [t/m<sup>2</sup>-día] pueden provocar eventos de barro, ya sean escurrimiento o bombeos.

Tabla 9: Velocidad máxima para puntos declarados barro, escurrimientos y bombeos. (BCTEC, 2016)

	Puntos estado barro	Puntos Escurrimientos	Puntos Bombeo
Número de datos	12	5	2
Velocidad de extracción máxima registrada [t/m <sup>2</sup> -día]	1,5	2,9	4,2

Este análisis sugiere que las variables de uniformidad del tiraje [%] y velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día] están relacionadas con la ocurrencia de eventos de barro, escurrimiento y bombeos. Este análisis fue hecho para los escurrimientos y bombeos en un sector extraído con LHD manual. Ambas variables deben ser consideradas como parte del modelo operacional para la extracción de barro mediante equipos tele-asistidos.

## 2.3 ANTECEDENTES DE EXTRACCIÓN EN DOZ DE FREEPORT

Deep Ore Zone (DOZ) es el tercer lift del complejo minero Grasberg, ubicado en Indonesia. Una de las particularidades de las operaciones PF Freeport Indonesia es que extraen en condiciones de agua/barro, principalmente, debido a las condiciones climáticas y de roca que se suceden en el entorno. Para el caso propio de DOZ, las reglas operacionales han evolucionado a medida que se fue explotando un nivel superior, IOZ (Intermediate Ore Zone), del cual se han obtenido ventajas y desventajas en los resultados operacionales.

### 2.3.1 Estrategia de extracción de agua/barro

En los puntos de extracción de DOZ existe material arcilloso, que al estar expuesto a caudales de agua o una alta humedad se producen “stuck muck” (colgadas de barro), que evitan el flujo de mineral. Ante estos eventos, los procedimientos de descuelgue o largadura de puntos con explosivos no es efectivo. Operacionalmente en DOZ se ha establecido que si los stuck muck permanecen por más de dos semanas, se corre el riesgo de contaminar con barro puntos adyacentes a medida que se expande el área activa del panel. Uno de los procedimientos aplicados para lograr la largadura de los puntos, es usar cañones de agua, el cual inyecta agua a presión permitiendo el colapso de los finos en una primera instancia y evitando la formación de stuck mucks.

La estrategia general adoptada por DOZ PT Freeport, es la extracción continua de los puntos, independientemente de la condición seca o agua/barro, la única condición que puede determinar el cierre de un punto está dado por la ley. Para los puntos declarados como agua/barro se extraen por lo menos 6 baldadas por turno, adicionalmente, la estrategia de extracción de barro se basa en dividir el panel en diferentes sectores, en donde cada sector será extraído en un turno del día, permitiendo mantener una extracción uniforme.

Esto ha permitido a DOZ, en el mes de diciembre-2013, extraer una cantidad de 1,57 Mton de mineral con equipos tele-comandos, lo que equivale a una producción diaria de 52.405 tpd.

Una revisión de la extracción histórica de DOZ de Freeport (faena que opera bajo condición de agua/barro) indica que las velocidades de extracción de barro promedio alcanzadas con equipos tele-comandados están en el rango de  $0,35 \pm 0,46$  [t/m<sup>2</sup>-día] con un máximo de 10,36 [t/m<sup>2</sup>-día] (ver Tabla 10).

Tabla 10: Velocidades de extracción diaria [t/m<sup>2</sup>-día] con equipos tele-comando para DOZ.  
(BCTEC, 2016)

<b>Parámetro</b>	<b>DOZ de Freeport</b>
<b>Valor mínimo</b>	0,001
<b>Valor máximo</b>	10,36
<b>Promedio ± desviación</b>	$0,35 \pm 0,46$



### 2.3.2 Razón de mezcla en piques de traspaso

Samosir (2008) plantea la necesidad de realizar una mezcla de material seco con material húmedo (razón 1:3) en el pique de traspaso para evitar los escurrimientos en los buzones del nivel de transporte, adicionalmente, un cambio en el diseño del buzón retirando las “flow chains” por puertas de acero, que evitan los posibles bombeos o escurrimientos. Este procedimiento según Wilson (2016) fue implementado, pero los resultados no fueron del todo ventajosos. La cantidad de material seco extraído era insuficiente para mantener la razón de mezcla 1:3, provocando en los puntos secos un tiraje aislado, que inducía la migración de material tipo agua/barro hacia puntos de extracción secos.

Una de las soluciones a estos problemas fue la implementación del procedimiento de descarga directa, a través de los piques de traspaso, a los camiones del nivel de transporte, lo que significa quitar el sistema de almacenamiento que proporciona el pique de traspaso-buzón (Figura 9). Sin embargo, esto a su vez traería un problema en la planificación de los camiones lo que significa una baja en el rendimiento del sistema Wilson (2016).

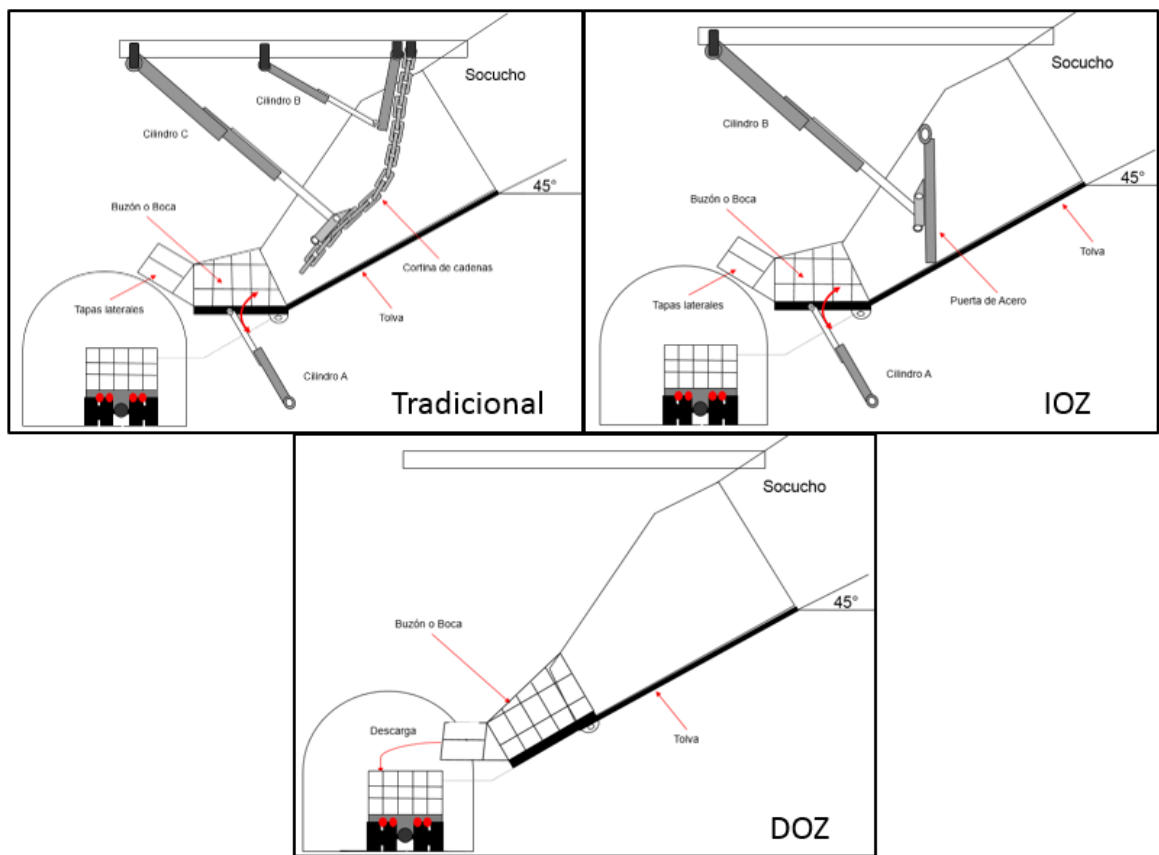


Figura 9: Esquematación sistema de traspaso – Buzones. Tradicional, IOZ con placa y DOZ sin placa directo a camiones. (BCTEC, 2016)

## 2.4 RESUMEN DE LA EXTRACCIÓN EN DET Y DOZ

La Tabla 11 muestra un resumen comparativo de los modelos operacionales empleado por PT Freeport, las pruebas realizadas en Diablo Regimiento y la situación actual de la División El Teniente.

Tabla 11: Resumen Modelos Operacionales. (BCTEC, 2016)

<b>Reglas Operacionales</b>	<b>Fase II, Diablo Regimiento (2015) (Manual)</b>	<b>DOZ Freeport (Tele-comandado)</b>	<b>DET, Prueba en Diablo Regimiento (Tele-comandado)</b>
<b>Extracción de barro</b>	No	Si	Si
<b>Uniformidad diaria planificada [%]</b>	Min : 0% Max: 100% Media: 44 ± 33 % (Nov 2015) 40 ± 34 % (Dic 2015)	Sin información	Sin información
<b>Velocidad de Extracción [t/m2-día] (basado en el análisis de extracción histórica)</b>	Máx: 1,7 t/m2-día Mín: 0 t/m2-día Media: 0,31 ± 0,05 t/m2-día	Máx: 10,36 t/m2-día Mín: 0 t/m2-día Media: 0,35 ± 0,46 t/m2-día	Máx: 1,63 t/m2-día Mín: 0 t/m2-día Media: 0,18 ± 0,32 t/m2-día.
<b>Mezcla (seco/húmedo) sistema de traspaso</b>	No ha sido establecida ya que no se extrae agua/barro	IOZ: 1:3 DOZ: 1:6 o directo a camiones	1:1
<b>Largadura de puntos (equipo/estrategia)</b>	P&T/Largadura de colgaduras de mineral grueso	Cañones de agua/ No más de 2 semanas sin extracción en un punto	No Data
<b>Extracción tele-comando por módulos y turno/día</b>	Toda la extracción se realiza con equipos manuales	Sectorización por calles de producción	Extracción de 4 calles con un equipo LHD tele-comando, se esperan dos turnos para estabilización de la calle.

## 2.5 TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO

A continuación se describen las tecnologías existentes para la operación de equipos LHD (Tabla 12).

Tabla 12: Descripción de tecnologías para la operación de equipos LHD (Dadhich, 2016).

Manual	El operador se ubica dentro de la máquina realizando todas las tareas de manera manual.
Remoto	El operador se encuentra afuera, en la vecindad de la máquina, realizando todas las tareas a través de un control remoto.
Tele-comando	El operador se encuentra en una sala de control lejos de la zona de carguío y realiza todas las tareas a través de un sistema remoto de audio y video que envía la información desde la máquina (ver Figura 10).
Tele-asistido	La máquina realiza algunas tareas de manera automática, el operador interviene en las tareas donde se requiere la supervisión de personal.
Autónomo	La máquina realiza todas las tareas por cuenta propia. El operador solo se presenta en situaciones en que se deben entregar instrucciones de alto nivel, hacerse cargo de emergencias o manejar fallas.

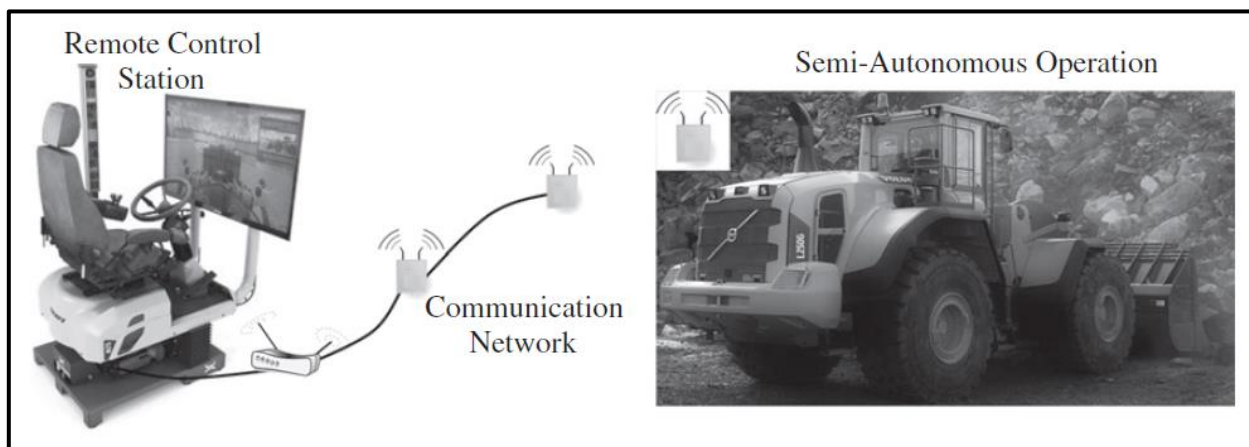


Figura 10: Componentes de un equipo LHD tele-comandado (Dadhich 2016).

En relación al descuelgue de finos, este se puede realizar con los llamados cañones de agua. Según indica MacLean, su equipo WC3 (Figura 11) puede expulsar 2.800 litros por minuto, con una capacidad de 11.000 litros. Además este equipo es seguro ya que no expone el personal a la caída de roca debido a su sistema de operación remota. Este equipo puede ser operado por una persona y es capaz de reducir hasta un 40% de las colgaduras de finos, el resto debe ser reducido con ayuda de perforación y tronadura.



Figura 11: Cañón de agua MacLean WC3.

## 2.6 SIMULACIÓN DE PROCESOS

La simulación es la imitación de un proceso o sistema de la vida real en el tiempo y ésta implica la generación y observación de una historia artificial, para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está representando (Banks, 1999).

Entre los distintos tipos de simulación que se pueden utilizar está la simulación de eventos discretos, la cual se basa en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Este proceso consiste en relacionar los diferentes eventos que pueden cambiar el estado del sistema por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas.

La simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas que se deben tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado. Dentro de las ventajas más comunes que ofrece la simulación se encuentran (García *et al*, 2006):

- Es una buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, lo cual puede ser riesgoso y/o costoso.
- Permite probar varios escenarios en busca de las mejores condiciones de trabajo de los procesos que se simulan.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución cuando se quiere relacionar distintas variables y conocer su impacto en una variable final.

Y dentro de las desventajas más relevantes se encuentran:

- A pesar de que algunos software tengan integrados paquetes que permiten utilizar la optimización para mejorar los distintos escenarios simulados, la simulación no es una herramienta de optimización.
- Es necesario que el analista domine el uso del software y que maneje conocimientos de estadística para el análisis de resultados.

### 2.6.1 Elementos clave en un modelo de simulación

Existen algunos elementos claves que se deben tener en cuenta para garantizar el éxito de un modelo de simulación, en la futura toma de decisiones. A continuación se mencionan algunas causas por las que un modelo de simulación podría no tener los resultados esperados:

- a. **Tamaño de la corrida.** A veces el tamaño de la corrida es insuficiente, es decir, es necesario que la simulación considere un periodo de tiempo suficiente para que las variables se estabilicen en el sistema y pasen a un estado estable.
- b. **Cantidad de réplicas o corridas.** Se debe efectuar más de una réplica del modelo que se está analizando, con el fin de obtener estadísticas de intervalo que den un mejor resultado de la variable de análisis, ya que las distintas réplicas generan diferentes escenarios, que dependen de los números pseudo aleatorios iniciados en cada corrida.
- c. **Variable de respuesta mal definida.** Aun cuando el modelo de simulación representa de muy buena manera la realidad, si la variable de respuesta seleccionada no es la apropiada, será imposible tomar decisiones que tengan impacto en la operación del sistema bajo estudio.
- d. **Error al establecer las relaciones entre las variables.** Un error común, es no establecer adecuadamente las relaciones lógicas entre las variables aleatorias del modelo. Una forma de evitar lo anterior, es llevar el modelo hasta su máxima capacidad de análisis, tanto analítico como visual y observar su comportamiento mediante análisis de sensibilidad.
- e. **Error al determinar el tipo de distribución asociado a las variables aleatorias del modelo.** Podrían utilizarse distribuciones que no son las más adecuadas o que responden únicamente a un intento de simplificar los estudios estadísticos, esto podría afectar de manera importante los resultados de la simulación, debido a que el modelo podría alejarse de lo que sucede en la realidad.
- f. **Falta o exceso de detalle en el modelo.** En muchas ocasiones algún proceso se simplifica tanto que tiende a verse como una “caja negra”, que impide ver lo que ocurre en el interior, aunque sí haya entrada y salida de datos que interactúan con otras partes del modelo. Por otra parte, si el modelo se hace demasiado detallado, tanto el tiempo dedicado al estudio como el costo de llevarlo a cabo podrían incrementarse sustancialmente. (García *et al*, 2006).

## 2.7 ANTECEDENTES DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE EXTRACCIÓN DE AGUA/BARRO (PT FREEPORT, INDONESIA)

El 2008 se realizaron simulaciones del sistema de manejo de materiales de los sectores DOZ y ESZ en PT Freeport Indonesia (Botha J., Watson S., Arkadius. T & Samosir E. 2008). La simulación para estos sectores se dividió en zonas que se identifican a continuación:

- Nivel de producción
  - Puntos de extracción
    - Tonelaje diario planificado
    - Fragmentación
  - Equipos *LHD manuales y tele-comandados*
  - Equipos de reducción secundaria
  - Piques de traspaso
  - Chutes
- Nivel de transporte
  - Camiones
  - Correas
- Sistemas de Chancado primario
- Correa a superficie

Estos sistemas son interdependientes, esto quiere decir que el retraso o interferencia de uno (ej. mantenencias, colgaduras, etc.) afecta otro elemento. Cada sistema considera su propia disponibilidad mecánica, determinada por mantenencias programadas y no programadas. Finalmente se puede obtener la disponibilidad, utilización y capacidad de cada sistema.

### 2.7.1 Objetivo del modelo de simulación de PT Freeport para DOZ y ESZ

Evaluar el efecto que produce los cambios en el sistema de manejo de material en la productividad del sector evaluado. Los principales cambios se realizarán de acuerdo a las capacidades de los equipos, la cantidad de puntos de extracción disponibles, fragmentación del material y procedimientos de operación.

### 2.7.2 Metodología para la construcción del modelo de simulación

La metodología para construir el modelo de simulación de manejo de materiales para los sectores DOZ y ESZ de PT Freeport se describe a continuación.

- Etapa 1: Comprender la filosofía operacional en términos de extracción, reducción secundaria y variables del manejo de materiales propuestos para la mina.
- Etapa 2: Conceptualización y desarrollo de modelos gráficos y matemáticos del manejo de materiales.
- Etapa 3: Construir el modelo de Simulación en el software Arena. (Desarrollo de códigos).
- Etapa 4: Definir inputs y outputs del modelo.
- Etapa 5: Realizar la validación del modelo de simulación en Arena. La validación consiste en verificar que el código del modelo de simulación replica la filosofía operacional de la mina.

### 2.7.3 Descripción del Sistema

El layout de producción tiene un diseño tipo “espina de pescado”. DOZ y ESZ contienen 1.324 puntos de extracción y 55 piques de traspaso, distribuidos en 39 paneles (ver Figura 12).

Cada panel cuenta con 25 puntos de extracción y la designación de un equipo LHD. El modelo incluye la distinción entre puntos secos y puntos con barro, los puntos con barro son extraídos con LHD tele-comandados, estos equipos poseen las mismas características que un equipo manual (velocidad, aceleración, dimensiones, peso y capacidad de balde), excepto en el tiempo de carga, que se considera el doble.

La disponibilidad de los puntos de extracción se define, como el factor crítico de la capacidad productiva. Existen tres motivos principales por los cuales un punto de extracción puede no estar disponible: colgaduras, mantenciones y sobre-tamaños. Además existe un cuarto motivo, que es la extracción del tonelaje máximo de un punto en el turno, día o mes.

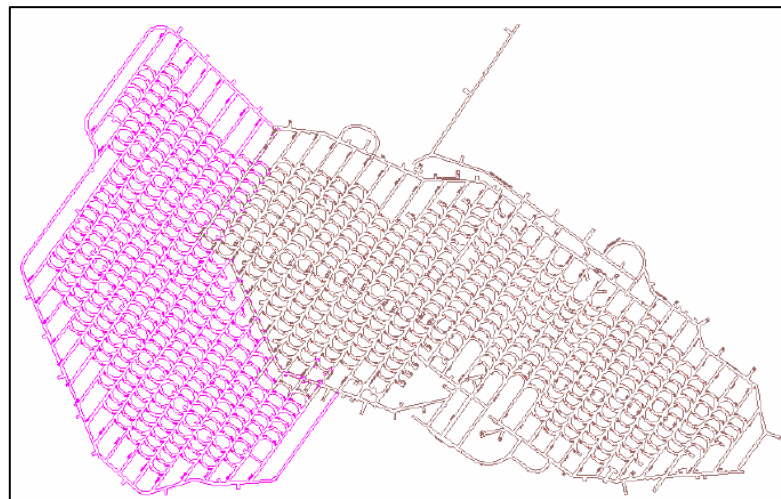


Figura 12: Layout de producción (DOZ/ESZ). (J. Botha, 2008)

Las colgaduras y sobre-tamaños se modelaron de acuerdo a su frecuencia de ocurrir (Tabla 13).

Tabla 13: Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños según tipo de roca. (Toneladas entre eventos)  
(J. Botha, 2008)

Rock Type	Year	High Hang-Ups *	Medium Hang-Ups	Low Hang-Ups	Drawpoint Oversize
Skarn	2006	149,700	1,000	1,514	162
Skarn	2010	165,400	1,100	1,499	198
Skarn	2012	169,100	1,200	1,499	247
Skarn	2014	172,500	1,300	1,496	267
Diorites	2006	N/A	N/A	N/A	N/A
Diorites	2010	59,100	700	775	65
Diorites	2012	115,900	1,000	897	65
Diorites	2014	155,300	1,200	996	70

Las operaciones de descuelgue y reducción secundaria se realizan durante los cambios de turno. Se consideran tres turnos de 8 horas al día.

## 2.7.4 Resultados de la simulación

Como se puede observar en la Tabla 14, la variable fue la cantidad de LHD Manuales y Telecomandados incorporados en la simulación, buscando así, la cantidad de equipos óptima, para alcanzar la producción deseada a escala anual.

Tabla 14: Resultados de simulación. (J. Botha, 2008)

Description	Unit	2006	2010	2012	2014
Required – Manual Loader	tpd	30,839	19,571	41,829	58,580
Sim Result – Average – Manual Loader	tpd	30,845	19,569	41,775	58,459
Required – Remote Loader	tpd	11,932	57,329	35,669	21,073
Sim Result – Average – Remote Loader	tpd	11,925	56,912	35,621	20,196
Total Required	tpd	42,771	76,900	77,498	79,654
Simulation Result	tpd	42,767	76,481	77,390	78,640
Production Difference	t	-4	-419	-109	-1,014
1. LHDs					
Number of Manual LHDs	ea	10	6	11	18
Number of Remote LHDs	ea	6	17	11	7
Total Number of LHDs	ea	16	23	22	25
Extraction Level LHD Utilization	%	65	81	84	87
Average Tonnes per LHD per day		2,673	3,325	3,518	3,146

## 2.7.5 Conclusiones del estudio (J. Botha, 2008)

El parámetro de evaluación, fue la capacidad de cumplimiento de los planes en base a la flota de equipos LHD que van a operar.

J. Botha concluye que no es posible alcanzar la completitud de los planes debido a:

- El excesivo número de puntos de extracción por panel (demasiados para un equipo LHD). En algunos casos hay hasta 19 puntos de extracción clasificados como “barro”, los cuales no pueden ser extraídos de manera eficiente por un solo equipo LHD.
- El tonelaje planificado por panel es muy alto para la capacidad de un equipo LHD. La alta frecuencia de sobre-tamaños reduce la disponibilidad de los puntos de extracción.
- Las distancias desde los puntos de extracción a los piques de traspaso en algunos casos son muy altas.

Finalmente, el objetivo no fue optimizar el plan de producción, sino que identificar los paneles que podrían presentar problemas en su cumplimiento. Este efecto se puede contrarrestar modificando el plan de producción, adelantando la preparación de nuevos puntos de extracción, incorporando más equipos de reducción secundaria o tomando medidas más drásticas como la modificación del layout de los paneles de producción.



## 2.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

De acuerdo a la revisión bibliográfica del uso de equipos LHD tele-comandados para la extracción de agua/barro, se puede concluir lo siguiente.

En cuanto a la planificación de la extracción de agua/barro:

- Se define como las reglas operacionales más significantes para la extracción de agua/barro, la uniformidad del tiraje [%], velocidad de extracción mínima y máxima diaria [t/m<sup>2</sup>-día], razón de mezcla de material seco y húmedo en el pique de traspaso, largadura de puntos colgados con mineral fino o grueso y la sectorización de la extracción por turno y calles para equipos LHD tele-comandos y manuales.
- Con respecto al análisis realizado a la extracción histórica mediante LHD tele-comando en DOZ (Freeport), faena que está caracterizada por extraer barro, la velocidad promedio de extracción es de  $0,35 \pm 0,46$  ton/m<sup>2</sup>-día.
- La uniformidad del tiraje que minimiza el riesgo de ocurrencia de un evento de barro debe ser superior a 50%, lo anterior se establece a partir de la experiencia de extracción manual.
- La velocidad máxima de extracción diaria permitida para minimizar el riesgo de la ocurrencia de un evento de barro debe ser inferior a 1,0 [t/m<sup>2</sup>-día] y la velocidad mínima de extracción en 0,03 [t/m<sup>2</sup>-día] para evitar colgaduras de finos por compactación. Lo anterior se establece a partir de la experiencia de extracción manual.
- La razón de mezcla para vaciar en el pique puede ser de 1:1 a 1:6, entre material seco y húmedo, siempre y cuando la humedad global no supere el 14%.

En relación a las tecnologías existentes para la extracción de agua/barro:

- Existen cinco tecnologías para operar los equipos LHD de las cuales tres permiten realizar la extracción de agua/barro; tele-comando, tele-asistido y autónomo. Dado que la extracción de agua/barro significa un riesgo para la operación con ingreso de personal, no es posible realizar la extracción con equipos manuales ni tele-remotos.
- Para la largadura de finos en estado de compactación se debe considerar el uso de cañones de agua sin dejar de lado el uso de perforación y tronadura, ya que deben actuar de manera complementaria. Esta operación debe considerar idealmente el uso de equipos sin operador a bordo, debido al riesgo inminente de un evento de barro durante la operación de descuelgue. En caso de no contar con estas tecnologías se debe evaluar la incorporación de un periodo de tiempo de espera antes de permitir el ingreso de personal.

En base al modelo de simulación creado para DOZ y ESZ (PT Freeport):

- El modelo considera los puntos en estado de barro o seco de manera estática y fue elaborado para evaluar la flota de equipos LHD que se necesita para alcanzar los planes de producción en el largo plazo. En el largo plazo el agua se desplaza de manera vertical y horizontal, esto significa que a medida que se extrae el mineral, más puntos entrarán en estado de agua/barro, por lo tanto, el estado de los puntos debe variar durante la simulación. Una forma de mejorar el modelo de simulación, es incorporando un modelo de predicción de la entrada de barro (matriz de riesgo de entrada de barro) para los distintos puntos de extracción y definir en qué momento deben operar los LHD tele-comando en una calle que contiene puntos en estado de agua/barro.

Finalmente, dada la importancia que tiene la recuperación de las reservas en condiciones de agua/barro, la implementación de los LHD sin operador a bordo (remoto, tele-comando, tele-asistido o autónomo) debe realizarse. Además, es posible observar que debido a las condiciones de cada mina, el modelo operacional será distinto, por lo que es necesario definir y entender como cada una de las reglas operacionales va a afectar la extracción. Para cuantificar la incidencia de las reglas operacionales en la extracción se plantea la elaboración de un modelo de simulación.

## CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO, SECTOR DIABLO REGIMIENTO

En este capítulo se describe de forma breve el sector Diablo Regimiento, el cual se utilizará como caso de estudio debido a la alta representatividad que presenta para el análisis de extracción de agua/barro.

Mina Diablo Regimiento cubre un área de 224.000 m<sup>2</sup>, está ubicada en el extremo Sur del yacimiento y está compuesta por 5 fases. Sus reservas extraíbles según PND 2015, corresponden a 66,2 Mt con una ley media de 0,823 % CuT y 0,031 % de molibdeno. Para el año 2015 la producción comprometida fue de 28.532 tpd, desde el año 2016 el perfil productivo disminuye de manera gradual hasta alcanzar un régimen cercano a 21.000 tpd entre los años 2017 y 2019. Posteriormente el ritmo decrece hasta agotar las reservas del sector en el año 2024, con 2981 tpd.

El método de explotación del sector es por Panel Caving Avanzado con equipos LHD de 13 yd<sup>3</sup> que realizan el vaciado vía Plate Feeder a chancadores de mandíbula ubicados en la periferia del footprint. Luego el acarreo es por correas transportadoras hacia la tolva del Nivel Teniente 6 desde donde se descarga el mineral hacia el Teniente 8 (GRMD Codelco, 2015). La Figura 13 muestra un esquema resumido del carguío y transporte.

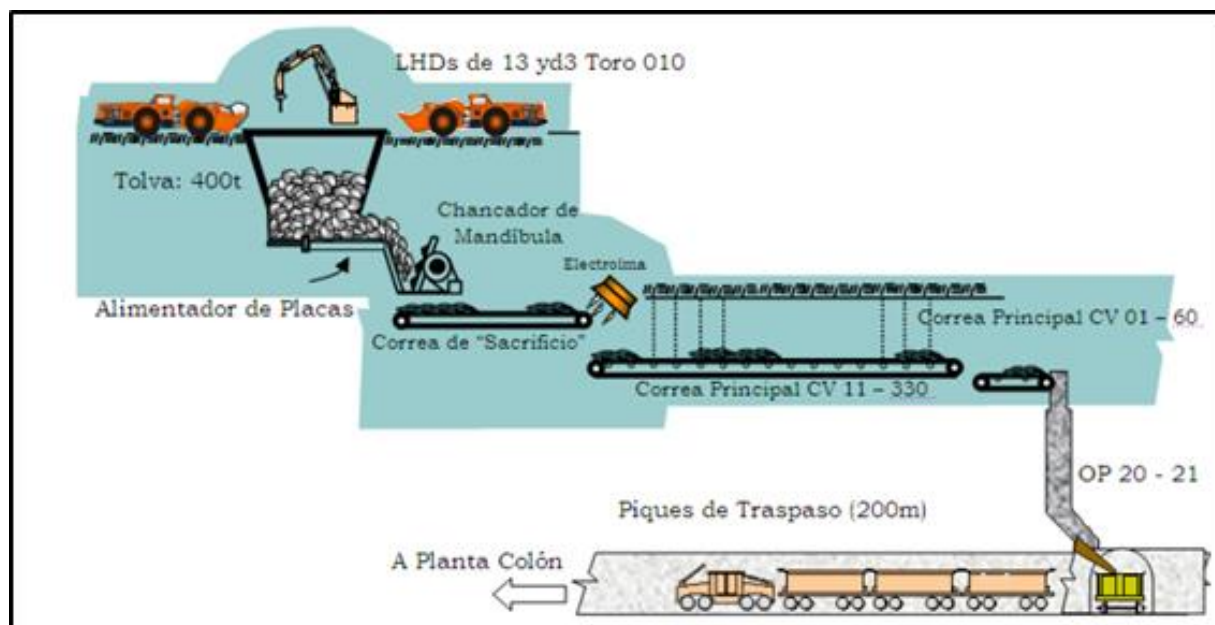


Figura 13: Proceso de producción Diablo Regimiento. (Paillacan, 2010)

La Mina Diablo Regimiento, con una cota de UCL (Under Cut Level, Nivel de Hundimiento) de 2210 msnm, se encuentra debajo de los sectores Teniente 4 Regimiento, Teniente 4 Fortuna y Puente, rodeando a la brecha Braden. Limita al norte por las labores acceso a la Mina, al Este con la Mina Esmeralda y los límites Sur y Suroeste son más bien de carácter económico, como se puede ver en la Figura 14.

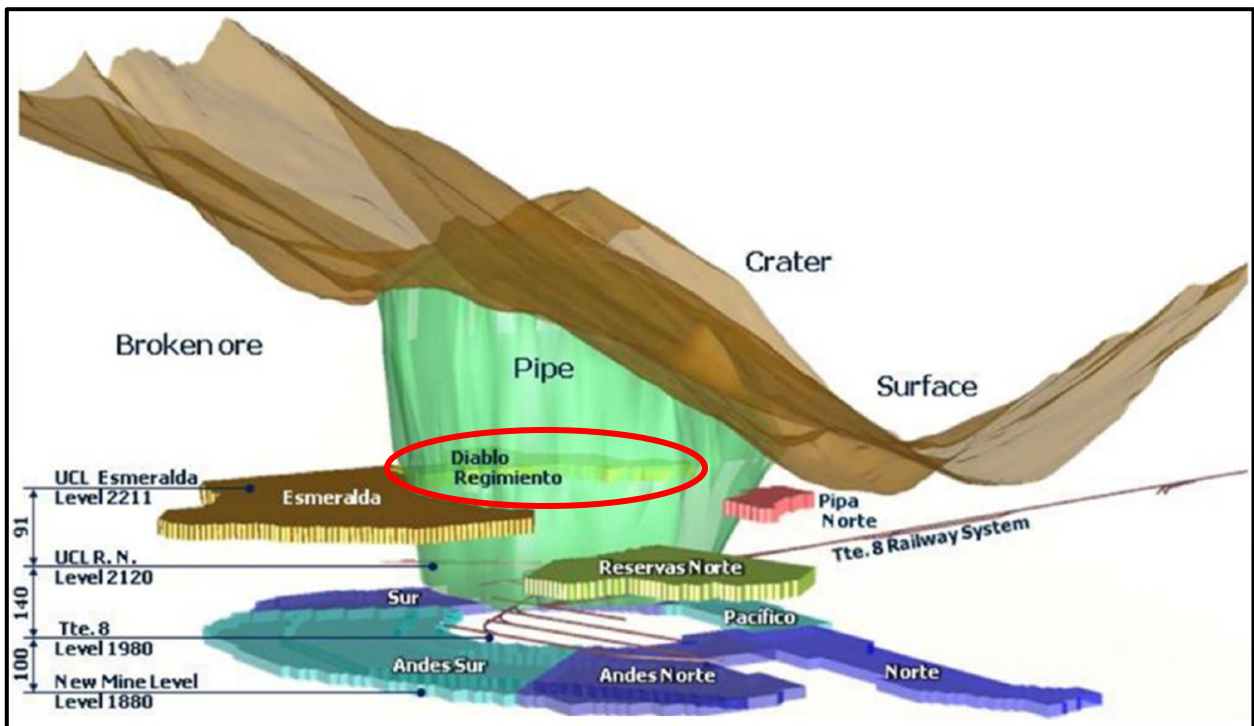


Figura 14: Ubicación Mina Diablo Regimiento (Pardo, C., Rojas, E. 2016).

En cuanto a la Fase II, Diablo Regimiento, esta cuenta con 786 kton remanentes y una ley media de Cu de 0.886 % (GRMD Codelco, 2016). El remanente corresponde al mineral económicamente extraíble que no ha sido extraído a la fecha. Del remanente por calle (ver Tabla 15), se observa que Diablo Regimiento presenta la mayor concentración en la calle 43, correspondientes a 320 kton.

Tabla 15: Remanente por calle, DR, Fase II (GRMD, CODELCO 2016).

<b>Diablo Regimiento Fase II</b>			
<b>Calle</b>	<b>Ton</b>	<b>Ley (%)</b>	<b>Fino</b>
<b>31</b>	78.544	0,80	628
<b>33</b>	59.457	0,45	268
<b>35</b>	20.199	0,67	135
<b>37</b>	82.444	0,65	536
<b>39</b>	79.285	0,45	357
<b>41</b>	59.266	0,61	362
<b>43</b>	<b>319.595</b>	<b>1,26</b>	<b>4.027</b>
<b>45</b>	87.435	0,75	656
<b>Total</b>	786.225	0,89	6.968

Debido al sistema de manejo de materiales de mina Diablo Regimiento, el transporte de mineral húmedo es menos vulnerable, ya que el mineral es transportado hacia una etapa de chancado primario interior mina, no exponiendo equipos y/o personas a potenciales siniestralidades por atrapamiento en los niveles de transporte. También es posible utilizar un pique que conecta Diablo Regimiento con Esmeralda, de modo de mezclar mineral húmedo con seco.

Por estos motivos se escoge la Fase II de Diablo Regimiento como caso de estudio para evaluar la extracción de mineral saturado con equipos LHD tele-asistidos. Además este sector permite analizar teorías de velocidad de extracción y uniformidad, dado que presenta más de 3 calles con mineral remanente (GRMD-SDI-NT-021-2016, CODELCO).

# CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

## 4.1 INTRODUCCIÓN

El siguiente capítulo presenta la metodología para la construcción de un modelo de simulación de 3 calles de un nivel de producción de una mina de Block/Panel Caving. El modelo tiene como objetivo la evaluación de estrategias de extracción de agua/barro con equipos LHD tele-asistidos.

Esta metodología incorpora los pasos a seguir para la construcción de un modelo de simulación, utilizando el software de eventos discretos ProModel (ProModel Corporation, 2016).

## 4.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología se compone de 8 etapas y está orientada al desarrollo del proyecto de simulación de un nivel de producción en Block/Panel Caving. La Figura 15 muestra las principales etapas, las cuales se detallarán a continuación.

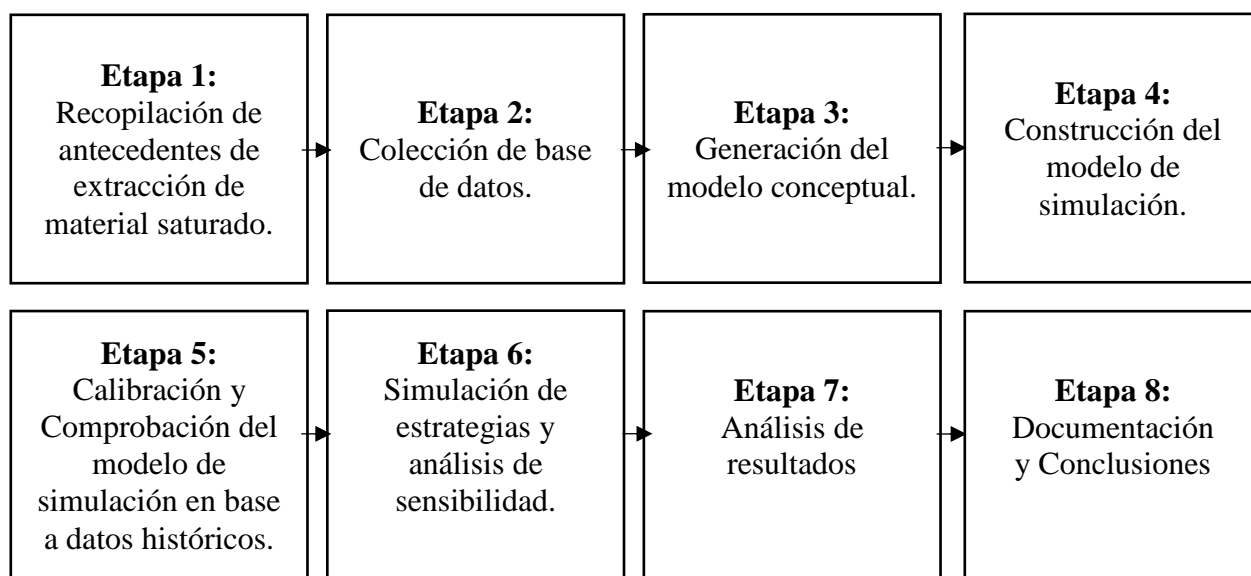


Figura 15: Etapas de la metodología de simulación propuesta.

### 4.2.1 Etapa 1: Recopilación de antecedentes de extracción de material saturado

Se realiza un trabajo de investigación del modelo operacional utilizado en distintas faenas. (CAPÍTULO 2)

### 4.2.2 Etapa 2: Colección base de datos

Se colecta los datos de; la extracción histórica, la extracción planificada diaria y mensual (CARTIR y PAM), el diseño del nivel de producción, datos de frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños, tiempos de frecuencia de fallas y mantenencias de equipos. Los datos son utilizados en la siguiente etapa, como datos de entrada para la construcción del modelo de simulación. La información se

recopila de la Fase II de mina Diablo Regimiento debido a la representatividad del sector. (CAPÍTULO 6)

#### **4.2.3 Etapa 3: Generación del modelo conceptual**

Antes de comenzar a codificar un modelo de simulación, se debe confeccionar un modelo conceptual. El modelo conceptual, tiene como objetivo, servir como guía para la construcción del modelo computacional, definirlo es útil para identificar las interacciones que existirán en el sistema. El modelo conceptual debe ser sometido a la revisión de algún analista o experto del tema para validarlo antes de su codificación. (CAPÍTULO 5)

#### **4.2.4 Etapa 4: Construcción modelo simulación**

Se construye un modelo de simulación del nivel de producción de un módulo de 3 calles. El modelo es construido en ProModel, software de simulación de eventos discretos. El modelo emula la extracción de mineral desde los puntos de extracción, mediante equipos LHD hasta el vaciado a un pique de traspaso. El modelo considera tiempos de frecuencias de fallas y mantenciones de equipos, calles, puntos de extracción y pique de traspaso. Por otro lado, se incorpora la frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños en los puntos de extracción. (CAPÍTULO 6)

#### **4.2.5 Etapa 5: Calibración y Comprobación del modelo de simulación**

Se realiza la calibración del modelo de simulación construido. La calibración se lleva a cabo respecto de un caso de extracción real de la Fase II de mina Diablo Regimiento para el módulo de 3 calles de producción. El caso seleccionado es el mes de octubre del 2013, para el cual se extrajeron 81.377 toneladas. Se escoge octubre del 2013 debido a que tiene una extracción cercana al promedio histórico mensual de extracción del sector simulado. El objetivo es que el modelo replique el tonelaje real extraído en el módulo, considerando como dato de entrada el tonelaje planificado para dicho mes (94.248 toneladas) y el estado de los puntos de extracción. Los resultados de la calibración y el error de estimación se obtienen a nivel de punto de extracción y a nivel de módulo.

Una vez calibrado el modelo se comprueba (manteniendo los parámetros de calibración del mes de octubre del 2013) con qué nivel de error se estiman otros meses de producción. (CAPÍTULO 6)

#### **4.2.6 Etapa 6: Simulaciones del modelo operacional**

Se realizan las simulaciones del modelo operacional propuesto para la extracción tele-comandada del sector seleccionado como caso de estudio (Fase II de mina Diablo Regimiento). El modelo operacional se encuentra en términos de velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día], uniformidad del tiraje [%], descuelgue de puntos finos y gruesos, mezcla de mineral entre seco y húmedo para vaciar en el pique y el uso de equipos LHD tele-asistidos según turnos y módulo de calles. (CAPÍTULO 7)

#### **4.2.7 Etapa 7: Análisis de resultados**

Se efectúa el análisis de resultados de las simulaciones realizadas en la etapa anterior. Los resultados son en términos de; tonelaje extraído mensual [ton], tonelaje de fino extraído mensual [ton], velocidad de extracción diaria mínima, máxima y promedio [t/m<sup>2</sup>-día] y uniformidad del tiraje mínima, máxima y promedio [%]. El objetivo es determinar aquella estrategia de extracción que maximice el tonelaje de mineral extraído mensual cumpliendo con los requerimientos uniformidad [%] y velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día] (CAPÍTULO 7)

#### **4.2.8 Etapa 8: Documentación y Conclusiones**

Finalmente, se debe realizar el reporte de los análisis y resultados de las simulaciones con la propuesta del modelo operacional escogido para la extracción tele-asistida. De esta manera el modelo de simulación se puede implementar a distintos casos de estudio.

## CAPÍTULO 5 MODELO CONCEPTUAL DE SIMULACIÓN

El objetivo principal de la construcción del modelo de simulación, es analizar el impacto que tienen las principales variables de las distintas estrategias de extracción de material saturado con equipos LHD tele-asistidos, sin necesidad de realizar inmediatamente su aplicación real en la mina.

A modo general el modelo de simulación, se puede describir como la emulación de eventos reales con herramientas computacionales estocásticas de eventos discretos. La simulación por eventos discretos se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento durante el intervalo simulado. Las principales variables que afectan la producción minera, como por ejemplo las mantenciones o colgaduras, se pueden modelar fácilmente con el uso de esta técnica ya que mantienen su comportamiento durante los intervalos simulados.

Los detalles de su funcionamiento e implementación se describen a continuación.

### 5.1 INFRAESTRUCTURA DE LA MINA

Los componentes de estructura implementados en el modelo de simulación son los siguientes:

- Puntos de extracción
- Piques de traspaso

En particular existe la siguiente relación de conectividad:

- Tres calles de producción independiente una de otra. Cada calle cuenta con 20 puntos de extracción (60 en total) especificados por las distancias entre estos y el pique de extracción respectivo por calle.

Cabe mencionar que para el caso en que se necesite simular el comportamiento del sistema minero con un número menor de componentes de infraestructura pueden bloquearse convenientemente las redundantes, de manera de asemejar el modelo de simulación a las singularidades de la mina.

### 5.2 ENTIDADES OPERATIVAS

Las entidades operativas consideradas en los modelos de simulación, que se movilizan entre la infraestructura antes mencionada son las siguientes.

- Mineral
- Equipos LHD manual y tele-asistidos
- Cuadrillas de reducción secundaria y descuelgue
- Cuadrillas de mantención de calles, puntos de extracción y piques de traspaso



Es preciso destacar ciertos aspectos que dicen relación a las cantidades y capacidades de las entidades operativas, disponibles durante el funcionamiento del modelo que se especifica a continuación:

- El flujo entrante de mineral al sistema, se realiza a través de los puntos de extracción. Éste debe ser tal que siempre exista material disponible para cargar en el punto, si es que no está detenido por algún evento de interferencia.
- Existe un equipo LHD por cada calle de producción, según lo especificado. Existen entonces un total de 3 equipos LHD. Cada unidad queda especificada por su velocidad, la capacidad de su balde y su calle correspondiente. Cabe destacar, que al igual que con la infraestructura es posible bloquear de manera conveniente el uso de alguna entidad operativa, de manera de asemejar el modelo de simulación al modelo operacional que se evalúe. En este estudio no se utilizarán más de 2 equipos LHD simultáneamente.
- El número de cuadrillas de reducción secundaria puede modificarse a voluntad, previo a ejecutarse la simulación, con el objetivo de asemejar el modelo de simulación al modelo operacional que se evalúe. Cada cuadrilla queda especificada por el tiempo unitario que requiere resolver tipos específicos de interferencias, en el sistema a nivel de puntos de extracción y piques de traspaso.

Es importante mencionar que la información recopilada de eventos de compactación de finos con extracción tele-asistida corresponde a conversaciones con PF Freeport, donde se indica que un punto que no ha sido extraído durante 15 días puede presentar estado de compactación. Dado que las estrategias de extracción incorporadas en el modelo en ningún caso dejan de extraer un punto en un intervalo  $15 \pm 5$  días, se decide no implementar un equipo de descuelgue de puntos en estado de compactación.

### 5.3 ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Durante la ejecución de cada simulación, las restricciones ligadas a la estrategia de extracción que será evaluada, se modifican constantemente por el usuario, previo a la ejecución de la simulación, como pueden ser la regla de mezcla o la cantidad de equipos que operará en el módulo de 3 calles de producción. Cualesquiera sean estas condiciones, son específicas del modelo de simulación utilizado y los resultados obtenidos están íntimamente ligados con éstas, por lo que en las siguientes secciones se procede a detallar de qué forma se comportan las diversas variables operativas conforme se ejecuta la simulación.

#### 5.3.1 Puntos de Extracción

**Tiempos entre llegadas:** A través de cada punto de extracción se realiza la entrada de una unidad de mineral en el sistema cada lapsos de tiempo específicos (tiempo entre llegadas). El sistema no permite que exista un mayor número de salida de unidades de mineral que las ingresadas al sistema, por lo tanto, el tiempo entre llegadas de mineral debe ser inferior al del ciclo del LHD para el punto de extracción más cercano al pique de traspaso, de manera que siempre que el equipo cargue en un punto de extracción exista al menos una unidad de mineral. De esta manera se puede asegurar que

la productividad total del sistema no será afectada por el tipo de simulación y solamente dependerá del funcionamiento propio del sistema modelado.

Para el caso puntual del inicio de la simulación es probable que dependiendo de la ubicación del equipo LHD, el tiempo en acceder a punto de extracción sea inferior al de su ciclo, por lo tanto, se debe asegurar que exista entrada de mineral al sistema en el tiempo cero de la simulación. Con el fin de evitar que la simulación dependa de las condiciones iniciales, la simulación comienza en el día -5.

**Estado inicial de los puntos de extracción:** El sistema contará con puntos de extracción en estado seco, limitados o con ingreso de agua/barro. Dado que la simulación evaluará la extracción en el mes, es que a cada punto de extracción se le debe asignar su estado al inicio de la simulación, el cual no variará durante el tiempo simulado. La distinción entre estados es una de las características más importantes del modelo, ya que les permitirá a los equipos LHD tele-asistidos, extraer una determinada cantidad de veces cada punto, dependiendo principalmente de la razón de mezcla y la velocidad máxima permitida para el punto de extracción.

**Eventos de interferencias:** La ocurrencia de eventos de interferencia en los puntos de extracción será aleatorio y responderá a una cierta distribución de probabilidades. Los eventos de interferencia que se incorporarán al sistema son:

- Colgadura (basada en el porcentaje de extracción del punto)
- Sobre-tamaño (basado en el porcentaje de extracción del punto)
- Tonelaje máximo permitido a escala diaria o mensual extraído

La probabilidad de ocurrencia de estos eventos, depende estrictamente de la altura de extracción de cada punto, por lo tanto, se debe asignar la altura extraída de cada punto de extracción al inicio de la simulación.

Una vez que el equipo LHD extrae mineral desde el punto de extracción, se evalúa la probabilidad de que ocurra un evento de colgadura o sobre-tamaño. También se verifica si extrajo el tonelaje máximo permitido en el día de acuerdo a la velocidad máxima de extracción permitida, o el tonelaje máximo permitido en el mes de acuerdo al plan de producción.

### 5.3.2 Calles de Producción

**Conectividad:** Las calles de producción conectan los puntos de extracción con su respectivo pique de traspaso, cumpliendo con las especificaciones del layout del sector de producción que se simulará. No se requiere conectividad entre las diferentes calles de producción, por lo que cada una tiene un funcionamiento independiente de la otra.

**Eventos de interferencias:** Al igual que los puntos de extracción, existen eventos que determinaran el estado de todos los puntos de extracción ligados a una calle. Ningún punto de extracción podrá ser extraído cuando ocurra lo siguiente:

- Operaciones de descuelgue o reducción secundaria en algún punto proveniente de la calle o de la calle vecina. Cada vez que se realiza una operación de descuelgue o reducción secundaria se añade también la posibilidad de falla de ésta, lo cual significa una repetición de la operación misma.

- Mantenciones en la calle de producción o algún punto de extracción de la misma calle.
- Mantenciones de los equipos LHD.

### 5.3.3 Piques de traspaso

Se considera un pique de traspaso asociado a cada calle de producción.

**Eventos de interferencias:** Los piques de traspaso también serán afectados por eventos de mantención, los cuales inhabilitarán la calle de producción ligada a éste.

### 5.3.4 Mineral

La unidad básica de mineral en el sistema, corresponde a una baldada de LHD, que posee el siguiente atributo:

Tonelaje: Se calcula como el producto de la densidad del material a cargar por la capacidad del balde del LHD por el factor de llenado del balde (que se especifica con una distribución uniforme).

### 5.3.5 Equipo LHD manual y tele-asistido

Los equipos LHD son los encargados de transportar el mineral desde los puntos de extracción hasta el pique de extracción correspondiente, sus especificaciones corresponden a la capacidad volumétrica del balde y su velocidad, tanto cargado como descargado. El funcionamiento de estos equipos se modela según los siguientes aspectos:

- Por cada calle de producción solo puede transitar un equipo LHD a la vez.
- Los equipos LHD requieren de mantención y son susceptibles a fallas mecánicas.
- La asignación del equipo LHD a un punto de extracción respeta una secuencia determinada por la distancia al pique, la orientación de los puntos de extracción, un contador de baldadas extraídas y el estado de los puntos.

### Ciclo de carguío:

En el modelo de simulación el ciclo de carga de los equipos LHD se encuentra determinado por:

- La velocidad del equipo LHD cargado.
- La velocidad del equipo LHD descargado.
- El tiempo de carga.
- El tiempo de descarga.

En todos los casos las velocidades y tiempos asociados a los equipos LHD serán una constante. Cabe destacar que para los equipos LHD tele-asistidos, las velocidades serán distintas a las de los equipos LHD Manuales.

### **Secuencia de extracción:**

Como se mencionó anteriormente, la asignación del equipo LHD a un punto de extracción dependerá de ciertas reglas que se describirán a continuación.

- **LHD manual:** El equipo comenzará extrayendo en primer lugar desde el punto más cercano al pique de traspaso hasta el más lejano por el lado patilla de la calle de producción y continuará desde el punto más lejano hasta el más cercano por el lado cabeza de la calle. En caso de que un punto de extracción no se encuentre disponible el equipo LHD pasará a extraer el siguiente. De esta forma el LHD extraerá los distintos puntos de extracción sin priorizar uno sobre otro. El número de baldadas que puede extraer el equipo LHD desde un punto de extracción antes de extraer el siguiente se determina según el plan de extracción diario (CARTIR). Por ejemplo, si se deben extraer 150 toneladas desde un punto y la capacidad de balde es de 10 toneladas, el LHD extraerá 15 baldadas antes de continuar con el siguiente punto de extracción.

Para el caso de extracción con LHD manual, los puntos agua/barro y agotados se consideran no disponibles, al igual que los puntos que presenten algún tipo de interferencia o que se les haya extraído el máximo tonelaje permitido en el día, respetando así la velocidad máxima de extracción, la cual es una restricción del sistema.

- **LHD tele-asistido:** El equipo LHD tele-asistido extrae en el mismo orden que el equipo LHD manual. Si bien el orden es el mismo, el equipo tele-asistido puede extraer los puntos en estado de agua/barro. Por sobre el orden de extracción descrito anteriormente, el LHD tele-asistido debe respetar la regla de mezcla de material seco con húmedo. La regla de mezcla obliga al equipo LHD tele-asistido a extraer de un punto seco o húmedo según corresponda (una baldada), respetando en segundo plano un orden de extracción para puntos secos y otro orden para puntos barro. A diferencia de la extracción manual, la extracción tele-asistida considera la extracción de una baldada por punto y una vez que finaliza la secuencia de extracción ya sea de puntos secos o barro, repite la secuencia hasta completar el tonelaje máximo diario permitido o el tonelaje planificado mensual.

Es importante precisar que cuando se tiene por ejemplo una mezcla 1:6 y no se encuentran 6 puntos en estado de agua/barro disponibles en la calle de producción, la mezcla será reducida al número de puntos en estado agua/barro disponibles, en el caso más extremo sólo habría extracción de mineral seco (razón de mezcla 1:0).

Un ejemplo de la secuencia de extracción de equipos manuales y tele-asistido se puede observar en la Figura 16 a continuación:

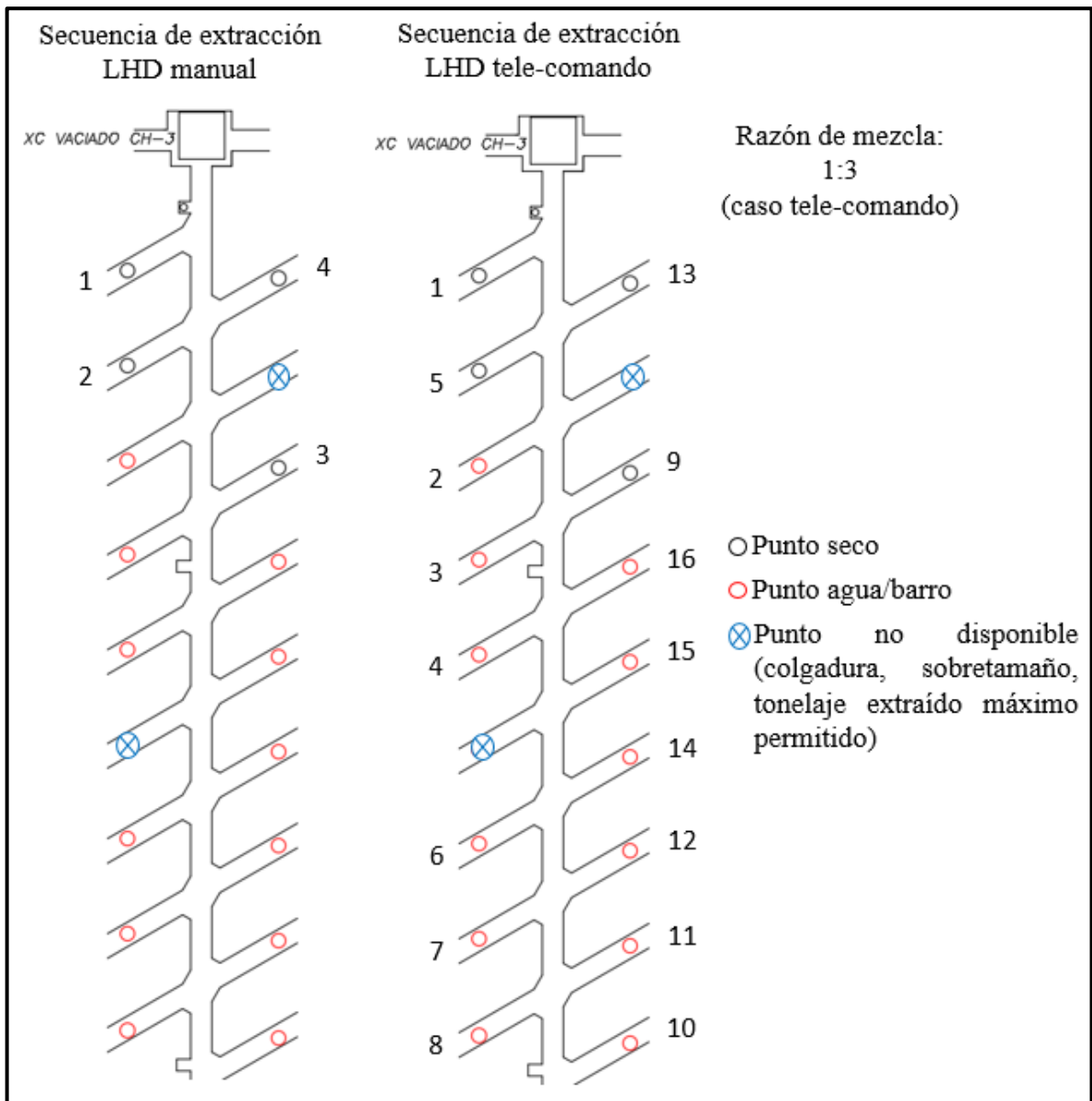


Figura 16: Secuencia de extracción de equipos LHD manual y tele-asistido (no indica número de baldadas por punto).

### 5.3.6 Operación de descuelgue y reducción secundaria sin extracción de agua/barro

En el caso de la extracción con equipos LHD manual, se define un número crítico de puntos disponibles por calle de producción. Si la disponibilidad de puntos es inferior a este número crítico debe intervenir la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria. Este número crítico corresponde a la mitad de los puntos de extracción disponibles sin considerar aquellos que se encuentran con agua/barro o que ya se les extrajo el tonelaje máximo permitido.

Dado que no existe un procedimiento estándar para determinar cuándo debe entrar la cuadrilla de descuelgue, este criterio fue definido en base a conversaciones con el personal de DET para este estudio.

Por lo tanto la entrada de la cuadrilla se define de la siguiente forma:

Fórmula 1: Número crítico de puntos disponibles para la entrada de la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria.

$$N_{critico} = \frac{TP - P_{ab} - P_{cerrados}}{2}$$

$$NP_{disponibles} = TP - P_{ab} - P_{cs}$$

Donde,

- Ncrítico: número crítico de puntos disponibles para la entrada de la cuadrilla de descuelgue.
- NPdisponibles: número de puntos disponibles en la calle de producción.
- TP: número total de puntos de extracción en una calle de producción.
- Pab: número de puntos en estado agua/barro.
- Pcerrados: número de puntos que ya extrajeron el tonelaje máximo permitido (diario o mensual)
- Pcs: número de puntos con presencia de colgadura o sobre-tamaño

Un ejemplo del cálculo del número crítico de puntos disponibles para el ingreso de la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria se puede observar en la Figura 17 a continuación:

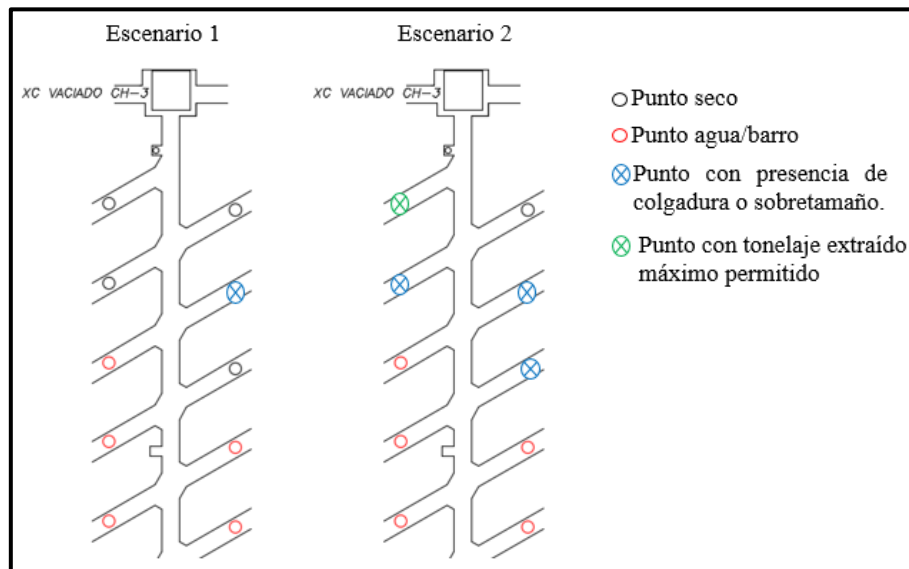


Figura 17: Ejemplo de escenarios para determinar si debe intervenir la cuadrilla de descuelgue o reducción secundaria.

Tabla 16: Cálculo del número crítico de puntos disponibles.

	Escenario 1	Escenario 2
Total de puntos	10	10
Puntos agua/barro	5	5
Puntos con presencia de colgadura o sobre-tamaño	1	3
Puntos con tonelaje extraído máximo permitido	0	1
Número crítico de puntos disponibles	$(10 - 5 - 0) / 2 = 2.5$	$(10 - 5 - 1) / 2 = 2$
Disponibilidad de puntos	$10 - 5 - 1 = 4$	$10 - 5 - 1 - 3 = 1$
¿Debe ingresar la cuadrilla?	¿ $4 < 2.5$ ? (NO)	¿ $1 < 2$ ? (SI)

### 5.3.7 Turnos de extracción, estabilización y chequeo para extracción de agua/barro

En el caso de la extracción con equipos LHD tele-asistidos, el ingreso de personal se encuentra restringido, debido al riesgo de entrada de agua/barro o bombeo desde algún punto de extracción. Dado que la operación de descuelgue, reducción secundaria o mantenciones no se encuentran automatizadas, debe existir un periodo de “estabilización”. El periodo de estabilización consiste en dejar un rango de tiempo (turnos) sin extracción para así reducir el riesgo de que ocurra un evento de barro cuando ingrese el personal.

Una vez finalizada la estabilización, se considera un turno de “chequeo”, en el cual se realizarán las operaciones con ingreso de personal.

Cabe destacar que cuando existe extracción de agua/barro en una calle de producción, no puede haber ingreso de personal en la calle vecina. Esto quiere decir, que no puede haber extracción con equipos LHD manual ni operaciones de descuelgue, reducción secundaria o mantenciones. Esto se debe principalmente a que las bateas de los puntos de extracción con agua/barro que están siendo extraídos, se encuentran conectadas con los puntos de extracción de las calles vecinas y la extracción de barro podría provocar un evento de escurrimiento o bombeo de agua/barro al otro lado de la batea, en la calle vecina.

En la Tabla 17 se puede observar una estructura de turnos para un caso, en donde operan dos equipos LHD tele-asistidos, y se utiliza como periodo de estabilización dos turnos.

Tabla 17: Dos turnos de estabilización para un caso de 2 equipos LHD tele-asistidos.

Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45
1	A	TA	TA	S.E
	B	TA	TA	S.E
	C	E	E	TA
2	A	E	E	E
	B	Chequeo	Chequeo	E
	C	S.E	S.E	Chequeo

	Tele - asistido
	Estabilización
	Chequeo
	S.E

\*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo

Como se puede observar, en ningún momento operan más de dos equipos LHD tele-asistidos simultáneamente. Tampoco hay operaciones con ingreso de personal de manera simultánea a la extracción con equipos LHD tele-asistidos.

A continuación en la Figura 18 se esquematiza el funcionamiento del modelo de simulación para la asignación de equipos LHD tele-asistidos a los puntos de extracción:

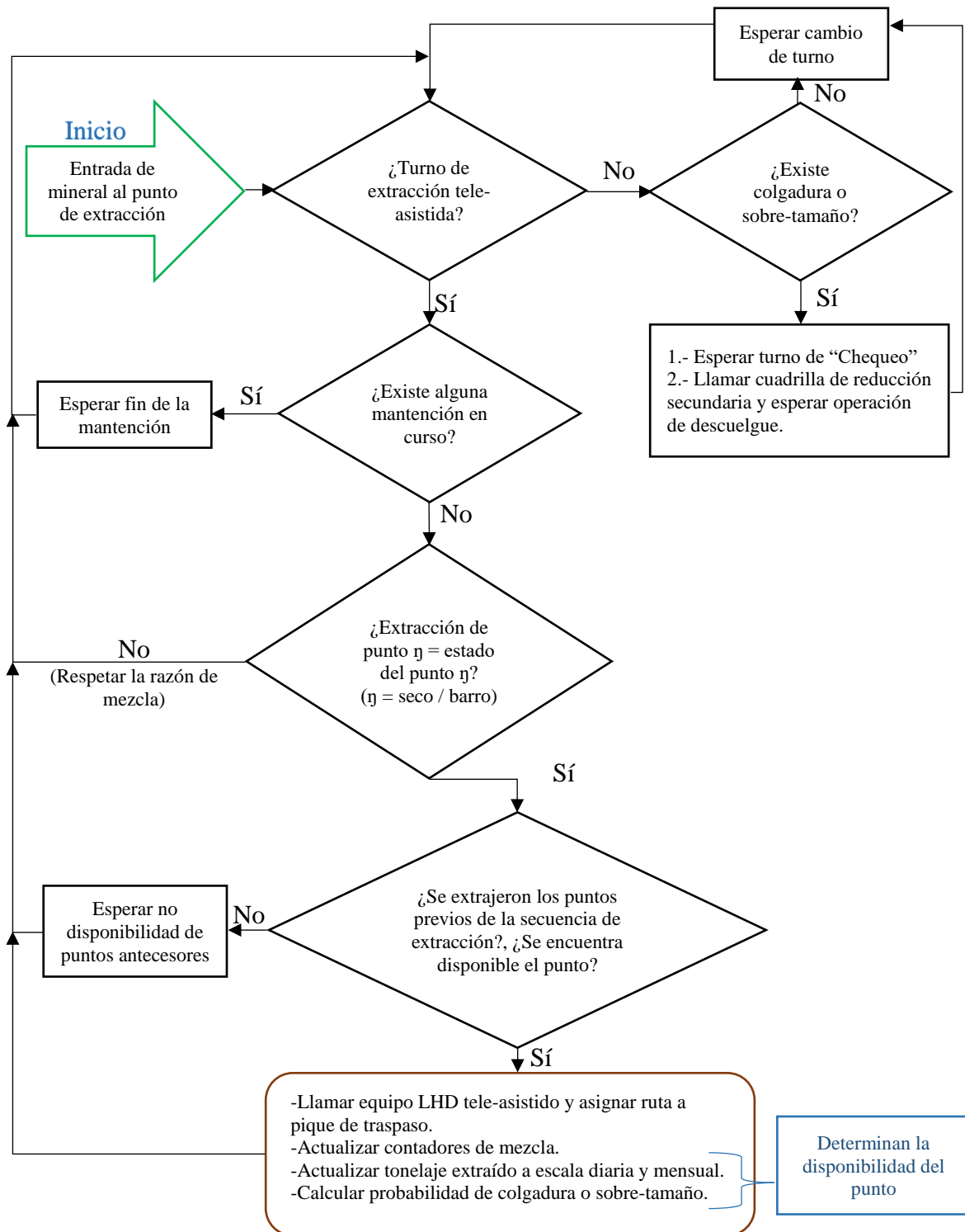


Figura 18: Modelamiento de asignación de equipos LHD tele-asistido a puntos de extracción.



## 5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Las conclusiones asociadas a la construcción del modelo conceptual se enlistan a continuación:

- El modelo conceptual, es la guía constructiva para la codificación del modelo de simulación independiente del software a utilizar y define qué variables deben ser incorporadas en el modelo de simulación, mientras que la etapa de construcción del modelo de simulación define cómo se usarán.
- La construcción del modelo conceptual de simulación, es la etapa más exhaustiva en cuanto a recopilación y análisis de la información. Permite definir una línea base para un posterior levantamiento de datos en terreno.
- La capacidad de emular la realidad, depende directamente de la cantidad de variables incorporadas en el modelo y la fidelidad de los datos con que éste se alimente posteriormente en la etapa de simulación.
- El modelo conceptual de simulación propuesto, aplica a proyectos de producción en minería de caving, enfocados en un nivel de producción con presencia de agua/barro y extracción con equipos LHD operados manualmente o tele-asistidos. La disponibilidad de los puntos de extracción, es determinada por la razón de mezcla, el número de baldadas que pueden ser extraídas, los eventos de colgadura o sobre-tamaños y el tonelaje máximo extraído diario o mensual. No se considera la ley de corte, debido a que las estrategias se evalúan para un periodo de un mes, periodo en donde no hay mayores cambios en la ley del mineral de cada punto de extracción.

# CAPÍTULO 6 CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL

En este capítulo se describe la construcción del modelo de simulación en el software de eventos discretos ProModel. El modelo construído, está basado en un módulo de 3 calles de producción con 20 puntos de extracción y un pique de traspaso. Posteriormente, el modelo es calibrado respecto de un caso real de extracción utilizando la base de datos de extracción histórica de DET (mes de octubre del 2013) y se realiza un análisis de sensibilidad respecto de las variables de la simulación. El código de simulación en ProModel se encuentra en el ANEXO G.

## 6.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL

El modelo de simulación es construído para un módulo de extracción de 3 calles de producción (malla tipo Teniente 15x20), donde cada calle tiene 20 puntos de extracción (10 en lado patilla y 10 en lado cabeza) y 1 pique de traspaso. En la Figura 19 se muestra un esquema de la disposición de las calles, puntos de extracción y el pique de traspaso. Se puede observar que el pique de traspaso es compartido por las 3 calles de producción, esto provoca interferencias entre los equipos LHD, para este estudio esta interferencia no fue considerada.

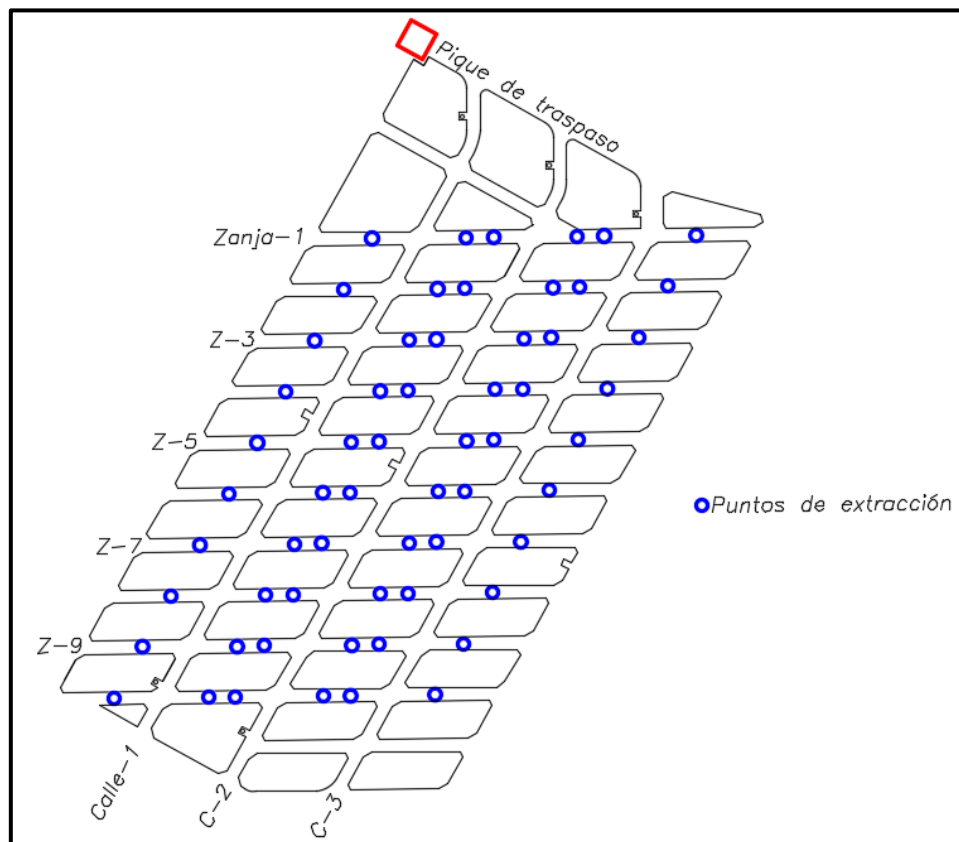


Figura 19: Esquema del modelo de simulación construído de 3 calles de producción.

### 6.1.1 Componentes del modelo

En el software ProModel, el modelo de simulación está compuesto por los siguientes componentes (ver Tabla 18).

Tabla 18: Componentes del modelo de simulación.

<b>Componentes</b>	<b>Descripción</b>	<b>En el modelo</b>
Locaciones	Representación virtual de un espacio/lugar fijo físico de la realidad.	Puntos de extracción y pique de traspaso.
Recursos	Un recurso puede ser una persona, una herramienta, un vehículo o cualquier otro objeto que pueden ser utilizados para el auxilio/transporte de entidades y/o locaciones.	Equipos LHD manual y tele-asistidos.
Entidades	Son los artículos que son procesados en el modelo o sistema.	Mineral [toneladas].
Rutas	Son trayectorias posibles donde las entidades y los recursos pueden viajar al moverse a través del sistema.	Calles de producción y zanjas.
Procesos	Define la secuencia de proceso y la lógica del flujo de entidades entre las locaciones del sistema.	Asignación de LHD a punto de extracción. Descuelgue de mineral grueso. Reducción de sobre-tamaño.
Llegadas	Define la llegada de las entidades al sistema por primera vez, el momento en que llegan, la locación a la que llegan, la cantidad, el número de ocurrencias y su frecuencia.	Llegada de mineral a los puntos de extracción.
Variables	Cada punto de extracción o calle de producción tendrá una serie de variables que indican las características principales de estas. Como se mencionó en el capítulo anterior, estas variables pueden tener los mismos valores para cada punto o ser distintos.	Tonelaje extraído por punto [toneladas], estado del punto de extracción (seco, limitado, barro), turno (extracción, estabilización, chequeo), etc.
Subrutinas	Las subrutinas permiten detonar eventos paralelos, como por ejemplo, los cambio de turnos o las mantenencias.	Programa de turnos. Mantenciones programadas y no programadas de equipos. Mantenciones de calles y pique.

## 6.2 DATOS DE ENTRADA PARA LA CALIBRACIÓN

Para la calibración del modelo de simulación construido se toman datos de la base de datos de extracción histórica real, para el cual se ha seleccionado el mes de octubre del 2013. Se selecciona este mes, ya que se extrajeron 81.377 toneladas con equipos LHD manuales, valor más cercano al promedio de extracción del sector evaluado que corresponden a 92.460 toneladas. Al simular un mes con extracción cercana al promedio del sector a nivel histórico, es posible recoger el nivel de interferencias de la mina que no es simulado por el código en condiciones normales de operación.

El estado de los puntos de extracción para el inicio de octubre del 2013, se puede observar en la Figura 20 a continuación.<sup>6</sup>

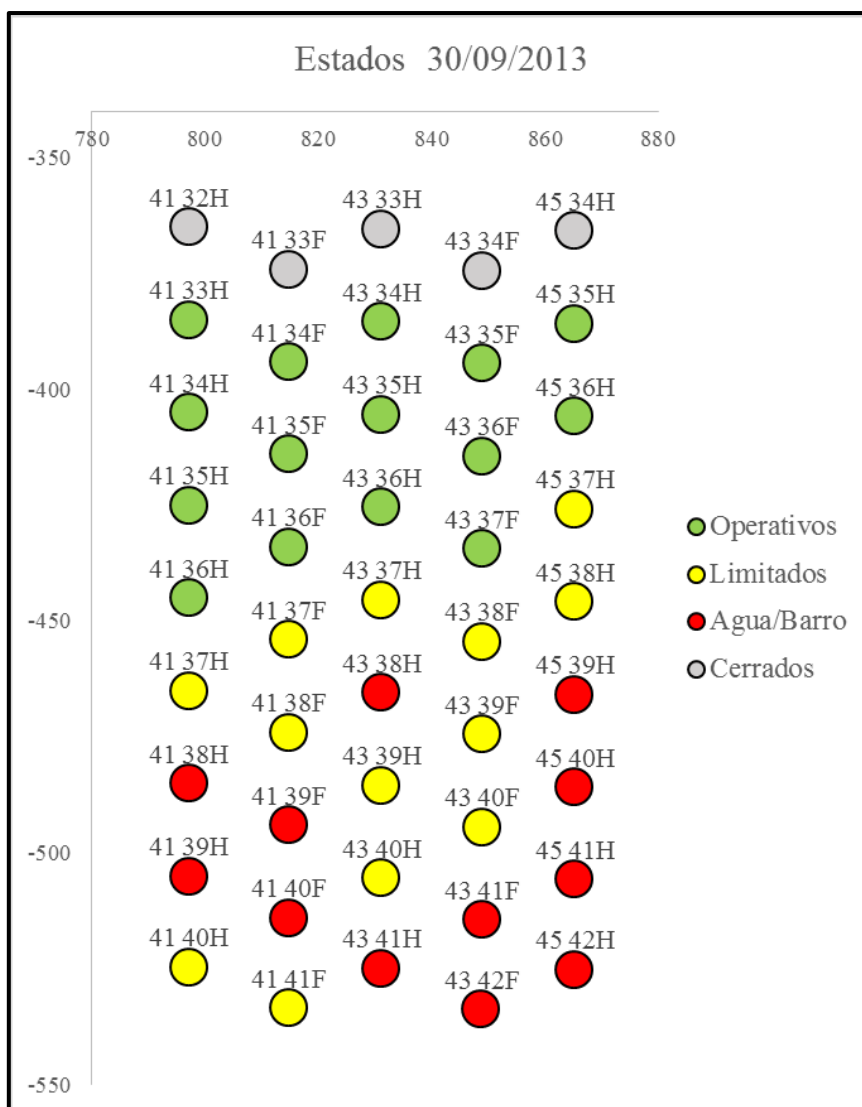


Figura 20: Estado de puntos de extracción calles 41, 43 y 45 mina Diablo Regimiento, octubre 2013.

<sup>6</sup> El total de puntos de extracción son 45, considerando 18 puntos por calle, exceptuando la calle 45 que solo posee 9 puntos a un lado (H).

## 6.2.1 Equipos LHD Manuales

El modelo considera un equipo LHD por calle de producción. Las características de los equipos LHD manuales se pueden ver en la Tabla 19.

Tabla 19: Características principales del equipo LHD de 13 yd<sup>3</sup> (catálogo Sandvik Toro 0010). Se considera una distribución uniforme con el valor promedio más y menos un 20% de variación para cada parámetro.

Parámetro		Unidad
Capacidad	7/10	yd <sup>3</sup> /ton
Factor de llenado	90	%
Velocidad vacío	12	km/h
Velocidad cargado	10	km/h
Tiempo de maniobras	0,5	min
Tiempo de carga	15	seg
Tiempo de vaciado	12	seg

## 6.2.2 Frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños

Ambos eventos se modelan en función de la altura de columna extraída [m]. A continuación, en la Figura 21 se presenta el número de eventos cada 1000 toneladas extraídas y las toneladas extraídas entre eventos, tanto para colgaduras basadas en los registros de Diablo Regimiento y sobre-tamaños basado en registros de RENO.

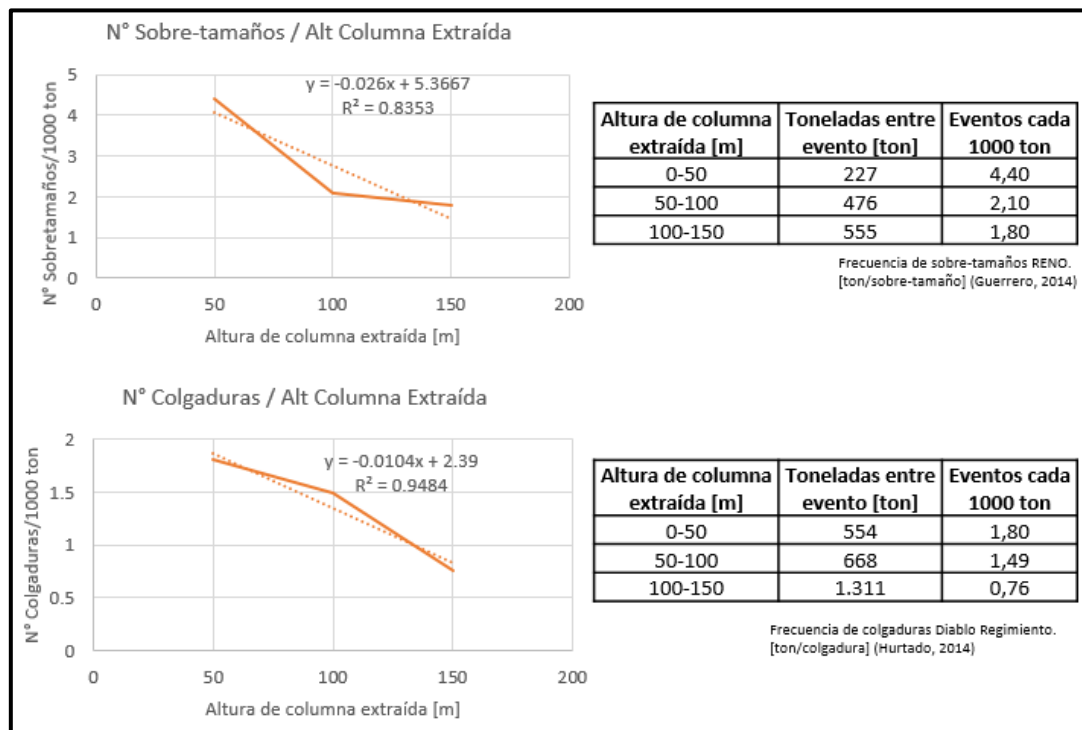


Figura 21: Frecuencia de colgaduras de mineral grueso y sobre-tamaños. (Guerrero, 2014 y Hurtado, 2014)

Para calcular la frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños, se incorpora al modelo el tonelaje extraído acumulado a la fecha de la simulación (octubre 2013) y el área para cada punto de extracción. Con estos datos se calcula la altura de columna extraída como el tonelaje extraído acumulado dividido en el área del punto de extracción, luego este valor corresponde al “x” de la regresión lineal indicada en los gráficos de la Figura 21, reemplazando el valor “x” se obtiene la frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños para cada punto en evaluación. El resultado corresponde a la frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños que se expresa como el número de eventos cada 1000 toneladas extraídas. Esta frecuencia es multiplicada por la capacidad de balde del equipo LHD, así se obtiene finalmente un valor entre 0 y 100 que define la probabilidad “p” de que ocurra el evento en cuestión cada vez que se realice una extracción. Cada vez que se realiza una extracción se genera una variable aleatoria con valor entre 0 y 100, si esta variable tiene un valor inferior a “p” ocurre el evento en cuestión.

En la Tabla 20 se observa el promedio de los parámetros requeridos para el cálculo de colgaduras y sobre-tamaños para el sector en estudio y en el ANEXO B se detallan los valores para cada punto de extracción.

Tabla 20: Altura de columna extraída promedio para las calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento (Dic. 2015)

	<b>Ton acum. Dic 2015</b>	<b>Área [m2]</b>	<b>Altura de columna extraída [m]</b>
Promedio	135.135	339	148
Desv. Std.	51.769	7	57

En la Tabla 21 se indica el tiempo para largar una colgadura y para reducir un sobre-tamaño. Cada uno de estos procesos, descuelgue y reducción secundaria, tiene una tasa de falla la cual es indicada para cada caso.

Tabla 21: Tiempos y tasa de falla de largaduras y reducción secundaria (Maass, 2013) y (Guerrero, 2014).

<b>Tiempos</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de largadura de gruesos	42 ± 12 min
Tiempo de reducción secundaria	36 ± 10 min
Frecuencia de falla en el largadura de gruesos	56 ± 16 %
Frecuencia de falla de reducción secundaria	20 ± 6 %

### 6.2.3 Frecuencia de fallas y mantenencias de equipos, calles y piques

A continuación, en la Tabla 22 se indica la frecuencia de mantenencias programadas y no programadas de los equipos LHD, calles de producción y piques de traspaso con los respectivos tiempos de mantención. La mantención de las calles incluye la reparación de carpeta de rodado, restablecimiento de servicios, limpieza de la calle, etc., mientras que la mantención de los piques incluye reparaciones del buzón, limpieza del pique con mineral grueso (choleo), drenaje de agua en el pique, etc.

Tabla 22: Frecuencias y tiempos de mantención de equipos LHD, calles y piques de traspaso (PPM mensual ES Bloque 1 y 2 mes de agosto-2015, Informe mensual de maquinarias Geovita Sept-Oct 2015).

<b>Frecuencia mantención y fallas</b>	<b>Valor</b>
Frecuencia mantención programada LHD	Una vez cada $14 \pm 3$ días
Tiempo mantención programada LHD	$3 \pm 1$ horas
Frecuencia de falla LHD	Una vez cada $4 \pm 1$ días
Tiempo de mantención no programada LHD	$18 \pm 5$ horas
Utilización promedio LHD	$84 \pm 5$ %
Frecuencia mantención programada calle y pique	Una vez cada 10 días
Tiempo mantención programada calle y pique	$14 \pm 3$ horas

Las mantenciones y fallas son modeladas con variables uniformes, por ejemplo la mantención programada de un LHD ocurre cada  $14 \pm 3$  días, esto quiere decir que se genera una variable aleatoria que puede tomar un valor entre 11 y 17 días con igual probabilidad. Una vez que transcurre este tiempo, una variable binaria se le asigna como valor 1, indicando que hay mantención del equipo LHD y se genera otra variable aleatoria que toma un valor entre 2 y 4, para definir la cantidad de horas que durará la mantención. Transcurrido este tiempo la variable de mantención binaria toma nuevamente valor 0 indicando que terminó la mantención y así sucesivamente se espera al siguiente evento de mantención.

#### 6.2.4 Velocidad de extracción planificada y máxima

Para el caso de extracción manual, solo pueden ser extraídos los puntos en estado seco y limitado. El modelo permite asignar para cada punto según su condición la velocidad máxima que se puede extraer a escala diaria y mensual (ver Tabla 23).

Tabla 23 Velocidad de extracción planificada y máxima para la operación manual.  
(PAM y CARTIR Octubre 2013, CODELCO)

<b>Velocidad de extracción planificada mensual para los puntos secos y limitados</b> [t/m <sup>2</sup> -día]	Mediante esta velocidad de extracción se calcula el tonelaje planificado para el mes a cada punto de extracción. Esta velocidad está basada según el PAM de Octubre del 2013, donde los puntos secos se planifican con una velocidad de extracción de <b>0,46 [t/m<sup>2</sup>-día]</b> en promedio por día y los puntos limitados con una velocidad de extracción de <b>0,18 [t/m<sup>2</sup>-día]</b> en promedio por día.
<b>Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos secos y limitados</b> [t/m <sup>2</sup> -día]	Valor restringido máximo de <b>1,0 [t/m<sup>2</sup>-día]</b> en puntos secos y <b>0,5 [t/m<sup>2</sup>-día]</b> en puntos limitados. Este valor está basado en el análisis de riesgo de ocurrencia de un evento de barro para la extracción manual de mineral seco en un sector bajo riesgo de agua/barro (BCTEC, 2016).

### 6.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El objetivo de la calibración, es que el modelo sea capaz con la información ya recopilada predecir el tonelaje mensual extraído a futuro y así mejorar la planificación del sector. Para lograr el objetivo, primero se ajusta el modelo de manera tal que replique el tonelaje extraído en octubre del 2013 a nivel de sector (3 calles) y puntos de extracción de manera manual, tomando en cuenta el tonelaje planificado según el PAM de ese mes. Es decir, el modelo recibe como dato de entrada el plan mensual y entrega como resultado el tonelaje extraído, simulado por día por punto.

Como parámetro de ajuste se definen el tiempo de trabajo de las palas por turno (un turno tiene una duración de 8 horas). Este parámetro de ajuste se debe, a que como se mencionó anteriormente el modelo no considera todas las interferencias que pueden ocurrir en la realidad. A continuación se indican las interferencias que están fuera del alcance de las simulaciones:

- Tiempo de carga de petróleo en equipos
- Interferencia de equipos en el pique de traspaso
- Disponibilidad piques de traspaso
- Disponibilidad buzones
- Disponibilidad equipos de descuelgue y reducción secundaria
- Agotamiento de puntos de extracción
- Mantenciones programadas y no del sistema de transporte
- Mantenciones programadas y no de la planta
- Mantenciones programadas y no del sistema de ventilación
- Mantenimiento y reposición de servicios interior mina

En el Gráfico 1 y la Tabla 24 se indica el tonelaje extraído simulado para 3 calles en el mes de octubre del 2013 para valores de 1, 2, 3, 4, 4½, 5, 5½, 6 y 7 horas de tiempo de trabajo de palas por turno y el error respecto del tonelaje extraído para dicho mes. Se puede observar que se obtiene el menor error (2%) cuando las horas por turno son 5.

Gráfico 1: Tonelaje extraído simulado versus horas de trabajo de palas por turno.

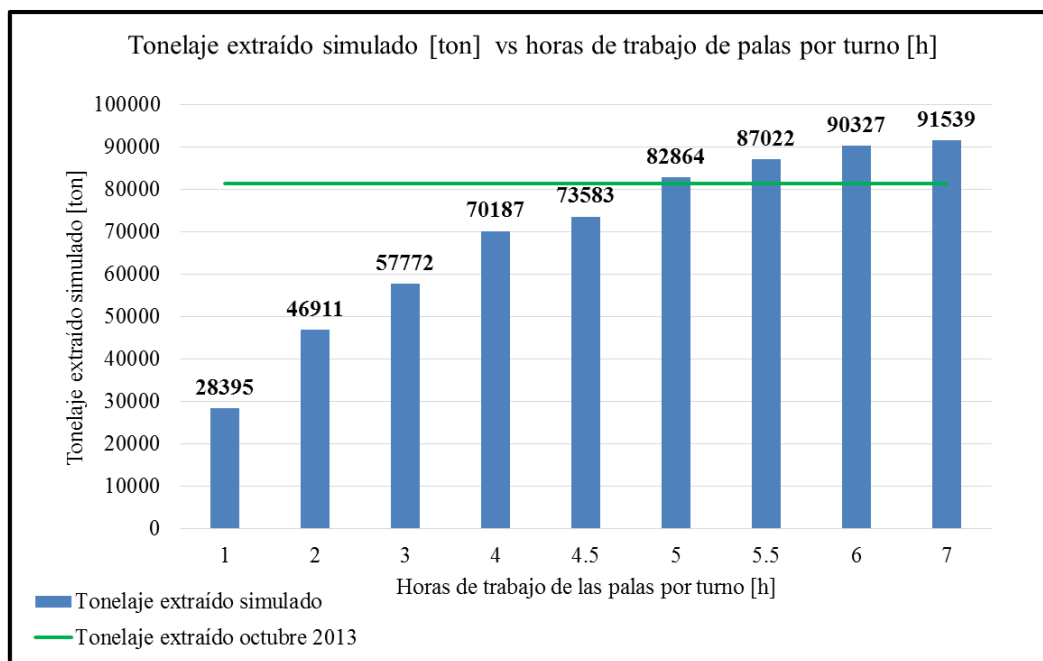




Tabla 24: Tonelaje extraído simulado por sector de 3 calles para el mes de octubre 2013.

Horas de trabajo de las palas por turno	Tonelaje extraído simulado sector 3 calles mes de octubre 2013 [ton]	Error respecto del tonelaje real extraído por el sector de 3 calles octubre 2013 (81.377 ton)
7 h	91.539	12%
6 h	90.327	11%
5½ h	87.022	7%
<b>5 h</b>	<b>82.864</b>	<b>2%</b>
4½ h	73.583	-10%
4 h	70.187	-14%
3 h	57.772	-29%
2 h	46.911	-42%
1 h	28.395	-65%

A nivel de punto de extracción la simulación que tiene menor error (-1%) es con 4h por turno, sin embargo, el análisis indica una alta dispersión de un 51% (Gráfico 2 y Tabla 25).

Se concluye que el modelo es capaz de replicar el tonelaje extraído para un sector de 3 calles, sin embargo, un análisis a nivel de puntos de extracción, muestra un mayor error y dispersión, por lo tanto, se seleccionan 5 h, como las horas de trabajo de palas por turno que mejor replican el tonelaje extraído, a nivel de sector para el mes de octubre 2013.

Cabe destacar que en el proceso de calibración no se busca determinar las horas efectivas de las palas, sino más bien, contar con una herramienta de análisis que indique un error de menos de un 5% respecto del valor medido (tonelaje total extraído a escala de mes y sector). Este parámetro será utilizado para evaluar estrategias de extracción con equipos tele-asistidos en el capítulo siguiente.

Gráfico 2: Error respecto del tonelaje real extraído por punto [%] v/s horas de trabajo por pala [h].

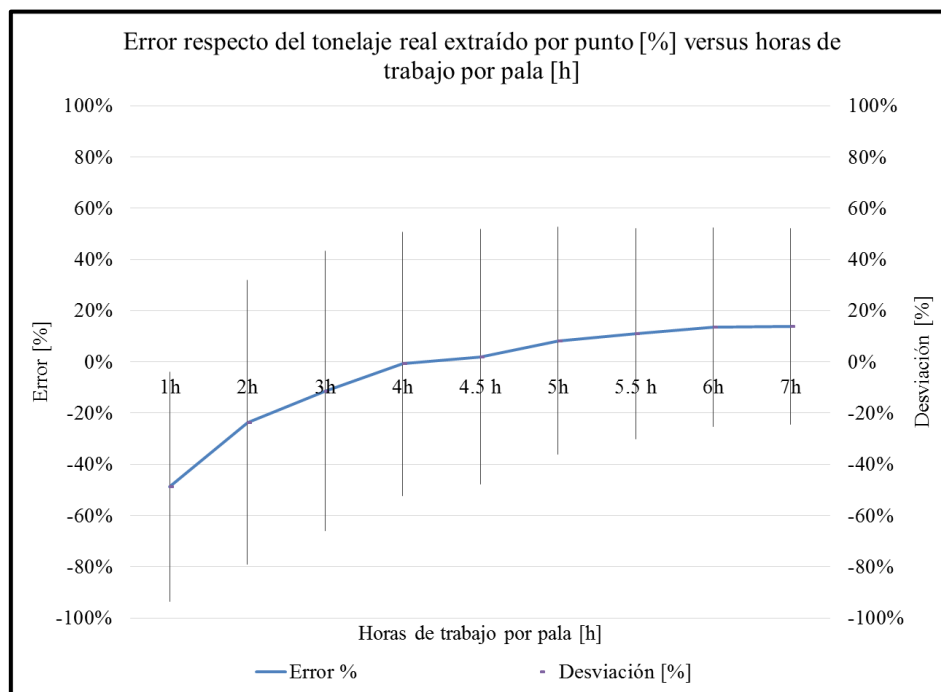
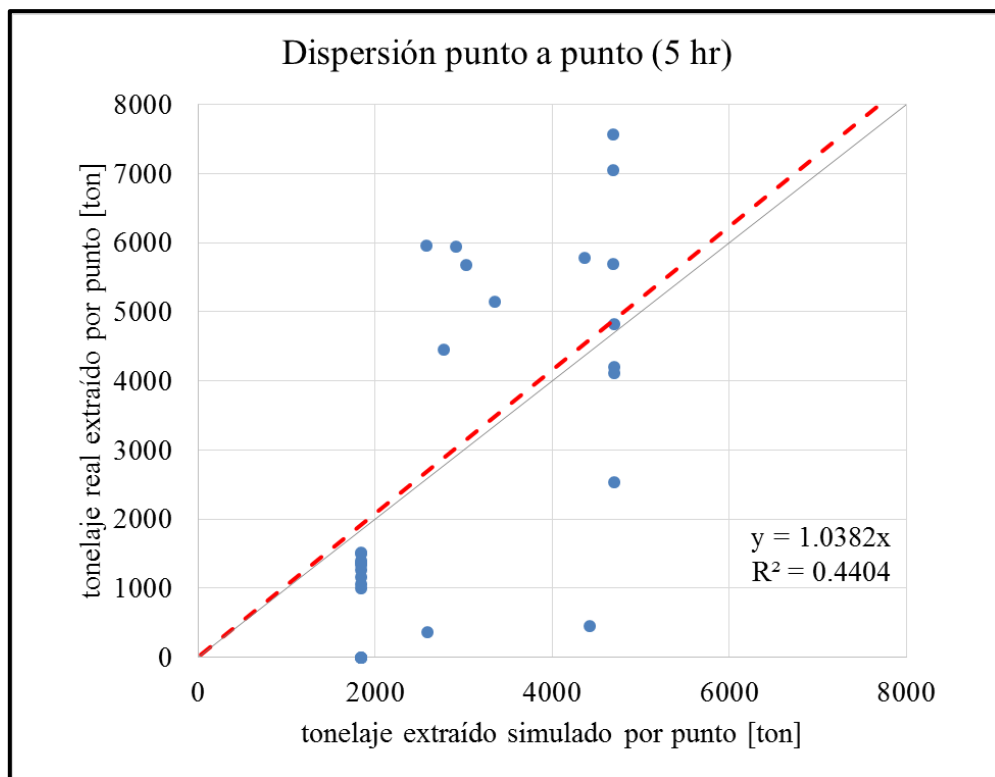


Tabla 25: Error del tonelaje extraído por punto simulado para el mes de octubre del 2013.

<b>Horas de trabajo de las palas por turno</b>	<b>Error respecto del tonelaje real extraído por punto octubre 2013 (81.377 ton)</b>
7 h	14 ± 38 %
6 h	14 ± 39 %
5½ h	11 ± 41 %
<b>5 h</b>	<b>8 ± 44 %</b>
4½ h	2 ± 50 %
4 h	-1 ± 51 %
3 h	-11 ± 55 %
2 h	-24 ± 56 %
1 h	-49 ± 45 %

Como se puede observar en el Gráfico 3, el tonelaje real extraído por punto es mayor al de la simulación. Este fenómeno ocurre debido a que el modelo no permite que se extraiga más mineral de los puntos que cumplen el plan de extracción mensual. En la realidad esto no ocurre ya que los operadores solo responden al tonelaje máximo que se puede extraer de un punto a escala diaria y no mensual. (Ver en el ANEXO C los gráficos de dispersión para el resto de las simulaciones) Para implementar la sobre extracción de puntos a escala diaria, se debe recopilar información que permita establecer una distribución de eventos de sobre extracción para cada punto y de esta forma asignar una variable aleatoria que con probabilidad “p” determine si se extrae o no el o los puntos que ya completaron su PAM para cada día de la simulación.

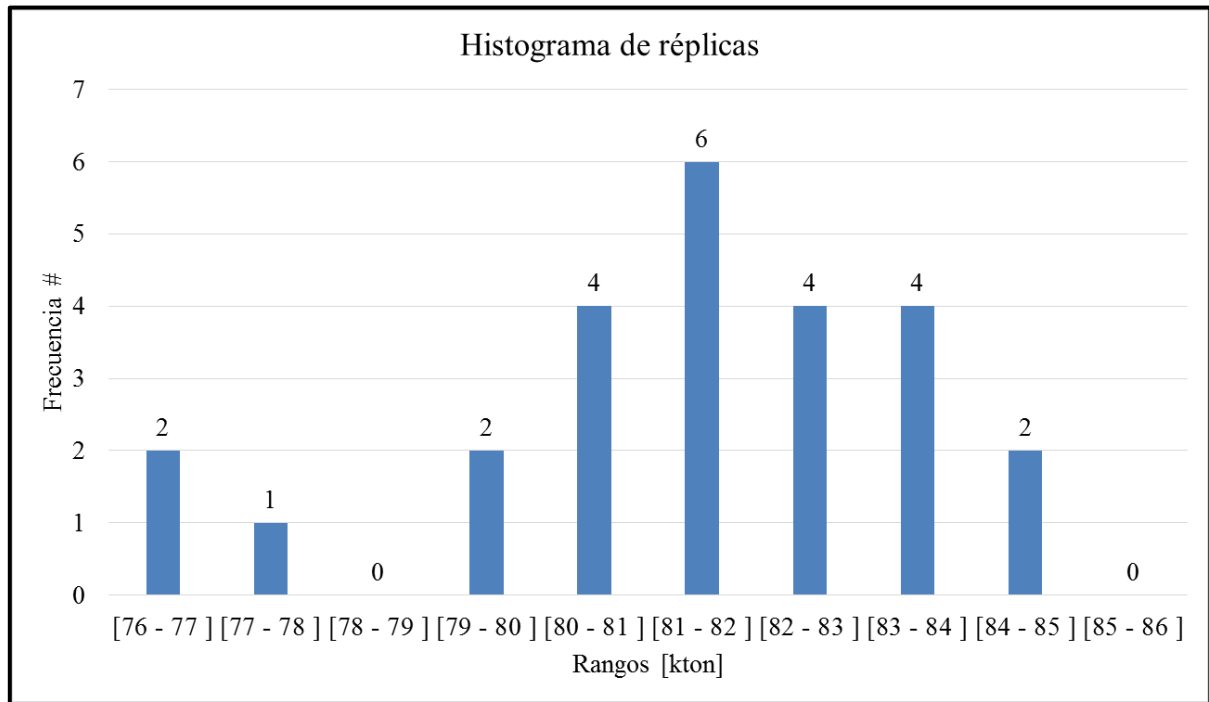
Gráfico 3: Comparación punto a punto entre tonelaje simulado por punto y tonelaje extraído real.



### 6.3.1 Número de réplicas

Para aproximar una distribución de probabilidades por medio de la simulación, es necesario determinar un número de réplicas. La precisión con que se estima la distribución dependerá, del número de ellas. De acuerdo a García E., 2006 se deben realizar 25 réplicas para obtener un nivel de confianza de un 5% por cola.

Gráfico 4: Histograma de réplicas de la simulación.



Como se puede observar en el Gráfico 4 la distribución de frecuencia del tonelaje simulado para un mes, corresponde a una distribución normal. El detalle de los tonelajes por replica se encuentra en el ANEXO D.

En la Tabla 26 se pueden observar los parámetros estadísticos resultantes de las 25 réplicas. El error asociado a las 25 réplicas es de un 0.9%, muy inferior a un 5%. Esto asegura que un 90% de las simulaciones realizadas presentarán una diferencia del tonelaje mensual extraído a nivel de sector menor o igual al 5% del promedio obtenido con 25 réplicas de esa simulación.

Tabla 26: Resultados de replicaciones de la simulación.

Número de réplicas	#	25
Tipo de distribución		Normal
Media	Ton	81.267
Desviación	Ton	2.135
$t_{\alpha/2, t-1}$	$t_{0.05, 40}$	1,708
<b>Error</b>	<b>%</b>	<b>0,9</b>
Intervalo de confianza (90%) <sup>7</sup>	Ton	[80.565 - 81.970]

<sup>7</sup> La fórmula para el cálculo del intervalo de confianza se encuentra en el ANEXO E.

### 6.3.2 Análisis de sensibilidad

Una vez calibrado el modelo, se realiza un análisis de sensibilidad, el cual permite evaluar la robustez del modelo de simulación frente a un cambio porcentual de las variables que componen el modelo. Se hizo una variación de cada variable en un  $\pm 20\%$  (excepto el número de equipos LHD) y se realizaron simulaciones para cuantificar el impacto porcentual respecto al tonelaje total extraído en la simulación (82.864 ton, caso 5 h efectivas por turno) de las principales variables del modelo.

Tabla 27: Resultados análisis de sensibilidad.

Variable	Error absoluto respecto del tonelaje extraído en la simulación de 5 h (82.864ton)
Tiempo de Mantenición LHD	$1.0 \pm 0.7 \%$
Tiempo de Mantenición NP LHD	$4.3 \pm 3.3 \%$
Tiempo de Mantenición Calle	$3.0 \pm 0.3\%$
Tiempo de Mantenición Pique	$4.9 \pm 2.6 \%$
Tiempo de Descuelgue de Gruesos	$3.8 \pm 3.7 \%$
Tiempo de Reducción Secundaria	$4.3 \pm 2.3 \%$
Frecuencia de Colgadura	$4.0 \pm 0.2 \%$
Frecuencia de Sobre-tamaño	$6.9 \pm 0.5 \%$
Factor de llenado del balde del LHD	$9.8 \pm 4.4 \%$
Velocidad del LHD	$4.8 \pm 0.4 \%$
Número de quipos LHD <sup>8</sup>	$28.7 \pm 5.2 \%$
Horas de trabajo por pala	$12.0 \pm 3.5 \%$

Como se puede observar en la Tabla 27, la variable más sensible del modelo corresponde a; el número de palas (28.65%), las horas de trabajo por pala ( $12 \pm 3\%$ ) y el factor de llenado de la pala (9,77%); la variable menos sensible corresponde al tiempo de mantenimiento de las palas (1,04%).

Dado que los datos de LHD disponibles, capacidad de balde de LHD (factor de llenado), frecuencia de colgaduras y sobre-tamaños son extraídos directamente de mina Diablo Regimiento, estos no distorsionarán el modelo de simulación, y por el contrario, dado el impacto que tienen en el modelo, van a contribuir acercándolo a la realidad. En el caso de las horas de trabajo por pala, este fue escogido como el parámetro de ajuste para la calibración, por lo que tampoco distorsiona el modelo.

Finalmente estos resultados muestran que la variación de  $\pm 20\%$  en las variables no incidirá más de un 5% en el resultado final del tonelaje extraído en la simulación, lo que indicaría la robustez del modelo frente a cambios en sus principales variables.

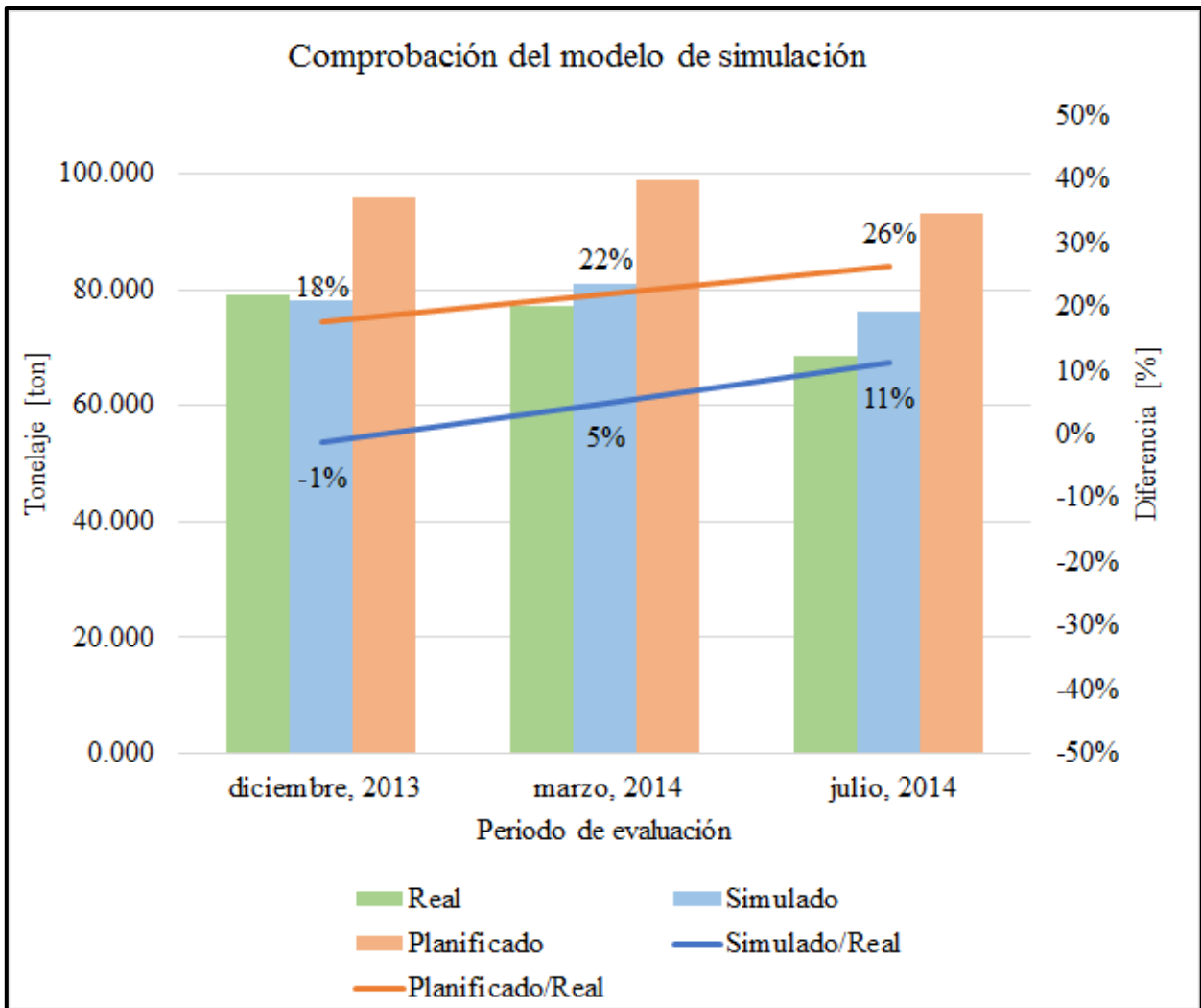
### 6.3.3 Comprobación del modelo

La finalidad de calibrar el modelo de simulación fue recopilar el impacto de las interferencias no incorporadas en la simulación y así predecir otros periodos a futuro. Para poder simular los modelos operacionales propuestos en un mes distinto del que se realizó la calibración, se debe proceder a la etapa de comprobación del modelo. Dado que el estado de los puntos de extracción y el tonelaje extraído por las 3 calles donde se realizará la extracción, varía de manera mensual, se propone

<sup>8</sup> El modelo se calibró con 2 equipos LHD, para el caso del análisis de sensibilidad se realizó la evaluación con 1 equipo.

simular 3 meses distintos del que se realizó la calibración, utilizando el mismo factor de horas de trabajo por pala y comprobar la exactitud de los resultados de extracción mensual. Se escogieron aleatoriamente los siguientes periodos; diciembre 2013, marzo 2014 y julio 2014.

Gráfico 5: Comprobación del modelo de simulación.



En el Gráfico 5 se puede observar la diferencia entre el tonelaje real extraído, el tonelaje simulado y el tonelaje planificado manteniendo las 5 horas de trabajo por pala por turno con que se calibró el modelo de simulación. Los meses de diciembre 2013 y marzo 2014 presentaron una diferencia menor al 5%, y el mes de julio 2014 un 11% entre el tonelaje simulado y el tonelaje real extraído. La diferencia entre el tonelaje planificado mensual y el real extraído es de un  $22 \pm 4\%$  en promedio para los periodos evaluados.

### 6.3.4 Conclusiones

El resultado más importante de la etapa de calibración, es la diferencia entre la capacidad predictiva de los modelos de planificación actual y la simulación. El modelo de simulación es capaz de predecir el tonelaje extraído mensual con un  $5 \pm 6\%$  de error, versus el modelo de planificación actual, que presenta errores de un  $22 \pm 4\%$ . Este resultado comprueba que la calibración fue exitosa y que la simulación debe ser incorporada en la etapa de planificación.

# CAPÍTULO 7 SIMULACIONES DEL MODELO OPERACIONAL

En este capítulo se evalúan estrategias de extracción que incorporan equipos LHD tele-asistidos para la extracción del sector definido por 3 calles. La principal característica de los equipos LHD tele-asistidos, es que poseen la capacidad de extraer mineral desde puntos declarados barro, al ser operados desde una sala de control y no existir riesgo para el personal. Otra característica de estos equipos es extraer puntos limitados a la misma velocidad que se extraen los puntos secos, dado que como no tienen operador a bordo se mitigan los riesgos de un posible escurrimiento o bombeo de agua/barro. El objetivo es determinar el tonelaje mensual extraído que se alcanzaría con la implementación de una estrategia de extracción con equipos LHD tele-asistidos, la velocidad de extracción media [t/m<sup>2</sup>-día] alcanzada en los puntos de extracción y la uniformidad del tiraje [%] por punto.

## 7.1 SELECCIÓN SECTOR PARA LA SIMULACIÓN: FASE II, MINA DIABLO REGIMIENTO

Para la simulación se toma como caso de estudio un módulo compuesto por 3 calles pertenecientes a la Fase II de mina Diablo regimiento (calles, 41, 43 y 45). La simulación tiene como entrada los datos correspondientes al mes de diciembre de 2015. En la Figura 22 se muestra el estado de los puntos de extracción de Diablo Regimiento al 1 de diciembre del 2015 (rojo puntos declarados agua/barro, amarillo puntos limitados, verde puntos en régimen o quiebre sin limitaciones de extracción y gris puntos cerrados), en un recuadro negro se muestra el sector que será simulado.

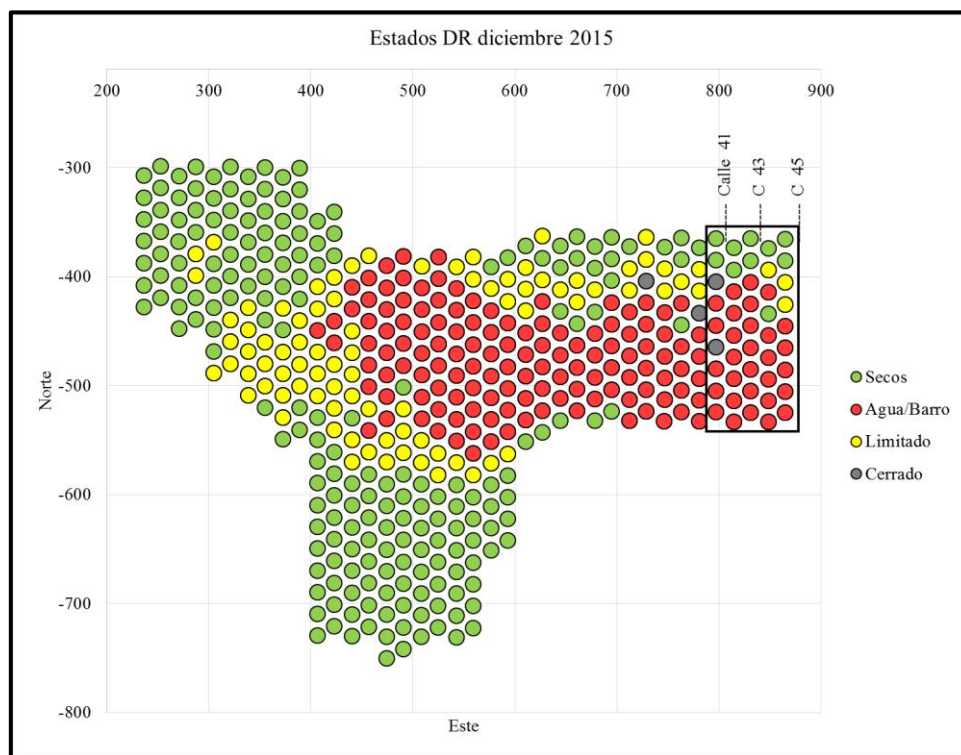


Figura 22: Fase II mina Diablo Regimiento, condición a diciembre del 2015.

En la Tabla 28 se indica el tonelaje planificado según el PAM de diciembre del 2015 para el sector compuesto por 3 calles y el tonelaje real extraído según la extracción histórica del bloque. Se puede observar que el cumplimiento del plan fue de un 35%.

Tabla 28: Tonelaje planificado y extraído para el mes de diciembre del 2015.

<b>Tonelaje mes de diciembre 2015</b>	<b>Valor [ton]</b>
Planificado según PAM	61.420
Extraído según extracción histórica	21.293

## 7.2 REGLAS OPERACIONALES DE EXTRACCIÓN CON EQUIPOS LHD TELE-ASISTIDOS

Basándose en la definición de modelo operacional de extracción con equipos LHD tele-asistidos, se presentan las siguientes reglas para la operación y las alternativas a ser evaluadas cuando se incorporan estos equipos para la extracción de puntos declarados en estado barro (Tabla 29).

Tabla 29: Reglas de operación con equipos LHD tele-asistidos.

<b>Variable Operacional</b>	<b>Descripción/estrategias</b>
<b>Extracción</b>	Los equipos LHD tele-asistidos <sup>9</sup> pueden extraer puntos <b>operativos (secos y limitados)</b> y declarados <b>agua/barro</b> . Para el estudio conceptual los puntos agotados se consideran agua/barro.
<b>Mezcla (seco/húmedo)</b>	Se refiere a la mezcla de mineral entre el seco y húmedo que debe ser vaciada en el pique de traspaso para no producir un escurrimiento o bombeo en el nivel de transporte. Las mezclas a evaluar son las siguientes: <b>Opción 1: 1:1</b> basado en la mezcla utilizada en la prueba de extracción en DR. <b>Opción 2: 1:3</b> basado en lo utilizado en DOZ, Freeport. <b>Opción 3: 1:5</b> valor definido como un análisis de sensibilidad. <b>Opción 4: 1:6</b> basado en lo utilizado en DOZ, Freeport
<b>Número de LHD tele-asistidos.</b>	Se define como sector de extracción a un módulo de 3 calles de producción y la extracción tele-comandada se realiza por turnos. Las siguientes estrategias son evaluadas: <b>Opción 1: Un equipo LHD</b> con extracción tele-asistido, alternando las calles en donde se realiza la extracción. <b>Opción 2: Dos equipos LHD</b> con extracción tele-asistida, operan de manera simultánea y alternan las calles donde se realiza la extracción.

<sup>9</sup> Para la simulación con equipos tele-asistidos se considera que éstos operan con una velocidad un 30% menor a la de un equipo manual.

Tabla 30: Continuación de la tabla anterior.

<p><b>Velocidad de extracción planificada mensual para los puntos operativos [t/m2-día]</b></p>	<p>Velocidad de extracción media planificada para el mes para puntos de extracción que se encuentran <b>operativos (secos y limitados)</b>. Mediante esta velocidad de extracción se calcula el tonelaje planificado para el mes a cada punto de extracción. Esta velocidad está basada según el PAM de diciembre del 2015, donde los puntos operativos (puntos secos y limitados) se planifican con una velocidad de extracción de <b>0,46 [t/m2-día]</b> en promedio por día.</p>																			
<p><b>Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos operativos [t/m2-día]</b></p>	<p>Valor restringido máximo de <b>1,0 [t/m2-día]</b> en <b>puntos operativos (secos y limitados)</b>. Este valor está basado en el análisis de riesgo de ocurrencia de un evento de barro para la extracción manual de mineral seco, en un sector bajo riesgo de agua/barro (BCTEC, 2016).</p>																			
<p><b>Velocidad de extracción media planificada mensual para los puntos en estado barro extraídos mediante equipos LHD tele-asistidos [t/m2-día]</b></p>	<p>Mediante esta velocidad de extracción, se calcula el tonelaje planificado para el mes a cada punto de extracción. Se definen las siguientes estrategias a ser evaluadas:</p> <p><b>Opción 1: 0,18 [t/m2-día]</b> valor basado en el valor promedio que se planifican los puntos limitados, lo que corresponde a extraer 1.620 ton por mes por punto. La velocidad de extracción máxima para la operación de puntos barro es para esta opción de 0,5 [t/m2-día].</p> <p>El tonelaje planificado mensual por punto de extracción se obtiene de la multiplicación de la velocidad de extracción planificada [t/m2-día] por el área de un punto [m2] y 30 días que tiene un mes. Para calcular el tonelaje planificado diario, el tonelaje planificado mensual es dividido en 30, esto asume que se planifica el mismo tonelaje para todos los días del mes.</p> <table border="1" data-bbox="501 1268 1448 1491"> <thead> <tr> <th>Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]</th> <th>Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]</th> <th>Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340 m2 por punto) [ton]</th> <th>Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,18</td> <td>1.836 / 61</td> <td>58.752</td> <td>119.748</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Opción 2: 0,46 [t/m2-día]</b> basado en el valor promedio que se planifican los puntos operativos, lo que equivale a 4.692 ton por mes. La velocidad de extracción máxima para la operación de puntos barro es para este caso 1,0 [t/m2-día].</p> <table border="1" data-bbox="501 1659 1448 1881"> <thead> <tr> <th>Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]</th> <th>Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]</th> <th>Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340m2 por punto) [ton]</th> <th>Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,46</td> <td>4.692 / 156</td> <td>150.144</td> <td>211.140</td> </tr> </tbody> </table>				Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]	Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]	Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340 m2 por punto) [ton]	Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]	0,18	1.836 / 61	58.752	119.748	Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]	Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]	Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340m2 por punto) [ton]	Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]	0,46	4.692 / 156	150.144	211.140
Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]	Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]	Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340 m2 por punto) [ton]	Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]																	
0,18	1.836 / 61	58.752	119.748																	
Velocidad de extracción planificada [t/m2-día]	Tonelaje planificado por punto por mes / día [ton]	Tonelaje planificado puntos barro sector (32 puntos, 340m2 por punto) [ton]	Tonelaje planificado para el sector de 3 calles (considera puntos operativos (60.996 ton) y barro) [ton]																	
0,46	4.692 / 156	150.144	211.140																	



Tabla 31: Continuación de la tabla anterior.

<p><b>Velocidad de extracción mínima y máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]</b></p>	<p>Valor medido a escala diaria y por punto de extracción. Para la velocidad mínima se define como estrategia extraer a lo menos 2 baldadas/turno (<b>0,03 [t/m2-día]</b>) para evitar colgaduras de finos por compactación. Respecto de la velocidad de extracción máxima para la operación de puntos barro se definen las siguientes estrategias a ser evaluadas:</p> <p><b>Opción 1: 0,5 [t/m2-día]</b> basado en el valor máximo en promedio que se extraen los puntos limitados en el Bloque 1 de mina Esmeralda (en base a la revisión de la base de datos de extracción histórica de puntos limitado del Bloque 1 realizada por BCTEC, 2015).</p> <p><b>Opción 2: 1,0 [t/m2-día]</b> valor definido como un análisis de sensibilidad.</p>																																			
<p><b>Estabilización y chequeo.<sup>10</sup></b></p>	<p>En caso de operaciones que requieran ingreso de personal (descuelgues, reducción secundaria o mantenciones), se tiene que una vez que finaliza el último turno extraído mediante equipos LHD tele-asistidos, debe existir un periodo donde no se realiza extracción de ningún tipo.</p> <p><b>Opción 1: un turno de estabilización.</b> Análisis de sensibilidad.  <b>Opción 2: dos turnos de estabilización.</b> Basado en pruebas de Fase I DR.</p> <p>Una vez finalizada la estabilización, se considera un turno de “chequeo”, en el cual se realizarán las operaciones con ingreso de personal (ver Tabla 32 como ejemplo para un turno de extracción con 2 equipos LHD tele-asistidos y dos turnos de estabilización). En el ANEXO F se indican las opciones a evaluar.</p> <p>Tabla 32: Dos turnos de estabilización para el caso de 2 equipos tele-asistidos.</p> <table border="1" data-bbox="560 1161 1136 1419"> <thead> <tr> <th>Días</th> <th>Turnos</th> <th>Calle - 41</th> <th>Calle - 43</th> <th>Calle - 45</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1</td> <td>A</td> <td>TA</td> <td>TA</td> <td>S.E</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>TA</td> <td>TA</td> <td>S.E</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>TA</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">2</td> <td>A</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>Chequeo</td> <td>Chequeo</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>S.E</td> <td>S.E</td> <td>Chequeo</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1193 1199 1411 1346" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <table border="1"> <tr><td style="background-color: #0070C0; color: white;">Tele - asistido</td></tr> <tr><td style="background-color: #FF0000; color: white;">Estabilización</td></tr> <tr><td style="background-color: #FFFF00; color: black;">Chequeo</td></tr> <tr><td style="background-color: #A9A9A9; color: black;">S.E</td></tr> </table> </div> <p>*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo</p>	Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45	1	A	TA	TA	S.E	B	TA	TA	S.E	C	E	E	TA	2	A	E	E	E	B	Chequeo	Chequeo	E	C	S.E	S.E	Chequeo	Tele - asistido	Estabilización	Chequeo	S.E
Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45																																
1	A	TA	TA	S.E																																
	B	TA	TA	S.E																																
	C	E	E	TA																																
2	A	E	E	E																																
	B	Chequeo	Chequeo	E																																
	C	S.E	S.E	Chequeo																																
Tele - asistido																																				
Estabilización																																				
Chequeo																																				
S.E																																				

<sup>10</sup> El chequeo no considera el descuelgue de puntos con agua/barro que presenten compactación de finos. Esto se debe a que en el presente no se ha recopilado información que permita predecir la compactación de los puntos de extracción.

### 7.3 PLAN DE SIMULACIONES

En la Tabla 33 se indican las 32 estrategias que serán evaluadas.

Tabla 33: Estrategias de extracción con equipos LHD tele-asistidos.

Simulación	Turnos de Estabilización	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m2-día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]	Número de equipos LHD tele-asistidos	Mezcla
1	2 turnos de estabilización	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5 [t/m2-día]	1	1:1
2					1:3
3					1:5
4					1:6
5				1:1	
6				1:3	
7				1:5	
8				1:6	
9		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0 [t/m2-día]	1	1:1
10					1:3
11					1:5
12					1:6
13				1:1	
14				1:3	
15				1:5	
16				1:6	
17	1 turno de estabilización	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5 [t/m2-día]	1	1:1
18					1:3
19					1:5
20					1:6
21				1:1	
22				1:3	
23				1:5	
24				1:6	
25		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0 [t/m2-día]	1	1:1
26					1:3
27					1:5
28					1:6
29				1:1	
30				1:3	
31				1:5	
32				1:6	

## 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de las simulaciones de las estrategias de extracción con operación de equipos LHD tele-asistidos, se muestran en función de las siguientes variables:

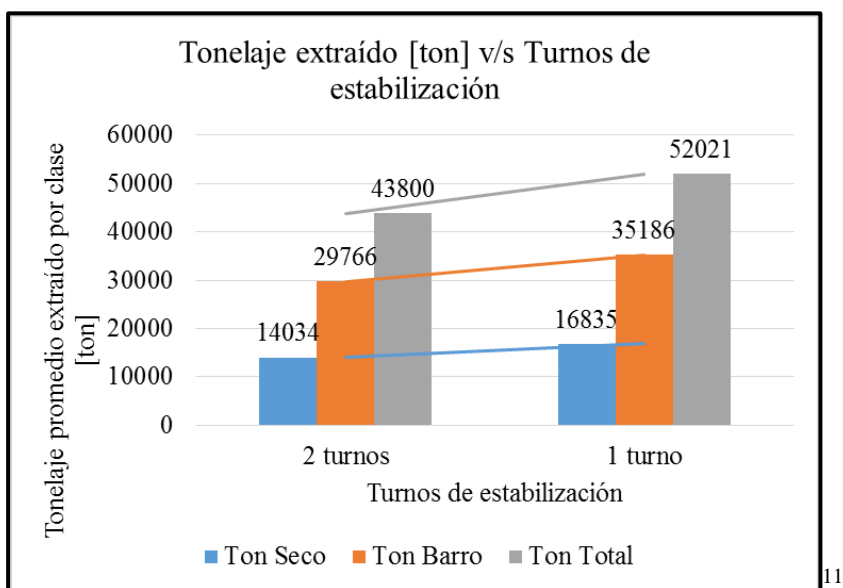
- Tonelaje mensual extraído para puntos operativos y puntos agua/barro [ton]
- Uniformidad del tiraje [%]
- Velocidad de extracción promedio mensual por punto para puntos operativos y agua/barro [t/m<sup>2</sup>-día]
- Tonelaje mensual de finos extraídos [ton].

### 7.4.1 Tonelaje Mensual Extraído [Ton]

En la Tabla 34 se indican los resultados de tonelaje extraído mensual [ton] para puntos operativos y agua/barro. Se puede observar lo siguiente:

**Turnos de estabilización:** Como se observa en el Gráfico 6, el tonelaje total extraído es de 43.800 ton con 2 turnos de estabilización y 52.021 con 1 turno de estabilización. En promedio el tonelaje mensual extraído aumenta un  $20 \pm 8 \%$  con 1 turno de estabilización respecto de 2 turnos.

Gráfico 6: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Turnos de estabilización.



**Velocidad de extracción planificada mensual [t/m<sup>2</sup>-día]:** En relación a las opciones 1 y 2 <sup>12</sup> (velocidad de extracción planificada y máxima para puntos barro), no existe mayor variación en los resultados en términos de tonelaje total extraído ( $3 \pm 6 \%$ ). Esto se debe principalmente a la baja productividad de los equipos LHD tele-asistidos, que en la mayoría de los casos no logran

<sup>11</sup> Ton Seco: corresponde a los puntos operativos (secos y limitados)

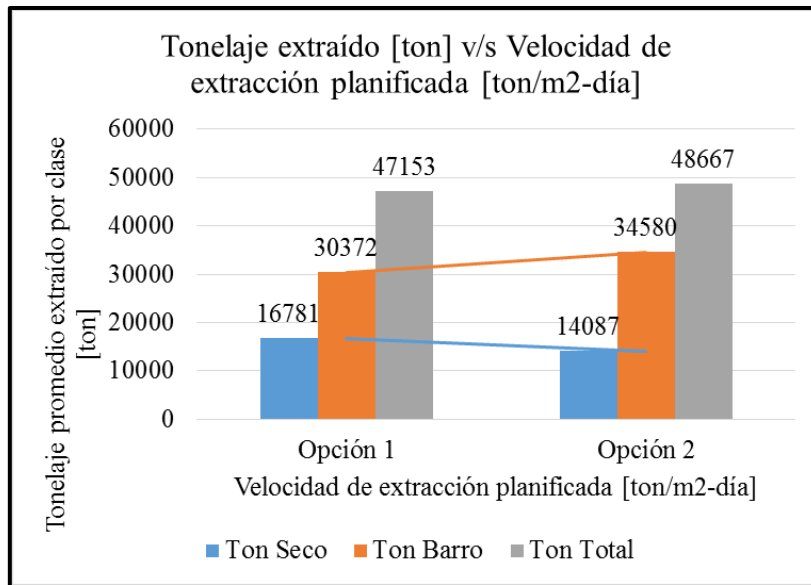
Ton Barro: corresponde a los puntos en estado de agua/barro.

<sup>12</sup> Opción 1: Velocidad de extracción planificada de 0,18 [t/m<sup>2</sup>-día] y máxima de 0,5 [t/m<sup>2</sup>-día] para puntos barro.

Opción 2: Velocidad de extracción planificada de 0,46 [t/m<sup>2</sup>-día] y máxima de 1,0 [t/m<sup>2</sup>-día] para puntos barro.

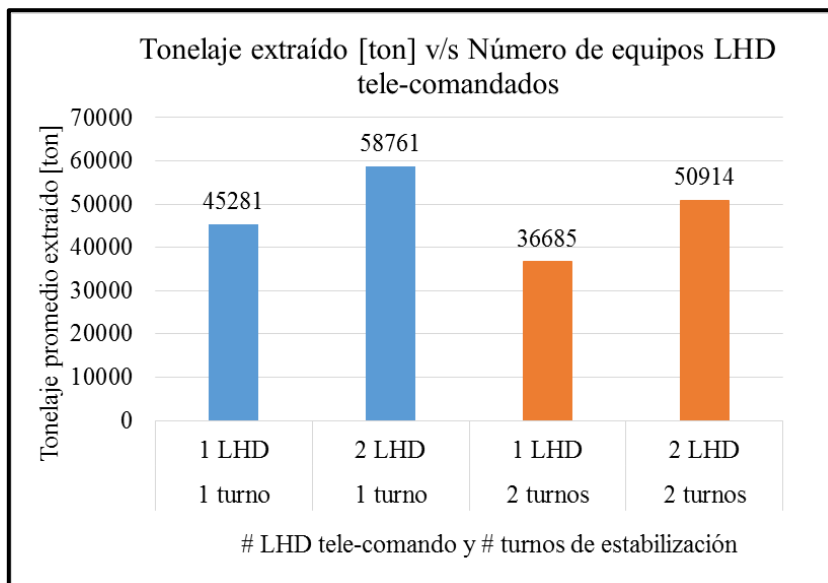
extraer el tonelaje mensual planificado. Realizando el análisis por estado de punto, se puede observar que la opción 2 presenta un alza de un  $14 \pm 6 \%$  en los tonelajes mensuales extraídos para los puntos barro y una baja de un  $20 \pm 15 \%$  para los puntos operativos (ver Gráfico 7)

Gráfico 7: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m<sup>2</sup>-día].



**Número de equipos LHD tele-asistidos:** El tonelaje total extraído mensual aumenta en un  $39 \pm 7 \%$  (promedio) con la incorporación de un segundo equipo LHD tele-asistido para el caso con 2 turnos de estabilización. En cambio, para las estrategias con 1 turno de estabilización el aumento de tonelaje total extraído mensual con la incorporación de un segundo equipo LHD tele-asistido es de un  $30 \pm 8 \%$  promedio (ver Gráfico 8).

Gráfico 8: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Número de equipos LHD tele-asistidos.



**Razón de mezcla:** A medida que aumenta la razón de mezcla, disminuye el tonelaje extraído mensual de puntos operativos ( $-58 \pm 9\%$ ) y aumenta el tonelaje extraído mensual de puntos barro ( $52 \pm 10\%$ ). En relación al tonelaje total extraído mensual, se puede observar que con un aumento de razón de mezcla, se produce una baja de 2500 ton en promedio ( $6 \pm 7\%$ ), esto se debe, a que para extraer la misma cantidad de tonelaje con una mayor razón de mezcla, se deben extraer más veces los puntos barro, los cuales se encuentran más distantes que los puntos operativos al pique de traspaso por lo que los equipos LHD deben recorrer mayores distancias (ver Gráfico 9).

Gráfico 9: Tonelaje mensual extraído [ton] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).

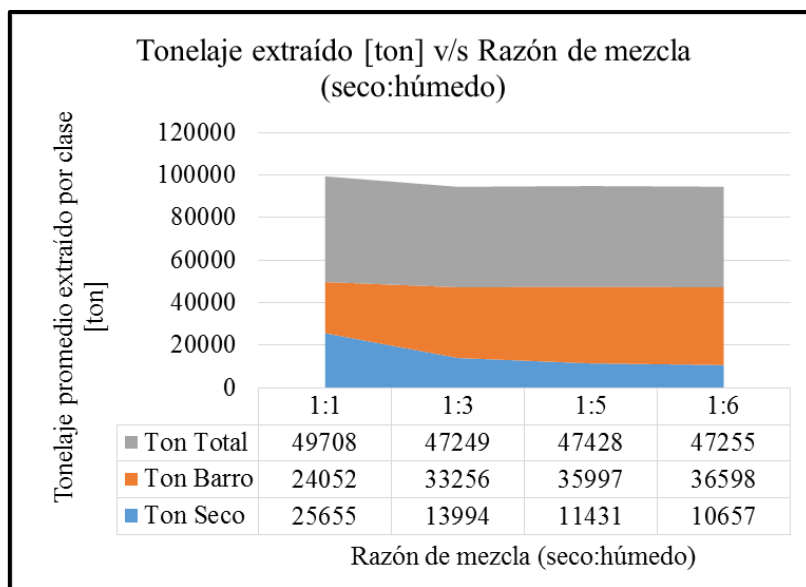


Tabla 34 Resultados de tonelaje total extraído (Puntos operativos, barro y total).

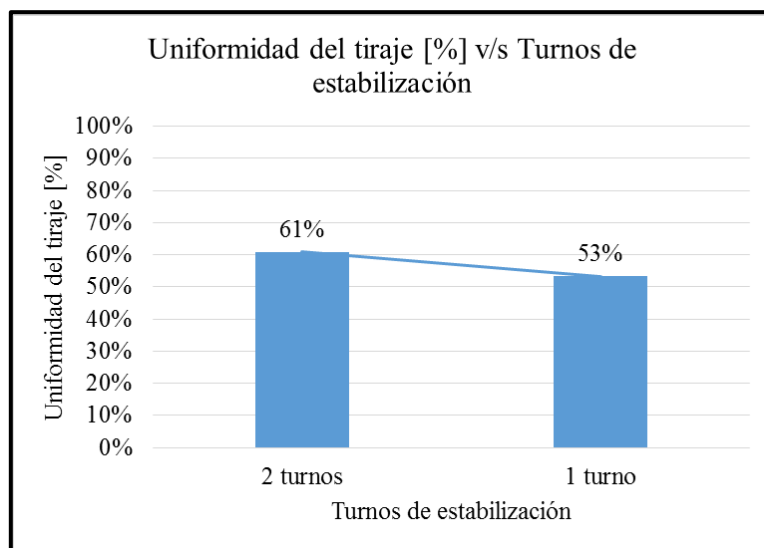
#	Turnos de Estabilización	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m2-día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]	Número de equipos LHD tele-asistidos	Mezcla	Tonelaje Total Extraído [ton]	Tonelaje total extraído de puntos operativos [ton]	Tonelaje total extraído de puntos barro [ton]
1	2 turnos	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	37.413	20.183	17.230
2					1:3	37.017	13.019	23.999
3					1:5	36.388	10.994	25.394
4					1:6	35.593	10.066	25.528
5				2	1:1	49.877	25.851	24.026
6					1:3	49.702	15.584	34.118
7					1:5	52.978	14.191	38.787
8					1:6	48.710	13.079	35.631
9		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	40.308	20.256	20.052
10					1:3	36.510	9.686	26.824
11					1:5	34.334	7.108	27.226
12					1:6	35.917	6.794	29.122
13				2	1:1	51.110	25.602	25.508
14					1:3	53.020	13.679	39.340
15					1:5	48.284	9.314	38.970
16					1:6	53.635	9.135	44.500
17	1 turno	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	47.185	25.565	21.620
18					1:3	42.565	15.309	27.257
19					1:5	44.954	13.183	31.771
20					1:6	44.718	13.206	31.512
21				2	1:1	56.999	30.131	26.868
22					1:3	54.626	17.189	37.437
23					1:5	57.489	15.677	41.812
24					1:6	58.235	15.273	42.962
25		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	50.041	25.141	24.900
26					1:3	42.247	11.378	30.869
27					1:5	45.052	9.364	35.688
28					1:6	45.483	8.135	37.348
29				2	1:1	64.728	32.513	32.215
30					1:3	62.308	16.105	46.203
31					1:5	59.948	11.617	48.331
32					1:6	55.752	9.568	46.184

## 7.4.2 Uniformidad Del Tiraje [%]

En la Tabla 35 se indican los resultados de uniformidad del tiraje [%] para puntos barro y operativos en conjunto. Se puede observar lo siguiente:

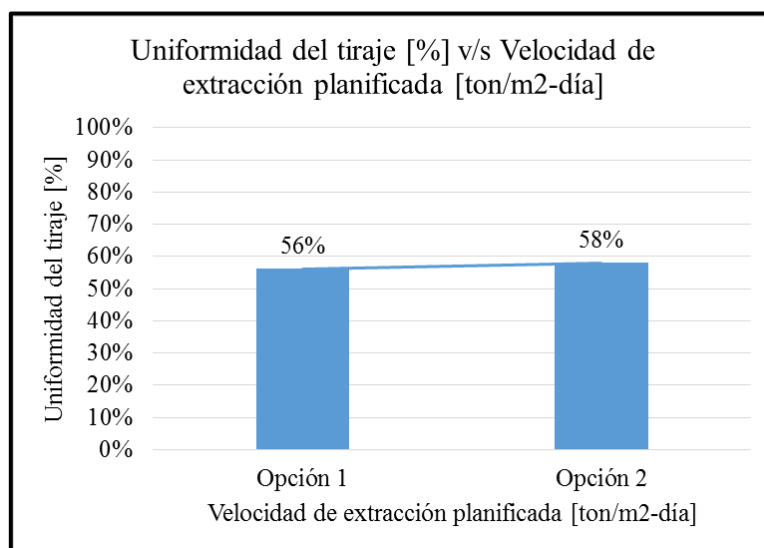
**Turnos de estabilización:** En promedio la uniformidad del tiraje [%] disminuye un  $7,6 \pm 8 \%$  con 1 turno de estabilización respecto de 2 turnos (ver Gráfico 10).

Gráfico 10: Uniformidad del tiraje [%] v/s Turnos de estabilización.



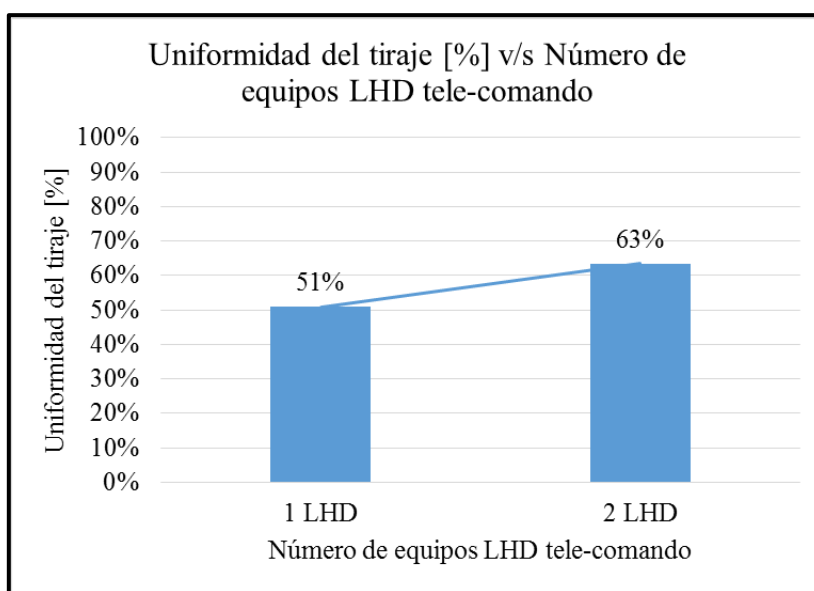
**Velocidad de extracción planificada mensual [t/m<sup>2</sup>-día]:** En relación a las opciones 1 y 2 (velocidad de extracción planificada), no existe mayor variación en los resultados en términos de uniformidad del tiraje [%] (diferencias de  $1.8 \pm 4.3 \%$ ). (Ver Gráfico 11)

Gráfico 11: Uniformidad del tiraje [%] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m<sup>2</sup>-día].



**Número de equipos LHD tele-asistidos:** Se puede observar que la uniformidad del tiraje [%] aumenta cuando se incorpora un segundo LHD tele-asistido. Cuando la extracción es realizada con un equipo LHD tele-asistido, los resultados se encuentran en el rango de [43-59%], en cambio cuando se incorpora un segundo LHD tele-asistido, los resultados se encuentran en un rango de [48-78%] (la simulación 21 es el único caso con 2 equipos LHD que presenta uniformidad bajo el 50%, el resto se encuentra por sobre el 54%). Este resultado se debe principalmente a que con un equipo LHD, la calle donde se está realizando la extracción, se extrae de manera aislada, ya que cada punto de extracción tendrá vecinos en calles inactivas, donde no se realiza extracción. Con la implementación de un segundo equipo LHD tele-asistido, la calle vecina se extraerá de manera simultánea, reduciendo los puntos con tiraje aislado y el número de puntos inactivos (ver Gráfico 12).

Gráfico 12: Uniformidad del tiraje [%] v/s Número de LHD tele-asistidos.

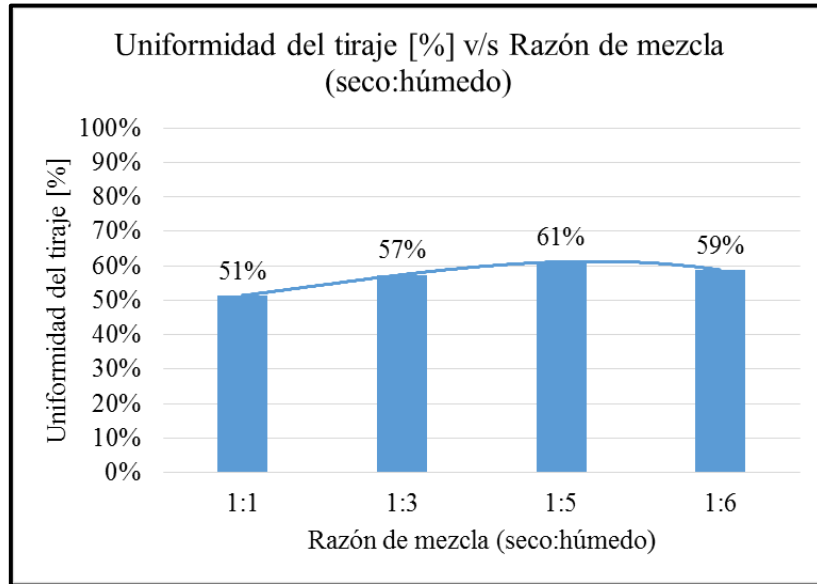


**Razón de mezcla:** A medida que aumenta la razón de mezcla aumenta la uniformidad del tiraje [%] en un rango de 5 a 16 %. En promedio la mejor razón de mezcla que se tiene para la proporción de puntos secos y barro del mes de diciembre del 2015 es de 1:5 (ver Gráfico 13).

El caso donde se alcanza mayor uniformidad del tiraje ( $78 \pm 12$  %) es cuando los barros se planifican con una velocidad media de 0,46 [t/m<sup>2</sup>-día], se opera con 2 equipos LHD tele-asistidos, 2 turnos de estabilización y una mezcla de 1:3.



Gráfico 13: Uniformidad del tiraje [%] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).



La uniformidad del tiraje no alcanza valores superiores debido a que:

- Existen puntos de extracción con colgaduras o sobre-tamaños que no extraen el tonelaje planificado diario, ya que se encuentran inactivos. Esto genera tiraje aislado en los puntos vecinos que no presentan este tipo de evento.
- Existen puntos de extracción que cumplen su plan mensual (30 días), en un periodo inferior a 30 días. A partir de ese momento, los puntos vecinos se podrían extraer de manera aislada.
- La detención de la extracción de una calle debido a mantenciones de piques, reparación calle, equipos y descuelgue, provoca que las calles vecinas, al no ser detenidas, se extraigan de manera aislada.

Tabla 35: Uniformidad del tiraje [%].

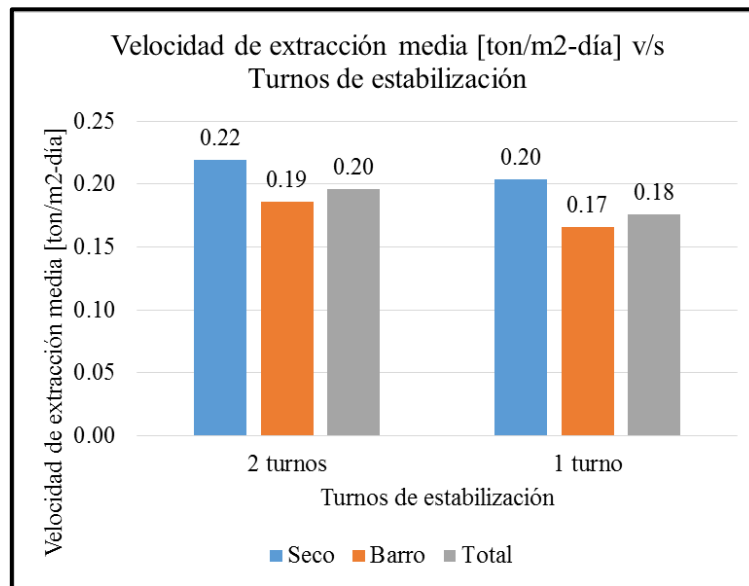
#	Turnos de Estabilización	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m2-día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]	Número de equipos LHD tele-asistidos	Mezcla	Uniformidad del tiraje [%]		
						Mín	Máx	Promedio
1	2 turnos	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	20%	84%	47 ± 18 %
2					1:3	10%	84%	48 ± 19 %
3					1:5	20%	84%	59 ± 16 %
4					1:6	12%	82%	52 ± 19 %
5				2	1:1	24%	97%	60 ± 22 %
6					1:3	33%	93%	68 ± 16 %
7					1:5	24%	100%	76 ± 17 %
8					1:6	34%	96%	72 ± 15 %
9		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	20%	87%	48 ± 20 %
10					1:3	11%	83%	50 ± 21 %
11					1:5	25%	80%	51 ± 16 %
12					1:6	23%	87%	54 ± 19 %
13				2	1:1	36%	100%	64 ± 21 %
14					1:3	54%	100%	<b>78 ± 12 %</b>
15					1:5	53%	100%	74 ± 13 %
16					1:6	44%	100%	74 ± 14 %
17	1 turno	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	12%	83%	47 ± 20 %
18					1:3	10%	85%	50 ± 21 %
19					1:5	12%	79%	52 ± 17 %
20					1:6	13%	80%	50 ± 18 %
21				2	1:1	14%	87%	48 ± 21 %
22					1:3	10%	96%	57 ± 26 %
23					1:5	14%	94%	59 ± 21 %
24					1:6	10%	92%	55 ± 25 %
25		Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	12%	81%	43 ± 20 %
26					1:3	23%	83%	48 ± 17 %
27					1:5	20%	86%	57 ± 21 %
28					1:6	28%	86%	58 ± 16 %
29				2	1:1	21%	92%	54 ± 22 %
30					1:3	25%	94%	60 ± 22 %
31					1:5	17%	92%	61 ± 23 %
32					1:6	13%	88%	55 ± 20 %

### 7.4.3 Velocidad De Extracción Media [t/m2-Día]

En la Tabla 36 se indican los resultados de velocidad de extracción promedio [t/m2-día] para; puntos barro, operativos y en conjunto. Se puede observar lo siguiente:

**Turnos de estabilización:** En relación al número de turnos de estabilización, la velocidad de extracción media [t/m2-día] es un  $10 \pm 16\%$  superior con 2 turnos de estabilización respecto de 1 turno (ver Gráfico 14). Este resultado se debe principalmente a la configuración de turnos de extracción tele-comandada<sup>13</sup>, para el caso de dos turnos de estabilización con 2 LHD tele-asistidos, hay días en que no se realiza extracción de mineral y la velocidad de extracción media, es calculada para los días que sí se extrae mineral.

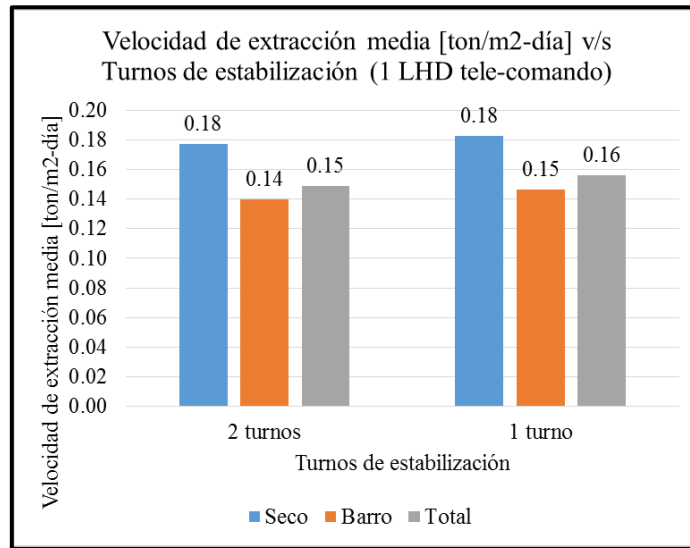
Gráfico 14: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización.



Si se realiza el análisis considerando, sólo las estrategias con 1 equipo LHD tele-asistido (donde todos los días sí hay extracción de mineral), se puede observar que con 1 turno de estabilización la velocidad de extracción media es un  $5 \pm 7\%$  superior que con 2 turnos de estabilización (ver Gráfico 15).

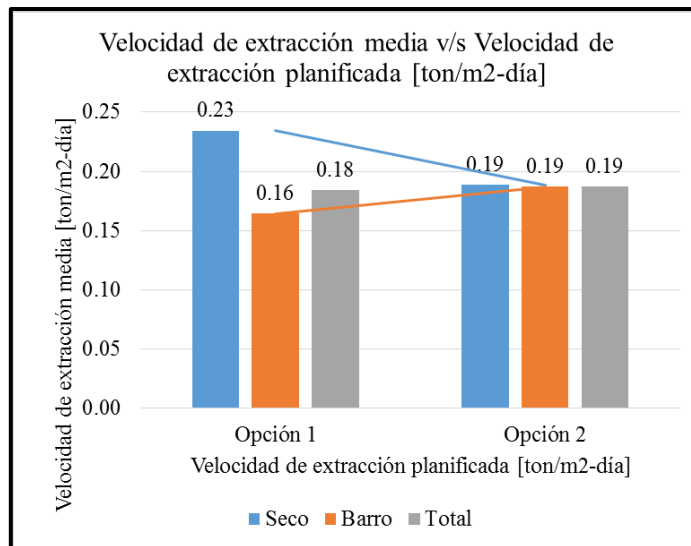
<sup>13</sup> El detalle de la configuración de los turnos de extracción se encuentra en el ANEXO F.

Gráfico 15: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Turnos de estabilización (caso 1 LHD tele-asistido).



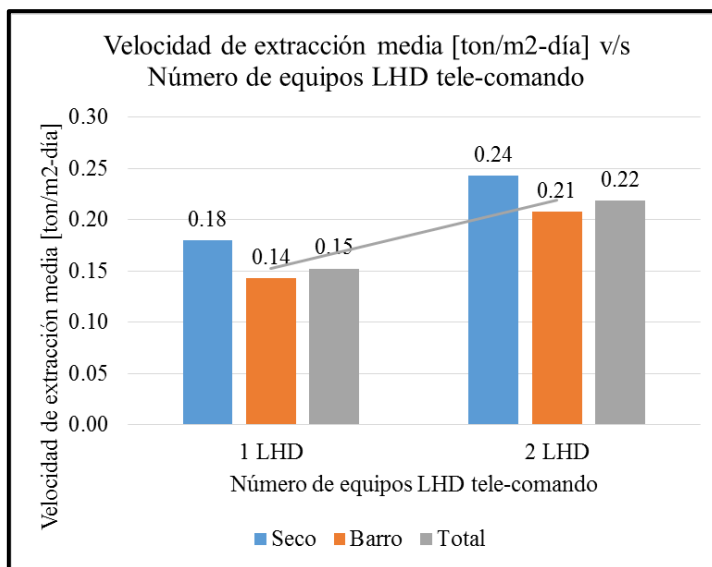
**Velocidad de extracción planificada mensual [t/m2-día]:** En relación a las opciones 1 y 2 (velocidad de extracción planificada), no existe mayor variación en los resultados en términos de velocidad de extracción promedio ( $1 \pm 6\%$ ). Esto se debe principalmente a la baja productividad de los equipos LHD tele-asistidos, que en la mayoría de los casos no logran alcanzar la velocidad de extracción planificada o máxima diaria para todos los puntos de extracción. Realizando el análisis por estado de punto se puede observar que la opción 2 es un  $14 \pm 5\%$  superior en las velocidades de extracción media, para los puntos barro y un  $24 \pm 16\%$  inferior, para los puntos operativos. Este resultado se debe, a que la opción 2 permite que se extraiga más tonelaje desde los puntos barro, incrementando su velocidad por sobre las 0.18 [t/m2-día] correspondientes a la opción 1 (ver Gráfico 16).

Gráfico 16: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Velocidad de extracción planificada [ton/m2-día].



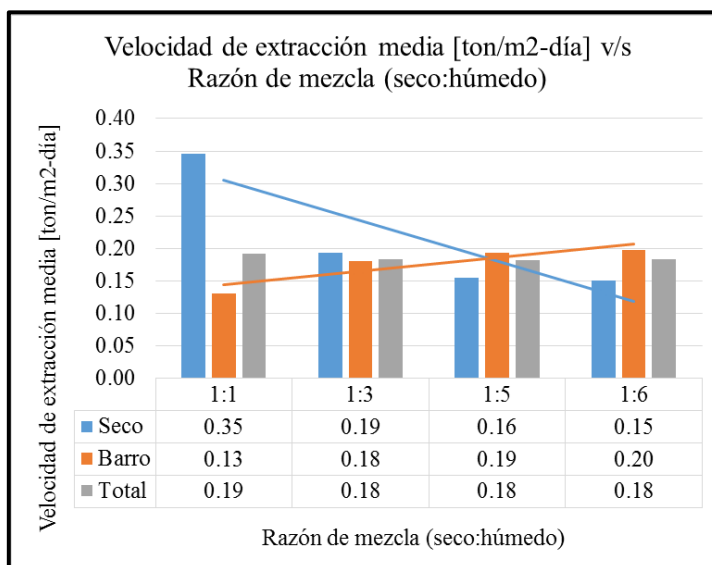
**Número de equipos LHD tele-asistidos:** La velocidad de extracción promedio, aumenta en un  $64 \pm 11\%$  con la incorporación de un segundo equipo LHD tele-asistido, para el caso de 2 turnos de estabilización. En cambio, para las estrategias con 1 turno de estabilización, la velocidad de extracción promedio, aumenta con la incorporación de un segundo equipo LHD tele-asistido en un  $25 \pm 8\%$  (promedio). En conjunto el aumento de la velocidad de extracción con 2 equipos LHD tele-asistidos es de un  $44 \pm 21\%$  (ver Gráfico 17).

Gráfico 17: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Número de equipos LHD tele-asistidos.



**Razón de mezcla:** A medida que aumenta la razón de mezcla, disminuye la velocidad de extracción promedio conjunto (puntos operativos y barro) en un  $5 \pm 7\%$ , aumenta la velocidad de extracción promedio de los puntos barro en un  $49 \pm 13\%$  y disminuye la velocidad de extracción promedio de los puntos operativos en un  $57 \pm 12\%$  (ver Gráfico 18).

Gráfico 18: Velocidad de extracción media [ton/m2-día] v/s Razón de mezcla (seco: húmedo).



Los casos donde se alcanza la mayor velocidad de extracción promedio ( $0.16 \pm 0.12$  [t/m<sup>2</sup>-día]) es para la opción 2 (velocidad de extracción planificada), cuando se opera con 2 equipos LHD tele-asistidos, 2 turnos de estabilización y una mezcla de 1:1 o 1:6 y para la opción 1, cuando se opera con 2 equipos LHD tele-asistidos, 2 turnos de estabilización y una mezcla de 1:6 (seco: húmedo). Es importante observar, que salvo los casos en que se registran las mayores velocidades de extracción, la tendencia es a disminuir con la razón de mezcla, esto se debe a que una razón de mezcla menor, exige mayor extracción de puntos operativos (secos) y para el sector de prueba los puntos secos son los más cercanos al pique de traspaso.

Tabla 36: Velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día]

#	Turnos de Estabilización	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m <sup>2</sup> -día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m <sup>2</sup> -día]	Número de equipos LHD tele-asistidos	Mezcla	Velocidad de extracción promedio [t/m <sup>2</sup> -día]		
						Operativos	Barro	Todos
1	2 turnos	Opción 1: 0,18 [t/m <sup>2</sup> -día]	0,5	1	1:1	0.29 ± 0.06	0.10 ± 0.02	0.15 ± 0.13
2					1:3	0.20 ± 0.10	0.14 ± 0.01	0.15 ± 0.09
3					1:5	0.16 ± 0.10	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.08
4					1:6	0.16 ± 0.12	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.10
5				2	1:1	0.41 ± 0.13	0.15 ± 0.01	0.23 ± 0.20
6					1:3	0.26 ± 0.05	0.22 ± 0.03	0.24 ± 0.12
7					1:5	0.23 ± 0.08	0.25 ± 0.04	0.24 ± 0.12
8					1:6	0.24 ± 0.10	0.25 ± 0.04	0.25 ± 0.12
9		Opción 2: 0,46 [t/m <sup>2</sup> -día]	1,0	1	1:1	0.29 ± 0.08	0.12 ± 0.04	0.16 ± 0.12
10					1:3	0.13 ± 0.03	0.15 ± 0.06	0.14 ± 0.07
11					1:5	0.10 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.07
12					1:6	0.09 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.14 ± 0.07
13				2	1:1	0.43 ± 0.16	0.17 ± 0.02	0.25 ± 0.21
14					1:3	0.21 ± 0.06	0.25 ± 0.02	0.24 ± 0.10
15					1:5	0.16 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.24 ± 0.10
16					1:6	0.15 ± 0.03	0.29 ± 0.02	0.25 ± 0.11
17	1 turno	Opción 1: 0,18 [t/m <sup>2</sup> -día]	0,5	1	1:1	0.31 ± 0.07	0.11 ± 0.01	0.17 ± 0.14
18					1:3	0.21 ± 0.12	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.09
19					1:5	0.15 ± 0.09	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.09
20					1:6	0.16 ± 0.11	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.09
21				2	1:1	0.37 ± 0.07	0.13 ± 0.01	0.20 ± 0.18
22					1:3	0.21 ± 0.06	0.17 ± 0.01	0.18 ± 0.11
23					1:5	0.19 ± 0.10	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.10
24					1:6	0.20 ± 0.11	0.20 ± 0.02	0.20 ± 0.11
25		Opción 2: 0,46 [t/m <sup>2</sup> -día]	1,0	1	1:1	0.28 ± 0.08	0.12 ± 0.04	0.16 ± 0.12
26					1:3	0.15 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.16 ± 0.06
27					1:5	0.11 ± 0.03	0.17 ± 0.05	0.15 ± 0.07
28					1:6	0.09 ± 0.02	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.07
29				2	1:1	0.39 ± 0.11	0.15 ± 0.03	0.22 ± 0.19
30					1:3	0.18 ± 0.04	0.21 ± 0.03	0.20 ± 0.10
31					1:5	0.14 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.19 ± 0.09
32					1:6	0.12 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.19 ± 0.10

A continuación, en la Tabla 37 y 38 se muestra un resumen de los resultados analizados.

Tabla 37: Resumen de resultados para 2 turnos de estabilización.

Sim	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m <sup>2</sup> -día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m <sup>2</sup> -día]	Número de equipos LHD tele-asistido	Mezcla	Tonelaje Total Extraído [ton]	Tonelaje total extraído de puntos operativos [ton]	Tonelaje total extraído de puntos barro [ton]	Uniformidad Del tiraje [%]	Velocidad de extracción promedio por día por punto [t/m <sup>2</sup> -día]
1	Opción 1: 0,18 [t/m <sup>2</sup> -día]	0,5	1	1:1	37.413	20.183	17.230	47 ± 18 %	0.15 ± 0.13
2				37.017	13.019	23.999	48 ± 19 %	0.15 ± 0.09	
3				36.388	10.994	25.394	59 ± 16 %	0.16 ± 0.08	
4			35.593	10.066	25.528	52 ± 19 %	0.14 ± 0.10		
5			49.877	25.851	24.026	60 ± 22 %	0.23 ± 0.20		
6	Opción 2: 0,46 [t/m <sup>2</sup> -día]	1,0	2	1:3	49.702	15.584	34.118	68 ± 16 %	0.24 ± 0.12
7				52.978	14.191	38.787	76 ± 17 %	0.24 ± 0.12	
8				48.710	13.079	35.631	72 ± 15 %	0.25 ± 0.12	
9				40.308	20.256	20.052	48 ± 20 %	0.16 ± 0.12	
10			36.510	9.686	26.824	50 ± 21 %	0.14 ± 0.07		
11			34.334	7.108	27.226	51 ± 16 %	0.15 ± 0.07		
12			35.917	6.794	29.122	54 ± 19 %	0.14 ± 0.07		
13			51.110	25.602	25.508	64 ± 21 %	0.25 ± 0.21		
14	53.020	13.679	39.340	78 ± 12 %	0.24 ± 0.10				
15	48.284	9.314	38.970	74 ± 13 %	0.24 ± 0.10				
16	53.635	9.135	44.500	74 ± 14 %	0.25 ± 0.11				

Tabla 38: Resumen de resultados para 1 turno de estabilización.

Sim	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m2-día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]	Número de equipos LHD tele-asistido	Mezcla	Tonelaje Total Extraído [ton]	Tonelaje total extraído de puntos operativos [ton]	Tonelaje total extraído de puntos de barro [ton]	Uniformidad Del tiraje [%]	Velocidad de extracción promedio por día por punto [t/m2-día]
17	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	47.185	25.565	21.620	47 ± 20 %	0.17 ± 0.14
18				1:3	42.565	15.309	27.257	50 ± 21 %	0.16 ± 0.09
19				1:5	44.954	13.183	31.771	52 ± 17 %	0.15 ± 0.09
20			1:6	44.718	13.206	31.512	50 ± 18 %	0.15 ± 0.09	
21			1:1	56.999	30.131	26.868	48 ± 21 %	0.20 ± 0.18	
22			1:3	54.626	17.189	37.437	57 ± 26 %	0.18 ± 0.11	
23	Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	2	1:5	57.489	15.677	41.812	59 ± 21 %	0.18 ± 0.10
24				1:6	58.235	15.273	42.962	55 ± 25 %	0.20 ± 0.11
25				1:1	50.041	25.141	24.900	43 ± 20 %	0.16 ± 0.12
26			1:3	42.247	11.378	30.869	48 ± 17 %	0.16 ± 0.06	
27			1:5	45.052	9.364	35.688	57 ± 21 %	0.15 ± 0.07	
28			1:6	45.483	8.135	37.348	58 ± 16 %	0.15 ± 0.07	
29	Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	64.728	32.513	32.215	54 ± 22 %	0.22 ± 0.19
30				1:3	62.308	16.105	46.203	60 ± 22 %	0.20 ± 0.10
31			1:5	59.948	11.617	48.331	61 ± 23 %	0.19 ± 0.09	
32			1:6	55.752	9.568	46.184	55 ± 20 %	0.19 ± 0.10	



#### 7.4.4 Tonelaje Mensual De Finos Extraídos [Ton]

En la Tabla 39 se indican los resultados de tonelaje de finos de Cu extraídos para cada estrategia de extracción simulada.

Tabla 39: Fino de Cu extraído en el periodo simulado para cada estrategia [ton].

#	Turnos de Estabilización	Velocidad de extracción planificada mensual para puntos en barro [t/m2-día]	Velocidad de extracción máxima en la operación para puntos barro [t/m2-día]	Número de equipos LHD tele-asistidos	Mezcla	Ton Extraído	Ley Cu Promedio [%]	Fino Cu [ton]
1	2 turnos	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	37413	0.93 ± 0.37 %	335
2					1:3	37017		338
3					1:5	36388		336
4					1:6	35593		332
5				2	1:1	49877		458
6					1:3	49702		464
7					1:5	52978		497
8					1:6	48710		459
9		Opción 2: 0,46 [t/m2-día] Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	40308		363
10					1:3	36510		333
11					1:5	34334		324
12					1:6	35917		334
13				2	1:1	51110		470
14					1:3	53020		499
15					1:5	48284		460
16					1:6	53635		509
17	1 turno	Opción 1: 0,18 [t/m2-día]	0,5	1	1:1	47185	422	
18					1:3	42565	391	
19					1:5	44954	415	
20					1:6	44718	415	
21				2	1:1	56999	517	
22					1:3	54626	508	
23					1:5	57489	541	
24					1:6	58235	544	
25		Opción 2: 0,46 [t/m2-día] Opción 2: 0,46 [t/m2-día]	1,0	1	1:1	50041	443	
26					1:3	42247	395	
27					1:5	45052	421	
28					1:6	45483	426	
29				2	1:1	64728	584	
30					1:3	62308	583	
31					1:5	59948	565	
32					1:6	55752	531 <sup>14</sup>	

<sup>14</sup> El color rojo muestra el menor y el verde el mayor tonelaje relativo al parámetro de evaluación.

La ley de mineral de Cu [%] varía para cada punto de extracción y podría darse el caso de que las variables influyan de manera relativa en la extracción de los puntos. Por ejemplo, si se varía solo la razón de mezcla para un sector en donde los puntos agua/barro poseen mejor ley, es probable que una mezcla de 1:6 resulte en una mayor extracción de finos que una mezcla 1:1 a pesar de extraer el mismo tonelaje.

En el caso del sector de estudio de esta memoria (calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento) no hay gran variación de leyes entre los puntos de extracción [ $0.93 \pm 0.37$  %] (ver detalle de leyes en ANEXO H). Este resultado se puede observar en la escala de colores de la Tabla 39, donde tanto el tonelaje total extraído como el tonelaje de finos se ordenan de igual forma para todas las estrategias propuestas. Para un análisis económico la mejor estrategia de extracción corresponde a la que registre mayor producción bajo las restricciones operativas impuestas por la mina.

## 7.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- En diciembre del 2015 se extrajeron 21.293 toneladas, muy inferior a las 61.420 toneladas planificadas, este resultado se debe principalmente a la no extracción de puntos en estado de agua/barro. Las estrategias propuestas con la incorporación de equipos LHD tele-asistidos registran valores de extracción muy superiores al histórico de este mes y cercanos al tonelaje planificado. Por ejemplo la estrategia n° 7 registra 52.978 toneladas extraídas en la simulación, un 149% mayor que el tonelaje histórico y un 14% bajo el tonelaje planificado. Este resultado se debe a que con equipos LHD tele-asistidos es posible la extracción de puntos agua/barro y puntos limitados a mayor velocidad.
- Respecto del tonelaje total extraído a escala mensual por el sector de prueba [ton], este aumenta a medida que disminuyen los turnos de estabilización (aumento de un  $20 \pm 8$  % cuando se pasa de dos turnos a un turno de estabilización) y aumenta si se utiliza un mayor número de equipos LHD tele-asistidos operando en simultáneo (aumento de un 30-40% cuando operan dos equipos LHD tele-asistidos en comparación a uno).
- En relación a la velocidad de extracción planificada [t/m<sup>2</sup>-día], para la opción 2, se extrae un  $14 \pm 6$  % más de agua/barro en relación a la opción 1.<sup>15</sup>
- **La razón de mezcla (seco: húmedo) a medida que aumenta, aumenta en un  $52 \pm 10$  % promedio la extracción de barro** y disminuye en un  $6 \pm 7$  % la extracción total, debido a que los puntos en estado agua/barro se encuentran más lejanos al pique de traspaso.
- Respecto de la uniformidad del tiraje [%] a escala diaria y nivel de puntos, ésta se ve afectada principalmente por el número de equipos LHD tele-asistidos operando en el sector. La uniformidad del tiraje [%] se encuentra en el rango de [43-59%] para un equipo LHD tele-asistido y en el rango de **[48-78%] para dos equipos**. De acuerdo al análisis de eventos de barro en Esmeralda Bloque 1, se observó que una extracción con una uniformidad superior al 50% minimiza la ocurrencia de un evento de agua/barro. Por lo tanto, **la extracción con 2 equipos LHD tele-asistidos minimiza la ocurrencia de un evento de agua/barro**.
- La velocidad de extracción [t/m<sup>2</sup>-día] se ve afectada principalmente por el número de equipos LHD tele-asistidos operando en el sector. Aumenta un  $44 \pm 21$  % en promedio cuando se pasa de operar con uno a dos equipos LHD tele-asistidos en calles simultáneas.
- En relación a la velocidad de extracción planificada [t/m<sup>2</sup>-día], la opción 2 registra una velocidad de extracción media [t/m<sup>2</sup>-día] un  $14 \pm 5$  % mayor para los puntos en estado de agua/barro en relación a la opción 1. En el caso de la opción 2, la velocidad de extracción media [t/m<sup>2</sup>-día] supera la velocidad de extracción planificada [t/m<sup>2</sup>-día] para la opción 1.
- El análisis del tonelaje de finos extraídos no aporta información para este caso de estudio, principalmente por la poca variación que presentan las leyes de Cu [%] en el sector ( $0.93 \pm 0.37$ %).

---

<sup>15</sup> Opción 1: Velocidad de extracción planificada de 0,18 [t/m<sup>2</sup>-día] y máxima de 0,5 [t/m<sup>2</sup>-día] para puntos barro.  
Opción 2: Velocidad de extracción planificada de 0,46 [t/m<sup>2</sup>-día] y máxima de 1,0 [t/m<sup>2</sup>-día] para puntos barro.

- Las tablas de resultados 37 y 38 corresponden a una guía de planificación, por ejemplo, si se decide implementar:
  - Dos turnos de estabilización.
  - Dos equipos LHD tele-asistidos para el módulo de 3 calles.
  - Estrategias con un resultado sobre un 50% de uniformidad.
  - Estrategias que no superen una velocidad máxima de extracción de barro de 0,5 [t/m<sup>2</sup>-día].
  - Estrategias con una mezcla mayor o igual 1:3.

Las estrategias que cumplen con estos requisitos son la n° 6, 7 y 8, de las cuales la **estrategia n° 7** es la que reporta mayor tonelaje extraído (52.978 ton, 14 kton de puntos operativos y 38.7 kton de puntos barro) y una uniformidad de un  $76 \pm 17$  % con una mezcla de 1:5.

Como se observa en el ejemplo, la forma de utilizar esta guía de planificación es fijando las variables de interés para ver cómo se comporta del resto de las variables. En el ejemplo se fijaron los turnos de estabilización, el número de equipos LHD, la uniformidad deseada, la velocidad de extracción máxima y la razón mínima de mezcla. Bajo estas condiciones se liberó el uso de una mezcla ya sea de 1:3, 1:5 o 1:6 y el tonelaje mensual extraído de puntos operativos y barro. Bajo el supuesto de extraer la mayor cantidad de tonelaje posible de puntos barro la guía indica que se debe extraer con una mezcla de 1:5.

En este mismo ejemplo si se permite la extracción de agua/barro a una velocidad de extracción máxima de 1,0 [t/m<sup>2</sup>-día], se añaden las estrategias n° 14, 15 y 16, de las cuales la 16 registra el mayor nivel de producción con 44.500 ton extraídas de puntos barro y un total de 53.635 ton, con una uniformidad del  $74 \pm 14$  % y una razón de mezcla de 1:6.

## CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este estudio son las siguientes:

- La principal ventaja del uso de la simulación en la planificación minera es la incorporación de variabilidad en los planes de producción. Sin embargo, la simulación no es una herramienta que se utilice diariamente hoy, debido a la alta cantidad de tiempo y de información que se requiere para la construcción de un modelo. A pesar de esto, es posible construir un modelo con un nivel de detalle que sea suficiente para representar un sistema real e ir mejorándolo con la adición de información en el tiempo.
- La metodología propuesta en este estudio permite realizar la construcción de un modelo de simulación de manera sistemática. Aun así, la construcción del modelo en el software de simulación ProModel no es sencilla y posee una curva de aprendizaje de uno a dos meses dependiendo la habilidad del programador. Actualmente se necesitan herramientas de simulación que sean más flexibles, rápidas y fáciles de utilizar, orientadas a la minería.
- Si bien, el modelo de simulación no considera todas las interferencias que existen en la mina, es capaz de predecir el tonelaje extraído para un módulo de extracción de 3 calles con un nivel de error menor al de los sistemas de planificación actuales. Además permite realizar la comparación de distintas estrategias de extracción (escenarios) para la toma de decisiones durante la planificación.
- La capacidad predictiva del modelo de simulación se ve reflejada en la etapa de comprobación donde se muestra que **el modelo es capaz de predecir con un error de un  $5 \pm 6$  % el tonelaje real extraído para meses futuros con la extracción de equipos LHD manuales**. La única variación que existe entre los meses futuros que se simularon es el estado de los puntos (secos, limitados o barro) y el tonelaje acumulado a la fecha, el cual incide en la probabilidad de colgadura y aparición de sobre-tamaños. Las herramientas de planificación que se utilizan en la actualidad presentan un error entre el tonelaje planificado y el real extraído de un  $22 \pm 4$  % para los periodos simulados.
- En relación a la comparación de escenarios, el modelo permite evaluar distintas estrategias de extracción con equipos LHD tele-asistidos. Las estrategias varían de acuerdo a los turnos de estabilización, velocidad de extracción planificada y máxima diaria [ $t/m^2$ -día], número de equipos LHD tele-asistidos y razón de mezcla entre mineral seco y húmedo.
- La ventaja del uso de equipos LHD tele-asistidos es la **extracción de puntos en estado de agua/barro y de puntos limitados a velocidades de extracción de la misma magnitud que los puntos secos**. Esto significa recuperar reservas de agua/barro que hoy no son extraídas con velocidades de extracción promedio que van de 0,10 a 0,29 [ $t/m^2$ -día]. Esta ventaja se debe a que los equipos LHD tele-asistidos funcionan sin operador a bordo, por lo cual los riesgos para el personal asociados a los eventos de entrada de barro son mitigados.
- En todos los casos **la proporción y distribución de los estados (operativos y barro) de los puntos de extracción, influye en todas las variables de salida según la razón de mezcla que se aplique debido a las distancias y tiempos de traslado del mineral**.

Por ejemplo, si los puntos en estado de barro se encuentran cercanos al pique de traspaso y se opera con una razón de mezcla mayor (1:6) significa más viajes a puntos barro que puntos operativos (secos y limitados), dado que los puntos barro estarán cercanos al pique, el LHD tele-asistido recorre la mayor parte del tiempo distancias cortas aumentando así la productividad de la calle. Si la mezcla fuese menor, por ejemplo 1:1, significa que por cada extracción de un punto en estado barro, el LHD tele-asistido tendrá que recorrer una gran distancia para ir en búsqueda de mineral seco y completar la mezcla, reportando finalmente una menor productividad. En este mismo ejemplo si se tienen por ejemplo en una calle 6 puntos barro y 14 secos, dado que los barros están más cercanos al pique si se extrae con una razón de mezcla alta (1:6) habrá muy poca extracción de los puntos secos, disminuyendo la uniformidad en la zona de extracción.

- Uno de los resultados de la simulación de cada estrategia de extracción es la uniformidad del tiraje [%]. De acuerdo al análisis de eventos de barro en Esmeralda Bloque 1, se observó que una extracción con una uniformidad superior al 50% minimiza la ocurrencia de un evento de agua/barro. Los resultados de este estudio muestran que la uniformidad del tiraje [%] se encuentra en el rango de [43-59%] con un equipo LHD tele-asistido operando y en el rango de [48-78%] para dos equipos. Por lo tanto, se puede concluir que **la extracción con 2 equipos LHD tele-asistidos minimiza la ocurrencia de un evento de agua/barro.**
- Finalmente, los resultados de las estrategias de extracción solo aplican al sector simulado, en este caso las calles 41, 43 y 45 de la Fase II de Diablo Regimiento. Para definir el modelo de operación de otros sectores se debe utilizar el modelo de simulación con los datos de entrada del sector que se desea estudiar.

Las recomendaciones de este estudio son las siguientes:

- El modelo operacional no es único y puede variar en el tiempo de acuerdo a la retroalimentación que se tenga desde la operación. En este estudio se recomienda que se realice una prueba con equipos LHD tele-asistidos de manera progresiva. Apuntar en un principio a velocidades de extracción medias de 0,18 [t/m<sup>2</sup>-día] y 0,5 [t/m<sup>2</sup>-día] máxima para puntos agua/barro, con 1 equipo LHD tele-comando, 2 turnos de estabilización y una mezcla 1:1 (estrategia n°1), donde se alcanzaría un tonelaje de material saturado extraído cercano a 17.230 ton al mes. Luego, a medida que la prueba avance, **ir aumentando el número de equipos LHD tele-asistidos hasta llegar a 2, una velocidad de extracción media de 0,46 [t/m<sup>2</sup>-día] y 1,0 [t/m<sup>2</sup>-día] máxima y una mezcla de 1:6, donde se podría alcanzar un tonelaje de material saturado extraído superior 44.500 toneladas (estrategia n°16) o 46.184 toneladas en el caso de ser aplicable sólo 1 turno de estabilización.** La finalidad de esta recomendación es evitar la ocurrencia de un evento de barro que paralice completamente la operación y observar el comportamiento de las variables de interés, para determinar el modelo que mejor se adecúe al sector de prueba, ya sea maximizando la producción y disminuyendo el riesgo de eventos de barro.
- En conjunto con lo anterior, se recomienda coleccionar la información de bombeos o escurrimientos de barro que ocurran durante la prueba. Esto permitirá construir una matriz de riesgo de producir uno de estos eventos cuando se extrae con equipos LHD tele-asistidos, los cuales no fueron considerados dentro de los alcances del estudio debido a la falta de experiencia e información en la extracción de agua/barro.

La información que se debe coleccionar corresponde a:

- Fecha del evento
- Estado histórico de los puntos de extracción {seco, limitado, barro, agotado, etc...}
- Humedad histórica de los puntos de extracción
- Extracción histórica de los puntos de extracción
- Granulometría observada en los puntos de extracción.
- Tiempo que tarda la vuelta a la operación del sector luego del evento.

Esta colección de información también permite a futuro validar el modelo de simulación comparando los resultados del simulador con la realidad.

- Se recomienda estudiar la automatización del proceso de manejo de materiales por completo. Esto incluye el descuelgue de puntos de extracción, buzones y nivel de transporte, con el fin de evitar los turnos de estabilización y el ingreso de personal al sector con riesgo de eventos de agua/barro.

Para realizar este estudio, se requiere coleccionar información de los distintos sistemas de automatización, para los equipos que intervienen en la producción y transporte de mineral. Por ejemplo, dentro del nivel de producción la automatización de los equipos de descuelgue y reducción secundaria, significa que los turnos de estabilización podrían pasar de utilizarse diariamente a solo los momentos en que se requiere ingreso de personal para mantenciones u operaciones más sofisticadas, generando un impacto directo en la producción. Por otro lado, la implementación de un nivel de transporte automatizado, permite mayor flexibilidad en las mezclas de mineral seco y húmedo, sin comprometer la integridad del personal. Existen casos extremos en donde un sector puede estar completamente en estado de agua/barro y no hay posibilidad de mezcla, por lo cual, se requiere de un sistema de transporte totalmente automatizado y preparado para manejar el agua/barro, sin la intervención de personal. La evaluación de estos sistemas puede ser realizado mediante la simulación, siempre que se tenga información con un nivel de detalle suficiente para representar la realidad.

- La planificación mensual y diaria (PAM y CARTIR) hoy se realiza de manera determinística y en la mayoría de los casos es difícil de alcanzar. Se recomienda implementar la simulación como herramienta que permita tener una mejor estimación de la producción que se puede alcanzar. En base a este estudio se comprueba que las reglas de extracción propuestas afectarán de manera distinta en la producción de cada sector, principalmente, porque cada sector tiene una configuración de estados de los puntos de extracción y ubicación de los piques de traspaso en particular. Los resultados de este estudio en su mayoría son solo aplicables al sector de estudio (calles 41, 43 y 45, Diablo Regimiento, Fase II).

## CAPÍTULO 9 BIBLIOGRAFÍA

1. BCTEC; Chile, 2016. Informe N° 2 y 4. Guía de planificación de largo plazo para sectores en condición de agua-barro. Proyecto Modelo de operación bajo condiciones agua – barro en proyectos subterráneos de División El Teniente. Contrato N° 4501601291.
2. BCTEC; Chile, 2016. Análisis de escurrimientos/bombeos del Bloque 1 Sector Esmeralda. Contrato N° BCTEC-DET-GMIN-A/B-001.
3. SYAIFULLAH T., WIDIJANTO E., SRIKANT A. & BRISBANE; Australia 2006. Water in Mining Conference. Water Issues in DOZ Block Cave Mine, PT Freeport Indonesia.
4. SAMOSIR E., BASUNI J., WIDIJANTO E. & SYAIFULLAH, T; Sweden, 2008. The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine. MassMin 2008.
5. WILSON A., PURBA A. & SJADAT A; Australia, 2016. Progressing Cave Performance into the Later Stages of the Deep Ore Zone Mine. MassMin 2016.
6. BANKS, J; 1999. Discrete Event Simulation. In Proceedings 1999 Winter Simulation Conference, pp 7-13.
7. GARCÍA E., GARCÍA H. & CÁRDENAS L; México, 2006. Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel. Pearson Educación, Primera Edición.
8. GARCÍA, P; Chile, 2012. Evaluación Técnico Económico de Recuperación de Reserva en Zona de Agua-Barro en Fase I de Diablo Regimiento. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Superintendencia de Planificación Minero Metalúrgica, División El Teniente.
9. BOTHA J., WATSON S., ARKADIUS. T & SAMOSIR E; Lulea, Sweeden, 2008. "Simulation applications at PT Freeport Indonesia's DOZ/ESZ Block Cave Mine." Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining.
10. División El Teniente, CODELCO; Chile, 2016.  
Disponible en: <http://www.codelco.com/>. Acceso en: 23/11/2016.
11. PAILLACAN, M.A.P; Chile, 2010. Mejoras para Proceso de Extracción Mina Diablo Regimiento Codelco Chile, Division El Teniente. Universidad de Santiago de Chile, Departamento De Ingeniería De Minas, Santiago, Chile, 2010.
12. DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO; Chile, 2016. Superintendencia de desarrollo e innovación (I) SDI - GRMD, Selección del Sector de Prueba API TE16E202 “Explotación Mineral Húmedo Mina El Teniente – Prueba Industrial”; GRMD-SDI-NT-021-2016.



13. DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO; Chile, 2015. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Informe Final Plan Minero – PND2015; GRMD-SPL-INF-3-2015.
14. GEOVITA; Chile, Sept-Oct 2015. Informe mensual de maquinarias ES Bloque 1 y 2, mes de agosto-2015.
15. MAASS S; Chile, 2013. Alternativas Tecnológicas para el descuelgue de zanjas. Tesis de Magister. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
16. CODELCO; Chile, 2009. Informe de Avance Back-análisis de Fragmentación: Sector Reservas Norte (RENO). Ingeniería Básica, Proyecto NNM. Preparado por J. Pereira y J. Hurtado.
17. PARDO, C., ROJAS, E; Sydney, Australia, 2016. Selection of exploitation method based on the experience of hydraulic fracture techniques at the El Teniente mine, in Massmin 2016: proceedings of The Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 97-103.
18. DADHICH S., BODIN U., ANDERSSON U; Lulea, Sweeden, 2016. Key challenges in automation of earth-moving machines. Lulea University of Technology.
19. MACLEAN ENGINEERING, Water cannons mining, 2017.  
Disponible en: <http://www.macleaneengineering.com/products/mining/ore-flow/block-caving-suite/mining-water-cannons>. Acceso en: 25/10/2016.

## ANEXOS

### ANEXO A CÁLULO DE UNIFORMIDAD DEL TIRAJE

A continuación se presenta la fórmula utilizada para el cálculo del índice de uniformidad del tiraje [%] para los puntos de extracción.

Fórmula 2: Cálculo del índice de uniformidad [%].

$$I.U. = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum (t_{max} - t_i)$$

Donde:

- I.U. = Índice de Uniformidad
- $\Delta$  = Número de puntos de extracción inactivos en la vecindad
- $\Gamma$  = Factor de normalización, igual a 99/89
- $t_p$  = Tonelaje extraído desde el punto de extracción “p” en análisis, en un periodo de tiempo específico
- $t_i$  = Tonelaje extraído desde el punto de extracción “i”, perteneciente a la vecindad del punto de extracción “p” en el mismo periodo de tiempo
- $t_{min}$  = Tonelaje mínimo extraído en la vecindad del punto de extracción “p” en el mismo periodo de tiempo
- $t_{max}$  = Tonelaje máximo extraído en la vecindad del punto de extracción “p” en el mismo periodo de tiempo
- $n$  = Número de puntos de extracción pertenecientes a la vecindad del punto de extracción “p”

## ANEXO B DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN (OCTUBRE 2013 Y DICIEMBRE 2015)

A continuación se presentan los datos de entrada a nivel de punto de extracción para las etapas de calibración (datos de octubre del 2013) y de simulación de los modelos operacionales (datos de diciembre del 2015).

Tabla 40: Datos de entrada por punto de extracción. (Calles 41, 43 y 45 de Fase II, Diablo Regimiento)

Punto	Área [m <sup>2</sup> ]	Estado (Oct 2013)	Estado (Dic 2015)	Ton acum. (Oct 2013)	Ton acum. (Dic 2015)	Altura de columna extraída [m] (Oct 2013)	Altura de columna extraída [m] (Dic. 2015)
41 32H	340	A	O	0	173830	0	189
41 33H	340	O	O	15636	170678	17	186
41 34H	340	O	A	40083	91339	44	99
41 35H	340	O	B	168692	220979	184	241
41 36H	340	O	B	232850	263501	254	287
41 37H	340	L	A	211646	229451	231	250
41 38H	340	B	B	196700	196700	214	214
41 39H	340	B	B	196766	196766	214	214
41 40H	329	L	B	177489	194062	200	218
41 33F	340	A	O	0	106915	0	116
41 34F	340	O	O	6963	106306	8	116
41 35F	340	O	B	20039	85548	22	93
41 36F	340	O	B	138591	166953	151	182
41 37F	340	L	B	173921	197026	189	215
41 38F	340	L	B	173546	173546	189	189
41 39F	340	B	B	175931	175931	192	192
41 40F	340	B	B	147411	147459	161	161
41 41F	316	L	B	139992	139992	164	164
43 33H	340	A	O	0	85951	0	94
43 34H	340	O	O	7389	76004	8	83
43 35H	340	O	B	18978	58900	21	64
43 36H	340	O	B	126485	155067	138	169
43 37H	340	L	B	158739	159791	173	174
43 38H	340	B	B	166154	166154	181	181
43 39H	340	L	B	171255	183522	187	200
43 40H	340	L	B	141746	141746	154	154
43 41H	327	B	B	106002	106002	120	120
43 34F	340	A	O	0	99608	0	109

43 35F	340	O	L	10242	63871	11	70
43 36F	340	O	B	27128	62606	30	68
43 37F	340	O	O	120448	146876	131	160
43 38F	340	L	B	147470	165025	161	180
43 39F	340	L	B	146265	146265	159	159
43 40F	340	L	B	155874	160334	170	175
43 41F	340	B	B	113964	113964	124	124
43 42F	312	B	B	116841	116841	139	139
45 34H	354	A	O	0	59659	0	62
45 35H	352	O	O	8172	25639	9	27
45 36H	340	O	L	21764	42256	24	46
45 37H	340	L	L	93937	106023	102	115
45 38H	340	L	B	127122	129452	138	141
45 39H	340	B	B	128375	128375	140	140
45 40H	340	B	B	123963	123963	135	135
45 41H	340	B	B	118922	118922	130	130
45 42H	325	B	B	101269	101269	115	115

La nomenclatura de estados de los puntos de extracción se detalla a continuación:

Tabla 41: Nomenclatura de los estados de puntos de extracción.

Estados	
O	Operativo
A	Agotado/Cerrado
B	Agua/Barro
L	Limitado

## ANEXO C      **DISPERSIÓN PUNTO A PUNTO DE LA CALIBRACIÓN**

Se presentan los gráficos de dispersión correspondientes al tonelaje extraído real versus el tonelaje extraído por la simulación, para la etapa de calibración del modelo de simulación.

Gráfico 19: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 1 y 2 horas de trabajo de palas por turno.

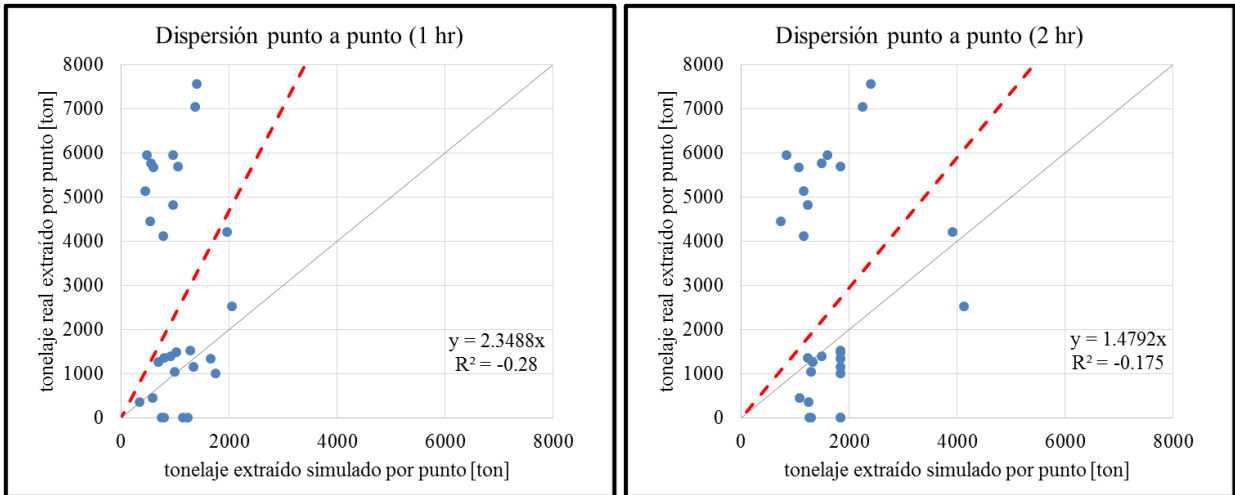


Gráfico 20: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 3 y 4 horas de trabajo de palas por turno.

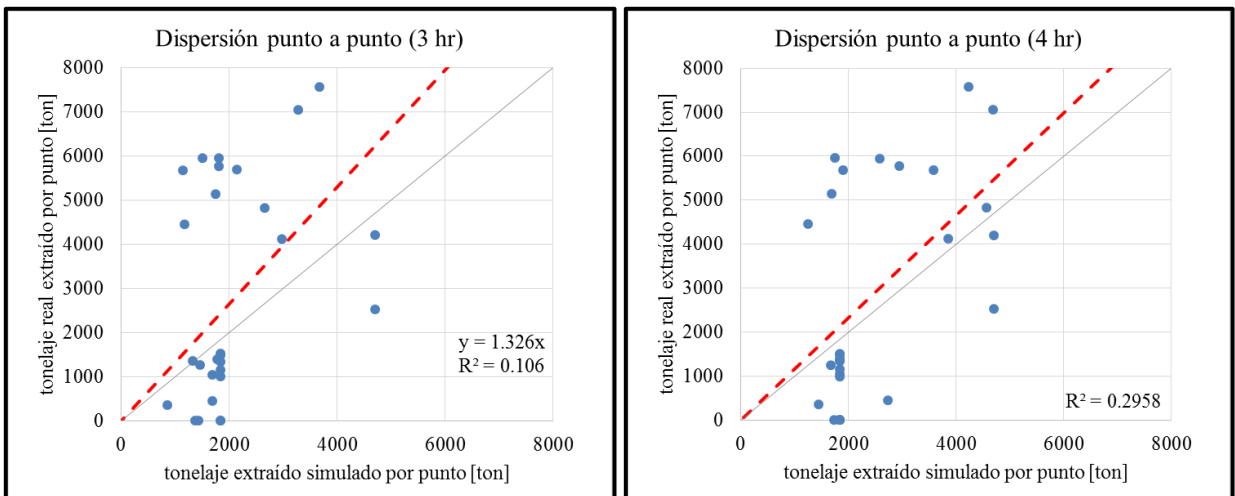


Gráfico 21: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 4,5 y 5,5 horas de trabajo de palas por turno.

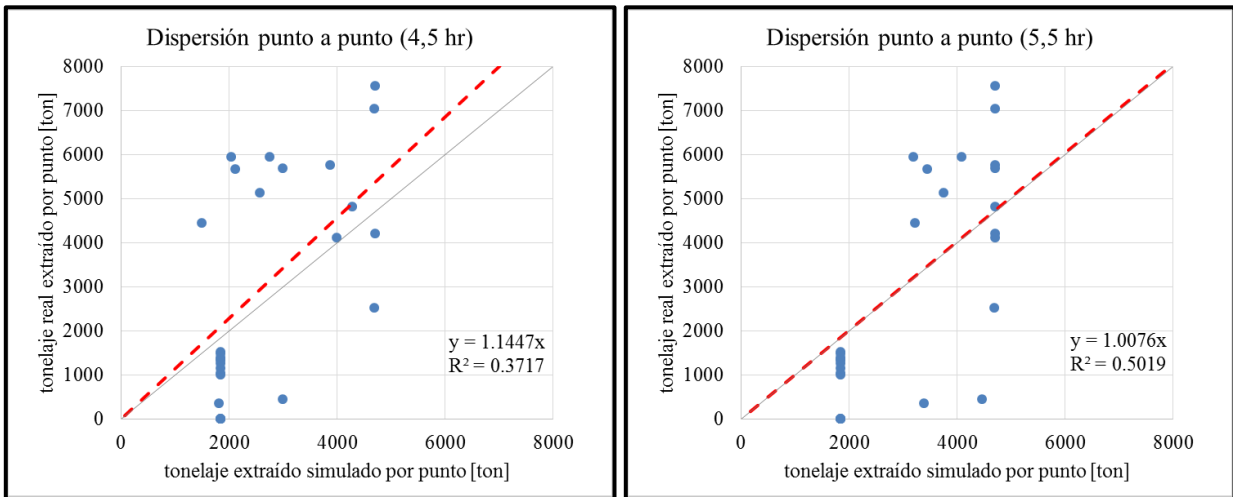
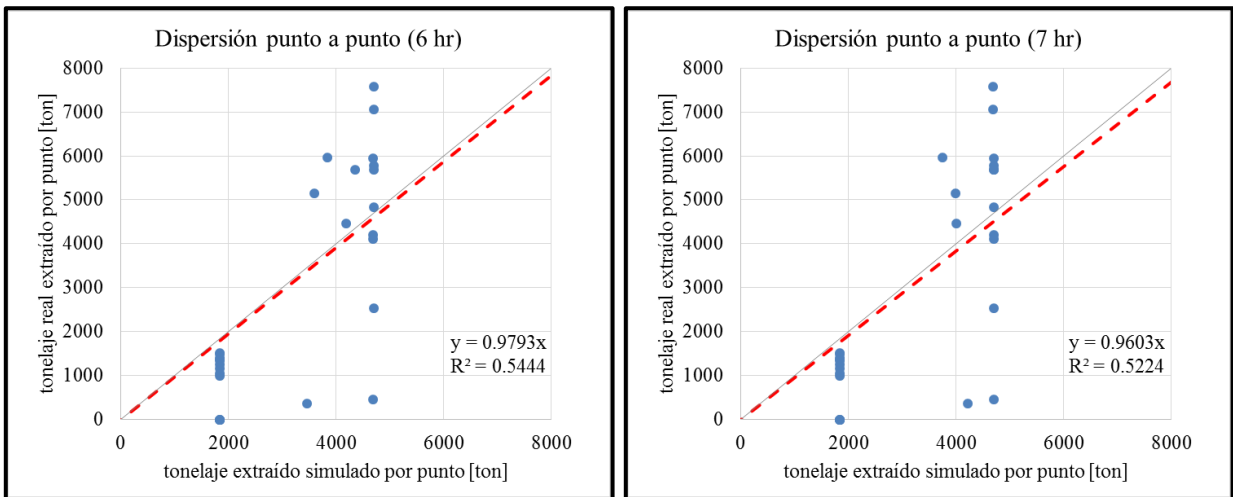


Gráfico 22: Dispersión punto a punto entre tonelaje real extraído y tonelaje simulado para 6 y 7 horas de trabajo de palas por turno.



## ANEXO D RESULTADOS DE RÉPLICAS

En la Tabla 42 se presentan los tonelajes extraídos, para cada simulación en el análisis de réplicas con 5 horas de trabajo por pala por turno.

Tabla 42: Tonelaje extraído por la simulación, para cada replica con distinta semilla.

# Replica	Ton Extraído Total	# Replica	Ton Extraído Total
1	82864	21	76164
2	81959	22	80367
3	84532	23	82868
4	81446	24	80081
5	81502	25	80126
6	79486	26	81311
7	82021	27	81828
8	83221	28	80869
9	77732	29	78250
10	81121	30	79406
11	81725	31	80216
12	80796	32	83581
13	82634	33	82639
14	76435	34	79463
15	83170	35	84509
16	83004	36	79111
17	79422	37	81344
18	81635	38	85103
19	84150	39	82297
20	83224	40	78371

## ANEXO E CÁLULO DE INTERVALO DE CONFIANZA Y DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT

Se presenta la fórmula utilizada para el cálculo del intervalo de confianza para las cuarenta réplicas que se realizaron. (García E., 2006)

Fórmula 3: Intervalo de confianza para una distribución normal.

$$IC = \left[ \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{r}} \left( t_{\alpha/2, r-1} \right), \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{r}} \left( t_{\alpha/2, r-1} \right) \right]$$

Donde:

- IC = Intervalo de Confianza
- $\bar{x}$  = Promedio de la variable de respuesta a analizar (Tonelaje total extraído por la simulación)
- $s$  = Desviación estándar de la variable de respuesta a analizar
- $r$  = Número de réplicas
- $t_{\alpha/2, r-1}$  = Estadístico t-student



En la Tabla 43, se presenta la distribución de t-student utilizada para el cálculo del intervalo de confianza y error del modelo en la etapa de calibración.

Tabla 43: Distribución de t-student.

<i>One-sided</i>	75%	80%	85%	90%	95%	97.50%	99%	99.50%	99.75%	99.90%	99.95%
<i>Two-sided</i>	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.50%	99.80%	99.90%
1	1	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.08	1.386	1.886	2.92	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.6
3	0.765	0.978	1.25	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.19	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.61
5	0.727	0.92	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.1	1.383	1.833	2.262	2.821	3.25	3.69	4.297	4.781
10	0.7	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.93	4.318
13	0.694	0.87	1.079	1.35	1.771	2.16	2.65	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.14
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.69	0.865	1.071	1.337	1.746	2.12	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.74	2.11	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.33	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.61	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.86	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.85
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.08	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.06	1.319	1.714	2.069	2.5	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.06	2.485	2.787	3.078	3.45	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.69
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.31	1.697	2.042	2.457	2.75	3.03	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.05	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2	2.39	2.66	2.915	3.232	3.46
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.99	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.29	1.66	1.984	2.364	2.626	2.871	3.174	3.39
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.98	2.358	2.617	2.86	3.16	3.373
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.96	2.326	2.576	2.807	3.09	3.291

## ANEXO F ESTRATEGIAS DE TURNOS CON TELE-ASISTIDO

Configuración de turnos de extracción para prueba con equipos LHD tele-asistidos.

- **Dos turnos de estabilización y un equipo LHD tele-asistido:**

Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45
1	A	TA	S.E	Chequeo
	B	E	TA	S.E
	C	E	E	TA
2	A	Chequeo	E	E
	B	S.E	Chequeo	E
	C	TA	S.E	Chequeo
3	A	E	TA	S.E
	B	E	E	TA
	C	Chequeo	E	E
4	A	S.E	Chequeo	E
	B	TA	S.E	Chequeo
	C	E	TA	S.E
5	A	E	E	TA
	B	Chequeo	E	E
	C	S.E	Chequeo	E

Tele - asistido
Estabilización
Chequeo
S.E

\*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo

Figura 23: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido.

- **Dos turnos de estabilización y dos equipos LHD tele-asistidos:**

Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45
1	A	TA	TA	S.E
	B	TA	TA	S.E
	C	E	E	TA
2	A	E	E	E
	B	Chequeo	Chequeo	E
	C	S.E	S.E	Chequeo

Tele - asistido
Estabilización
Chequeo
S.E

\*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo

Figura 24: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos.

- **Un turno de estabilización y un equipo LHD tele-asistido:**

Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45
1	A	TA	S.E	Chequeo
	B	E	TA	S.E
	C	Chequeo	E	TA
2	A	S.E	Chequeo	E
	B	TA	S.E	Chequeo
	C	E	TA	S.E
3	A	Chequeo	E	TA
	B	S.E	Chequeo	E
	C	TA	S.E	Chequeo
4	A	E	TA	S.E
	B	Chequeo	E	TA
	C	S.E	Chequeo	E

Tele - asistido
Estabilización
Chequeo
S.E

\*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo

Figura 25: Estructura de turnos con 1 equipo LHD tele-asistido.

- **Un turno de estabilización y dos equipos LHD tele-asistidos:**

Días	Turnos	Calle - 41	Calle - 43	Calle - 45
1	A	TA	TA	S.E
	B	TA	TA	S.E
	C	E	E	TA
2	A	Chequeo	Chequeo	E
	B	S.E	S.E	Chequeo
	C	TA	TA	S.E
3	A	TA	TA	S.E
	B	E	E	TA
	C	Chequeo	Chequeo	E
4	A	S.E	S.E	Chequeo
	B	TA	TA	S.E
	C	TA	TA	S.E
5	A	E	E	TA
	B	Chequeo	Chequeo	E
	C	S.E	S.E	Chequeo

Tele - asistido
Estabilización
Chequeo
S.E

\*S.E Sin extracción tele-asistida, estabilización ni chequeo

Figura 26: Estructura de turnos con 2 equipos LHD tele-asistidos.

# ANEXO G CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN PROMODEL

La Figura 27 muestra una imagen del modelo de simulación en ProModel.

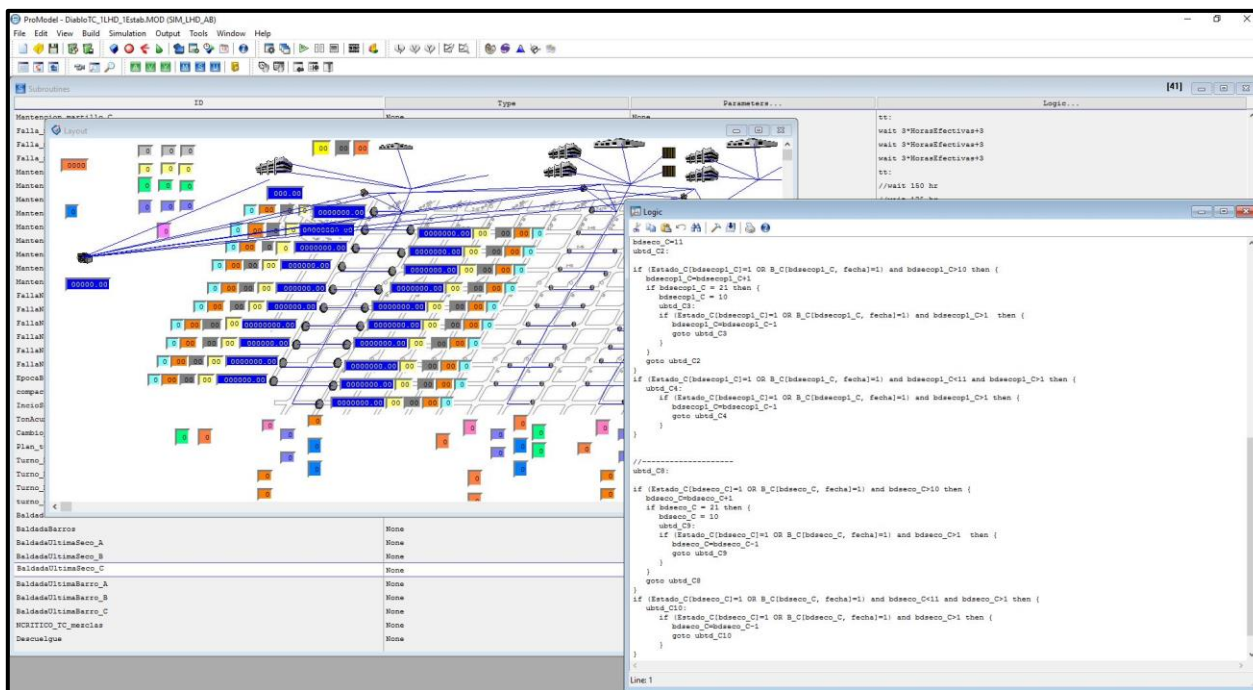


Figura 27: Vista de PROMODEL

A continuación se presenta el detalle del código de simulación en ProModel.

- Puntos de extracción:

```
toncargar=U(10 , 1) //capacidad de balde, distribución uniforme
Colgrand=rand(1) //variable aleatoria, si toma valor inferior a "p", el punto se cuelga
Sobretamañorand=rand(1) // si toma valor inferior a "p", hay sobretamaño
```

```
//Cumplimiento Plan Diario(Velocidad Máxima)
If B A3=0 and Vecinos A[3]>0 and TonDiarioMax A[3, fecha]>TonDiarioLimitado[1] then {
TonDiarioMax_A[3, fecha] = TonDiarioLimitado[1]}
//B_A3 = barro en calle A, punto 3. // Vecinos_A[3] = # vecinos de A3 con barro
//asigna el tonelaje de extracción máximo diario para puntos limitados.
If B A3=1 and TonDiarioMax A[3, fecha]>0 then { TonDiarioMax_A[3, fecha] =
TonDiarioBarro[1]} // asigna el tonelaje de extracción máximo diario para puntos barro.
```

```
//Cumplimiento Plan Mensual
TonMensual_A[3]= Text_A3-Tinicial_A[3]
If B_A3=0 and Vecinos_A[3]>0 then { TonMensualMax_A[3]=TonMensualLimitado[1] }
//limitados
If B A3=1 then { TonMensualMax_A[3]=TonMensualBarro[1] } //barro
If Vecinos_A[3]<0 then { TonMensualMax_A[3]=0 Estado_A[3]=1 TD_A3=1} //para desactivar
puntos de extracción se les asigna un # de vecinos con barro menor a cero, por ende el
tonelaje máximo que pueden extraer es cero y siempre figuran como puntos que completaron
el plan para facilitar la secuencia de extracción y saltarlos.
//El # de vecinos barro, el estado de barro de los puntos, los tonelajes máximos se
asignan al inicio de la simulación.
//-----
```

```

// Se verifica si es turno de extracción manual, si no se han extraído el total de
baldadas, que el punto no sea barro y que los puntos anteriores (1 y 2) ya fueron
extraídos. Además se verifica que no haya ningún tipo de mantenimiento, sino el LHD toma
otra ruta distinta a la ruta hacia el pique de vaciado.
if turnoABC_A=0 and Baldada_A[3]<nBaldada and B_A3=0 and (Estado_A[1]=1 OR B_A1=1) and
(Estado_A[2]=1 OR B_A2=1) and TonTurno_A[3]<TonTurnoMax_A[3] and
TonMensual_A[3]<TonMensualMax_A[3] and TonDiario_A[3, fecha]< TonDiarioMax_A[3, fecha]
and mantPlanta=0 and mantMartillo_A=0 and FallaMartillo_A=0 then{

  if mantPv_A=0 OR descuelgue_A=1 then {
    if mantCalle_A=0 then{
      if cambioTurno = 0 then {
        if mantLhdM_A = 0 then {
          if fallaNpLhdM_A=0 then {
            wait until TonDiario_A[3, fecha]< TonDiarioMax_A[3, fecha] and Ncolg_A <
nColgCritico_A and NST_A < nStCritico_A and Ncomp_A < nCompCritico_A and
descuelgue_A=0
              get LHDM A
              wait 24 sec
              route 1
              inc Baldada_A[3]
              Text_A3=Text_A3+toncargar
              TonTurno_A[3]=TonTurno_A[3]+toncargar
              TonDiario_A[3, fecha]=TonDiario_A[3, fecha]+toncargar
              if Colgrand <= PCG_A[3] then { CG_A3=1 Ncolg_A=Ncolg_A+1
TotalColgaduras_A=TotalColgaduras_A+1}else{
                if Sobretamañorand <= PSS_A[3] then { ST_A3=1 NST_A=NST_A+1
TotalSobretamaño_A=TotalSobretamaño_A+1}else{}
              }else { route 2}
            }else{ route 2}
          } else{ route 3}
        } else { route 4}
      } else{route 4}
    }else//-----
// Se verifica si es turno de extracción tele-asistida, si no se han extraído el total
de baldadas, que el punto si sea barro y que los puntos anteriores (1 y 2) ya fueron
extraídos. Además se verifica que no haya ningún tipo de mantenimiento, sino el LHD toma
otra ruta distinta a la ruta hacia el pique de vaciado.
if turnoABC_A=1 and Baldada_A[3]<nBaldada and B_A3=1 and Mezcla_A1>0 and pique12_A=0
and TonTurno_A[3]<TonTurnoMax_A[3] and TonMensual_A[3]<TonMensualMax_A[3] and
(Estado_A[1]=1 OR B_A1=0) and (Estado_A[2]=1 OR B_A2=0) and TonDiario_A[3, fecha]<
TonDiarioMax_A[3, fecha] and mantPlanta=0 and mantMartillo_A=0 and FallaMartillo_A=0
then{
  if mantPv_A=0 OR descuelgue_A=1 then {
    if mantCalle_A=0 then{
      if cambioTurno = 0 then {
        if mantLhdTC_A = 0 then {
          if fallaNpLhdTC_A=0 then {
            wait until TonDiario_A[3, fecha]< TonDiarioMax_A[3, fecha] and Ncolg_A <
nColgCritico_A and NST_A < nStCritico_A and Ncomp_A < nCompCritico_A and Descuelgue_A=0
              get LHDTA A
              wait 24 sec
              route 7
              inc Baldada_A[3]
              inc BMP1_A
              inc Mezcla_A1
              Text_A3=Text_A3+toncargar
              TonTurno_A[3]=TonTurno_A[3]+toncargar
              TonDiario_A[3, fecha]=TonDiario_A[3, fecha]+toncargar
//              if ColgBrand <= 0.05 then {CGB_A3=1 Ncomp_A=Ncomp_A+1
TotalCompactacion_A=TotalCompactacion_A+1}else{
                if Sobretamañorand <= PSS_A[3] then {ST_A3=1 NST_A=NST_A+1
TotalSobretamaño_A=TotalSobretamaño_A+1}else{}
              //}
            }else { route 5}
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

```

    }else{ route 5}
  } else{ route 3}
} else { route 6}
}else{route 6}
}else//-----
// Se verifica si es turno de extracción tele-asistida, si no se han extraído el total
de baldadas, que el punto no sea barro y que los puntos anteriores (1 y 2) ya fueron
extraídos. Además se verifica que no haya ningún tipo de mantención, sino el LHD toma
otra ruta distinta a la ruta hacia el pique de vaciado. (Este caso es la extracción de
seco con tele-asistido)
if turnoABC_A=1 and Baldada_A[3]<nBaldada and Mezcla_A1=0 and pique12_A=0 and
TonTurno_A[3]<TonTurnoMax_A[3] and TonMensual_A[3]<TonMensualMax_A[3] and B_A3=0 and
(Estado_A[1]=1 OR B_A1=1) and (Estado_A[2]=1 OR B_A2=1) and TonDiario_A[3, fecha]<
TonDiarioMax_A[3, fecha] and mantPlanta=0 and mantMartillo_A=0 and FallaMartillo_A=0
then{

  if mantPv_A=0 OR descuelgue_A=1 then {
    if mantCalle A=0 then{
      if cambioTurno = 0 then {
        if mantLhdTC_A = 0 then {
          if fallaNpLhdTC_A=0 then {
            wait until TonDiario_A[3, fecha]< TonDiarioMax_A[3, fecha] and Ncolg_A <
nColgCritico_A and NST_A < nStCritico_A and Ncomp_A < nCompCritico_A and Descuelgue_A=0
            get LHDTC_A
              wait 24 sec
            route 7
            inc Baldada_A[3]
              inc BMP1_A
              inc Mezcla_A1
            Text_A3=Text_A3+toncargar
              TonTurno_A[3]=TonTurno_A[3]+toncargar
              TonDiario_A[3, fecha]=TonDiario_A[3, fecha]+toncargar
            if Colgrand <= PCG_A[3] then {CG_A3=1 Ncolg_A=Ncolg_A+1
TotalColgaduras_A=TotalColgaduras_A+1}else{
              if Sobretamañorand <= PSS_A[3] then {ST_A3=1 NST_A=NST_A+1
TotalSobretamaño_A=TotalSobretamaño_A+1}else{}}
            }else { route 5}
              }else{ route 5}
            } else{ route 3}
              } else { route 6}
            }else{route 6}
              }else{route 8}
            if Mezcla_A1>=mi_A1+1 then{Mezcla_A1=0}
            if TonTurno_A[3] >= TonTurnoMax_A[3] or TonMensual_A[3]>=TonMensualMax_A[3] or
TonDiario_A[3, fecha]>=TonDiarioMax_A[3, fecha] then {TD_A3=1} else {TD_A3=0}
//-----
            if EstrategiaColgaduras=1 and B_A3=0 then{
              if CG_A3=1 then{
                wait until Ncolg_A >= nColgCritico_A //criterio para realizar el descuelgue
                get DC_A
                wait TLG[1] min
                FallaDG=rand(1)
                if FallaDG<(1-TFDG[1]) then{
                  CG_A3 = 0}
                    else{
                      wait TLG[1] min
                      CG_A3 = 0}
                        if CG_A1 +CG_A2 +CG_A3 +CG_A4 +CG_A5 +CG_A6 +CG_A7 +CG_A8 +CG_A9 +CG_A10 +CG_A11
+CG_A12 +CG_A13 +CG_A14 +CG_A15 +CG_A16 +CG_A17 +CG_A18 +CG_A19 +CG_A20=0 then{
                          Ncolg_A = 0 }
                            free DC_A }
                        }
                      }
                    }
                  }
                }
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}

if Estrategia_sobretamaño=1 then{
  if ST_A3=1 then{

```

```

    wait until NST_A >= nStCritico_A and Ncolg_A < nColgCritico_A //criterio para realizar
    la reducción secundaria.
    get ST_A
    wait TRS[1] min
    FallaRS=rand(1)
    if FallaRS < (1-TFRS[1]) then{
        ST_A3 = 0}
    else{
        wait TRS[1] min
        ST_A3 = 0}
    if ST_A1 +ST_A2 +ST_A3 +ST_A4 +ST_A5 +ST_A6 +ST_A7 +ST_A8 +ST_A9 +ST_A10 +ST_A11
+ST_A12 +ST_A13 +ST_A14 +ST_A15 +ST_A16 +ST_A17 +ST_A18 +ST_A19 +ST_A20 = 0 then{
        NST_A = 0 }

    free ST_A }
}
//-----
if TonTurno_A[1] >= TonTurnoMax_A[1] or TonMensual_A[1]>=TonMensualMax_A[1] then {TD_A1=1}
if TonTurno_A[2] >= TonTurnoMax_A[2] or TonMensual_A[2]>=TonMensualMax_A[2] then {TD_A2=1}
if TonTurno_A[3] >= TonTurnoMax_A[3] or TonMensual_A[3]>=TonMensualMax_A[3] then {TD_A3=1}
if TonTurno_A[4] >= TonTurnoMax_A[4] or TonMensual_A[4]>=TonMensualMax_A[4] then {TD_A4=1}
if TonTurno_A[5] >= TonTurnoMax_A[5] or TonMensual_A[5]>=TonMensualMax_A[5] then {TD_A5=1}
... //TD_A# = 1: el punto ya complete el plan diario o mensual.

if turnoABC_A=0 then{
if Baldada_A[bdseco_A]>=nBaldada OR (Baldada_A[bdseco_A]>=1 AND Estado_A[bdseco_A]=1)
then {
    if B_A[1, fecha]=0 then {Baldada_A[1]=0}
    if B_A[2, fecha]=0 then {Baldada_A[2]=0}
    if B_A[3, fecha]=0 then {Baldada_A[3]=0}
    if B_A[4, fecha]=0 then {Baldada_A[4]=0}
    if B_A[5, fecha]=0 then {Baldada_A[5]=0}
    ... //reinicia las baldadas en caso de extracción manual
}
}
if turnoABC_A=1 then{
if Baldada_A[bdsecopl_A]>=nBaldada OR (Baldada_A[bdsecopl_A]>=1 AND
Estado_A[bdsecopl_A]=1) then {
    if B_A[1, fecha]=0 then {Baldada_A[1]=0}
    if B_A[2, fecha]=0 then {Baldada_A[2]=0}
    if B_A[3, fecha]=0 then {Baldada_A[3]=0}
    if B_A[11, fecha]=0 then {Baldada_A[11]=0}
    if B_A[12, fecha]=0 then {Baldada_A[12]=0}
    if B_A[13, fecha]=0 then {Baldada_A[13]=0}
    ... //reinicia las baldadas en caso de extracción TA
}
}
if Baldada_A[bdbarrop1_A]>=nBaldada OR (Baldada_A[bdbarrop1_A]>=1 AND
Estado_A[bdbarrop1_A]=1) then {
    if B_A[1, fecha]=1 then {Baldada_A[1]=0}
    if B_A[2, fecha]=1 then {Baldada_A[2]=0}
    if B_A[3, fecha]=1 then {Baldada_A[3]=0}
    if B_A[11, fecha]=1 then {Baldada_A[11]=0}
    if B_A[12, fecha]=1 then {Baldada_A[12]=0}
    if B_A[13, fecha]=1 then {Baldada_A[13]=0}
    ... //reinicia las baldadas en caso de extracción TA
}
}
}
if TD_A1+CG_A1+CGB_A1+ST_A1>=1 OR Baldada_A[1]=nBaldada then {Estado_A[1]=1} else {Estado_A[1]=0}
if TD_A2+CG_A2+CGB_A2+ST_A2>=1 OR Baldada_A[2]=nBaldada then {Estado_A[2]=1} else {Estado_A[2]=0}
if TD_A3+CG_A3+CGB_A3+ST_A3>=1 OR Baldada_A[3]=nBaldada then {Estado_A[3]=1} else {Estado_A[3]=0}
if TD_A4+CG_A4+CGB_A4+ST_A4>=1 OR Baldada_A[4]=nBaldada then {Estado_A[4]=1} else {Estado_A[4]=0}
if TD_A5+CG_A5+CGB_A5+ST_A5>=1 OR Baldada_A[5]=nBaldada then {Estado_A[5]=1} else {Estado_A[5]=0}
... //Estado_A[#]: variable que indica la disponibilidad del punto de acuerdo al tonelaje
máximo extraído, colgadura, sobre-tamaño o baldadas.

```

- Ruta 1 puntos de extracción:

```
move with LHDM_A //caso de extracción manual en calle A(la primera calle) mineral a pique
Wait Until CapPv_A>=toncargar+TonPv_A
      TonPv_A=TonPv_A+toncargar
wait 12 sec
free LHDM_A
```

- Ruta 2 puntos de extracción:

```
move with LHDM_A //enviar LHD a mantención
```

- Ruta 3 puntos de extracción:

```
//move with LHDM_A or LHDTA_A //LHD fuera de turno, se desactivo esta ruta y se deja el
LHD donde estaba a final de turno
```

```
ORDER 1 mineral to PE_A3
```

- Ruta 4 puntos de extracción:

```
move with LHDM_A //mantención no planificada
```

- Ruta 5 puntos de extracción:

```
move with LHDTA_A //enviar LHD TA a mantención
```

- Ruta 6 puntos de extracción:

```
move with LHDTA_A //mantención no planificada
```

- Ruta 7 puntos de extracción:

```
move with LHDTA_A //mineral a pique con equipo LHD TA
Wait Until CapPv_A >= toncargar+TonPv_A
      TonPv_A=TonPv_A+toncargar
```

```
free LHDTA_A
```

- Ruta 8 puntos de extracción:

```
EXIT // ruta de salida de mineral en caso de error
```

- Zonas de espera por mantención:

```
if mantCalle_A=1 then {
wait until mantCalle_A=0 and mantPv_A=0 and turnoABC_A=0
free LHDM_A} else
```

```
if mantPv_A=1 then {
wait until mantPv_A=0 and mantCalle_A=0 and turnoABC_A=0
free LHDM_A} else
```



```

if turnoABC_A=1 then{
wait until turnoABC_A=0 and mantPv_A=0 and mantCalle_A=0
free LHDM_A}

if descuelgue_A=1 then{
wait until Descuelgue_A=0
free LHDM_A}

if mantLhdM_A=1 then{
wait until mantLhdM_A = 0 and fallaNpLhdM_A=0
free LHDM_A} else

if fallaNpLhdM_A=1 then {
wait until fallaNpLhdM_A=0 and mantLhdM_A = 0
free LHDM_A} else

{ free LHDM_A}

```

- **Subrutinas:**

- **Mantenciones:**

```

//todas las subrutinas de mantención siguen la siguiente forma
tt:
fallaNpLhdM_A=0
wait U((3*HorasEfectivas+3)*4, (3*HorasEfectivas+3)*4*0.3) hr
fallaNpLhdM_A=1 //variable binaria
TmantnpM_A = U(18 , 5) //variable uniforme
wait TmantnpM_A min
TmantnpAcuM_A= TmantnpM_A + TmantnpAcuM_A
fallaNpLhdM_A=0
goto tt

```

- **Cambio de turno:**

```

tt:

cambioTurno=0
wait HorasEfectivas hr
cambioTurno=1 //comienza cambio de turno
wait 0.99 hr

if EstrategiaColgaduras=2 and CG_A1 +CG_A2 +CG_A3 +CG_A4 +CG_A5 +CG_A6 +CG_A7
+CG_A8 +CG_A9 +CG_A10 +CG_A11 +CG_A12 +CG_A13 +CG_A14 +CG_A15 +CG_A16 +CG_A17
+CG_A18 +CG_A19 +CG_A20 >= 1 then{
nColgCritico_A=0}

if Estrategia_sobretamaño=2 and ST_A1 +ST_A2 +ST_A3 +ST_A4 +ST_A5 +ST_A6 +ST_A7
+ST_A8 +ST_A9 +ST_A10 +ST_A11 +ST_A12 +ST_A13 +ST_A14 +ST_A15 +ST_A16 +ST_A17
+ST_A18 +ST_A19 +ST_A20 >= 1 then{
nStCritico_A=0}

//verifica criterio de descuelgue

//Se resetea el numero de baldadas por punto, y el estado de disponibilidad del
punto.
Baldada_A[1]=0
Baldada_A[2]=0
Baldada_A[3]=0
Baldada_A[4]=0
...

Estado_A[1]=0
Estado_A[2]=0

```

```

Estado_A[3]=0
Estado_A[4]=0
...

wait 0.01 hr
cturno = cturno + 1

cambioTurno=0 //finaliza el cambio de turno

goto tt

```

- **Estrategia de turnos:**

```

//existe una subrutina por calle (A, B y C)
tt:

turnoABC_A=1 //turno con extracción Tele-asistida
if B_A1=1 then {Mezcla_A1=1} else {Mezcla_A1=0}
wait (HorasEfectivas*2+2) hr

turnoABC_A=2 //turno de estabilización
Mezcla_A1=0
wait (HorasEfectivas*2+2) hr

Chequeo_A=1
turnoABC_A=2 //turno de chequeo
Mezcla_A1=0
wait (HorasEfectivas*1+1) hr
Chequeo_A=0

turnoABC_A=2 //turno S.E.
Mezcla_A1=0
wait (HorasEfectivas*1+1) hr

goto tt

```

- **Control de mezclas según baldadas (puntos secos):**

Sub: //algoritmo para identificar el último punto de la secuencia que debe ser extraído para reiniciar la cuenta de baldadas.

```

ubtd_A1:
bdsecop1_A=11
bdseco_A=11
ubtd_A2:

if (Estado_A[bdsecop1_A]=1 OR B_A[bdsecop1_A, fecha]=1) and bdsecop1_A>10 then {
    bdsecop1_A=bdsecop1_A+1
    if bdsecop1_A = 21 then {
        bdsecop1_A = 10
        ubtd_A3:
        if (Estado_A[bdsecop1_A]=1 OR B_A[bdsecop1_A, fecha]=1) and
        bdsecop1_A>1 then {
            bdsecop1_A=bdsecop1_A-1
            goto ubtd_A3
        }
    }
    goto ubtd_A2
}
if (Estado_A[bdsecop1_A]=1 OR B_A[bdsecop1_A, fecha]=1) and bdsecop1_A<11 and
bdsecop1_A>1 then {
    ubtd_A4:

```

```

        if (Estado_A[bdsecop1_A]=1 OR B_A[bdsecop1_A, fecha]=1) and
        bdsecop1_A>1 then {
            bdsecop1_A=bdsecop1_A-1
            goto ubtd_A4
        }
    }

//-----
ubtd_A8:

if (Estado_A[bdseco_A]=1 OR B_A[bdseco_A, fecha]=1) and bdseco_A>10 then {
    bdseco_A=bdseco_A+1
    if bdseco_A = 21 then {
        bdseco_A = 10
        ubtd_A9:
        if (Estado_A[bdseco_A]=1 OR B_A[bdseco_A, fecha]=1) and bdseco_A>1
        then {
            bdseco_A=bdseco_A-1
            goto ubtd_A9
        }
    }
    goto ubtd_A8
}

if (Estado_A[bdseco_A]=1 OR B_A[bdseco_A, fecha]=1) and bdseco_A<11 and bdseco_A>1
then {
    ubtd_A10:
    if (Estado_A[bdseco_A]=1 OR B_A[bdseco_A, fecha]=1) and bdseco_A>1
    then {
        bdseco_A=bdseco_A-1
        goto ubtd_A10
    }
}

//-----
wait 0.1 min
goto ubtd_A1

```

- Control de mezclas según baldadas (puntos barro):

```

ubtd_A1:
bdbarrop1_A=11
bdbarrop2_A=19
ubtd_A2: //algoritmo para identificar el último punto de la secuencia que debe
ser extraído para reiniciar la cuenta de baldadas.

if (Estado_A[bdbarrop1_A]=1 OR B_A[bdbarrop1_A, fecha]=0) and bdbarrop1_A>10 then
{
    bdbarrop1_A=bdbarrop1_A+1
    if bdbarrop1_A = 21 then {
        bdbarrop1_A = 10
        ubtd_A3:
        if (Estado_A[bdbarrop1_A]=1 OR B_A[bdbarrop1_A, fecha]=0) and
bdbarrop1_A>1 then {
            bdbarrop1_A=bdbarrop1_A-1
            goto ubtd_A3
        }
    }
    goto ubtd_A2
}

if (Estado_A[bdbarrop1_A]=1 OR B_A[bdbarrop1_A, fecha]=0) and bdbarrop1_A<11 and
bdbarrop1_A>1 then {
    ubtd_A4:
    if (Estado_A[bdbarrop1_A]=1 OR B_A[bdbarrop1_A, fecha]=0) and
bdbarrop1_A>1 then {
        bdbarrop1_A=bdbarrop1_A-1
    }
}

```

```

                                goto ubtd_A4
                                }
                                }
                                //-----
                                wait 0.1 min
                                goto ubtd_A1

```

- Contador de puntos con presencia de colgaduras, puntos disponibles y mezclas:

```

sub:
if TonMensual_A[1]>=TonMensualMax_A[1]then {TonM_A[1]=1} else {TonM_A[1]=0}
if TonMensual_A[2]>=TonMensualMax_A[2]then {TonM_A[2]=1} else {TonM_A[2]=0}
if TonMensual_A[3]>=TonMensualMax_A[3]then {TonM_A[3]=1} else {TonM_A[3]=0}
if TonMensual_A[4]>=TonMensualMax_A[4]then {TonM_A[4]=1} else {TonM_A[4]=0}
...

if turnoABC_A=0 then {
if nColgCritico_A>1 OR (NST_A + Ncolg_A + Ncomp_A=0) then {
    activos_A = 20 - Barros_A - ( TonM_A[1] + TonM_A[2] + TonM_A[3] + TonM_A[4]
+ TonM_A[5] + TonM_A[6] + TonM_A[7] + TonM_A[8] + TonM_A[9] + TonM_A[10] + TonM_A[11] +
TonM_A[12] + TonM_A[13] + TonM_A[14] + TonM_A[15] + TonM_A[16] + TonM_A[17] + TonM_A[18]
+ TonM_A[19] + TonM_A[20] )
    nColgCritico_A = (activos_A*nLargCritico)
//trunc(activos_A*nLargCritico)
}
if turnoABC_A=1 then {
if nColgCritico_A>1 OR (NST_A + Ncolg_A + Ncomp_A=0) then {
    activos_A = 20 - ( TonM_A[1] + TonM_A[2] + TonM_A[3] + TonM_A[4] + TonM_A[5]
+ TonM_A[6] + TonM_A[7] + TonM_A[8] + TonM_A[9] + TonM_A[10] + TonM_A[11] + TonM_A[12]
+ TonM_A[13] + TonM_A[14] + TonM_A[15] + TonM_A[16] + TonM_A[17] + TonM_A[18] + TonM_A[19]
+ TonM_A[20] )
    nColgCritico_A = (activos_A*nLargCritico) }
if EstrategiaColgaduras=1 and (NST_A + Ncolg_A + Ncomp_A >= nColgCritico_A OR
Chequeo_A=1) then{
    nColgCritico_A=1}
nStCritico_A = nColgCritico_A
nCompCritico_A = nColgCritico_A

if TD_A1+CG_A1+CGB_A1+ST_A1>=1 then {Disponible_A[1]=1} else {Disponible_A[1]=0}
if TD_A2+CG_A2+CGB_A2+ST_A2>=1 then {Disponible_A[2]=1} else {Disponible_A[2]=0}
if TD_A3+CG_A3+CGB_A3+ST_A3>=1 then {Disponible_A[3]=1} else {Disponible_A[3]=0}
if TD_A4+CG_A4+CGB_A4+ST_A4>=1 then {Disponible_A[4]=1} else {Disponible_A[4]=0}
...

// Máxima mezcla posible: a medida que los puntos cumplen el plan existe la
posibilidad que se deba disminuir la razón de mezcla, por ejemplo si la razón es de 1:6,
pero quedan 4 puntos barro, la mezcla será 1:4.
if
m_A<=(B_A1+B_A2+B_A3+B_A11+B_A12+B_A13+B_A14+B_A15+B_A16+B_A17+B_A18+B_A4+B_A5+B_A6+B_A
7+B_A8+B_A9+B_A10+B_A20+B_A19 - Disponible_A[1]*B_A1- Disponible_A[2]*B_A2-
Disponible_A[3]*B_A3- Disponible_A[11]*B_A11- Disponible_A[12]*B_A12-
Disponible_A[13]*B_A13- Disponible_A[14]*B_A14- Disponible_A[15]*B_A15-
Disponible_A[16]*B_A16- Disponible_A[17]*B_A17- Disponible_A[18]*B_A18 -
Disponible_A[4]*B_A4- Disponible_A[5]*B_A5- Disponible_A[6]*B_A6- Disponible_A[7]*B_A7-
Disponible_A[8]*B_A8- Disponible_A[9]*B_A9- Disponible_A[10]*B_A10-
Disponible_A[19]*B_A19- Disponible_A[20]*B_A20 ) then {mi_A1 = m_A}
else{mi_A1 = B_A1+B_A2+B_A3+B_A11+B_A12+B_A13+B_A14+B_A15+B_A16+B_A17+B_A18 -
Disponible_A[1]*B_A1- Disponible_A[2]*B_A2- Disponible_A[3]*B_A3-
Disponible_A[11]*B_A11- Disponible_A[12]*B_A12- Disponible_A[13]*B_A13-
Disponible_A[14]*B_A14- Disponible_A[15]*B_A15- Disponible_A[16]*B_A16-
Disponible_A[17]*B_A17- Disponible_A[18]*B_A18
+B_A4+B_A5+B_A6+B_A7+B_A8+B_A9+B_A10+B_A20+B_A19 - Disponible_A[4]*B_A4-

```

```

Disponible_A[5]*B_A5- Disponible_A[6]*B_A6- Disponible_A[7]*B_A7- Disponible_A[8]*B_A8-
Disponible_A[9]*B_A9- Disponible_A[10]*B_A10- Disponible_A[19]*B_A19-
Disponible_A[20]*B_A20}

```

```

if Disponible_A[4]*B_A4 + Disponible_A[5]*B_A5 + Disponible_A[6]*B_A6 +
Disponible_A[7]*B_A7 + Disponible_A[8]*B_A8 + Disponible_A[9]*B_A9 +
Disponible_A[10]*B_A10 + Disponible_A[19]*B_A19 + Disponible_A[20]*B_A20 +
Disponible_A[1]*B_A1 + Disponible_A[2]*B_A2 + Disponible_A[3]*B_A3 +
Disponible_A[11]*B_A11 + Disponible_A[12]*B_A12 + Disponible_A[13]*B_A13 +
Disponible_A[14]*B_A14 + Disponible_A[15]*B_A15 + Disponible_A[16]*B_A16 +
Disponible_A[17]*B_A17 + Disponible_A[18]*B_A18 = B_A1 + B_A2 + B_A3 + B_A11 + B_A12 +
B_A13 + B_A14 + B_A15 + B_A16 + B_A17 + B_A18 + B_A4 + B_A5 + B_A6 + B_A7 + B_A8 + B_A9
+ B_A10 + B_A19 + B_A20 then { Mezcla_A1 = 0}

```

```

wait 0.01 min
goto sub

```

- Condición de no operar cuando ocurre el descuelgue de calles vecinas:

```

desc: //Si hay una operación con ingreso de personal, las calles vecinas no pueden
operar.

```

```

if Ncolg_B >= nColgCritico_B or NST_B >= nStCritico_B or Ncomp_B >= nCompCritico_B OR
Ncolg_A >= nColgCritico_A or NST_A >= nStCritico_A or Ncomp_A >= nCompCritico_A then{
descuelgue_A=1 }else{descuelgue_A=0}

```

```

if Ncolg_A >= nColgCritico_A or NST_A >= nStCritico_A or Ncomp_A >= nCompCritico_A OR
Ncolg_B >= nColgCritico_B or NST_B >= nStCritico_B or Ncomp_B >= nCompCritico_B OR
Ncolg_C >= nColgCritico_C or NST_C >= nStCritico_C or Ncomp_C >= nCompCritico_C then{
descuelgue_B=1 }else{descuelgue_B=0}

```

```

if Ncolg_B >= nColgCritico_B or NST_B >= nStCritico_B or Ncomp_B >= nCompCritico_B OR
Ncolg_C >= nColgCritico_C or NST_C >= nStCritico_C or Ncomp_C >= nCompCritico_C then{
descuelgue_C=1 }else{descuelgue_C=0}

```

```

wait 0.05 min

```

```

//guardar datos en excel

```

```

Tcolg_A[1]=TotalColgaduras_A
Tst_A[1]=TotalSobretamaño_A
Tcolg_B[1]=TotalColgaduras_B
Tst_B[1]=TotalSobretamaño_B
Tcolg_C[1]=TotalColgaduras_C
Tst_C[1]=TotalSobretamaño_C

```

```

goto desc

```

## ANEXO H LEY DE CU % POR PUNTO DE EXTRACCIÓN

En la Tabla 44 se presenta la ley de Cu % por punto considerada para la evaluación de finos. Los registros corresponden a la última medición.

Tabla 44: Ley de Cu % por punto de extracción.

Punto de extracción	Ley Cu %	Punto de extracción	Ley Cu %
41 32H	1.02	43 33H	0.72
41 33H	0.84	43 34H	0.8
41 34H	0.67	43 35H	1.15
41 35H	0.53	43 36H	1.26
41 36H	0.88	43 37H	1.54
41 37H	0.85	43 38H	1.95
41 38H	0.83	43 39H	1.12
41 39H	1.08	43 40H	1.03
41 40H	0.61	43 41H	0.62

41 33F	0.82	43 34F	1.01
41 34F	0.31	43 35F	0.68
41 35F	0.45	43 36F	0.64
41 36F	0.63	43 37F	1.33
41 37F	1.49	43 38F	1.72
41 38F	1.75	43 39F	1.32
41 39F	1.08	43 40F	0.53
41 40F	0.72	43 41F	0.6
41 41F	0.53	43 42F	0.72

45 34H	0.69
45 35H	1.05
45 36H	0.9
45 37H	0.81
45 38H	0.79
45 39H	1.48
45 40H	0.67
45 41H	0.86
45 42H	0.67