

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

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE EXTRACCIÓN DE AGUA-
BARRO EN LA FASE II DE MINA DIABLO REGIMIENTO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

IGNACIO ANDRÉS SOTO ZURITA

PROFESOR GUÍA

NICOLÁS MONTECINO BASTÍAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ
RAÚL CASTRO RUIZ

SANTIAGO
2018

RESUMEN

La minería subterránea se ha enfrentado por años con el gran problema de la aparición de agua-barro en sus niveles de producción y a través de las columnas de extracción, lo cual compromete la integridad y seguridad de los trabajadores que se exponen a diario frente a la ocurrencia de un evento violento de material húmedo, además de posibles pérdidas de equipos e infraestructura dañada. Hasta la fecha, la forma en que se ha enfrentado este problema consiste simplemente en cerrar el punto de extracción que presente mayor humedad, y continuar la extracción en puntos aledaños. Sin embargo, se sabe que esto no provoca más que el traslado del barro hacia otros sectores, teniendo las operaciones que lidiar continuamente con este riesgo. Además, esta medida genera la pérdida de reservas de mineral, las que tienen el suficiente potencial económico para proponer una solución que permita su recuperación, sin arriesgar a las personas.

El área de Innovación de División El Teniente dispone dentro de su cartera de proyectos la prueba industrial de extracción de agua-barro en la Fase II de Mina Diablo Regimiento. Este proyecto consiste en implementar una nueva filosofía operacional para poder extraer mineral de puntos previamente cerrados por presencia de barro utilizando equipos tele-asistidos, y reduciendo la exposición de trabajadores en terreno. El objetivo de este estudio se enfoca en realizar un análisis de datos reales obtenidos en la extracción de agua-barro en la Fase II, a través de 41 puntos de extracción, para entregar un seguimiento a la prueba en forma de KPIs operacionales, y posteriormente evaluar, por medio de una nueva estrategia de extracción, los nuevos resultados y aprendizajes obtenidos.

El seguimiento a la prueba en el estudio fue realizado por ocho meses, desde enero hasta agosto de 2018, siendo el último mes donde se instauró la nueva estrategia de extracción, y permitiendo de esa manera definir dos escenarios. El primer escenario ocurrió durante el período de enero a julio, donde los siguientes KPIs diferenciadores se obtuvieron: un cumplimiento de producción cercano al 50%, una uniformidad de extracción de 10.2%, una utilización efectiva del equipo de 3 [h/d], y un 88.5% de baldadas efectivas en cada turno. Se verificó que durante estos meses las colgaduras pasaron de un 55% a tener un máximo de 90%, dejando 4 puntos abocados con mineral, debido a que en mayo no hubo extracción ni reducción secundaria, y el material se terminó consolidando.

El segundo escenario se presentó una vez aplicada la nueva estrategia, que consistió en ordenar y reestructurar las operaciones unitarias en la Fase II, concentrando las actividades de reducción secundaria en un turno, y priorizando la extracción en los otros dos. Los siguientes KPIs se obtuvieron: un cumplimiento de producción cercano al 95%, una uniformidad de extracción del 14%, una utilización efectiva del equipo sobre 6 [h/d], y un 94.3% de baldadas efectivas en cada turno. Las colgaduras se redujeron hasta un 70%, dejando más de 10 puntos abocados. Se concluye de este nuevo plan que la continuidad operacional en las zanjas permite mantener el flujo gravitacional y evita la formación de colgaduras, aunque también genera la posibilidad de aumentar los eventos de agua-barro.

Se recomienda como trabajo futuro continuar el seguimiento de la prueba para documentar los nuevos aprendizajes obtenidos en la prueba de extracción, proponer métodos para aislar por completo la fase de personas en lo que respecta a reducción secundaria, y al final evaluar económicamente el proyecto para comprobar su rentabilidad.

ABSTRACT

Underground mining process has been challenged during the recent years with the appearance of mud-rushes in its production levels and through its extraction columns, impacting on the integrity and safety of the workers who are exposed daily to the occurrence of a violent event of wet material, in addition to possible losses of equipment and damaged infrastructure. To date, this problem is faced with the closure of the extraction point which has the highest humidity, and the continuity of the extraction at nearby points. However, it is known that this solution causes the transfer of the mud to other sectors, with the operations having to deal continuously with this risk. In addition, this measure generates the loss of mineral reserves, which have sufficient economic potential to propose a solution that allows their recovery, without putting in danger the life of people involved.

El Teniente Division's Innovation area includes within its portfolio the project of an industrial test of water-mud extraction in Phase II of Mina Diablo Regimiento. This project consists of implementing a new operational philosophy to extract ore from previously closed points with mud using tele-assisted equipment, and reducing the exposure of workers on the area. The main objective of this study consists of performing an analysis of real data obtained in the extraction of water-mud from Phase II, through 41 extraction points, in order to get a follow-up of the industrial test using operational KPIs, and subsequently evaluate, through a new extraction strategy, the results and the lessons learnt.

The test follow-up in the study was executed for eight months, from January to August 2018, in which two scenarios were defined. The first scenario was presented during the period from January to July, where the following KPIs were obtained: production was close to 50% of the target, extraction uniformity was 10.2%, the LHD effective utilization was approximately of 3 [hours/day], and the effective ore extraction was 88.5% each shift. It was verified that during these months the mineral hang-ups located in the draw points went from 55% to a maximum of 90%, leaving only 4 points with available ore. This was mainly caused due to the fact that in May there was no extraction or secondary reduction, and thus the material on height was consolidated.

The second scenario was presented during the execution of the new strategy extraction, which consisted primarily of ordering and restructuring the unit operations in Phase II, leaving the secondary reduction activities during one shift, while prioritizing the extraction in the other two shifts, and the whole weekend. The following KPIs were obtained: production was close to 95% of the target, extraction uniformity was 14%, the LHD effective utilization was over 6 [hours/day], and the effective ore extraction was 94.3% each shift. The draw points' hang-ups were reduced up to 70%, leaving more than 10 points with available ore. It is concluded from this new strategy that the operational continuity on the draw points allows maintaining the gravitational flow and avoids the formation of hang-ups, although this also increases the possibility of mud-rushes events.

It is recommended for future work that the test follow-up should continue in order to document new learnings gotten from the test and to propose methods to completely isolate the area of people from secondary reduction. The economic evaluation of the project is also suggested.

“Ama lo que haces y haz lo que amas. No escuches a nadie más que te diga que no lo hagas. Haz lo que quieras, lo que ames. La imaginación debe ser el centro de tu vida”

-Ray Bradbury (1920 – 2012)

A mi familia,
por su amor incondicional
A mis libros de ciencia ficción,
por mantener viva mi imaginación

AGRADECIMIENTOS

Debo comenzar por agradecer enormemente a mi madre, quien ha sido mi pilar fundamental durante mi vida en todo sentido, y que siempre he podido contar con ella para lo que fuera necesario. Espero poder retribuir algún día toda la ayuda que me ha brindado. Me siento muy orgulloso de ser hijo de una mujer valiente que ha podido sacar adelante a su familia y nunca ha flaqueado un solo segundo.

A mi pequeña pero valiosa familia que me ha acompañado y apoyado, comenzando por mi nonita, por su cariño incondicional, y terminando con mis pequeños hermanos, Daniel y Francisco, a quienes amo con todo mi corazón y para mí es un gusto poder mencionarlos aquí. No puedo dejar de mencionar a mis perros, que más que mascotas, han sido unos verdaderos amigos, en especial a mi Bruno.

También debo agradecer a parte de la familia que nos ha dejado en el camino pero que los siento y están conmigo, como mi padre, mi nonito, y mi bisa-abuelita. Me encantaría que hubiesen podido leer estas palabras y estar presentes conmigo en este proceso. Confío en Dios que nos volveremos a reunir eventualmente.

A mis amigos del colegio, Benjamín y Cristóbal, cuya amistad que tenemos ha sido tan sólida todos estos años, que aunque el tiempo y la distancia nos separen, solo basta una llamada para reunirnos y ser tan unidos como siempre. Espero que eso nunca cambie.

Lo mismo puedo decir de mis amigos de la Universidad, Sebastian y Juan Pablo, en los que he depositado toda mi confianza y cariño en ellos y ellos han hecho lo mismo conmigo. Sin ustedes, la vida universitaria hubiera sido muy árida. Gracias por todos esos momentos de risa y distensión que tuvimos mientras nos encontrábamos inmersos en un continuo ambiente de estrés. Confío en que seguiremos juntos por mucho tiempo más. Esto también se extiende a los amigos que hemos conocido en la especialidad, como a Selma, Héctor, Felipe, Sir Óscar, Ada y Silver, y que juntos hicimos un bonito grupo de mineros.

A las secretarias de pregrado de la facultad, Gloria, Nicole y Carol, por toda su ayuda y por hacer hasta lo imposible por facilitarme mi proceso de titulación.

A mis profesores de la comisión por su continuo apoyo, y por haberme hecho crecer como persona, además de ofrecerme una gran oportunidad que como memorista aproveché al máximo y que quedo muy satisfecho con los resultados logrados.

A Codelco División El Teniente, por permitirme estar en estos 8 meses trabajando y aprendiendo, y por entregarme toda la información necesaria para realizar este trabajo.

A la Superintendencia de Innovación Divisional que fue el lugar donde estuve la mitad del tiempo, y donde me propusieron la memoria. Incluyo, entre muchos otros, a Juan Cristóbal, Sandra, Nicolás, Jorge, Marcela, Cristian G., Cristian A., Joaquín, Víctor y Matías. Gracias a todos ellos por disfrutar y ayudarme en mi camino a ser minero.

A operaciones mina de Diablo Regimiento, donde estuve la otra mitad del tiempo, y donde conocí a personas valiosas que espero volver a ver en algún futuro. Incluyo, entre muchos otros, a Eduardo Villalobos., Anthonny, Ignacio J., don Carlos, Jaime, don Cristian C., don Gabriel, al “Mago” y a Mario. También al Grupo Operacional Barro que me apoyó con información importante, a Eduardo Viera, Kenji y César. A todos los trabajadores del CPM, incluyendo a don Christian P, a Ramón, y a don Osvaldo.

Y gracias a quien lea este trabajo. Espero que encuentres lo que necesites aquí.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación del trabajo.....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo principal.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Alcances.....	4
2.	Revisión bibliográfica.....	5
2.1	Mina El Teniente.....	5
2.2	Sectores productivos División El Teniente.....	6
2.3	Mina Diablo Regimiento.....	7
2.3.1	Generalidades.....	7
2.3.2	Fase II.....	9
2.4	Concepto de agua-barro.....	10
2.4.1	Definiciones de eventos de agua-barro.....	12
2.5	Agua-barro en otras minas.....	12
2.5.1	Kimberley y De Beers, Sudáfrica.....	13
2.5.2	Hubei, China.....	13
2.5.3	DOZ, Indonesia.....	13
2.6	Definición de humedad en El Teniente.....	15
2.7	Flujo gravitacional y modelos físicos.....	18
2.8	Índice de Uniformidad (I.U.).....	20
2.8.1	Interpretación del Índice de Uniformidad.....	21
2.9	Modelo de operación bajo condiciones de agua-barro.....	22
2.9.1	Consolidación y compactación.....	23
2.9.2	Drenaje.....	24
2.9.3	Hipótesis y extracción sugerida de agua-barro.....	25
2.10	Proyecto extracción agua-barro.....	26
2.10.1	Gerencia de Desarrollo e Innovación (GDI) de División El Teniente.....	26
2.10.2	Proyecto de extracción agua-barro.....	27
2.11	Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	30
3.	Metodología de trabajo.....	31
3.1	Conceptualización del problema.....	31
3.2	Revisión de antecedentes.....	31

3.3	Recopilación de datos	31
3.4	Análisis de datos y obtención de KPIs.....	32
3.5	Elaboración de una propuesta de extracción.....	32
3.6	Discusiones generales	33
3.7	Conclusiones y recomendaciones	33
4.	Resultados y análisis.....	34
4.1	Tonelaje extraído y cumplimiento	34
4.1.1	Tonelaje extraído y cumplimiento mensual por área completa y por calle	34
4.1.2	Cumplimiento mensual por punto de extracción	36
4.1.3	Velocidades de extracción de los puntos de extracción	41
4.2	Índice de Uniformidad y uniformidad de tiraje	43
4.2.1	Índice de Uniformidad de Susaeta por punto	43
4.2.2	Uniformidad de tiraje.....	48
4.2.3	Relación entre tonelaje extraído y uniformidad	49
4.3	Disponibilidad y estado de puntos	52
4.3.1	Estado previo a la prueba industrial	52
4.3.2	Colgaduras en los puntos de la Fase II	53
4.3.3	Eventos de agua-barro en la Fase II de Diablo Regimiento	56
4.3.4	Canalón.....	65
4.3.5	Agua en altura.....	67
4.3.6	Eventos de agua-barro en el Bloque 1 de Esmeralda	70
4.4	Utilización efectiva del equipo	79
4.5	Número de baldadas.....	81
4.6	Velocidades medias de traslado y tiempos de ciclo.....	82
4.7	Propuesta de estrategia de extracción	85
4.8	Resultados parciales de la propuesta de estrategia de extracción	87
5.	Discusión	92
5.1	KPIs obtenidos durante la prueba de extracción.....	92
5.2	Estrategia de extracción propuesta	95
6.	Conclusiones y recomendaciones	98
6.1	Conclusiones	98
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro	100
7.	Bibliografía.....	101
8.	Anexos	103

Anexo A:	Determinación de humedad cualitativa en puntos de extracción.....	103
Anexo B:	Estados operacionales en puntos de extracción	106
Anexo C:	Teoría del flujo gravitacional (A. Susaeta).....	107
Anexo D:	Análisis estadístico de puntos y tonelaje diario, Fase II, período enero-julio 2018	110
Anexo E:	Uniformidad puntual por semana de junio y julio	111
Anexo F:	Tonelaje extraído de los puntos con eventos en el Bloque 1 de Esmeralda	115
Anexo G:	Utilización efectiva del equipo durante junio y julio de 2018	117
Anexo H:	Tiempos de ciclos registrados del equipo LHD 832.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dos principales riesgos ocasionados por la aparición de mineral fino y húmedo (agua-barro) en los puntos de extracción a partir del caso inicial de mineral grueso y seco: extracción de tiraje aislado (arriba), y aparición de colgaduras (abajo) (BCTEC, 2016).	3
Figura 2: Ubicación geográfica de la entrada a la División El Teniente (Adit 71), y su distancia a Rancagua (<i>Fuente: Google Earth</i>).	5
Figura 3: Principales niveles actuales de producción de División El Teniente separados por cotas (Harrison, 2009).	7
Figura 4: Vista en planta del nivel de producción de Diablo Regimiento, con sus cinco fases.	8
Figura 5: Principal manejo de materiales de las fases de Diablo Regimiento.	8
Figura 6: Manejo de materiales específico para la Fase II de Diablo Regimiento, en conjunto con el mineral proveniente de Esmeralda.	9
Figura 7: Tipos de barros, según Jakubec & Clayton. A la izquierda, barro fluido (De Beers, Sudáfrica). A la derecha, barro viscoso (<i>Northparkes Mines</i> , Australia).	10
Figura 8: Ubicación del distrito de Ertsberg, Indonesia (Samosir, et al., 2008).	13
Figura 9: Matriz de clasificación del estado de los puntos en mina DOZ (traducido de Samosir, et al., 2008).	15
Figura 10: Matriz de criticidad utilizada actualmente en El Teniente (Pérez, 2017).	17
Figura 11: Fotografías y representaciones esquemáticas de modelos físicos del flujo gravitacional. A la izquierda, propuesto por Kvapil (1965). A la derecha, propuesto por Laubscher (1994).	18
Figura 12: Representación gráfica en plano de distintas minas en División El Teniente y el I.U. de cada punto de extracción (intervalo de 3 turnos).	22
Figura 13: Tipos de colgaduras. A la izquierda, una colgadura por consolidación de finos, dejando una chimenea. A la derecha, un caso intermedio, donde se aprecian colpas y mineral consolidado (GOB - DET, 2018).	23
Figura 14: Esquema que ilustra el drenaje de agua-barro. A la izquierda, el material es transportado hacia los puntos de extracción cercanos activos al dejar inactivos los puntos con mineral saturado. A la derecha, el material se extrae de los puntos con mineral saturado y evita la contaminación en puntos cercanos.	25
Figura 15: Distribución de proyectos de innovación y su aporte en ebitda del año 2018 (en MUSD).	26
Figura 16: Zona definida para la prueba industrial de agua-barro, delimitado con naranja.	27
Figura 17: Plan de producción mensual de prueba industrial agua-barro DR F-II, según meta SID y compromiso PND R2.	28
Figura 18: Ubicación de la de tele-operación en el barrio cívico de Diablo Regimiento.	28
Figura 19: Pasos de la metodología de trabajo propuesta para el estudio.	33
Figura 20: Tonelaje mensual extraído y tonelaje programado R2 en la Fase II DR.	34
Figura 21: Cumplimiento de cada punto de extracción durante enero de 2018.	37
Figura 22: Cumplimiento de cada punto de extracción durante febrero de 2018.	37
Figura 23: Cumplimiento de cada punto de extracción durante marzo de 2018.	38
Figura 24: Cumplimiento de cada punto de extracción durante abril de 2018.	38

Figura 25: Cumplimiento de cada punto de extracción durante mayo de 2018.	39
Figura 26: Cumplimiento de cada punto de extracción durante junio de 2018.	39
Figura 27: Cumplimiento de cada punto de extracción durante julio de 2018.	40
Figura 28: Cantidad de puntos de la Fase II según su cumplimiento, período enero-julio 2018.	41
Figura 29: Velocidades de extracción diaria de cada punto disponible en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.	41
Figura 30: Pantalla inicial del ejecutable de I.U. de Susaeta.	43
Figura 31: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, enero 2018 (3 turnos).	44
Figura 32: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, febrero 2018 (3 turnos).	44
Figura 33: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, marzo 2018 (3 turnos).	45
Figura 34: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, abril 2018 (3 turnos).	45
Figura 35: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, mayo 2018 (3 turnos).	46
Figura 36: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, junio 2018 (3 turnos).	46
Figura 37: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, julio 2018 (3 turnos).	47
Figura 38: Número de puntos de la Fase II de Diablo Regimiento con porcentaje de uniformidad superior al 50%, e igual e inferior al 50%, período enero-junio 2018.	48
Figura 39: Diagrama de cajas y bigotes del número de puntos con extracción al día en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.	50
Figura 40: Diagrama de cajas y bigotes del número de tonelaje extraído al día en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-junio 2018.	50
Figura 41: Evolución del estado operativo de los 42 puntos que conforman parte de la Fase II utilizada para la extracción teleasistida, y tonelaje mensual, previamente extracción manual, período 2013-2018.	52
Figura 42: Evolución del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II, período junio-julio 2018.	53
Figura 43: Representación esquemática de los estados en terreno de las zanjas y su disposición del mineral.	54
Figura 44: Número de puntos de la Fase II de Diablo Regimiento con porcentaje de uniformidad superior al 50%, e igual e inferior al 50%, junio-julio 2018.	55
Figura 45: Fotografía del punto 39 35F tomada el 3 de mayo de 2018, mostrando el deslizamiento.	56
Figura 46: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 35F y sus vecinos durante abril de 2018.	57
Figura 47: Áreas de influencia y uniformidad (02/04/18 – 02/05/18) del punto 27 37H y sus seis vecinos.	57

Figura 48: Velocidades de extracción del punto 39 35F y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	58
Figura 49: Fotografía del punto 39 31H tomada el 10 de julio de 2018, mostrando el deslizamiento.	59
Figura 50: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 31H y sus vecinos, período 01 - 10 abril de 2018.	59
Figura 51: Áreas de influencia y uniformidad (01/07/18 – 09/07/18) del punto 39 31H y sus seis vecinos.	60
Figura 52: Velocidades de extracción del punto 39 31H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	60
Figura 53: Fotografía del punto 39 31H tomada el 03 de agosto de 2018, mostrando el deslizamiento.	61
Figura 54: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 31H y sus vecinos, período 27 julio - 03 agosto de 2018.	61
Figura 55: Áreas de influencia y uniformidad (27/07/18 – 03/08/18) del punto 39 31H y sus seis vecinos.	62
Figura 56: Velocidades de extracción del punto 39 31H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	62
Figura 57: Fotografía de la calle 37 tomada el 05 de agosto de 2018, mostrando el efecto del bombeo.	63
Figura 58: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 37 34H y sus vecinos, período 27 julio - 03 agosto de 2018.	63
Figura 59: Áreas de influencia y uniformidad (30/07/18 – 05/08/18) del punto 37 34H y sus seis vecinos.	64
Figura 60: Velocidades de extracción del punto 37 34H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	64
Figura 61: Fotografía de parte de la superficie de El Teniente, donde se destaca el canalón, entre la brecha Braden y la ladera del cerro.	66
Figura 62: Planos de los niveles de producción de Diablo Regimiento y Esmeralda, donde en azul se destaca el recorrido del canalón en superficie, mientras que en rojo, los sectores productivos en estudio (F-II y B1).	66
Figura 63: Sistema esquematizado del ingreso y salida de agua a través de los niveles actuales de Mina El Teniente.	67
Figura 64: Tasa de aparición de puntos declarados como agua-barro en la Fase II y precipitaciones mensuales sobre Mina El Teniente.	68
Figura 65: Plano de Diablo Regimiento con presencia de sectores históricos.	68
Figura 66: Distribución real de las cuencas y caudales estimados para una excedencia de 81% (Salazar, 2017).	69
Figura 67: A la izquierda, fotografías del escurrimiento ocurrido en el punto 27 37H, noviembre 2017, vista de norte a sur (arriba) y de sur a norte (abajo). A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda y extensión del escurrimiento.	70
Figura 68: Áreas de influencia y uniformidad (11/10/17 - 08/11/17) del punto 29 39H y sus seis vecinos.	70

Figura 69: Velocidades de extracción del punto 29 39H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al escurrimiento.	71
Figura 70: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 27 37H, diciembre 2017. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.	72
Figura 71: Áreas de influencia y uniformidad (18/11/17 - 18/12/17) del punto 27 37H y sus seis vecinos.	72
Figura 72: Velocidades de extracción del punto 27 37H (en rojo) y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	73
Figura 73: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 27 39F, febrero 2018. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.	74
Figura 74: Áreas de influencia y uniformidad (11/01/18 - 09/02/18) del punto 27 37H y sus seis vecinos.	74
Figura 75: Velocidades de extracción del punto 27 39F (en rojo) y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	75
Figura 76: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 33 42H, febrero 2018. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.	76
Figura 77: Áreas de influencia y uniformidad (01/02/18 - 27/02/18) del punto 33 42H y sus seis vecinos.	76
Figura 78: Velocidades de extracción del punto 33 42H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.	77
Figura 79: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 18 de junio – 30 de junio.	79
Figura 80: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 01 de julio – 31 de julio.	79
Figura 81: Plano de la Fase II de Diablo Regimiento, con zonas delimitadas según riesgo de aparición de evento de agua-barro.	80
Figura 82: Baldadas extraídas y planificadas en la Fase II Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.	81
Figura 83: Distancias estimadas generales de algunas calles y cruzados de la Fase II.	82
Figura 84: Tiempos de ciclo medio en las zanjas extremas de cada calle de la Fase II.	83
Figura 85: Promedio de toneladas diarias de extracción, Fase II DR, período enero-agosto 2018.	87
Figura 86: Cumplimiento de cada punto de extracción, 01-20 agosto de 2018.	88
Figura 87: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 01-20 de agosto.	88
Figura 88: Evolución del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II, período 01-16 agosto de 2018.	89
Figura 89: Vista en planta del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II en julio y en agosto de 2018.	90
Figura 90: Baldadas extraídas y planificadas en la Fase II Diablo Regimiento, período enero-agosto 2018.	91
Figura 91: Punto de extracción en estado seco (H=0).	103

Figura 92: Punto de extracción en estado de baja humedad (H=1).....	103
Figura 93: Punto de extracción en estado de humedad (H=2).....	104
Figura 94: Punto de extracción en estado de barro incipiente (H=3).....	104
Figura 95: Punto de extracción en estado de barro (H=4).....	105
Figura 96: Punto de extracción con agua (H=A).....	105
Figura 97: Comportamiento del flujo aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).....	108
Figura 98: Modelo de tiraje aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).	109
Figura 99: Entrada de dilución calculada según el modelo de tiraje aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).....	109
Figura 100: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 4-10 de junio 2018 (3 turnos).	111
Figura 101: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 11-17 de junio 2018 (3 turnos).	112
Figura 102: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 18-24 de junio 2018 (3 turnos).	112
Figura 103: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 25 de junio-1 de julio 2018 (3 turnos).	113
Figura 104: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 2-8 julio 2018 (3 turnos).....	113
Figura 105: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 9-15 julio 2018 (3 turnos).....	114
Figura 106: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 16-22 julio 2018 (3 turnos).....	114
Figura 107: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 23-29 julio 2018 (3 turnos).....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Definiciones de eventos de agua-barro según División El Teniente.....	12
Tabla 2: Resumen de modelos físicos de flujo gravitacional (Vergara, 2016).....	19
Tabla 3: Límites del Índice Específico de Uniformidad según extracción.....	20
Tabla 4: Matriz del Índice de Uniformidad (Susaeta, 2004b).....	21
Tabla 5: Cuadro resumen de distintos puntos de extracción para reducción o descolgadura de zanjas.	24
Tabla 6: Reservas estimadas con barro en División El Teniente (API, 2016).	27
Tabla 7: KPIs de extracción de mineral húmedo para la prueba.	29
Tabla 8: KPIs de rendimientos de operación tele-asistida.....	29
Tabla 9: Porcentaje de cumplimiento de extracción programada en la Fase II DR, período enero-julio 2018.....	35
Tabla 10: Porcentaje de cumplimiento de en cada calle de la Fase II DR, período enero-julio 2018.....	35
Tabla 11: Leyenda utilizada para marcar el cumplimiento de los puntos.	36
Tabla 12: Velocidades de extracción promedio de todos los puntos de la Fase II Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.....	42
Tabla 13: Uniformidad de tiraje de la prueba de extracción de agua-barro en la Fase II de Diablo Regimiento.....	49
Tabla 14: Resultados obtenidos de velocidad media.....	82
Tabla 15: Resultados obtenidos de tiempos promedio de carga y descarga de mineral.....	83
Tabla 16: Tiempos medios de ciclo de cada calle.	83
Tabla 17: Actividades asignadas por turno a cada uno de los pares ordenados según la nueva estrategia de extracción en dos días calendarios, con los grupos (37, 39) y (41, 43).86	
Tabla 18: Actividades asignadas por turno a cada calle en caso de que ocurra reducción secundaria en la calle 41, con los grupos (37, 39) y (41, 43).	86
Tabla 19: Resumen de resultados de KPIs de extracción de agua-barro y operación tele-asistida en Fase II DR, período enero-agosto 2018.....	92
Tabla 20: Actividades asignadas por turno a cada una de las calles según modificación a la estrategia de extracción en dos días calendarios, con los grupos (37, 39) y (41, 43).....	95
Tabla 21: Clasificación operativa de los puntos de extracción según sus condiciones.....	106
Tabla 22: Clasificación de colores del estado operativo de los puntos según su área y disponibilidad.	107
Tabla 23: Modelo de comportamientos de tiraje y velocidades de tiraje.	108
Tabla 24: Valores de datos ordenados para el número de puntos con extracción al día, período enero-julio 2018.	110
Tabla 25: Estadística básica del número de puntos con extracción al día, período enero-julio 2018.	110
Tabla 26: Valores de datos ordenados para el tonelaje extraído diario, período enero-julio 2018.	110
Tabla 27: Estadística básica del tonelaje extraído diario, período enero-julio 2018.....	110
Tabla 28: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 29 39H durante el mes previo al evento.	115

Tabla 29: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 37H durante el mes previo al evento.	116
Tabla 30: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 39F durante el mes previo al evento.....	116
Tabla 31: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 39F durante el mes previo al evento.....	116
Tabla 32: Distribución de horas durante el período de junio registrado por el sistema automático del equipo.....	117
Tabla 33: Distribución de horas durante el período de junio registrado por el sistema automático del equipo.....	117
Tabla 34: Tiempos registrados el 21 de junio al equipo durante extracción.	117
Tabla 35: Tiempos registrados el 05 de julio al equipo durante extracción.	118

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Índice de Uniformidad.....	20
Ecuación 2: Utilización efectiva (U.E.).....	29

1. Introducción

El gran y principal desafío de las empresas mineras en el mundo se basa en establecer y mantener una competitividad a través de tiempo, con ventajas imponentes que les permitan alcanzar y mejorar una posición en su entorno. De esta manera, sus activos y beneficios aumentan respecto de sus competidores.

Uno de los factores o parámetros clave para lograr esta superioridad, aparte de una alta productividad y una optimización de operaciones y equipos, corresponde a la preservación de una licencia social para trabajar, en la que se debe respetar las exigencias sociales y medioambientales de las comunidades y autoridades. Dentro de la primera categoría, se encuentra preservar la seguridad de los actores relacionados con la minería y sus alrededores.

El bienestar, la salud y la seguridad de las personas son el valor más importante y prioridad absoluta en toda empresa minera. Para mantener este compromiso, la búsqueda de nuevas tecnologías que reduzcan e, idealmente, anulen cualquier tipo de accidente durante las jornadas laborales de los trabajadores se encuentra en continuo crecimiento. En particular, la innovación está centrada en las operaciones unitarias, con el claro objetivo de aislar la exposición al riesgo de cualquier persona involucrada.

La División El Teniente (DET) es un complejo minero metalúrgico de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, y es la mina subterránea más grande del mundo, utilizando el método de explotación de *Panel Caving*. En los últimos años, se han presentado inestabilidades geomecánicas asociadas a cambios en la mineralización debido a la profundidad de los niveles de producción y condiciones de estabilidad adversas. En general, estos eventos ocurren sobre roca seca, es decir, que presenta muy poca humedad (inferior al 5%). Sin embargo, existe otro fenómeno asociado a altos porcentajes de humedad en el material como lo es el bombeo de agua-barro, y que influye directamente en la seguridad de la extracción.

Uno de los proyectos principales para el año 2018 en la Superintendencia de Innovación Divisional (SID) en DET corresponde a la utilización de equipos teleasistidos para la extracción de mineral de la Fase II de Mina Diablo Regimiento, que actualmente presenta una importante área inutilizada debido a riesgos asociados a la presencia de agua-barro. Este trabajo tiene por objeto, mediante el análisis de datos del caso de estudio actualmente en ejecución y estrategias propuestas de extracción, presentar una guía en la que se alcance una efectiva extracción de mineral de dicha fase a través de una estrategia definida y segura, manteniendo adecuados tiempos de ciclo, pero también preservando una uniformidad en los puntos, de manera tal que los eventos, de llegar a ocurrir, lo hagan en forma programada.

1.1 Motivación del trabajo

En la historia de División El Teniente se han producido reiterados eventos de agua-barro por puntos de extracción y piques de traspaso, algunos de los cuales, en particular los bombeos, ocurren en forma explosiva y son sumamente destructivos. Frente a esta problemática, y para evitar exponer a riesgos innecesarios a los trabajadores, se han tenido que cerrar áreas productivas, perdiéndose potenciales reservas de mineral para recuperar y ocasionando una disminución de beneficios para la empresa.

Las reservas consideradas húmedas al año 2017 en los niveles de producción actuales en El Teniente alcanzan un total de 7.98 [Mt], por lo que su extracción se vuelve un atractivo escenario económico. Sin embargo, las anteriores pruebas efectuadas en la División no han resultado exitosas, al no contar con tecnología suficiente que haya permitido un estudio e implementación de una estrategia de operaciones de agua-barro. Esto se ha revertido con la incorporación de equipos teledirigidos y estudios para implementar y monitorear la humedad a través del mineral (SDI-GRMD-DET, 2016).

A partir de las nuevas tecnologías mencionadas, se han retomado las labores mineras a través de una prueba industrial en un área específica de la Fase II de Mina Diablo Regimiento, llevada adelante por las gerencias de Desarrollo e Innovación y Mina de División El Teniente. El objetivo consiste en alcanzar un régimen de ritmo de producción utilizando *Load Haul Dumps* (LHDs) que son dirigidos desde salas ubicadas en el barrio cívico acondicionadas específicamente para la extracción a distancia por operadores, preservando también su seguridad frente a eventos de agua-barro en terreno.

En la actualidad, existe una estrategia directa frente a la aparición de humedad en los puntos de extracción, el que consiste en declararlos limitados. Sin embargo, aún queda la incógnita de cómo actuar frente a la extracción en puntos previamente cerrados por presencia de agua-barro, y que al reabrirse presentan situaciones como las que se ven en la Figura 1. La ausencia de una estrategia consolidada frente a dichos escenarios resulta todo un desafío a superar, con el objetivo de que en un futuro se puedan realizar planificaciones seguras y rentables, tal y como ha ocurrido con las reglas para hundimiento en la zona de transición. Por ello, resulta importante para la División estudiar el comportamiento de la extracción de la prueba piloto industrial, para así elaborar una guía con recomendaciones que deban ser consideradas antes de extraer reservas con barro.

En particular, la SID ya cuenta con datos reales obtenidos de la prueba industrial, suministrados por el Grupo Operacional Barro (GOB) y el Control Producción Mina (CPM), siguiendo un lineamiento de acuerdo con una propuesta sugerida para la extracción de agua-barro en los puntos de la Fase II de Diablo Regimiento. De esta manera, el enfoque de esta memoria consiste en corroborar con la información derivada de los datos en terreno las hipótesis efectuadas por los estudios de ingeniería para proporcionar un nuevo enfoque que permita así definir planes de producción y sienta un precedente para lidiar con los problemas generados por la presencia de agua-barro.

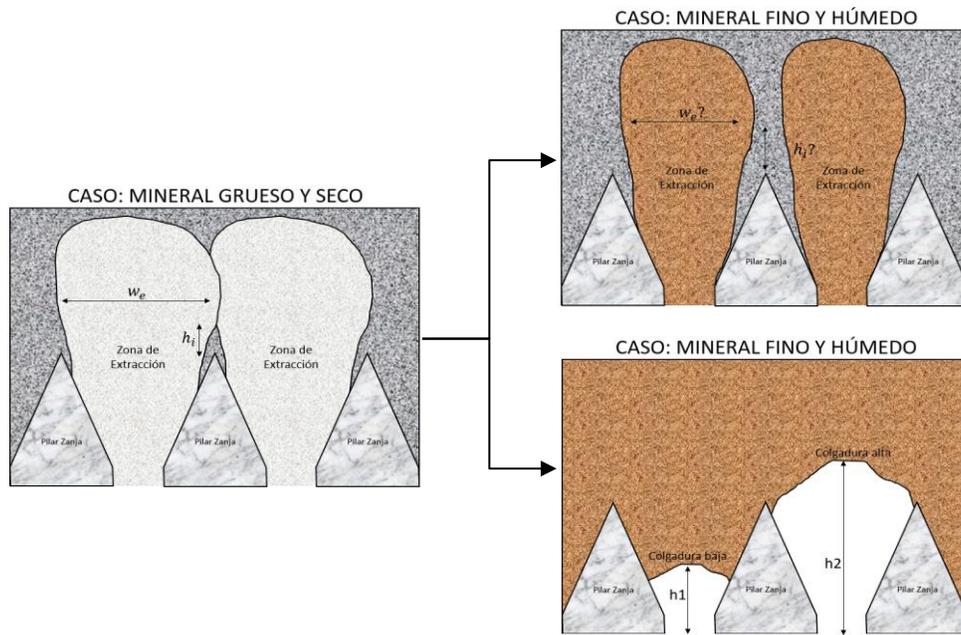


Figura 1: Dos principales riesgos ocasionados por la aparición de mineral fino y húmedo (agua-barro) en los puntos de extracción a partir del caso inicial de mineral grueso y seco: extracción de tiraje aislado (arriba), y aparición de colgaduras (abajo) (BCTEC, 2016).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Definir y evaluar una estrategia de extracción segura y rentable para la extracción de mineral con humedad presente en los puntos de extracción con agua-barro en la Fase II de Diablo Regimiento, El Teniente.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos por etapas de desarrollo del proyecto se encuentran indicados a continuación:

- Revisar y analizar los datos obtenidos en terreno para la identificación de ocurrencias de agua-barro, a partir de parámetros de extracción y humedad.
- Relacionar la información obtenida con las estrategias de extracción propuestas por estudios de ingeniería y evaluar su aplicación en la operación.
- Identificar causas que generan desviaciones de los datos reales respecto de lo planificado.
- Presentar los *Key Performance Indicators* (KPIs) obtenidos de la prueba, y compararlos con los propuestos como indicadores de éxito.
- Proponer y evaluar una estrategia de extracción operativizada, estableciendo una guía general con parámetros recomendados a partir del estudio realizado.

1.3 Alcances

Los alcances definidos en este trabajo son los siguientes:

- El estudio se centra en la información recopilada y aplicada en Mina Diablo Regimiento, específicamente en las calles 37, 39, 41 y 43 de la Fase II, que se encuentran comprometidas con la presencia de puntos de extracción abandonados por agua-barro y en las que se realiza la prueba industrial.
- El marco temporal del estudio de la prueba industrial abarca desde enero hasta los primeros días de agosto de 2018, en lo que se considera el *ramp-up* de extracción. Durante estos meses se encuentra operativo uno de los dos equipos LHDs planificados en la Fase II. Para el análisis histórico de la extracción, el marco temporal fue desde 2013 hasta 2017.
- La estrategia estudiada y recomendada considera en forma cualitativa la incorporación de factores exógenos a la operación unitaria en sí, como la temporalidad (época del año), geología superficial y clima, entre otros fenómenos que contribuyen a la aparición de agua-barro en los puntos de extracción.
- El estudio se centra directamente en la operación de extracción que ocurre en el nivel de producción en términos de carguío de mineral, y consideraciones generales acerca de la operación de reducción secundaria (también conocidas como quemadas) para descolgaduras. No considera en las operaciones aguas abajo una vez depositado el mineral en el pique de traspaso.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Mina El Teniente

La mina El Teniente (formalmente División El Teniente) corresponde a un complejo minero-metalúrgico perteneciente a Codelco que se encuentra ubicada bajo el cerro del mismo nombre, en la comuna de Machalí, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, aproximadamente a 120 [km] del sur de Santiago y a 57 [km] al noreste de Rancagua. El acceso a la mina y la planta es a través de la carretera Presidente Eduardo Frei Montalva, también conocida como Carretera del Cobre, cuya ruta se muestra representada en la Figura 2. La división se encuentra enclavada a 2,300 [msnm], y contiene a la mina subterránea de cobre más grande del mundo (AFP, 2018).

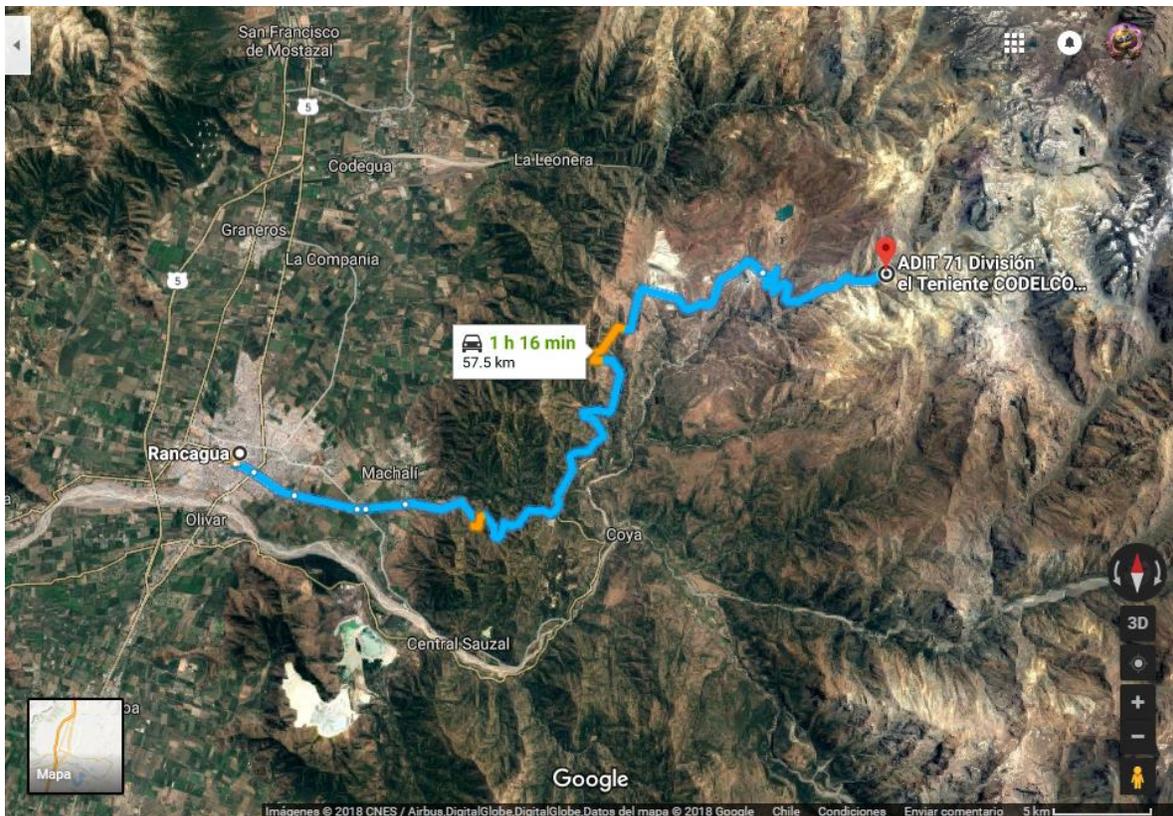


Figura 2: Ubicación geográfica de la entrada a la División El Teniente (Adit 71), y su distancia a Rancagua (Fuente: Google Earth).

Con más de 3,000 [km] de galerías construidas, División El Teniente dispone en sus diversos sectores instalaciones e infraestructura para la extracción y producción de minerales de cobre y molibdeno. En la actualidad, posee la capacidad de procesar 140,000 [tpd] de mineral, de los cuales aproximadamente 124,000 [tpd] provienen directamente de la mina subterránea. Los resultados del año 2017 indicaron que se produjeron en total 464 [ktmf] de cobre, y 6.2 [ktmf] de molibdeno (DET-Codelco, 2018).

2.2 Sectores productivos División El Teniente

División el Teniente tiene en la actualidad ocho sectores con operaciones activas, en diferentes subniveles productivos ubicados en profundidad. De acuerdo con el Plan de Negocios Divisional 2018 (PND), se listan a continuación:

- ❖ Cotas entre 2360 y superficie
 - Mina Rajo Sur.
- ❖ Cotas entre 2200 y 2360
 - Mina Esmeralda Bloque 1 y 2 con extensiones y Panel Esmeralda
 - Mina Diablo Regimiento
 - Mina Pacífico Superior
 - Mina Suapi
 - Mina Pipa Norte
- ❖ Cotas entre 1880 y 2200:
 - Mina Reservas Norte (Reno) y Panel Reservas Norte
 - Mina Dacita
 - Mina Pilar Norte

La explotación de los subniveles productivos subterráneos es realizada mediante el método de hundimiento *Panel Caving*, utilizando equipos LHDs para la extracción de mineral los que lo depositan a piques, u *ore passes* (OPs). El acarreo o transporte intermedio es realizado mediante correas transportadoras, camiones o ferrocarriles. Finalmente, el transporte principal está a cargo del ferrocarril del Teniente 8 que traslada el mineral desde la mina subterránea hasta la planta procesadora (chancado, molienda y flotación) de Colón. Para el caso del rajo, los camiones trasladan el mineral hasta un OP que lo lleva hasta el ferrocarril Teniente 5, el que lo conduce hasta la planta procesadora (chancado y molienda) de Sewell (GRMD-SPL-INF-DET, 2015).

La Figura 3 representa un despliegue isométrico de algunos de los principales sectores productivos subterráneos, incluyendo también el futuro proyecto del Nuevo Nivel Mina (NNM) en desarrollo.

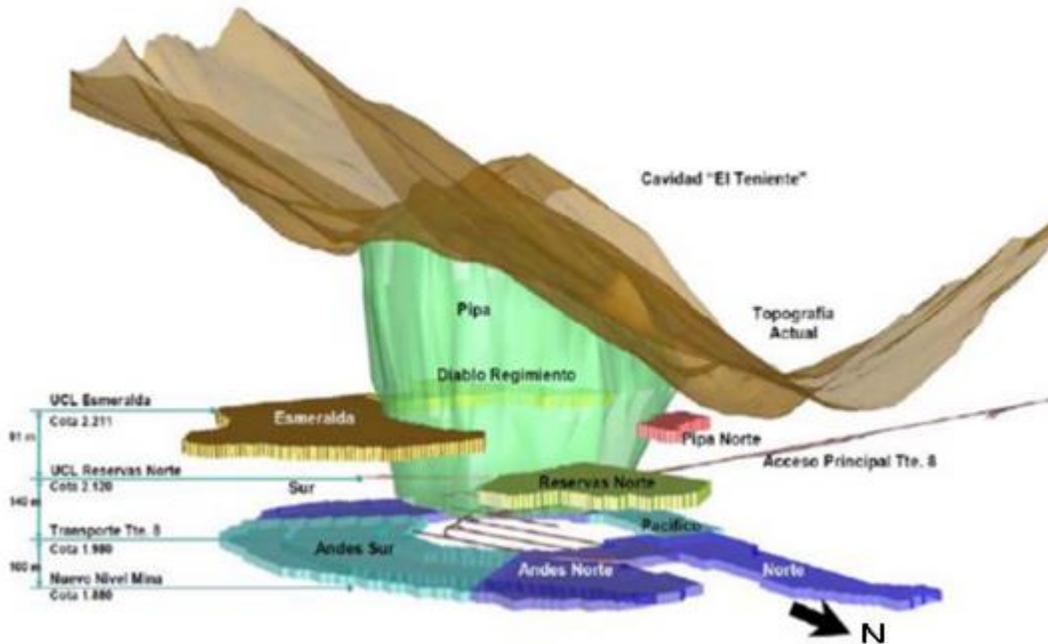


Figura 3: Principales niveles actuales de producción de División El Teniente separados por cotas (Harrison, 2009).

2.3 Mina Diablo Regimiento

2.3.1 Generalidades

Mina Diablo Regimiento es uno de los sectores productivos de División El Teniente, localizado en el nivel Sub 5 de producción, al sur del yacimiento, y rodeando la brecha Braden, con una cota en el nivel de hundimiento de 2,210 [msnm]. Se encuentra compuesta por cinco subsectores, denominadas *fases*, como se aprecia en la Figura 4, todas actualmente con algún grado de producción, aunque con sus respectivas diferencias: la Fase I posee solo algunos puntos de extracción operativos, la Fase II (F-II) presenta el problema de agua-barro, Fases III y IV están en regimen, y la fase V está iniciando su *ramp-up* con la apertura de puntos (DET-Codelco, 2018).

Como se mencionó, el método de explotación es por *Panel Caving* utilizando la variante Avanzado. La extracción de mineral en la mayoría de sus fases se realiza mediante equipos LHDs de 13 [yd³], los que lo depositan en piques de traspaso a chancadores de mandíbulas en el interior-mina para su reducción. Posteriormente, el acarreo intermedio consiste en correas transportadoras hasta la tolva del nivel Teniente 6, desde donde se realiza la descarga por los OPs 20-21 hasta el ferrocarril del Teniente 8 (GRMD-SPL-INF-DET, 2015). La Figura 5 presenta un esquema general del manejo de materiales principal de Diablo Regimiento.

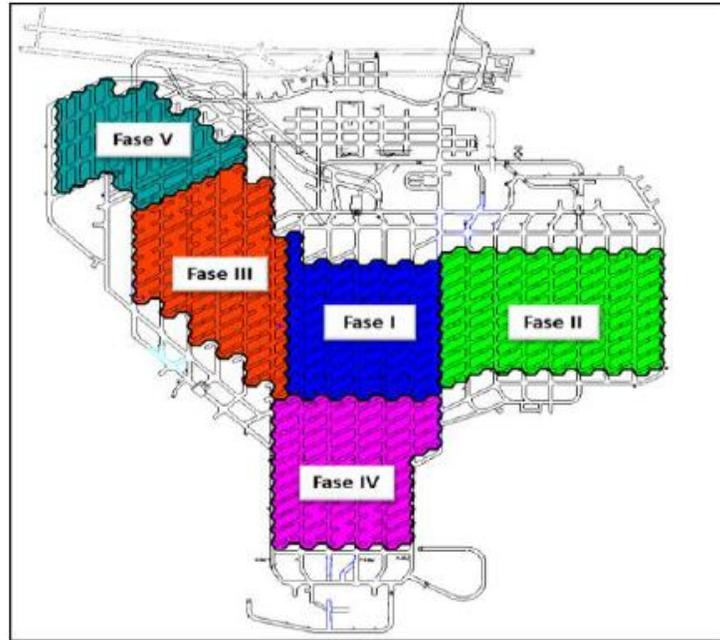


Figura 4: Vista en planta del nivel de producción de Diablo Regimiento, con sus cinco fases.

De acuerdo al PND de 2018, para el año 2019 la producción comprometida en Diablo Regimiento es de 23,174 [tpd], con una ley de cobre total de 0.88%. Desde ese año y hasta el 2022 el perfil productivo disminuye de manera hasta alcanzar un régimen cercano a 15,308 [tpd], con un CuT de 0.79%. Finalmente, el ritmo decrece hasta agotar las reservas del sector en el año 2025, con 3,000 [tpd], y un CuT de 0.69%.

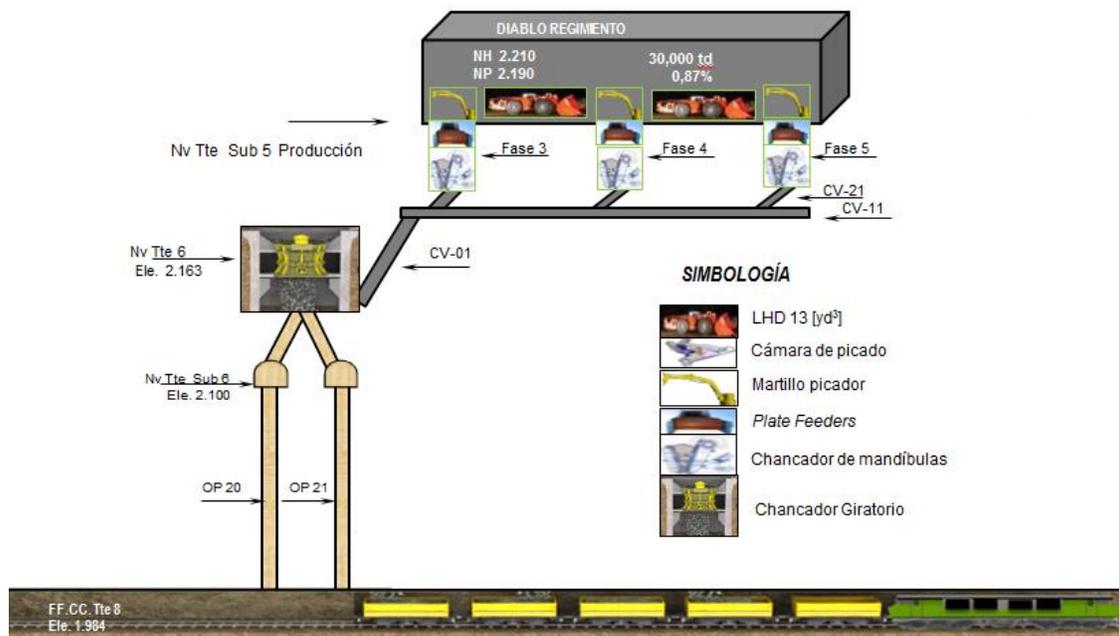


Figura 5: Principal manejo de materiales de las fases de Diablo Regimiento.

2.3.2 Fase II

La Fase II de Mina Diablo Regimiento, cuya expansión original es de la calle 29 hasta la calle 45, como se observa en la Figura 4, presenta un caso particular respecto de las otras al tener una alta presencia de agua-barro en los puntos de extracción. Debido a esto, en forma paulatina se fue perdiendo área productiva por el continuo cierre de puntos a partir de 2013 hasta inicios de 2017, momento en el que fue cerrada por completo por baja producción y muy pocas zanjas con mineral seco. Esta medida también fue adoptada para evitar la exposición de los trabajadores al riesgo de ocurrencia de un evento.

La situación de la Fase II cambió a finales de 2017, cuando se incorporó la tecnología de equipos teledirigidos. Desde enero de 2018, se encuentra en operación el LHD 832, de 13 [yd³] (equipo LH517 de Sandvik), a cargo de una prueba industrial mínima de 6 meses que compromete un área de aproximadamente 16,000 [m²], abarcando desde las calles 37 a la 43. El diseño utilizado, como en las otras fases, es el de malla Teniente, con dimensiones de galería de 17 [m] x 20 [m] (GDI-GMIN-DET, 2017).

Actualmente, la Fase II tiene un total de reservas remanentes en estado operacional Agua-Barro de 2.29 [Mt], con una ley media de cobre de 0.89% (GDI-DET, 2018). Debido a la alta presencia de humedad en el mineral, el manejo de materiales es diferente a las de las otras fases, consistiendo en el depósito del ferrocarril de Teniente 6, responsable del acarreo intermedio hasta el ferrocarril principal de Teniente 8 a través del OP 22, tal y como lo indica la Figura 6. La razón de esta modificación se debe a que el mineral barroso es mezclado en el *ore pass* con mineral seco proveniente de mina Esmeralda para evitar problemas en operaciones aguas-abajo, principalmente en la planta (GDI-DET, 2018).

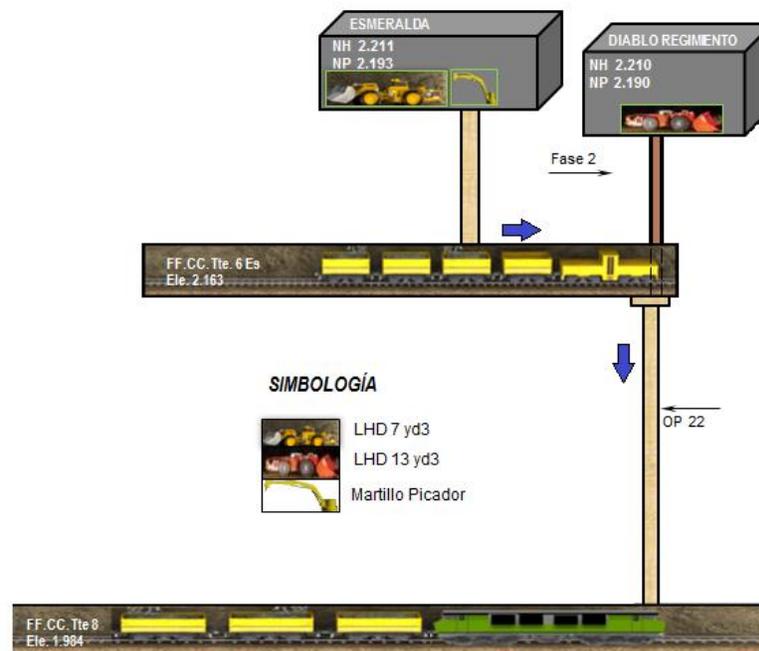


Figura 6: Manejo de materiales específico para la Fase II de Diablo Regimiento, en conjunto con el mineral proveniente de Esmeralda.

2.4 Concepto de agua-barro

La extracción de minerales mediante técnicas de hundimiento presenta diferentes riesgos provenientes intrínsecamente del macizo rocoso, como el estallido de roca y el colapso, debido a esfuerzos inducidos y eventos sísmicos. Estos problemas ocurren durante las primeras etapas del *caving*, como es en la etapa de conexión e incorporación de áreas productivas. Una vez alcanzado el régimen productivo, que es en donde comienza además el cierre de puntos, aparece otro riesgo que es la ocurrencia de escurrimiento y bombeos de agua-barro, ingreso de material húmedo en forma repentina a los puntos de extracción, a través de las galerías de producción y piques de traspaso (SDI-GRMD-DET, 2016).

El agua-barro queda definido como una mezcla de material de granulometría fina con agua, dos elementos importantes que deben estar presentes en forma simultánea para que ocurra un potencial bombeo, además de la presencia de un punto de descarga y la generación de una perturbación de algún tipo que accione o gatille el movimiento (Butcher, et al., 2005). Los bombeos pueden ocurrir cuando más del 30% del material presenta un tamaño menor a 5 [cm] y una humedad mayor al 8.5% (Samosir, et al., 2008).

Sobre la base de movilidad del barro, existen dos categorías principales que se han reconocido (Jakubec, et al., 2013):

- El barro fluido, el cual contiene un porcentaje de agua que puede alcanzar hasta un 50%, fluye horizontalmente grandes longitudes, y contiene grandes rocas de hasta 3 [m] de tamaño. Un bombeo de este tipo se asemeja a una suspensión fina, por lo que se considera más como una descarga de agua (Figura 7, izquierda).
- El barro viscoso, el cual contiene, en forma relativa, un porcentaje de humedad menor, entre un 17% a un 23%. Este material, al ser mucho más rígido, no fluye libremente por gravedad, pero lo puede hacer bajo esfuerzos y ciertas condiciones, siendo expulsado como flujo fuera de los puntos de extracción. Un bombeo de este tipo, pese a su alta viscosidad, puede resultar destructivo (Figura 7, derecha).



Figura 7: Tipos de barro, según Jakubec & Clayton. A la izquierda, barro fluido (De Beers, Sudáfrica). A la derecha, barro viscoso (Northparkes Mines, Australia).

Por otro lado, según el mecanismo de ocurrencia de los bombeos de agua-barro, se pueden clasificar como externos o internos, así como también se puede producir una combinación de ambas (Butcher, et al., 2005):

- Los bombeos de agua-barro externos provienen de la formación de barro en condiciones externas a las presentadas en el entorno subterráneo del macizo rocoso. Se producen principalmente a través de tres fuentes: deposición de relaves, rellenos y fallas de taludes (Brown, 2003).
- Los bombeos de agua-barro internos provienen de la formación de barro producido por la reducción de tamaño de esquistos u otras rocas formadoras de arcilla, y minerales ricos en arcilla, ubicados en la columna de mineral quebrado dentro de la zona de hundimiento. También se incluyen finos que se acumulan como resultado de procesos mineros anteriores.

Independientemente del origen de los bombeos, estos eventos súbitos producen usualmente los mismos resultados desastrosos, que van desde heridas y pérdidas de vida de trabajadores, daños a la infraestructura y equipos, altos porcentajes de dilución en los puntos de extracción, retrasos en los programas de producción, y en casos más extremos, el cierre definitivo de la mina (Jakubec, et al., 2013).

2.4.1 Definiciones de eventos de agua-barro

División El Teniente ha clasificado los eventos de agua-barro en deslizamientos, bombeos y escurrimientos, diferenciándose principalmente en la rapidez y violencia de la descarga del material saturado, además de la distancia lineal que alcanza el barro en las galerías. La Tabla 1 presenta la definición textual de los eventos (SGC-GRL-DET, 2017):

Tabla 1: Definiciones de eventos de agua-barro según División El Teniente.

Tipo de evento	Descripción
Bombeo	Descarga violenta de agua-barro que se produce en la zona de influencia de un área de extracción, a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanjas, puntos de extracción, chimeneas y labores. El desplazamiento del barro cubre una superficie significativa de las labores involucradas (sobre la gradiente por distancias mayores a 20 [m] lineales de labor), interrumpiendo el proceso operacional, pudiendo ocasionar daño a la infraestructura y/o personas.
Escurrimiento	Deslizamiento de material barroso infiltrado desde los niveles superiores a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanjas, puntos de extracción, chimeneas y labores. El deslizamiento de este material barroso se produce en forma lenta y acotada, alcanzando distancias inferiores a los 20 [m] lineales, y no afectando la infraestructura del sector.
Deslizamiento	Desplazamiento de material del talud en el punto de extracción, o al interior de buzón de pique de traspaso, producto de la saturación por humedad o agua, el cual no involucra un movimiento relevante de la columna del mineral. El desplazamiento de este material puede o no proyectarse a la galería, sin sobrepasar la gradiente, su influencia es menor a un escurrimiento y no provoca interferencias significativas al proceso productivo.

2.5 Agua-barro en otras minas

Los eventos de escurrimientos y bombeos constituyen un riesgo considerable para preservar la seguridad de las labores mineras subterráneas. A pesar de la escasa documentación de estos eventos en el mundo, algunas minas han implantado soluciones correctivas, mientras que otras han evaluado estrategias de control, prevención y extracción de material con alto porcentaje de humedad, las que se han ido desarrollando con el tiempo debido a los avances tecnológicos (García, 2012). A continuación, se presentan algunos casos históricos de minas en el mundo con sus respectivos problemas de agua-barro.

2.5.1 Kimberley y De Beers, Sudáfrica

Las minas de diamante de Kimberley y De Beers constituyen los primeros casos documentados respecto de escurrimientos de agua-barro. A partir de reportes que datan de la década de 1890, se determinaron las causas de estos eventos como una mezcla de finos de kimberlita y lutita, minerales con alto contenido de arcilla, y agua de lluvia a través de una operación de cielo abierto (Butcher, et al., 2005).

El problema de ingreso del barro fue combatido construyendo túneles que permitían un aumento del drenaje en la zona a partir de 1891. El éxito de esta operación fue parcial, puesto a que el agua de lluvia de igual forma se infiltraba y llegaba a los niveles subterráneos. Estos casos corresponden claramente a bombeos de agua-barro internos.

2.5.2 Hubei, China

La mina de hierro en la provincia de Hubei, explotada bajo el método *Sublevel Caving*, experimentó un bombeo devastador el año 2004, quitándole la vida a un trabajador (Jakubec, et al., 2013).

Una característica particular de este caso es que el macizo rocoso de hierro es competente y no genera excesivos finos ni arcillas. Una posible explicación a lo sucedido guarda relación con excesivas lluvias e inundaciones que azotaron la región en 1998, en las que finos y arcillas generados por cráteres expuestos percolaron a través de la columna de mineral y formaron una capa sobre el *Sublevel Caving*, llegando a formar aproximadamente 14.000 [m³] de finos que entraron a la mina. En el momento del evento, el personal a cargo concluyó que los puntos de extracción donde ocurrió el bombeo estaban sobre extraídos.

2.5.3 DOZ, Indonesia

PT Freeport Indonesia opera un complejo minero de cobre y oro en el distrito minero de Ertsberg, y se encuentra sobre las montañas Sudirman, a una altura entre 3,000 y 4,500 [msnm] (ver Figura 8).

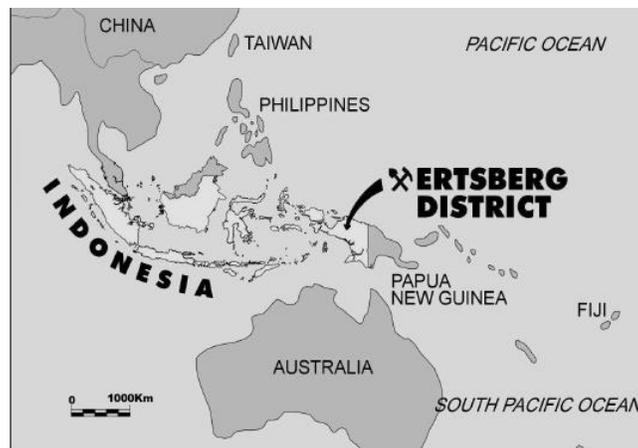


Figura 8: Ubicación del distrito de Ertsberg, Indonesia (Samosir, et al., 2008).

Las operaciones incluyen el rajo Grasberg y la mina *Deep Ore Zone* (DOZ), explotada por *Block Caving*, la tercera en el *East Ertsberg Skarn System* (EESS), después del cierre de la mina Gunung Bijih Timur (GBT) y la mina *Intermediate Ore Zone* (IOZ).

El continuo crecimiento en la cantidad de finos en la mina DOZ se debe por el aumento en las alturas de columna de extracción, altos ritmos de producción, y una topografía en superficie escarpada, además de fuertes precipitaciones en la zona que alcanzan un promedio de 5,500 [mm]. Estos factores han provocado la aparición de agua-barro en los niveles de producción, ubicados aproximadamente a 1,200 [m] bajo el nivel de la superficie (Samosir, et al., 2008).

PT Freeport ha establecido algunos programas de control y monitoreo de la humedad, para lograr una operación segura y eficiente reduciendo a su vez el riesgo de ocurrencia de los eventos de agua-barro, entre los que se incluyen (Putra, 2016):

- Activa extracción de agua: en promedio, cerca de 20,000 [m] de perforaciones son realizadas cada año, desde niveles inferiores en dirección a las zonas con alto porcentaje de humedad en niveles superiores para generar un desagüe pasivo, en el que el agua fluye por gravedad y es desviada de la zona de hundimiento a través de un sistema de piques de drenaje. El programa ha permitido además despresurizar las áreas de producción en el bloque DOZ.
- Equipos LHDs tele-operados en áreas con agua-barro: su uso reduce la exposición del personal minero en áreas con alto potencial de ocurrencia de bombeos.
- Inspecciones de agua-barro: realizadas en forma regular por ingenieros geotécnicos, hidrólogos e ingenieros de operación, los que proveen una evaluación de las condiciones de humedad en los puntos de extracción y además permiten identificar las áreas donde el potencial de bombeo sea mayor, con el objetivo de tomar precauciones necesarias al trabajar en ellas.
- Procedimientos operativos estandarizados: su implementación respecto a la clasificación de los puntos de extracción con agua-barro con base en la humedad y granulometría ha resultado en operaciones seguras en áreas con alto potencial de bombeos. El sistema de clasificación, implementado a partir del 2007 en mina DOZ, es el que se ve en la Figura 9.

Humedad/Contenido de agua	Tamaño de material ≥ 5 [cm] (M)		
	M > 70%	30% < M \leq 70%	M \leq 30%
	(dominado por grano grueso)		(dominado por grano fino)
< 8.5% (seco)	A1	B1	C1
8.5% - 11%	A2	B2	C2
$\geq 11\%$ (húmedo)	A3	B3	C3
Notar:	Casilla verde: cualquier cargador Casilla amarilla: cualquier cargador con supervisión Casilla roja: cargador telecomandado Para clases B2 y A3, es crítica la consideración de altura de la columna y fragmentación		

Figura 9: Matriz de clasificación del estado de los puntos en mina DOZ (traducido de Samosir, et al., 2008).

De la Figura 9, se puede apreciar que conforme disminuye el porcentaje de M, que corresponde al tamaño de partículas superior a 5 [cm], y el porcentaje de humedad aumenta, el punto se vuelve crítico y con mayor potencial de ocurrencia de bombeo. El color indica que en verde se puede ocupar un equipo LHD manual sin problemas, en amarillo, cualquier equipo LHD utilizado debe requerir supervisión, y en rojo, se debe ocupar un equipo LHD controlado a distancia, vale decir, sin un operador en terreno.

Además, para esta última clasificación, se requiere información adicional de fragmentación y altura de extracción (HOD) antes de considerarlo como punto seguro para la elaboración de mapas de potencial de riesgos (Wicaksono, et al., 2012).

2.6 Definición de humedad en El Teniente

Al igual que en los casos anteriores, los estudios realizados y la información histórica recopilada de agua-barro en El Teniente permitieron determinar que los parámetros más importantes en la ocurrencia de escurrimientos y bombeos de agua-barro están relacionados con la humedad en el material presente en los sectores productivos y granulometría del material (SGP - DET, 2010).

Para ello, se realiza una clasificación de 6 estados cualitativos de humedad, los que permiten generar una uniformidad de criterios y una fácil interpretación en terreno mediante una prueba de cohesión manual. En el Anexo A se pueden encontrar imágenes que complementan esta clasificación.

Las clasificaciones de humedad cualitativa son las siguientes:

- ❖ Seco ($H=0$): el punto de extracción se observa sin presencia de humedad. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y, al liberarlo, las partículas se separan unas de otras y el guante permanece seco.
- ❖ Baja humedad ($H=1$): el punto de extracción se observa con el material fino (inferior a 5 [cm]) con baja humedad y de un color más oscuro que el seco. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas se separan unas de otras, dejando el guante con trazas de humedad.
- ❖ Humedad ($H=2$): el punto de extracción se observa con material húmedo. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa frágil que, frente a una presión, se rompe.
- ❖ Barro incipiente ($H=3$): el punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura pastosa. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa resistente que, aunque sea lanzada contra una superficie plana, no pierde su forma comprimida.
- ❖ Barro ($H=4$): el punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura barrota y presenta un brillo propio de la presencia de saturación de agua. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y comprobar que el barro se escurre y es incapaz de formar una masa comprimida.
- ❖ Agua ($H=A$): el punto de extracción se observa con material con una granulometría media a gruesa (superior a 25 [cm]), permitiendo que el agua escurra sin provocar mayores complicaciones operacionales.

Para el caso de la granulometría, se considera clasificado como fina si la partícula presenta un tamaño inferior a 25 [cm].

A partir de ello, gracias a esta clasificación y la recolección de los parámetros en terreno realizada periódicamente por analistas del Control Producción Mina (CPM), se pueden distinguir los puntos de extracción que presentan una humedad relativamente mayor a otros, y así definir aquellos a los que se les debe muestrear para medir el porcentaje de humedad en el laboratorio. De esta manera, se puede realizar una evaluación cuantitativa del estado de esos puntos (García, 2012).

La herramienta utilizada para la evaluación de puntos de extracción es a través de una matriz de criticidad, presentada en la Figura 10, y creada en la Superintendencia de Gestión Producción (SGP), encargada de generar planos de riesgos sobre los niveles de producción a partir de la humedad y de la geología. (SGP - DET, 2010).

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	Alerta
	H3: Barro incipiente	Normal	Observación	Alerta	Alerta
	H4: Barro	Observación	Alerta	Alerta	Alerta
	A: Agua	Normal	Normal	Observación	Alerta

Normal
 Observación
 Alerta

Figura 10: Matriz de criticidad utilizada actualmente en El Teniente (Pérez, 2017).

Los puntos de extracción con granulometría predominantemente gruesa, y con una baja humedad se encuentran dentro de la categoría normal, donde pueden ser extraídos en las condiciones habituales, y con baja o nula ocurrencia de un evento de bombeo. En esta clasificación también se incluyen los puntos con granulometría gruesa y H=A, pues el agua puede escurrir sin ser retenida, acción necesaria para que ocurra la formación de barro.

Los puntos de extracción que caen en la categoría de observación se refieren a los que presentan una granulometría con una presencia notoria de finos, y además un alto nivel de humedad cualitativa, lo que significa que existe una no despreciable probabilidad de ocurrencia de un evento de agua-barro. Estos puntos son clasificados como Limitados (L), donde solo se puede extraer una determinada cantidad de toneladas cada día por un determinado período de tiempo.

Finalmente, los puntos de extracción con alta presencia de finos y alta humedad, donde existe una gran probabilidad de que ocurra un evento de bombeo. Es por ello que los puntos usualmente son declarados en Agua/Barro (B), y debido a su peligrosidad, son cerrados temporal o definitivamente, perdiéndose con ello área productiva y reservas.

La matriz de criticidad de la Figura 10 debe ser considerada como referencia al momento de declarar los puntos clasificados en alerta como estado B, y debe ser respaldada con inspección en terreno por personal técnico, muestreo de humedad cuantitativa a través de un laboratorio y análisis de porcentaje de extracción e interacción del punto con sus vecinos y sectores abandonados antes de abandonarlos definitivamente (Pérez, 2017).

En el Anexo B se presenta la tabla con los estados operacionales de los puntos de extracción definidos por la División El Teniente.

2.7 Flujo gravitacional y modelos físicos

Las operaciones en minería subterránea cuyo método de explotación empleado es por hundimiento se encuentran continuamente expuestas a la aparición de escurrimientos y bombeos, generando una conexión entre la acumulación de agua y finos de mineral con el punto de extracción (Jakubec, et al., 2013). Corresponde por tanto para este estudio comprender el comportamiento del mineral a través de las columnas, pues es allí donde ocurre la formación de barro.

El concepto de flujo gravitacional se entiende como el movimiento vertical de partículas controlado por la fuerza de gravedad y la fuerza que proviene de la interacción entre ellas (Castro, 2006). Es importante conocer este fenómeno físico pues su impacto influye directamente en la recuperación de mineral, y la posibilidad de una temprana o tardía entrada de dilución a los puntos (Vergara, 2016). Por esta razón, la optimización en la extracción de mineral se puede lograr a través de un adecuado diseño de niveles y una correcta práctica y control en la extracción (Susaeta, 2004a).

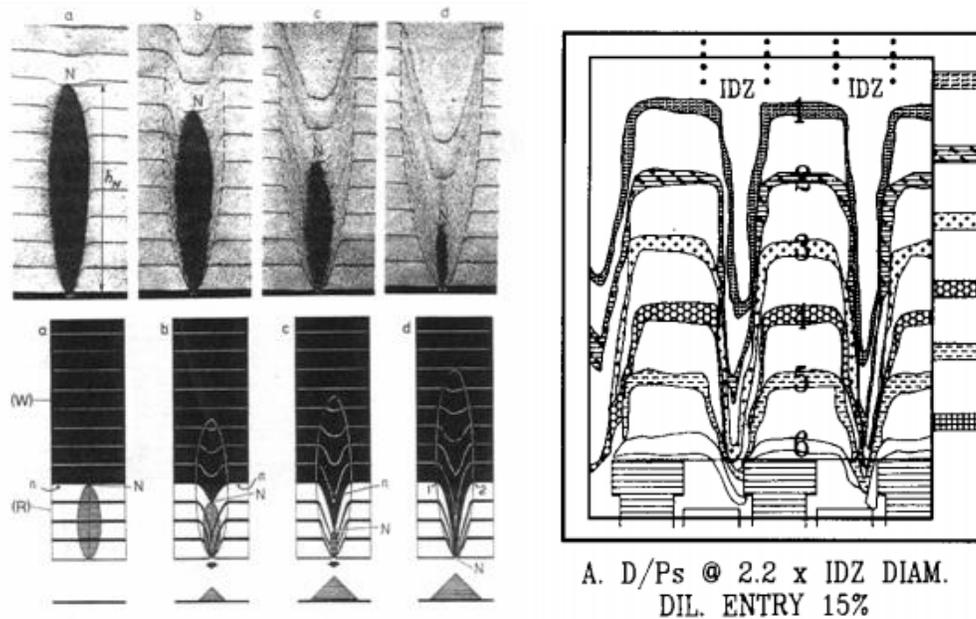


Figura 11: Fotografías y representaciones esquemáticas de modelos físicos del flujo gravitacional. A la izquierda, propuesto por Kvapil (1965). A la derecha, propuesto por Laubscher (1994).

Con el objetivo de estudiar el flujo gravitacional, varios autores han propuesto modelos físicos, representaciones a escala con objetos reales de fenómenos físicos con el fin de observar y estudiar las leyes físicas que los gobiernan. Unos ejemplos se pueden apreciar en las Figura 11. La Tabla 2 presenta una línea temporal con los principales objetivos y resultados obtenidos a través de modelos físicos.

Tabla 2: Resumen de modelos físicos de flujo gravitacional (Vergara, 2016)¹.

Año	Autor(es)	Materiales	Objetivos	Resultados
1916	G.Lhemman	Mineral chancado	Estudiar recuperación minera (Miami <i>copper mine</i>).	Efectos del tamaño del punto de extracción sobre la recuperación.
1946	McNicholas	Mineral chancado	Estudiar recuperación minera (Climax <i>molybdenum mine</i>).	Diferencias en el tamaño de los puntos de extracción dependiendo del tamaño de las partículas
1965	Kvapil	Arena	Proveer relaciones matemáticas respecto al flujo de materiales granulares en silos.	Teoría de Elipsoides de Movimiento y extracción
1966	Janelid y Kvapil	Arena	Extender modelo de silos de Kvapil a mina de hierro en Suecia explotada mediante el método de <i>Sublevel Caving</i> .	Criterios de diseño para <i>Sublevel Caving</i> basados en la teoría de elipsoides
1972	Janelid y Kvapil	Mineral chancado	Estudiar escalamiento desde modelo a escala mina.	Resultados similares entre prototipo y modelo; diferencias asociadas a mayor movilidad y menor compactación en modelo
1984	Peters	Grava	Estudiar efecto del tamaño de partícula en la forma de la zona de extracción.	Ancho de la zona de extracción no depende del tamaño de partícula.
1994	Laubscher	Arena	Diseñar modelo 3D para observar y estudiar la interacción entre puntos de interacción adyacentes.	Teoría del Tiraje Interactivo
2001	Castro	Grava	Escalamiento de modelo físico para estudio de flujo gravitacional en minería por hundimiento.	Las fuerzas preponderantes corresponden a la gravedad y la fricción. El movimiento de las partículas se limita a un elipsoide caracterizado por altura (H) y ancho (W).
2004	Power	Grava	Revisión de las escalas utilizadas en modelos físicos.	Resultados similares entre escala mina y modelo a la escala (1:30), destaca diferencia entre modelos 2D y 3D.
2004	Susaeta	Arena	Estudio velocidad flujo gravitacional para tiraje aislado, tiraje interactivo.	Índice de Uniformidad (IU). A mayor uniformidad del tiraje, más tardía será la entrada de dilución.
2006	Castro	Grava	Estudio flujo gravitacional en modelo 3D a gran escala.	La masa extraída y la altura de extracción tienen gran influencia sobre la zona de extracción aislada.

Si bien es cierto también existen modelos numéricos, cuyas bases son matemáticas, buscan predecir a través de ecuaciones o teorías el comportamiento de algún fenómeno particular y se pueden clasificar en dinámicos o cinemáticos (González, 2014), este estudio se centra en los modelos físicos, y en particular, en la teoría de flujo gravitacional y el Índice de Uniformidad de Susaeta.

¹ Modificado, incluyendo el estudio del tiraje interactivo de Laubscher (Laubscher, 1994).

2.8 Índice de Uniformidad (I.U.)

Susaeta (2004b) planteó que determinar la uniformidad de la extracción corresponde a un problemática clave que debe ser resuelta para alcanzar un adecuado control de extracción de puntos. Para ello, el autor propuso el siguiente índice para caracterizar esta variable:

$$I. U. = \Delta + \Gamma * \frac{t_p - t_{\min}}{t_{\max}^2 * n} * \sum_{i=1}^n (t_{\max} - t_i)$$

Ecuación 1: Índice de Uniformidad.

Los términos se describen a continuación:

- Δ : número de puntos de extracción inactivos en la vecindad del punto estudiado.
- Γ : factor de normalización, equivalente a 99/89.
- t_p : tonelaje extraído del punto p en un período específico de tiempo.
- t_i : tonelaje extraído del punto i que se encuentra en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- t_{\max} : tonelaje máximo extraído en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- t_{\min} : tonelaje mínimo extraído en la vecindad del punto p en el mismo período de tiempo.
- n: número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto p, incluyéndolo.

El análisis de la ecuación corresponde a lo siguiente:

- ❖ El primer término, Δ , es un número entero que indica el número de puntos en la vecindad que no han tenido movimiento durante el período considerado de tiempo. Así, mientras mayor sea Δ , menor se vuelve la uniformidad del punto estudiado.
- ❖ La segunda parte se denomina Índice Específico de Uniformidad (I.E.U.), el que es un número decimal entre 0 y 1 gracias al factor de normalización Γ , e indica la uniformidad del punto de extracción respecto de los demás puntos activos de la vecindad en el período considerado de tiempo.

De esta manera, Susaeta (2004b) definió en particular para el I.E.U. los siguientes bordes definidos en la Tabla 3:

Tabla 3: Límites del Índice Específico de Uniformidad según extracción.

Características de extracción	I.E.U.
Extracción completamente uniforme	0
Extracción completamente aislada	1

2.8.1 Interpretación del Índice de Uniformidad

Puesto a que el I.U. posee una naturaleza vectorial al estar compuesto por dos partes, el autor propone la utilización de una matriz en el que se puedan caracterizar los resultados respecto del número de puntos de extracción inactivos, Δ , y el I.E.U., como se ve en la Tabla 4. Se debe notar que la matriz está aplicada para una vecindad de 7 puntos, y que puede ser modificada según criterios específicos.

Tabla 4: Matriz del Índice de Uniformidad (Susaeta, 2004b).

		Índice Específico de Uniformidad				
		0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
Número de puntos de extracción inactivos	0	Unif	Unif	Unif	Semi	Semi
	1	Unif	Unif	Semi	Semi	Semi
	2	Unif	Semi	Semi	Semi	Des
	3	Semi	Semi	Semi	Des	Des
	4	Semi	Semi	Des	Des	Des
	5	Des	Des	Des	Des	Des
	6	Des	Des	Des	Des	Des

La matriz tiene un correcto funcionamiento y aplicabilidad para puntos cuya vecindad de puntos presenta información completa. Sin embargo, para los puntos de borde o zonas con colapso, esta herramienta tiende a presentar problemas, declarando puntos desiguales al presentar “puntos vecinos inactivos” inexistentes, por lo que pueden ser omitidos para el análisis de uniformidad (Montecino, 2011). Susaeta propone como solución la aplicación de una matriz específica para estos puntos de acuerdo a un criterio específico y considerando el diseño de la mina.

Cada intervalo de cálculo, o período de tiempo definido (como por ejemplo, 1 o 3 turnos) puede generar un I.U. para cada punto de su vecindad. Así, al seleccionar un período de control (como por ejemplo, 1 mes, 1 año), se puede obtener una visualización en la que se presentan los puntos de acuerdo a la uniformidad ponderada en ese marco de tiempo (Susaeta, 2004b; Montecino, 2011). Un ejemplo de una visualización se puede apreciar en la Figura 12, donde se presenta una escala con porcentajes de uniformidad, donde en rojo se presentan los puntos con tiraje aislado por su bajo I.U., y en el otro extremo, en verde, los puntos con tiraje interactivo por su alto I.U.

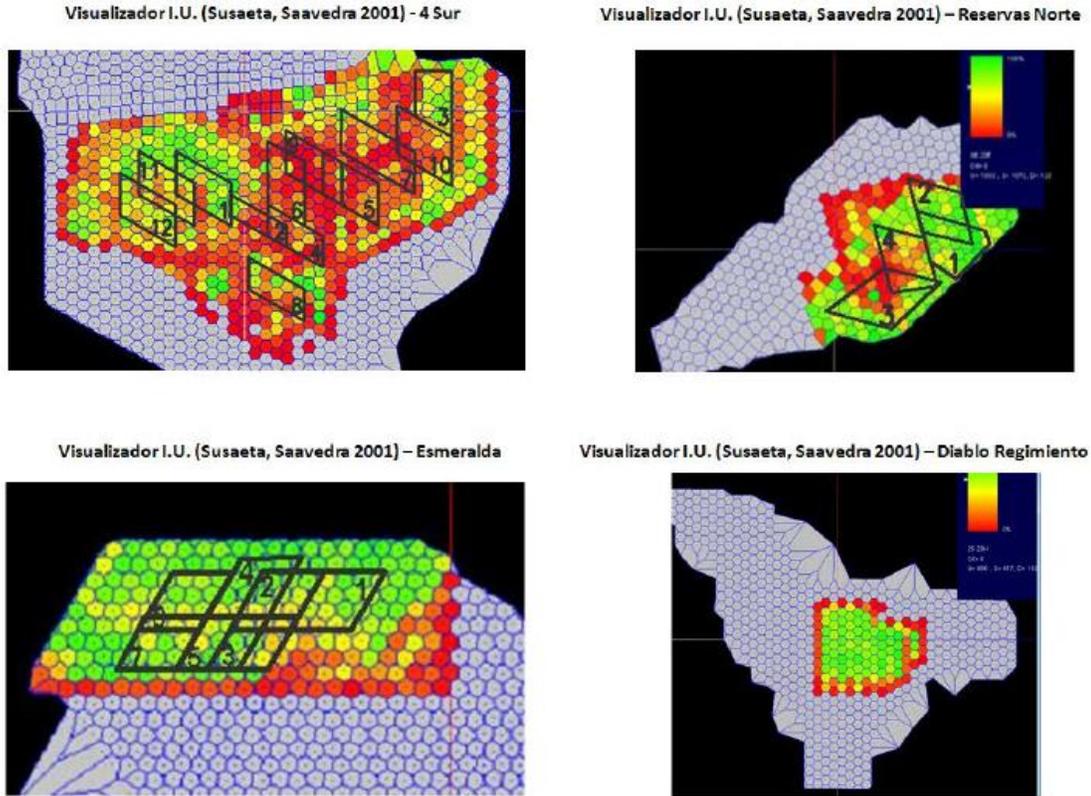


Figura 12: Representación gráfica en plano de distintas minas en División El Teniente y el I.U. de cada punto de extracción (intervalo de 3 turnos).

2.9 Modelo de operación bajo condiciones de agua-barro

División El Teniente ha solicitado, a través de la consultora de ingeniería BCTEC, estudios y análisis de los eventos de agua-barro que han ocurrido en la mina con el objetivo de generar modelos de riesgo y proponer una estrategia de extracción en la prueba industrial de la Fase II de Diablo Regimiento.

Los estudios de ingeniería han podido determinar hasta la fecha que las únicas variables de extracción relacionadas con la ocurrencia de eventos de agua-barro son la uniformidad de tiraje [%], y la velocidad de extracción [$t/m^2/día$] (BCTEC, 2016).

Aparte de los eventos de agua-barro, escurrimiento y bombeos, previamente definidos, se consideran dentro de las hipótesis de BCTEC otros fenómenos físicos, como es la consolidación y el drenaje, necesarios de comprender para la posibilidad d

2.9.1 Consolidación y compactación

El fenómeno de consolidación se produce cuando deja de existir extracción en una zanja durante un tiempo determinado. Bajo esta condición, el mineral fino se consolida por el peso ejercido por la columna de mineral, vaciando el agua contenida y perdiendo así su fluidez. Así, los puntos de extracción con finos consolidados forman arcos de estabilidad que impiden que el mineral de la columna descienda hacia el punto de extracción.

La consolidación es una de las condiciones para la que el punto sea declarado operativamente como Colgado (C). Otra opción para que tenga ese estado es el bloqueo por colpas, rocas de gran tamaño que no pueden ser extraídas por los equipos LHDs por sus grandes dimensiones, y que requieren de reducción secundaria. También se puede dar el caso de ambos escenarios, como se ve en la Figura 13.

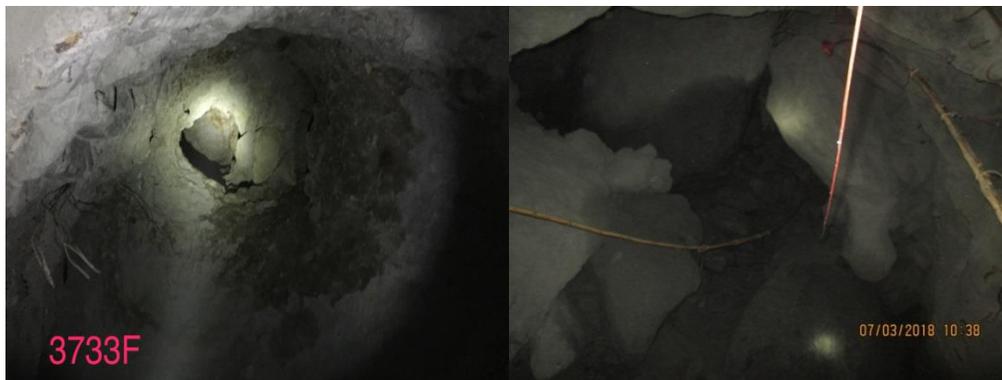


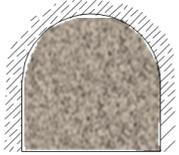
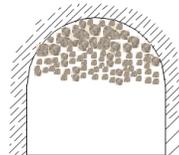
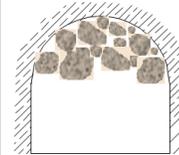
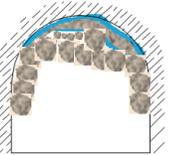
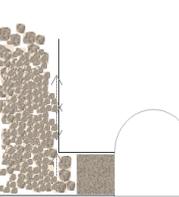
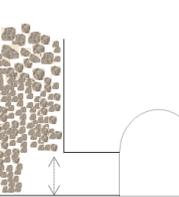
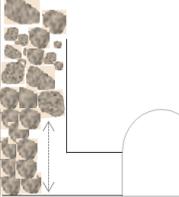
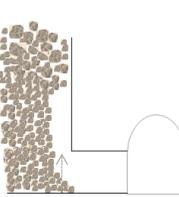
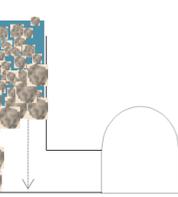
Figura 13: Tipos de colgaduras. A la izquierda, una colgadura por consolidación de finos, dejando una chimenea. A la derecha, un caso intermedio, donde se aprecian colpas y mineral consolidado (GOB - DET, 2018).

Se debe notar que los entregables de BCTEC se refieren indistintamente a la consolidación como compactación a modo de simplificación. Sin embargo, existen algunas diferencias sustanciales entre ambos fenómenos (Basaure, 2014), las que son brevemente descritas a continuación:

- ❖ En el caso de la compactación, el proceso ocurre en forma instantánea al ejercer un esfuerzo sobre un cuerpo granular, dependiendo únicamente de la energía aplicada y de la interacción entre las partículas, al existir aire como espacio intersticial. La presencia de humedad en el mineral genera un aumento en la densidad al reducir la fricción entre partículas y permitiendo una mayor compresión, y alcanza un máximo al acercarse al punto de saturación, revirtiéndose y disminuyendo la densidad.
- ❖ En el caso de la consolidación, el proceso ocurre en forma gradual y prolongada en el tiempo, al ejercer un esfuerzo sobre un cuerpo granular pero saturado, es decir, con presencia única de agua en el medio como espacio entre los sólidos. De esta manera, la deformación del cuerpo no solo depende de la interacción entre las partículas, sino que además de la velocidad de salida de agua del cuerpo, propiedad conocida como permeabilidad.

Respecto del tipo de colgaduras, en División El Teniente se establecen cinco condiciones recurrentes que presentan los puntos de extracción y que requieren una operación de reducción secundaria, dependiendo de la configuración del punto y la evaluación de riesgo que determine la supervisión del área. En este aspecto, la Tabla 5 ilustra esquemáticamente los cinco tipos de colgaduras (GOB - DET, 2018).

Tabla 5: Cuadro resumen de distintos puntos de extracción para reducción o descolgadura de zanjas.

TIPO / VISTA	PUNTOS COMPACTADOS	PUNTOS CON ARCOS COHESIVOS	PUNTOS CON ARCOS MECANICOS	PUNTOS COLGADOS CON PRESENCIA DE CHIMENEA	PUNTOS CON ARCOS MECANICOS + FINO + AGUA
VISTA FRENTE					
VISTA PERFIL					
OBS.	Corresponden a la formación de un muro compacto de mineral seco, formado por la falta de movimiento por un tiempo prolongado, a un punto que presentó material fino y humedad necesaria para consolidarse.	Corresponden a la formación de una cavidad sustentable en forma de arco, con material fino.	Corresponden a la formación de una cavidad en forma de arco autosustentable con material grueso, debido al acomodamiento de colpas.	Corresponde a colgaduras generadas por el desprendimiento de material focalizado en un área específica del techo, formando una chimenea natural.	Corresponden a la formación de una cavidad en forma de arco autosustentable con material grueso, debido al acomodamiento de colpas. Sin embargo, presenta humedad y material fino entre ellas.

Si bien, es de esperarse que en un sector de minería subterránea que se encuentre con presencia de humedad en altura se dé principalmente el quinto caso de arcos mecánicos de gruesos con finos y agua, el fenómeno de la consolidación permite, a través del nulo movimiento en el punto de extracción, generar con el tiempo las otras condiciones de colgaduras con arcos estables de finos, al ir vaciando en forma paulatina el agua contenida. En cualquier caso, la aparición de este fenómeno en el nivel de producción implica una reducción en la extracción de mineral y expone al personal de reducción secundaria al tener que acercarse a estas zonas donde existe el riesgo que se genere un evento de agua-barro.

2.9.2 Drenaje

El concepto de drenaje es otro fenómeno que ocurre en los puntos de extracción, y sucede cuando el agua/barro contenida en las columnas de mineral es extraído a través de puntos donde se realiza extracción de mineral saturado. De esta manera, se evita que se desplace este material con alto porcentaje de humedad por efectos de gravedad a puntos donde se realiza extracción de mineral seco o con menor humedad, tal y como se ve en la Figura 14 (BCTEC, 2016).

Siguiendo esta estrategia, como ocurre en DOZ, Indonesia, de continuar con la extracción en los puntos saturados, se evita a que aumente la cantidad de puntos declarados como Agua/Barro (B) en otras zonas cercanas.

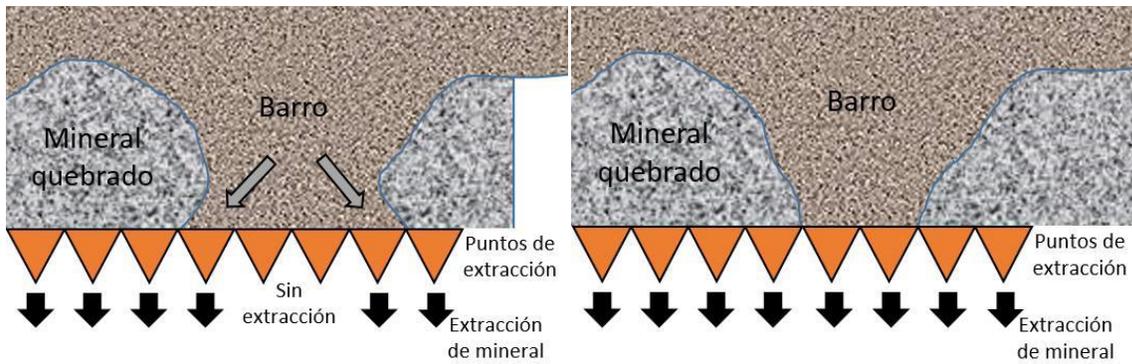


Figura 14: Esquema que ilustra el drenaje de agua-barro. A la izquierda, el material es transportado hacia los puntos de extracción cercanos activos al dejar inactivos los puntos con mineral saturado. A la derecha, el material se extrae de los puntos con mineral saturado y evita la contaminación en puntos cercanos.

2.9.3 Hipótesis y extracción sugerida de agua-barro

BCTEC, a través de los estudios realizados para División El Teniente, establece algunas hipótesis considerando los fenómenos físicos descritos anteriormente, concluyendo en la elaboración de una propuesta de extracción para el Fase II de Diablo Regimiento. A continuación, se revisan las que presentan una relación directa con el caso de estudio.

2.9.3.1 Eventos de agua-barro en puntos de extracción

La primera hipótesis planteada está relacionada con las variables de extracción: la probabilidad de ocurrencia de eventos de agua-barro aumenta con una baja uniformidad de tiraje, y una alta velocidad de extracción, a escala mensual.

La hipótesis se encuentra respaldada por estudios realizados en 2016 sobre eventos de barro que ocurrieron en el Bloque 1 de Esmeralda, entre 2014 y 2016. De esta manera, la clasificación de los eventos, según su violencia y rapidez, también presentaron una conexión con el valor de las variables obtenidas en los puntos, es decir, la velocidad de extracción promedio era menor, y la uniformidad de tiraje era mayor en el caso del escurrimiento respecto de un bombeo.

2.9.3.2 Consolidación en puntos de extracción

La siguiente hipótesis se refiere al evento físico de consolidación, donde los puntos en los que no ha habido extracción continua, el cuerpo granular aumenta su densidad y forma arcos estables, colgando en definitiva la zanja.

La hipótesis se encuentra sustentada en observaciones realizadas en División El Teniente por pruebas de tele-comando en Diablo Regimiento y Reservas Norte, entre 2010 y 2012, además de la información reportada en DOZ, Indonesia. De acuerdo con sus resultados experimentales, los puntos de extracción que presentan una humedad de laboratorio superior al 6% presentan la condición ideal para compactarse.

2.9.3.2 Drenaje en puntos de extracción

La última hipótesis atingente al estudio se refiere al fenómeno físico de drenaje de agua/barro, en la que una extracción de mineral saturado desde puntos declarados como Agua/Barro permite una disminución de la tasa de declaración de nuevos puntos previamente secos con dicho estado.

La hipótesis está soportada por análisis realizado de la base de datos de extracción y estado histórico de puntos cuando se realizaron las pruebas de tele-comando en Diablo Regimiento y Reservas Norte, entre 2010 y 2012.

2.10 Proyecto extracción agua-barro

2.10.1 Gerencia de Desarrollo e Innovación (GDI) de División El Teniente

División El Teniente a través de la Gerencia de Desarrollo e Innovación (GDI) dispone de una serie de proyectos que tienen por objetivo generar propuestas disruptivas para desafíos que continuamente se presentan y que constantemente son revisados con la incorporación de nuevas tecnologías que aporten beneficios y seguridad a la faena.

El principal objetivo de la GDI consiste en ejercer un papel protagónico en el proceso de transformación de la División, al incorporar un aporte al negocio y propiciar un cambio, idealmente permanente, en la cultura y organización y mantener una situación competitiva a largo plazo (Codelco, 2018).

Los resultados de los compromisos en innovación se ven reflejados según su ebitda (del acrónimo en inglés *Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization*), que corresponde a su aporte de valor a Codelco. El ebitda comprometido para el año 2018 de la GDI es de 18 [MUSD], a través de una cartera de proyectos desglosada en la Figura 15. El ebitda mínimo para el proyecto asociado a agua-barro es de 6.1 [MUSD], un 34% del total de los proyectos asociados a innovación.

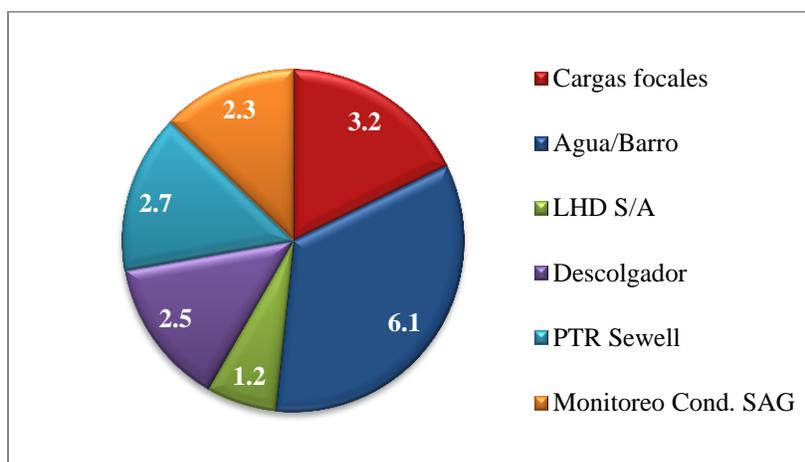


Figura 15: Distribución de proyectos de innovación y su aporte en ebitda del año 2018 (en MUSD).

2.10.2 Proyecto de extracción agua-barro

El proyecto de agua-barro a cargo de la GDI formalmente se llama, según API 2016, “Explotación mineral húmedo mina El Teniente – Prueba industrial”, cuyo objetivo principal es la viabilizar la extracción de reservas que en la actualidad deben abandonarse frente al riesgo de bombeo en puntos de extracción. Las reservas estimadas según API con presencia de agua-barro se presentan en la Tabla 6, volviéndose un atractivo económico para la División recuperarlas (SID - GRMD, 2016).

La prueba de extracción se define como la generación de una nueva filosofía operacional, al intentar minimizar la exposición de las personas, utilizando un sistema teleasistido multi-marca que permite posibilitar la extracción de reservas de barro.

Tabla 6: Reservas estimadas con barro en División El Teniente (API, 2016).

Sector	Tonelaje [t]	Ley [%Cu]
Diablo Regimiento	2,285,211	0.695
Reservas Norte	4,805,119	0.877
Esmeralda (Bloque 1)	949,389	0.681

La zona delimitada para realizar la prueba industrial corresponde a un área de aproximadamente 16,000 [m²], incorporando las calles 37, 39, 41 y 43, y de las zanjas 30 a la 37, como se ve en la Figura 16. El polígono es irregular en la zona sur, al no considerar las zanjas 38 ni 39 de las calles 41 y 43, y fue planificado de esa manera porque dichos puntos de extracción se encuentran localizados debajo del botadero de Mina Rajo Sur, lo que podría ocasionar inestabilidades tanto en superficie como en el nivel de producción.

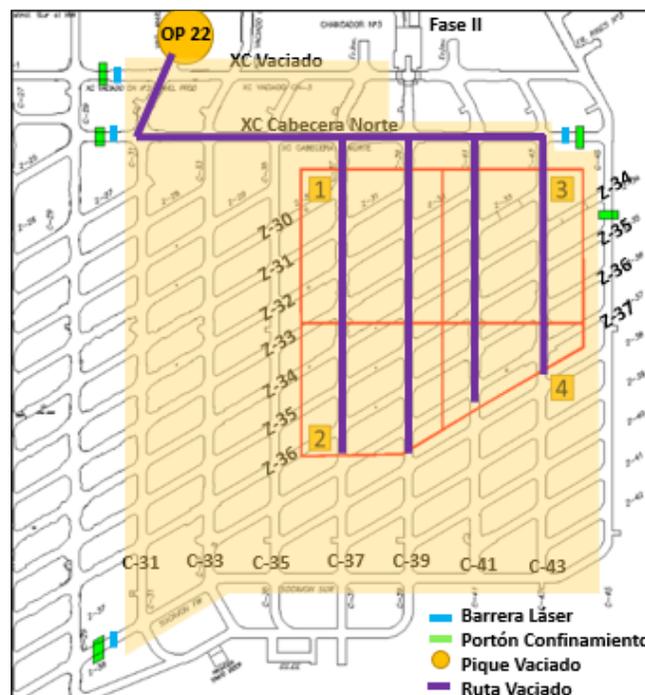


Figura 16: Zona definida para la prueba industrial de agua-barro, delimitado con naranja.

De acuerdo con la meta propuesta por la Superintendencia de Innovación Divisional (SID), la prueba industrial tendría una duración mínima de seis meses, con un *ramp-up* de cuatro meses, y llegando a un régimen de 2,500 [tpd]. Por otro lado, el compromiso consignado en la Revisión 2 del PND 2018 es más conservadora en su plan, comenzando con 300 [tpd] el primer mes, y alcanzando un máximo de 1,600 [tpd] tras la incorporación del segundo equipo LHD. Ambos planes se presentan en la Figura 17.

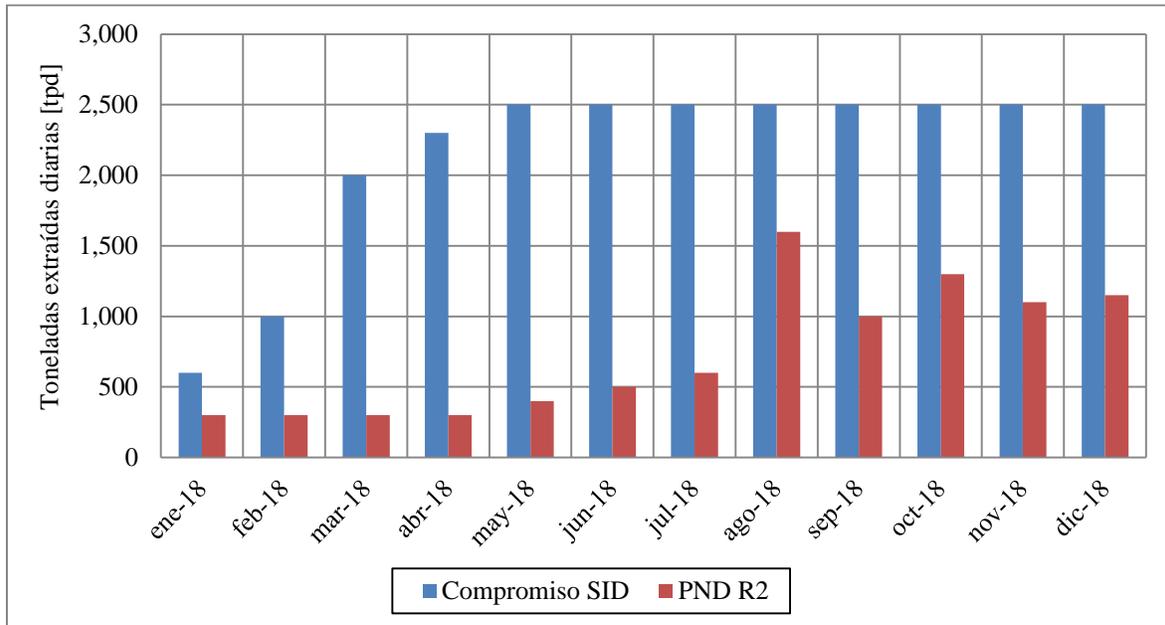


Figura 17: Plan de producción mensual de prueba industrial agua-barro DR F-II, según meta SID y compromiso PND R2.

Para cumplir con el plan de producción, se dispone en principio de un equipo LHD exclusivo para la operación de agua-barro, con la opción de incorporar un segundo equipo tras siete meses de operación. Los equipos son controlados a distancia utilizando un sistema multi-marca que permite la teleasistencia independiente del proveedor del equipo. La sala de tele-operación fue instalada en el barrio cívico de Diablo Regimiento, al noroeste de la Fase II, indicado en la Figura 18. Para la seguridad del personal, se instalaron cinco portones con sensores láser que detienen inmediatamente al LHD en caso de que alguno de ellos sea traspasado.

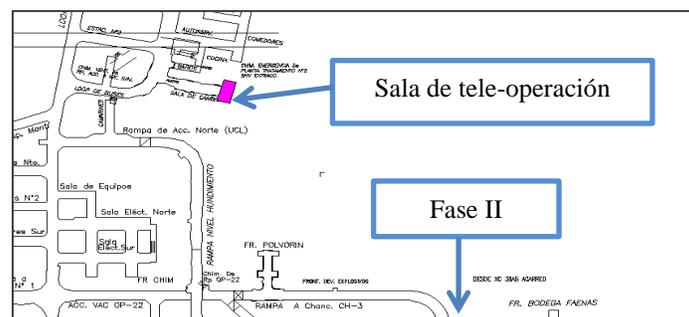


Figura 18: Ubicación de la de tele-operación en el barrio cívico de Diablo Regimiento.

La SID definió algunos KPIs para validar y establecer criterios de éxito para la prueba, los que se definen en dos dimensiones: extracción de mineral húmedo, y rendimientos de operación tele-asistida, los que se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 7: KPIs de extracción de mineral húmedo para la prueba.

Tabla de seguimiento	Cumplimiento		
KPI	Bajo	Medio	Alto
Extracción de agua/barro	Gran eventualidad: bombeo	Eventualidad leve: escurrimiento	Sin eventualidad: sin bombeo ni escurrimiento
Plan de producción (tpd)	< 90%	90%-100%	> 100%
Uniformidad de extracción	< 50%	50%-75%	> 75%

El KPI de extracción de agua/barro contabiliza la ocurrencia de algún evento en la Fase II. El KPI de plan de producción corresponde directamente al cumplimiento mensual respecto de lo programado en porcentaje. Por último, el KPI de uniformidad de extracción deriva del Índice de Uniformidad, y es el porcentaje de tonelaje extraído en puntos declarados uniformes del tonelaje total extraído.

Tabla 8: KPIs de rendimientos de operación tele-asistida.

Tabla de seguimiento	Cumplimiento		
KPI	Bajo	Medio	Alto
Utilización efectiva	< 3 [h]	3-3.5 [h]	> 3.5 [h]
Tiempo medio de ciclo	> 5 [min]	4-5 [min]	4 [min]
N° baldadas por turno	< 85%	85%-100%	> 100%

El KPI de utilización efectiva contabiliza las horas en que el equipo estuvo destinado a la extracción en la Fase II. Siguiendo la norma ASARCO, se calcula como:

$$U.E. = \frac{\text{Horas efectivas}}{\text{Horas disponibles (efectivas + demoras + reservas)}}$$

Ecuación 2: Utilización efectiva (U.E.).

El KPI de tiempo medio corresponde al tiempo de ciclo en que se tarda el LHD en ir a una zanja de la Fase II, extraer mineral y depositarlo, en este caso, al OP 22, para luego regresar a dicha zanja y extraer una nueva baldada. Por último, el número de baldadas por turno corresponde al cumplimiento efectivo de baldadas extraídas, esta vez en un período de 8 horas, de acuerdo a lo programado en cada zanja.

2.11 Conclusiones de la revisión bibliográfica

A continuación, se indican las siguientes conclusiones relevantes y que justifican la realización del estudio de la prueba industrial de agua-barro:

- **Del concepto de agua-barro y agua-barro en otras minas**

El estudio bibliográfico refleja que los eventos de agua-barro como escurrimientos o bombeos son eventos en la actualidad no controlados y que generan problemas a nivel de seguridad de las personas, y a nivel de negocio al perder producción y áreas productivas con reservas sin extraer. Esta situación se puede volver un desafío y un atractivo económico para las compañías mineras, intentando recuperar dichas reservas a través de una extracción en la que no comprometa la salud de sus trabajadores, ni tampoco del equipo o del entorno con eventos súbitos.

Métodos para extraer mineral como lo presentado en DOZ permiten tomar medidas preventivas para reducir la probabilidad de ocurrencias de eventos de agua-barro, a través de un drenaje continuo a los niveles superiores, continua inspección de puntos, y uso de equipos tele-comandados o tele-asistidos. Sin embargo, la escasa información divulgada por las compañías mineras frente a eventos de escurrimiento o bombeo vuelven la recopilación de datos una labor compleja. Por tanto, frente a una prueba industrial realizada en División El Teniente, se vuelve necesario registrar los parámetros más importantes y obtener un análisis de datos adecuados.

- **Del Índice de Uniformidad y del modelo de operación propuesto**

El I.U. propuesto por Susaeta permite tener un control de extracción de los puntos frente a sus vecinos, generando un estado de uniformidad que puede tener una relación directa con la reducción de eventos de agua-barro en un nivel de producción. Los estudios de ingeniería sugieren a través de su modelo propuesto que para evitar potenciales eventos, debe existir una alta uniformidad de tiraje, asociado también a bajas velocidades de extracción. Poner en evidencia la efectividad del modelo propuesto también resulta de interés para el desarrollo de la prueba industrial.

- **Justificación del trabajo**

Finalmente, la falta de información en otras minas respecto de la extracción de agua-barro y sus resultados resulta concluyente para afirmar que a la fecha no se ha elaborado una guía con consideraciones generales para abordar esta problemática directamente. Además, junto a la necesidad de poder efectuar un seguimiento a la prueba industrial en Fase II de Diablo Regimiento, vuelven a este trabajo de análisis de la estrategia de extracción necesario para extraer resultados de operación y variables de interés que permitan la elaboración de nuevas estrategias en las que se puedan recuperar reservas con barro o alta presencia de humedad, evitando tener que cerrarlas y abandonarlas, tendencia actual al momento de tomar decisiones de negocio.

3. Metodología de trabajo

La metodología para realizar el estudio y cumplir con los objetivos planteados consistió en los siguientes pasos, divididos en actividades:

3.1 Conceptualización del problema

En esta etapa se presentó el problema, que consistía en el estudio y seguimiento de una prueba industrial durante el año 2018 de extracción de mineral con altos porcentajes de humedad en un sector específico de la Fase II de Mina Diablo Regimiento.

El análisis de los datos reales a su vez generó la motivación del trabajo, pues con los resultados obtenidos se permitiría determinar la calidad de la extracción realizada durante los meses de producción, y elaborar un nuevo plan para maximizar la extracción de agua-barro a la vez que se controlaba la ocurrencia de escurrimientos y bombeos con estrategias preventivas. Se definen los alcances, centrándose el estudio en el ritmo de producción del sector en que se realiza la prueba industrial, y su relación con el estado de los puntos.

3.2 Revisión de antecedentes

Se realizó una revisión crítica bibliográfica de los trabajos realizados previamente respecto del agua-barro, además de los problemas que ha causado en otras minas del mundo y las formas de combatirlo a modo de definir un estado del arte.

Se revisaron conceptos importantes que influyen directamente en el estudio del agua-barro, así como informes realizados en la División sobre este tema, incluyendo los procedimientos que se deben adoptar al momento de un evento, la diferencia entre deslizamiento, escurrimiento y bombeo según su magnitud y alcance, y las propiedades asociadas al barro estudiadas en terreno. Por otro lado, desde un punto de vista operacional, se propuso una estrategia a través de estudios de ingeniería, la que se recomendó poner en marcha, y es el centro de estudio respecto de la extracción real.

Al considerar los ritmos de extracción, se propuso revisar el concepto de Índice de Uniformidad de Susaeta, el que permite también generar un escenario temporal del comportamiento de los puntos respecto de sus vecinos y de las otras fases.

3.3 Recopilación de datos

En esta sección se complementaron las revisiones realizadas en el paso anterior, apoyándolas con datos. Las fuentes y bases de datos obtenidas más importantes para el desarrollo del trabajo fueron las siguientes:

- ❖ Extracción real histórica de la Fase II de Mina Diablo Regimiento, incluyendo datos de la prueba industrial.
- ❖ Extracción programada de la Fase II de DR según Plan Actualizado Mensual (PAM) y compromisos de la prueba industrial.

- ❖ Resultados y conclusiones de los estudios de eventos de agua-barro ocurridos en el Bloque 1 en Esmeralda durante el período noviembre 2016 febrero 2017.
- ❖ Estado operativo de los puntos de la Fase II de DR y disponibilidad de área de extracción según existencia de estado operativo de zanjas, como abocado o colgado.

Los datos fueron extraídos principalmente de las operaciones en Diablo Regimiento, y del Grupo Operacional Barro (GOB), encargado de la programación y revisión de los puntos de extracción que presenten eventos con agua-barro en División El Teniente, con el objetivo de tomar medidas correctivas y preventivas frente a estos sucesos, ya sea cerrando los puntos, o declarando aquellos con alta presencia de humedad como limitados.

3.4 Análisis de datos y obtención de KPIs

En esta sección se recopilaron las bases de datos y se comenzaron a efectuar análisis para la obtención de información relevante para el estudio, como el cumplimiento de la extracción real respecto del programa, incluyendo cada punto de la prueba industrial, para definir si se estaba logrando una extracción uniforme en el sector, dadas las condiciones. Se generaron vistas en planta para desplegar las variables obtenidas en cada período de control y se obtuvieron los KPIs necesarios para validar la prueba industrial presentadas por la SDI.

La información obtenida anteriormente sirvió como dato de entrada para utilizar un ejecutable elaborado por Susaeta para determinar el I.U. en cada uno de los puntos y la generación una validación del mismo índice respecto de su alcance y aplicabilidad en esta zona, considerando los turnos de estabilización propuestos y los puntos donde no era posible extraer agua-barro.

Conforme iba avanzando la prueba industrial, se iba renovando la base de datos la extracción en la Fase II, lo que permitió generar un seguimiento respecto del caso base (previo a su cierre). De esta manera, se pudieron establecer nuevos escenarios actuales que servían para establecer una comparación entre meses y determinar diferencias cualitativas y cuantitativas durante la duración y evaluación de la prueba.

3.5 Elaboración de una propuesta de extracción

El estudio preliminar, la obtención de datos y la generación de información permitieron crear un escenario general de la calidad de extracción de la Fase II de Diablo Regimiento. Al considerar las variables externas y disponibilidad del equipo y de los puntos, se propusieron unos lineamientos generales que permiten establecer una guía inicial para lograr una efectiva extracción de agua-barro en la zona de estudio, maximizando el cumplimiento según PAM y reduciendo el factor sorpresa de eventuales escurrimientos o bombeos con un tiraje controlado.

3.6 Discusiones generales

En esta sección se efectuaron comentarios generales de los resultados obtenidos durante el período de estudio en función de los objetivos buscados, evaluando los aspectos más importantes del caso de estudio, como beneficios, tonelaje, cumplimiento y utilización del equipo, entre otros, de cada uno de los meses evaluados y de la propuesta de extracción.

Se evaluó y analizó además la posibilidad de expandir la propuesta de extracción a otras zonas en División El Teniente donde han ocurrido problemas con agua-barro.

3.7 Conclusiones y recomendaciones

En la sección final de este trabajo se realizaron los últimos comentarios del estudio realizado y de la experiencia de la prueba industrial, incorporando los análisis de la sección anterior para definir conclusiones de la propuesta y de su aplicabilidad en otros sectores, según los siguientes ejes:

- ❖ Área productiva disponible (número de puntos de extracción habilitados)
- ❖ Tonelaje programado para el sector
- ❖ Tonelaje extraído en los puntos y su respectiva uniformidad
- ❖ Estado de los puntos

Se indicaron además recomendaciones para futuros trabajos de este tema que no fueron considerados por alcances.

El resumen esquemático de la metodología de trabajo se encuentra en la Figura 19:

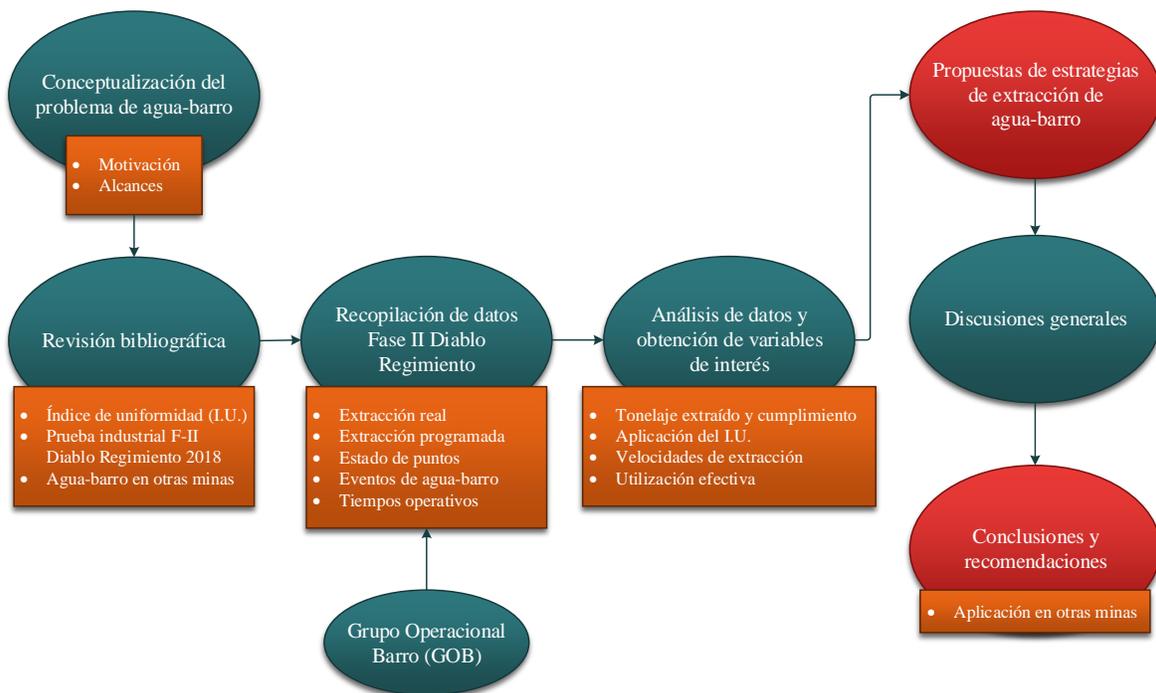


Figura 19: Pasos de la metodología de trabajo propuesta para el estudio.

4. Resultados y análisis

A continuación, se presentan las secciones que corresponden al desarrollo y obtención de resultados importantes para el estudio, junto con sus respectivos análisis. Al igual que los criterios de éxitos establecidos para la validación de la prueba, este capítulo se divide en dos partes: de la sección 4.1 a la 4.3 corresponden a criterios relacionados con la prueba de extracción de agua-barro, mientras que de la sección 4.4 a la 4.6 corresponden a los criterios de rendimientos de operación tele-asistida.

4.1 Tonelaje extraído y cumplimiento

4.1.1 Tonelaje extraído y cumplimiento mensual por área completa y por calle

De acuerdo con el tonelaje programado según R2 del PND, la extracción tendría un *ramp-up* progresivo durante los primeros siete meses hasta la incorporación de un segundo equipo LHD en el octavo mes. La Figura 20 presenta el tonelaje mensual extraído de la Fase II de Diablo Regimiento durante el período de estudio, entre enero y julio de 2018, comparado con la programación.

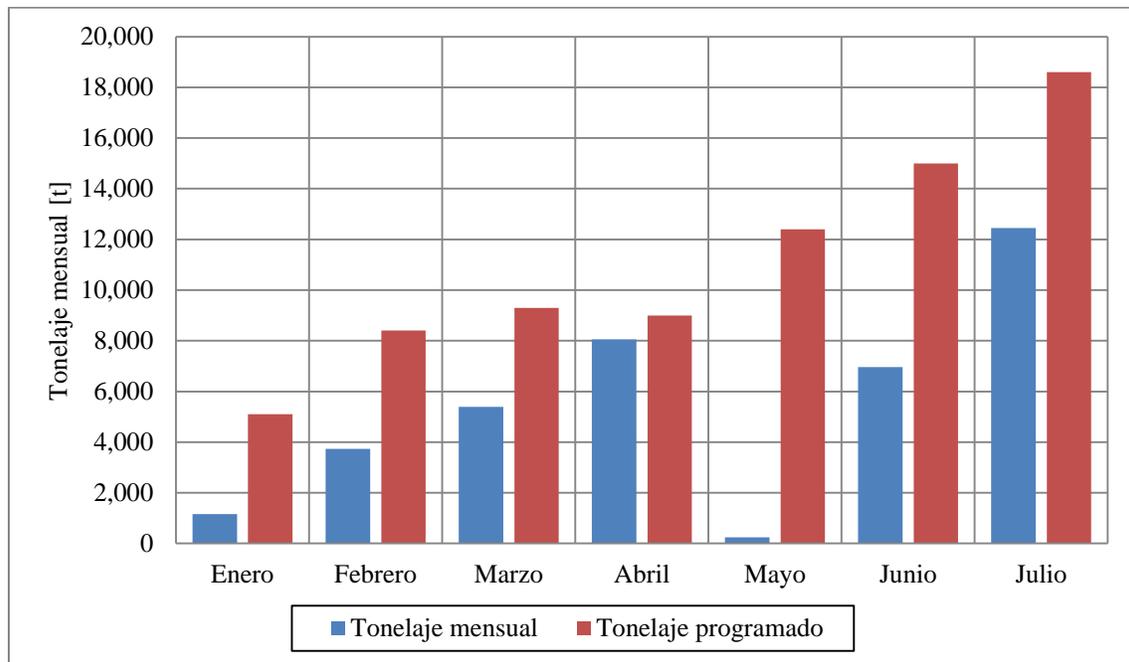


Figura 20: Tonelaje mensual extraído y tonelaje programado R2 en la Fase II DR.

Los datos presentados en la figura anterior pueden visualizarse también como el cumplimiento de extracción a nivel general de área productiva de la Fase II respecto del programa propuesto, sin importar el cumplimiento a nivel de cada punto asignado cada día, como se ve en la Tabla 9. El estudio también se extendió a las cuatro calles de la prueba industrial, detallado en la Tabla 10.

Tabla 9: Porcentaje de cumplimiento de extracción programada en la Fase II DR, período enero-julio 2018.

	%Cumplimiento
Enero	22.6%
Febrero	44.4%
Marzo	58.0%
Abril	89.4%
Mayo	2.0%
Junio	46.4%
Julio	66.9%

Tabla 10: Porcentaje de cumplimiento de en cada calle de la Fase II DR, período enero-julio 2018.

%Cumplimiento	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Promedio
C37	34.8%	61.9%	49.9%	84.8%	3.1%	42.1%	53.2%	46.1%
C39	17.1%	58.7%	36.8%	85.5%	1.9%	50.2%	75.3%	41.7%
C41	17.5%	6.8%	48.6%	80.1%	1.2%	40.2%	49.9%	32.4%
C43	6.8%	2.0%	15.9%	124.9%	2.4%	39.7%	38.5%	32.0%

El *ramp-up* se puede apreciar a nivel de fase completa, pero a nivel de calles, se presentan algunas diferencias notables. En marzo, las calles 37 y 39 disminuyeron su cumplimiento respecto de febrero, mientras las calles 41 y 43 tienen el comportamiento contrario. Lo último se debe principalmente a la disponibilidad de calles durante enero y febrero por presencia de residuos industriales sólidos (*rises*) que impedían que el equipo operara en las calles 41 y 43. Con un cumplimiento más uniforme en las calles durante marzo, se obtuvo a su vez un mayor cumplimiento a nivel de fase respecto de febrero.

En abril, se da el caso particular de que la calle 43 superó el 100% de cumplimiento, y considerando que solo dispone de cinco zanjas, es indicativo de una sobre extracción. Por otro lado, el mes de mayo en todos los resultados presenta ser una particularidad, debido a que durante ese período, el LHD tuvo problemas de teleasistencia al tener impactadas las torres de navegación que permitían el control remoto del equipo, incurriendo en una caída abrupta del cumplimiento. La situación se revirtió a partir del 9 de junio, día en que se recalibró nuevamente el sistema y pudo operar nuevamente.

Los meses de junio y julio vuelven a tener mejores cumplimientos en las calles 37 y 39, debido a que han tenido mayores instancias de reducción secundaria que mantienen área habilitada para extracción, y a la mayor aparición de puntos colgados con humedad en las calles 41 y 43 que no han podido retornar a su condición de abocado. Al compararlos a ambos, se puede apreciar también un nuevo *ramp-up*.

Se debe mencionar además, y para los análisis posteriores que pese a que se tenía contemplado un segundo equipo LHD en los primeros días de agosto, se pospuso su incorporación para octubre de este año.

4.1.2 Cumplimiento mensual por punto de extracción

El porcentaje de cumplimiento mensual por punto se puede observar en las siguientes figuras. En el caso de mayo, prácticamente hubo nulo movimiento de mineral, y, con la excepción de una zanja, ningún otro punto de extracción tuvo un porcentaje de cumplimiento superior al 10%.

Se puede evidenciar la disponibilidad de las calles con el avance de los meses y su cumplimiento mensual. En efecto, la calle 39 comenzó a tener movimiento en sus puntos en forma sistemática a partir del 9 de febrero; la calle 41, a partir del 15 de marzo; y la calle 43, a partir del 11 de abril.

Sin embargo, existen extracciones puntuales en meses anteriores a la apertura de las calles inferiores a dos baldadas (aproximadamente 26 [t]), y se encuentran registradas en las figuras, pero no son indicativas del inicio formal de la actividad en dichas áreas. La razón del bloqueo de las calles se debía a la presencia de *rises* que se tuvieron que ir despejando con el tiempo. Esta situación en particular es notoria en los puntos ubicados más al norte de las calles, ya que al servir como acceso, desde un inicio se encontraban sin *rises*, y presentan movimiento de mineral, cayendo incluso en la sobre extracción al superar el 100% del mineral planificado.

En particular, los planos siguientes presentan los puntos con distintos colores que se encuentran directamente relacionados con su cumplimiento, y se utilizó una leyenda que aparece registrada en la Tabla 11.

Tabla 11: Leyenda utilizada para marcar el cumplimiento de los puntos.

Porcentaje de cumplimiento [%]	Color
< 85%	%
85% - 95%	%
95% - 105%	%
105% - 115%	%
> 115%	%

Se pueden apreciar en las figuras puntos en rojo y sin porcentaje de cumplimiento, los que corresponden al 41 33H, y al lado patilla (este) de la calle 43. Estas zanjas fueron declaradas por el GOB para no ser extraídas, en ambos casos por presentar condiciones adversas que podrían desencadenar en un bombeo, afectando la calle 39 y que implicaría en un cierre de área y producción, y la calle 45, actualmente utilizada para el tránsito de equipos y que resultaría en una pérdida de conexión entre fases en el nivel de producción de Diablo Regimiento.

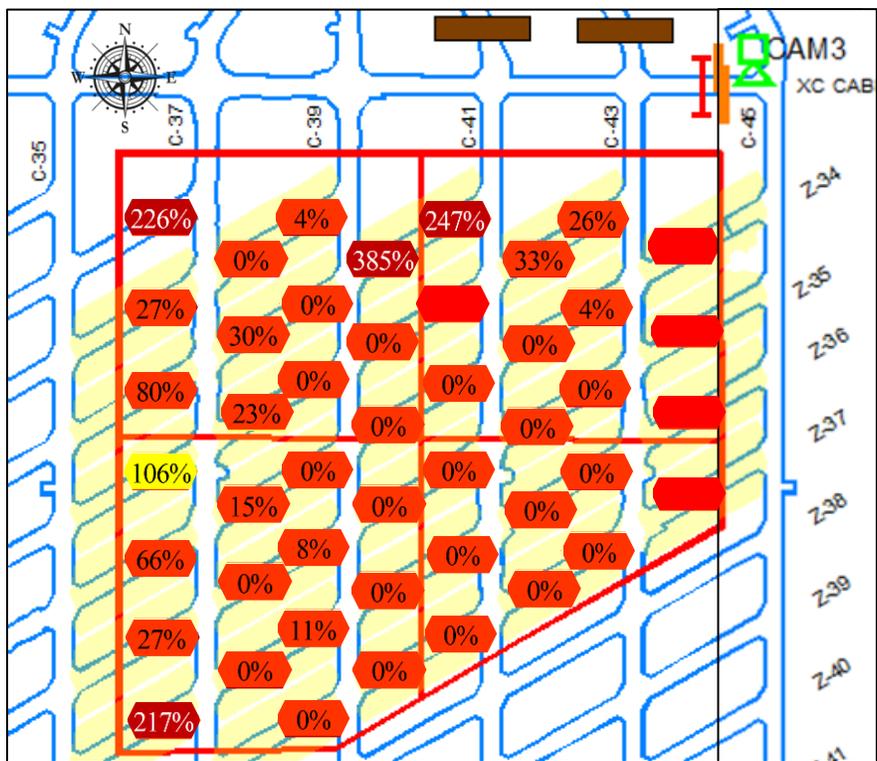


Figura 21: Cumplimiento de cada punto de extracción durante enero de 2018.

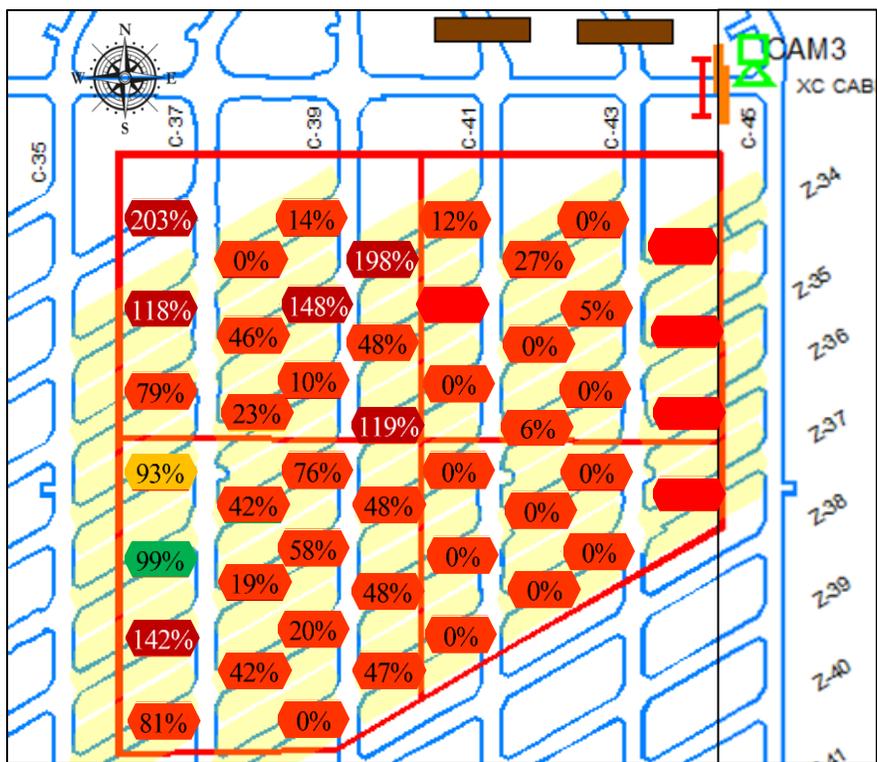


Figura 22: Cumplimiento de cada punto de extracción durante febrero de 2018.

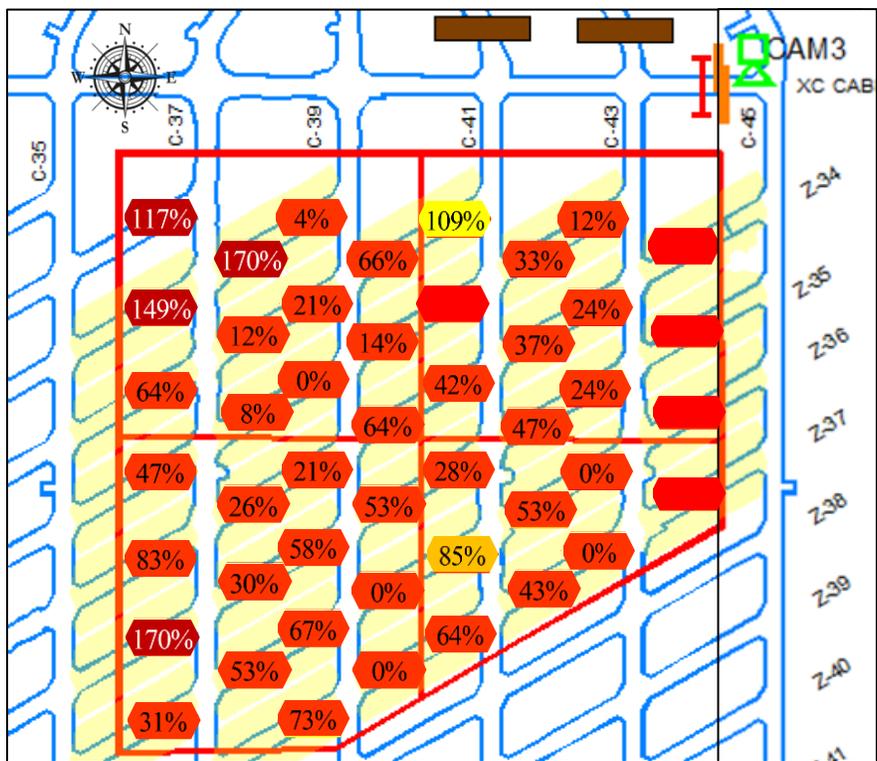


Figura 23: Cumplimiento de cada punto de extracción durante marzo de 2018.

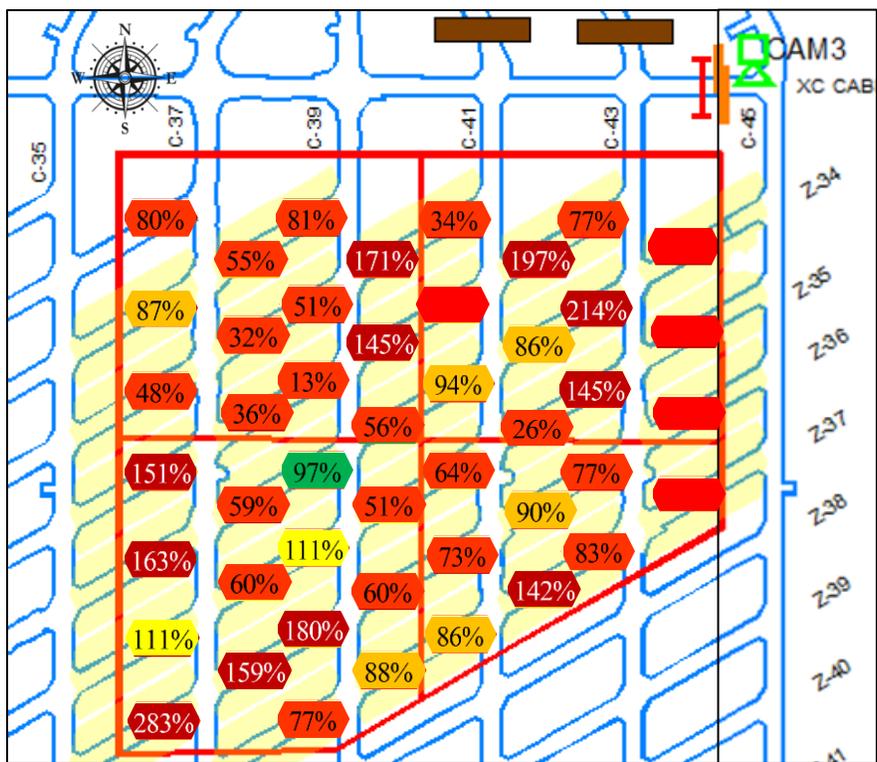


Figura 24: Cumplimiento de cada punto de extracción durante abril de 2018.

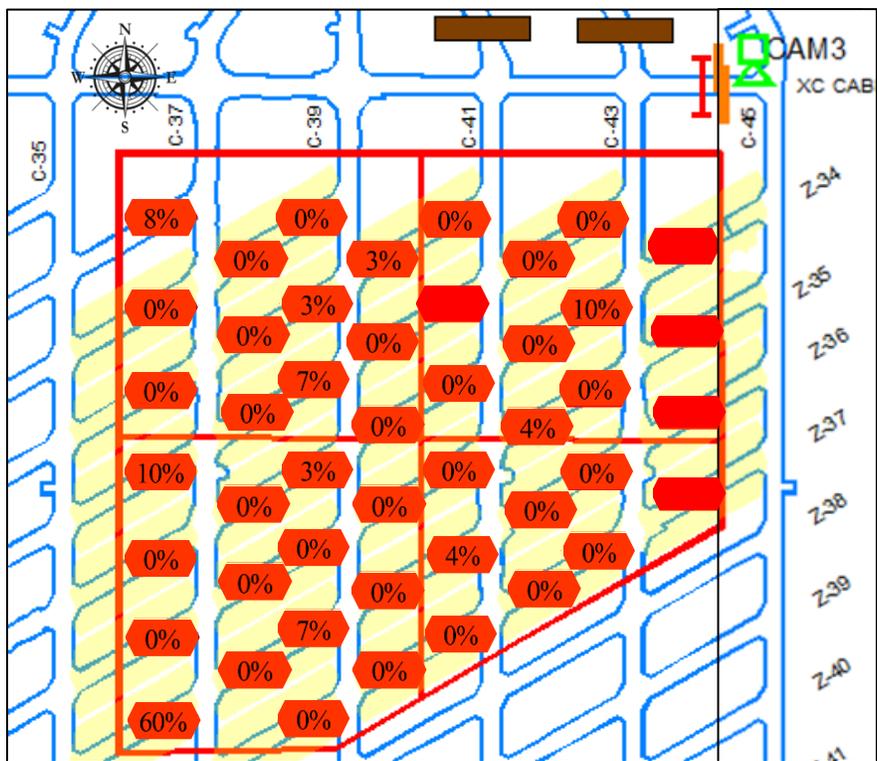


Figura 25: Cumplimiento de cada punto de extracción durante mayo de 2018.

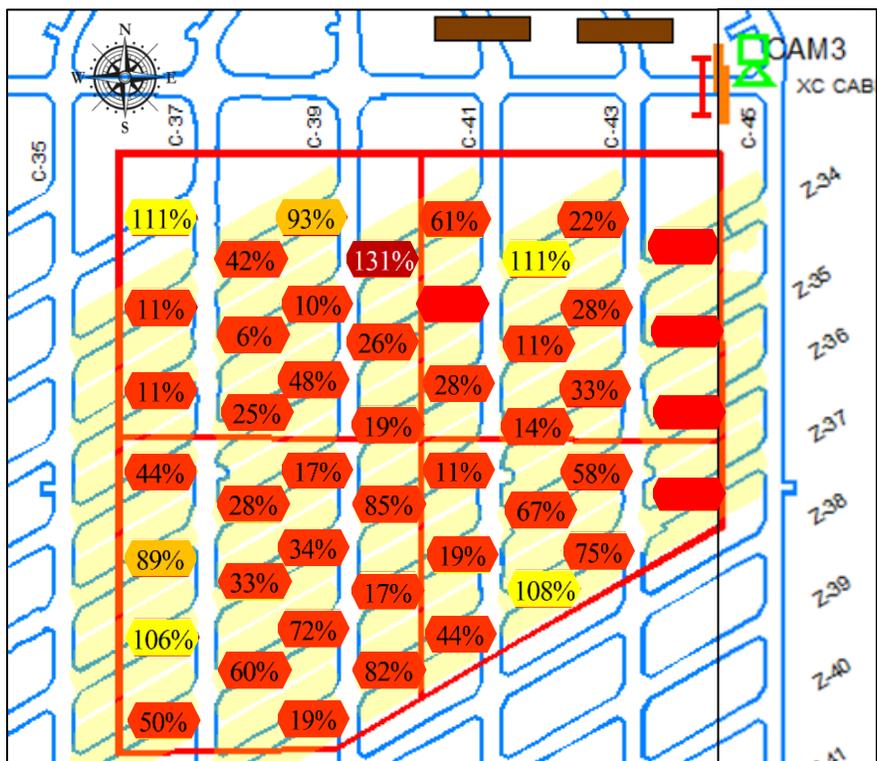


Figura 26: Cumplimiento de cada punto de extracción durante junio de 2018.

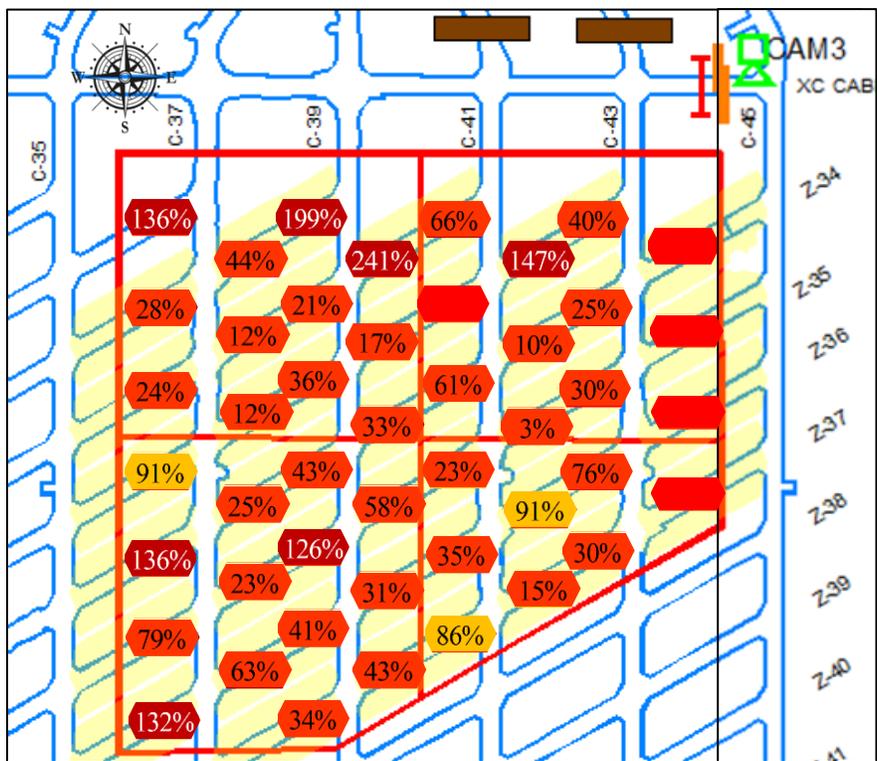


Figura 27: Cumplimiento de cada punto de extracción durante julio de 2018.

De los siete planos presentados, queda definido una vez más que abril y julio resultó ser el mes con el mejor porcentaje de cumplimiento, añadiendo además la información de que se repartió la extracción en forma equitativa a través las cuatro calles. Sin embargo, se debe notar que los puntos en ese mes presentan porcentajes de extracción mucho mayor al 100%, siendo el mayor en el 37 36H, con un 283% de cumplimiento. En estos casos, tampoco es un resultado esperado debido a la sobre extracción de la zanja, la que no solo afecta a la uniformidad de tiraje, sino que además propicia la ocurrencia de colgaduras al interferir con el proceso de hundimiento.

A modo de resumen, se presenta en la Figura 28 la evolución del número de puntos de extracción respecto de su cumplimiento y que fueron categorizados con la leyenda de la Tabla 11. Queda en evidencia que las zanjas en general no cumplen el programa planificado, o presentan sobre extracción, con casos que superan el 200%.

El mes de julio es importante de mencionar también, pues presenta la segunda mayor cantidad de puntos con sobre extracción al mes, con 7, después de abril, con 11. Coincidentemente, son los meses con mayor movimiento de mineral y cumplimiento, indicativo de que para obtener dichos tonelajes se extrajo más de lo planificado en ciertas zanjas, posiblemente las que se encontraban habilitadas o abocadas en esos períodos.

Desde mayo, el número de puntos bajo el 85% de cumplimiento se han reducido en más de 15 unidades, situación que queda explicada por la mayor cantidad de mineral disponible y suministrado por las zanjas.

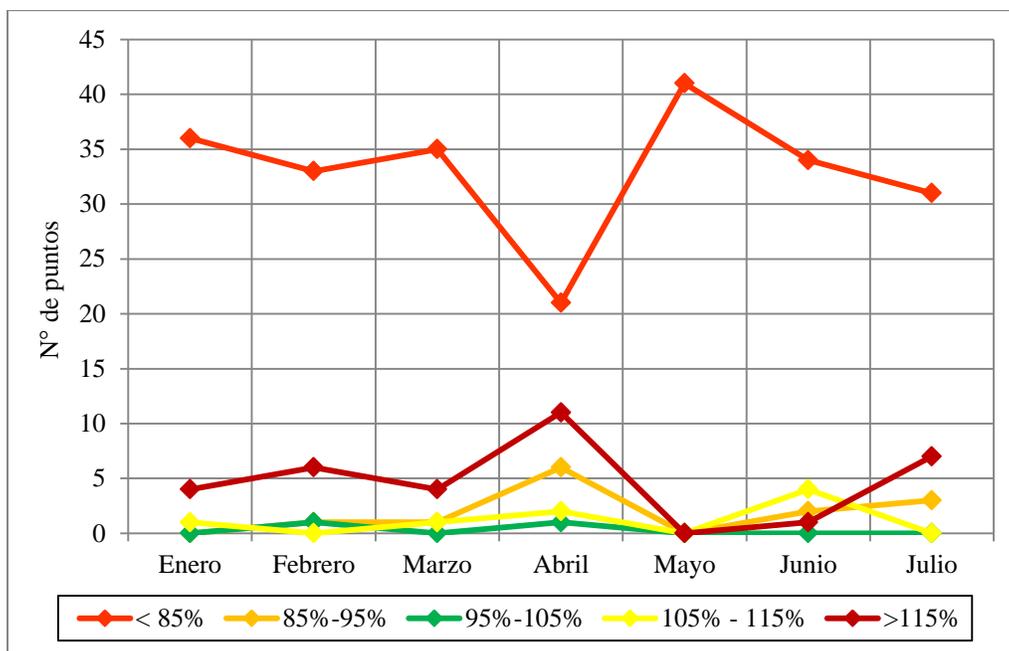


Figura 28: Cantidad de puntos de la Fase II según su cumplimiento, período enero-julio 2018.

4.1.3 Velocidades de extracción de los puntos de extracción

Una hipótesis surge frente a la ocurrencia de sobre extracción y es que se encuentre asociada a altas velocidades de extracción. El reducido tonelaje extraído en la Fase II durante el período de estudio, inferior a 10,000 [t/mes] en seis de los siete meses, podría resultar indicativo de que no es el caso, pero igualmente se realizó el análisis de velocidades para obtener una verificación más robusta.

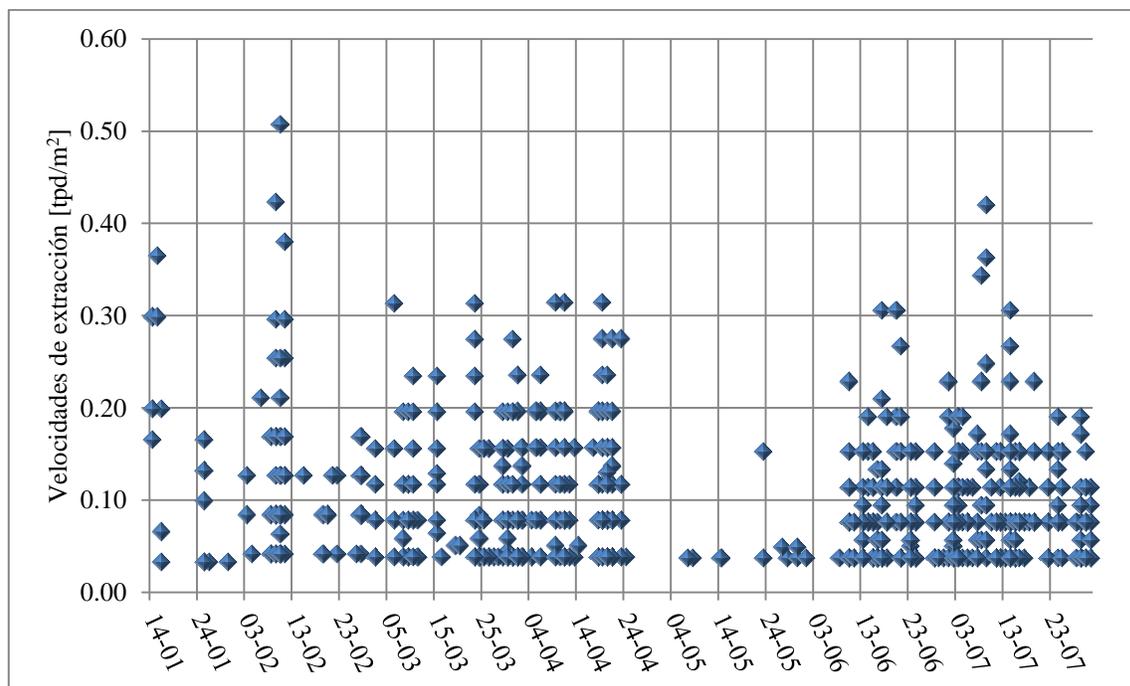


Figura 29: Velocidades de extracción diaria de cada punto disponible en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.

La Figura 29 presenta las velocidades de extracción diarias de cada zanja desde enero hasta junio. Se puede apreciar que las mayores velocidades ocurrieron en los primeros dos meses, alcanzando una zanja los 0.50 [tpd/m²], y en julio, con un caso que superó los 0.40 [tpd/m²]. La tendencia, sin embargo, en los períodos posteriores a febrero es a la baja, con puntos en marzo, abril y junio que raramente sobrepasan los 0.30 [tpd/m²].

En efecto, al revisar los promedios de velocidad de extracción mensuales de todas las zanjas en la Fase II, presentadas en la Tabla 12, se observa que los meses con mayor velocidad de extracción son enero y febrero, ambos sobre 0.10 [tpd/m²], seguidos de abril y marzo. Estos cuatro meses presentan al menos un punto con una sobre extracción superior al 150%, situación contraria a la de junio, que a su vez presenta la menor velocidad promedio, sin contar mayo. En el caso de julio, la velocidad media va al alza, y junto con ella, el aumento de puntos con sobre extracción.

Tabla 12: Velocidades de extracción promedio de todos los puntos de la Fase II Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.

Mes	Velocidad de extracción media ± desviación estándar [tpd/m ²]
Enero	0.15 ± 0.07
Febrero	0.12 ± 0.05
Marzo	0.09 ± 0.04
Abril	0.10 ± 0.04
Mayo	0.05 ± 0.02
Junio	0.07 ± 0.03
Julio	0.09 ± 0.03

La desviación estándar presente también indica, al igual que como se observa en la Figura 29, una tendencia a la concentración de los datos a partir de marzo, siendo menor en junio, dentro de los meses con equipo disponible para la extracción tele-asistida.

Sin embargo, no existe una correlación directa entre esta variable y la cantidad de puntos con sobre extracción, cuyo mayor número se concentra en abril. Una razón posible se debe a que no necesariamente tiene que existir una alta velocidad de extracción para generar sobre tiraje de una zanja, pues basta con sacar, por ejemplo, una baldada más de lo planificado al día para que a nivel mensual se dé dicha condición. Por otro lado, se cumple con el hecho de que todas las velocidades son bajísimas en comparación a otras fases y sectores de la mina. Mina Esmeralda, por ejemplo, posee una velocidad de inicio de quiebre de 0.28 [tpd/m²], una final de quiebre de 0.65 [tpd/m²], y una máxima liberado (o en régimen) de 1.00 [tpd/m²], valores muy superiores a los de la Tabla 12.

4.2 Índice de Uniformidad y uniformidad de tiraje

4.2.1 Índice de Uniformidad de Susaeta por punto

La obtención del Índice de Uniformidad para cada punto de extracción de la Fase II fue mediante la utilización de un programa ejecutable diseñado por Susaeta (ver Figura 30), en el que se suministran como datos de entrada la extracción histórica (en este caso, a partir de 2018) y la matriz de agrupación que permite definir la cantidad de puntos vecinos inactivos (presentada en la Tabla 4). El intervalo de cálculo para cada I.U. fue seleccionado cada 3 turnos (1 día) al ser la ventana de tiempo más extensa en la que existe correlación con la interacción (Susaeta, 2004b), un radio de influencia de 20 [m], y los resultados ponderados de uniformidad de tiraje se muestran cada mes.

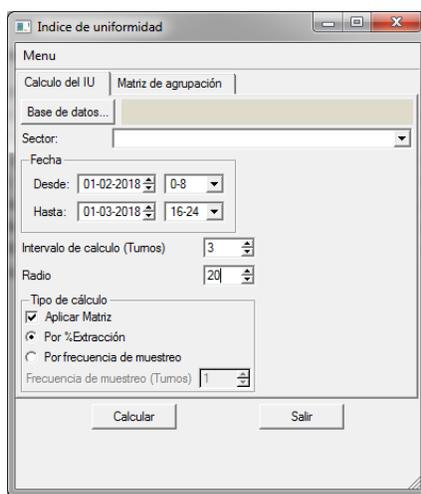


Figura 30: Pantalla inicial del ejecutable de I.U. de Susaeta.

El intervalo de cálculo refiere a la cantidad de turnos que deben analizarse por separado previo a la obtención de un I.U. promedio del punto. Así, para cada día, en los turnos C, A y B (numerados como 1, 2 y 3), el programa calcula un I.U.E. y el número de puntos inactivos de cada uno, cuyos resultados son posteriormente cruzados con la matriz de agrupación para determinar si es uniforme, semi-uniforme o no uniforme.

El radio se refiere al alcance en el que un punto influye respecto a sus vecinos: mientras más alto sea el valor, menos conservador va a resultar al considerar más puntos cercanos, pero si es muy bajo, solo logra una comparación consigo mismo, asumiendo un tiraje aislado.

La obtención del I.U. promedio se puede visualizar en las siguientes figuras, entre enero y junio de 2018. El ejecutable le asigna a cada punto, de acuerdo a un valor ponderado de uniformidad entre 0 y 100% (es decir, un I.U.E. de 1 a 0, según Tabla 3), un color que va de rojo a verde, con un matiz intermedio amarillo, en caso de que predomine la semi-uniformidad. Los puntos de la Fase II se encuentran destacados en un círculo.

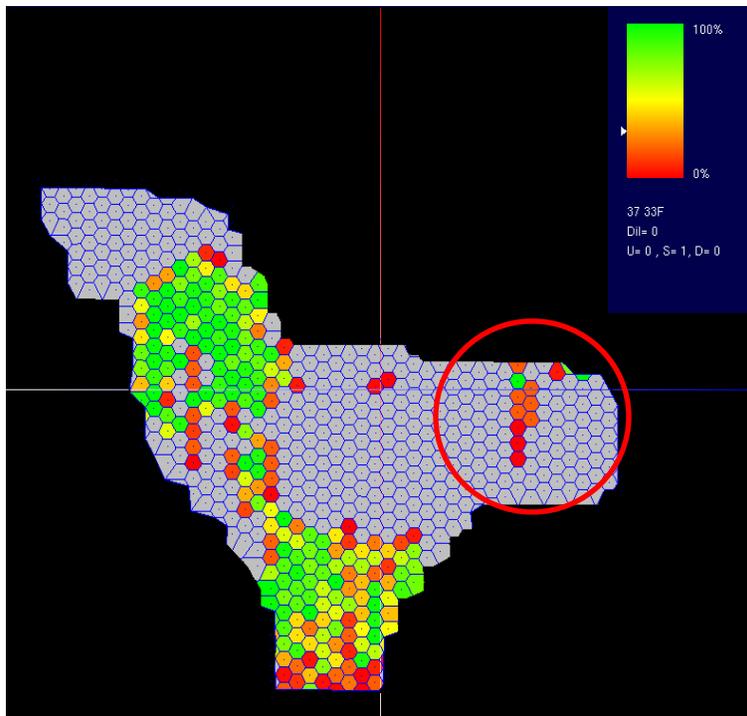


Figura 31: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, enero 2018 (3 turnos).

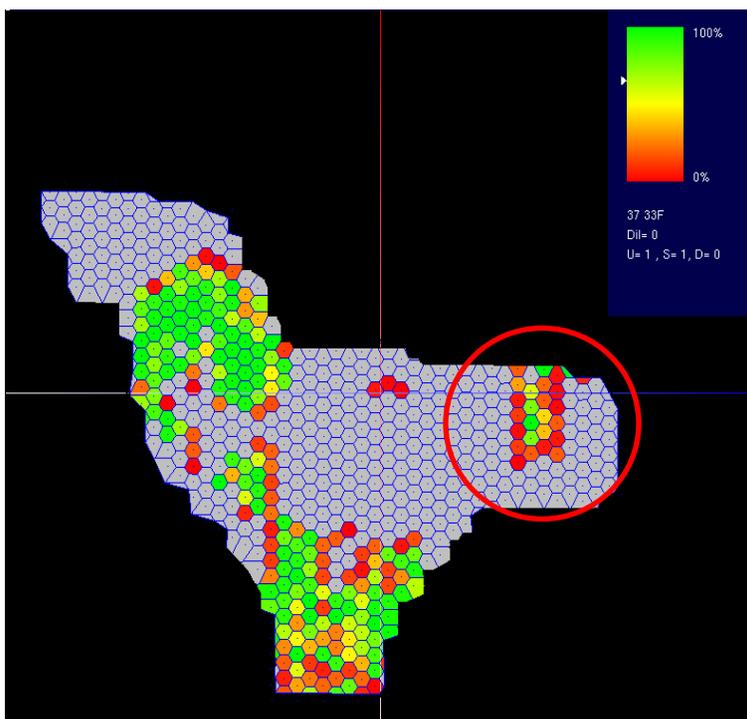


Figura 32: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, febrero 2018 (3 turnos).

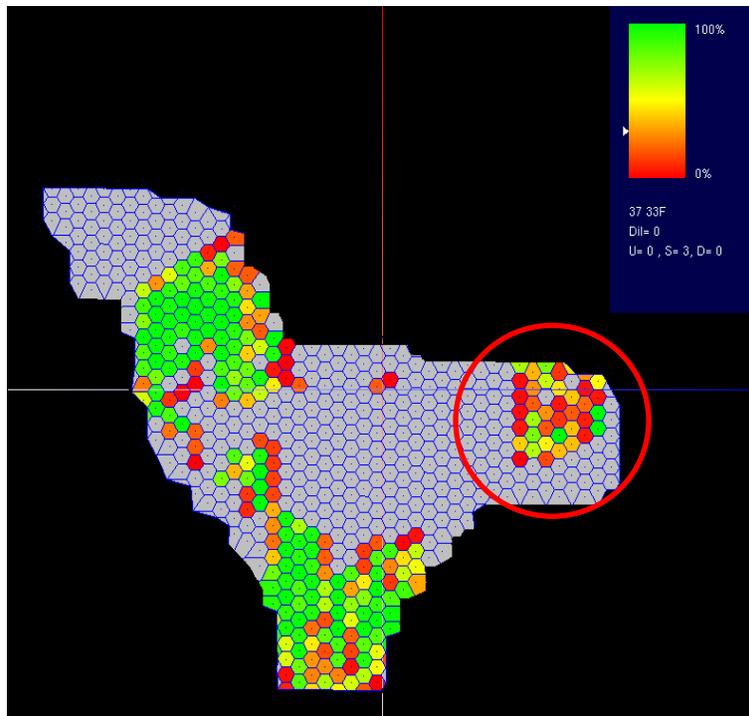


Figura 33: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, marzo 2018 (3 turnos).

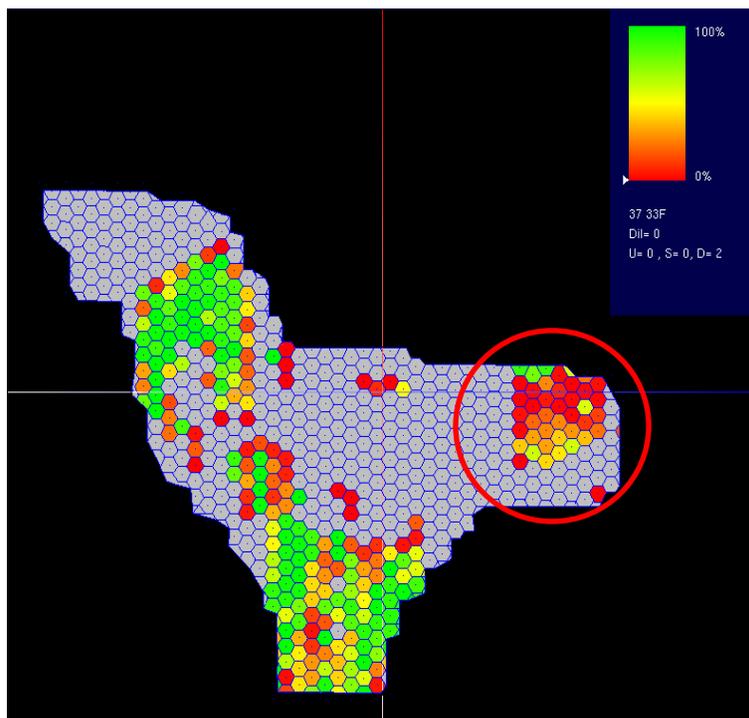


Figura 34: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, abril 2018 (3 turnos).

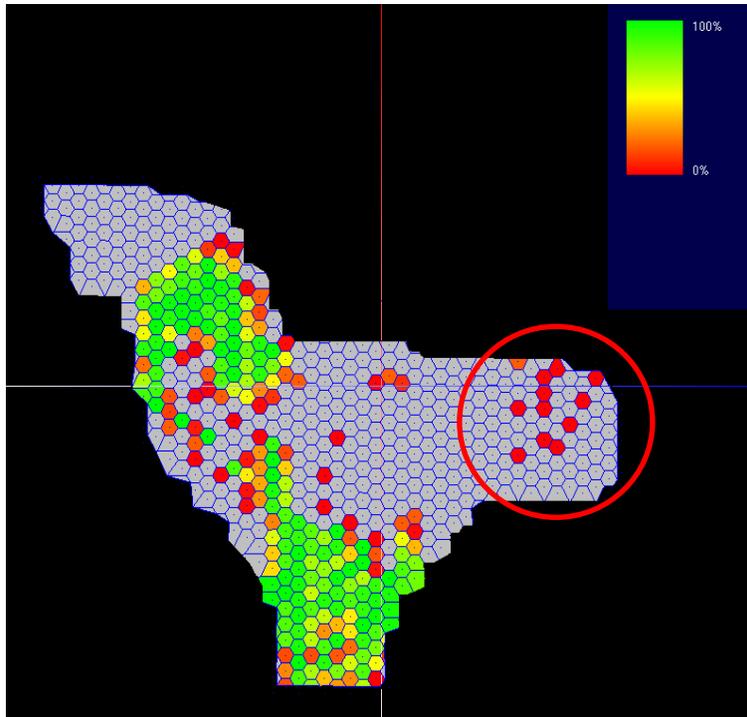


Figura 35: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, mayo 2018 (3 turnos).

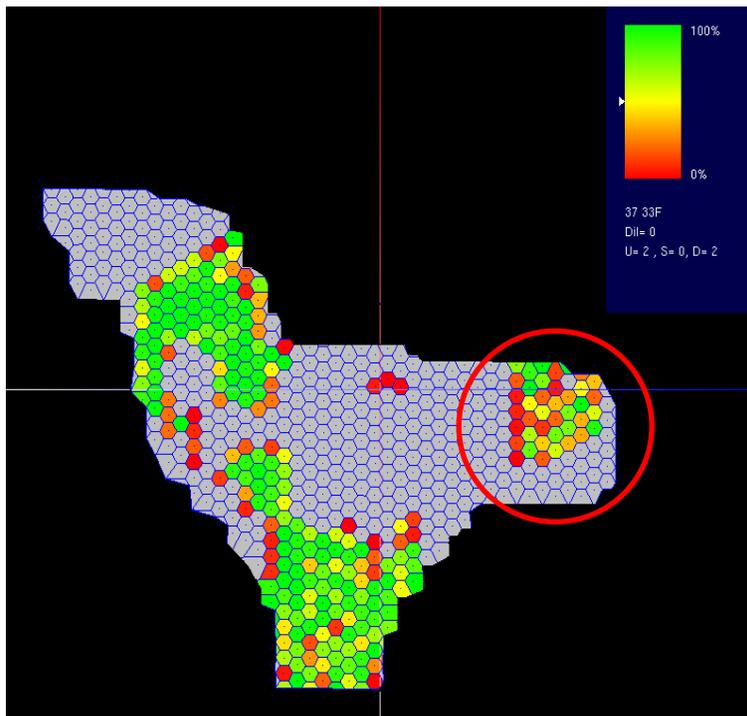


Figura 36: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, junio 2018 (3 turnos).

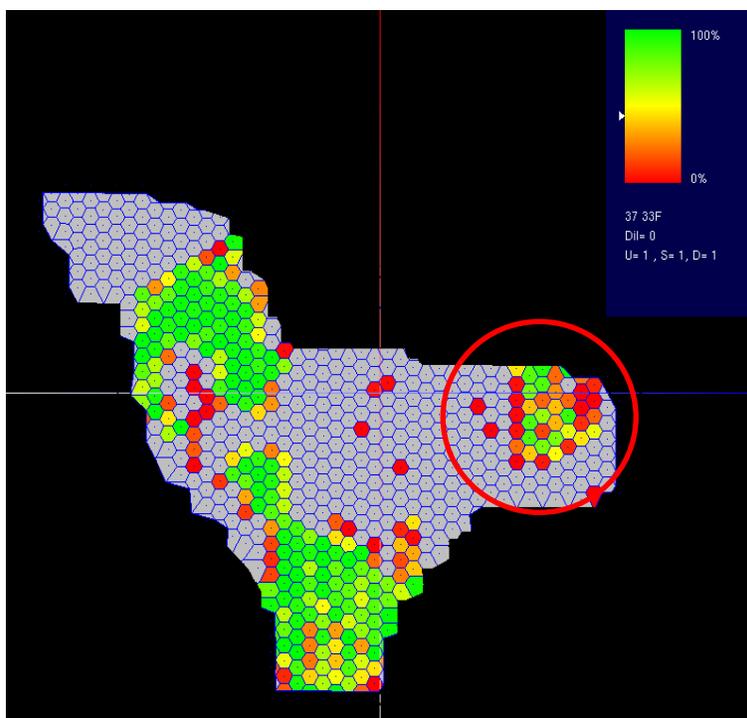


Figura 37: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, julio 2018 (3 turnos).

De las figuras obtenidas se derivan algunas observaciones, como la comparación de resultados obtenidos en la Fase II respecto de las otras fases operativas de Diablo Regimiento, Fases III y IV, en los que se pueden ver una mayor cantidad de puntos con una mayor cantidad de puntos con uniformidades cercana al 100% a nivel mensual. Las zonas con menor porcentaje de uniformidad son calles puntuales, que se ven como un conjunto vertical de hexágonos, pero la tendencia grupal es mucho mejor que la de la zona donde se realiza la prueba industrial.

La baja uniformidad de la Fase II a nivel general se explica, de acuerdo a la definición del índice calculado, por la extracción dispareja de los puntos y sus vecinos realizada en distintos turnos y días. La principal razón del porqué ocurre esta situación se centra principalmente en el estado de los puntos, ya que si se encuentran colgados, no se puede realizar extracción en ellos, y de llegar a poderse, no habría suficiente mineral para cumplir con el programa, respecto de los otros que se encuentran abocados (sin problemas de colgadura).

La existencia de los turnos de estabilización del modelo sugerido también es una causa de la baja uniformidad de la Fase II, y se encuentra relacionado con los puntos colgados. Por protocolo de seguridad, se debe esperar en las calles al menos 1 turno después de la última extracción para ingresar y realizar la reducción secundaria (lo que a su vez requiere de otro turno), y 1 turno más para volver a extraer. Si en las calles vecinas hubo extracción durante los turnos de estabilización de la calle que fue tronada, entonces eso genera en el día una desigualdad en tonelaje movido de los puntos, y por ende, un bajo I.U.

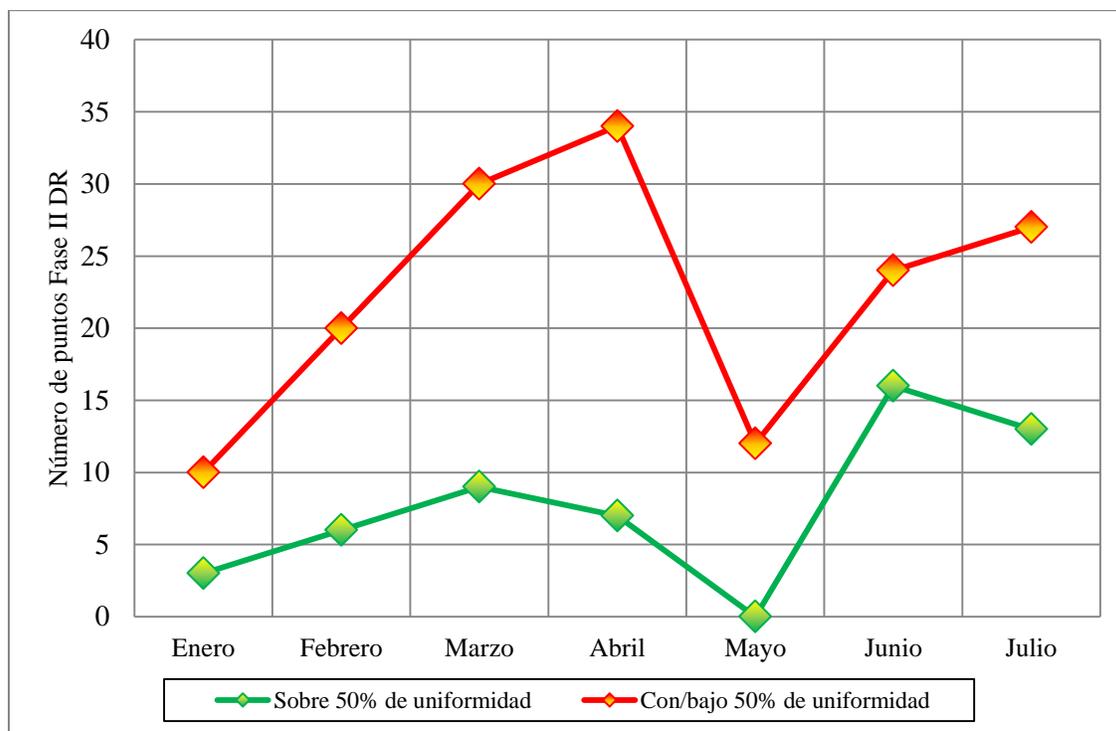


Figura 38: Número de puntos de la Fase II de Diablos Regimiento con porcentaje de uniformidad superior al 50%, e igual e inferior al 50%, período enero-junio 2018.

La Figura 38 presenta la evolución de los puntos con uniformidad sobre el 50% a través de los meses, representado en las vistas en planta anteriores como hexágonos con colores que tienen tonalidades verdosas, respecto de los que se encuentran con o bajo un 50%, representado como hexágonos con colores que tienen tonalidades rojizas. Junio resultó visiblemente el mes con una mayor cantidad de puntos uniformes, situación que se contrasta con abril, pese a que durante ese período hubo una mayor extracción y un mejor cumplimiento a nivel de fase, por calles y por puntos. Aunque abril presentó más puntos uniformes que enero y febrero, sigue siendo el mes con el peor resultado en uniformidad a nivel de fase por la alta cantidad de puntos con extracción aislada, sin considerar el área limitada disponible durante los primeros dos meses.

4.2.2 Uniformidad de tiraje

Los resultados obtenidos en la sección anterior también son determinados por la División a través del Portal de Gestión de Operaciones Mineras (PGOM), utilizando un criterio más simplificado para el cálculo del Índice de Uniformidad de Susaeta: si un punto es clasificado como semi-uniforme o no uniforme, es declarado como aislado.

Mediante la utilización del PGOM, se puede obtener uno de los KPIs requeridos para la obtención de la prueba que corresponde a la uniformidad, basado claramente en el previo cálculo de los I.U. Esta uniformidad corresponde al porcentaje obtenido entre tonelaje extraído de puntos declarados como uniformes y el tonelaje extraído total de los puntos, tanto uniformes como aislados, de cada mes.

La Tabla 13 presenta los resultados de uniformidad obtenidos de la plataforma durante los meses de estudio, siguiendo la metodología previamente mencionada.

Tabla 13: Uniformidad de tiraje de la prueba de extracción de agua-barro en la Fase II de Diablo Regimiento.

Mes	% Uniformidad
Enero	6.60%
Febrero	8.23%
Marzo	9.60%
Abril	7.85%
Mayo	0.00%
Junio	14.96%
Julio	11.13%

Los porcentajes de uniformidad son considerablemente menores que los resultados esperados por la SDI (superiores al 75%), siendo junio el único mes que alcanza aproximadamente un 15%. Estos resultados indican que la extracción en la Fase II ha sido principalmente realizada en puntos aislados, es decir, que los puntos vecinos han tenido movimiento de mineral en días diferidos.

4.2.3 Relación entre tonelaje extraído y uniformidad

Una vez realizados los análisis por separados de los tonelajes extraídos, porcentajes de cumplimiento y uniformidad de puntos durante el período de estudio, corresponde efectuar un análisis estadístico de las distribuciones de los datos obtenidos en la Fase II para buscar justificaciones acerca de los resultados anteriores, en particular durante los meses de marzo, abril y junio.

El gráfico presentado en la Figura 39 presenta el número de puntos que tuvieron registro de extracción cada día en la Fase II. La evolución de la mediana en los primeros meses se encuentra directamente relacionada con el aumento en la disponibilidad de área y es coherente con los resultados anteriores. Lo destacable aquí, sin embargo, es la varianza en las distribuciones, la que se ve en aumento con los meses. Así, en un día de marzo, la mediana en la extracción de puntos fue de 8, mientras que en un día de abril fue de 11. Junio y julio, en cambio, revierten parcialmente la alta varianza presentada en abril, con una mediana cercana a los 10 puntos de extracción en ambos casos.

Julio destaca por ser el mes con tener una máxima de 33 zanjas con movimiento durante un único día, el 14 de julio. Si bien no existe registro de un porcentaje de puntos abocados tal que permitiera una extracción uniforme, el número se justifica con la existencia de una cantidad suficiente de mineral en los puntos para completar un par de baldadas, aunque se encontraran clasificadas como colgadas. Un ejemplo de estos casos es la extracción de mineral necesario para tener una mejor condición al momento de realizar una reducción secundaria. La moda en ese día de julio fue, en efecto, de 3 baldadas.

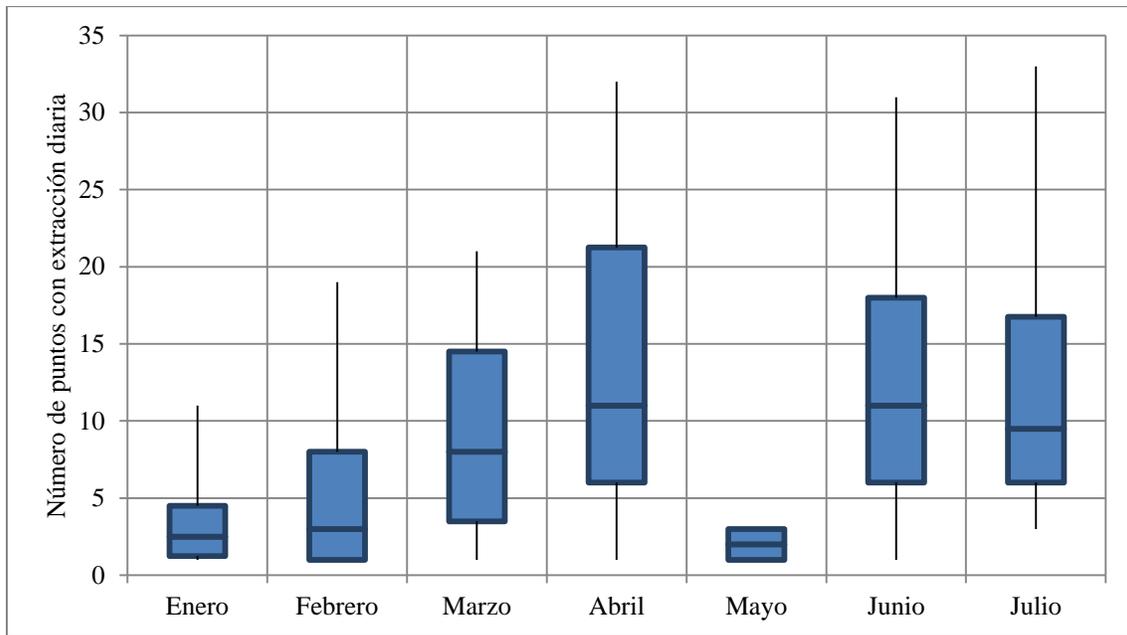


Figura 39: Diagrama de cajas y bigotes del número de puntos con extracción al día en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.

Aunque enero y febrero tienen una menor varianza que los meses posteriores (sin contar mayo), no se pueden comparar directamente, ya que en esos meses no se tenían habilitadas todas las calles. Esto también se aplica al caso de mayo, debido a su extracción puntual

El análisis también fue realizado para los tonelajes extraídos al día, otro parámetro considerado para el cálculo del I.U., y se visualiza en la Figura 40. Al igual que con el gráfico anterior, por sí solo no se puede obtener mucha información, pero complementado con los resultados anteriores, se pueden observar notorias diferencias.

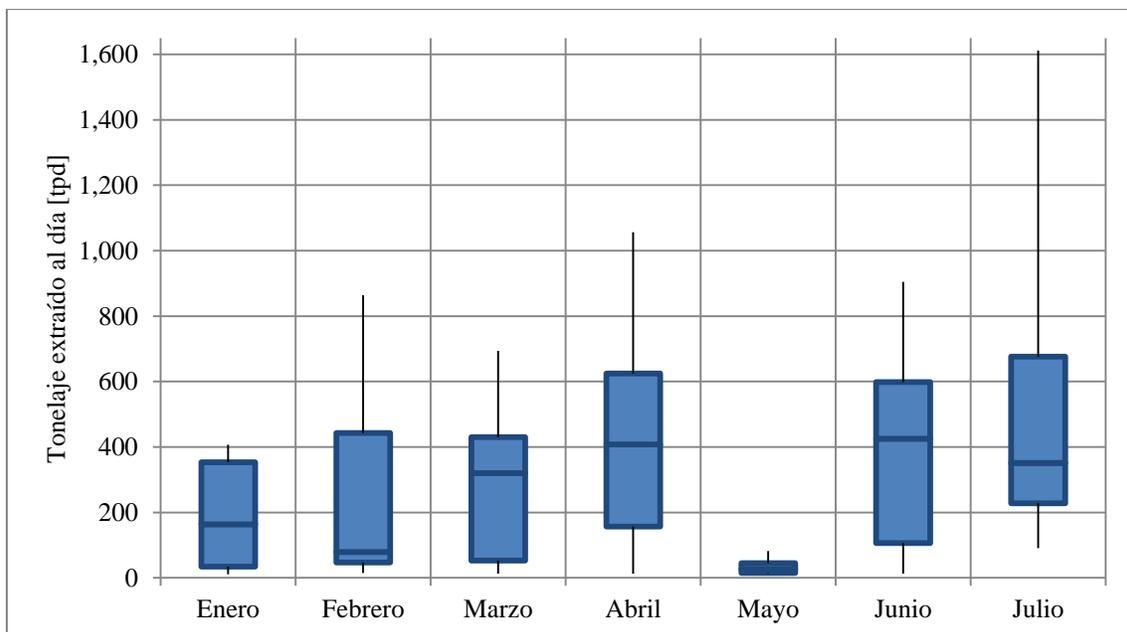


Figura 40: Diagrama de cajas y bigotes del número de tonelaje extraído al día en la Fase II de Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.

Por un lado, y por observación directa, la mediana de febrero (79 [tpd]) es inferior a la de enero (164 [tpd]), explicado por una mayor cantidad de días con una extracción reducida. La mayor varianza de febrero, superando incluso a marzo, implica que, pese a que hubo menor cantidad de puntos con movimiento de mineral, la extracción en ellos fue mayor.

Por otro lado, abril presenta el caso de tener la mayor varianza en términos de número de puntos con movimiento, y la segunda mayor varianza en extracción de mineral diario, superado solo por julio. Al considerar el hecho de que es uno de los meses con peor desempeño en uniformidad implica que durante ese período hubo movimiento de mineral en zanjas alejadas entre sí y a una alta tasa de extracción, evidenciado también por los puntos con sobre cumplimiento.

En el caso de junio, presenta el mes con la mejor uniformidad dentro del período de estudio, y el análisis revela una varianza que se encuentra por debajo incluso que febrero. En caso contrario a abril, se infiere que en este período hubo movimiento de mineral en zanjas aledañas, y a una tasa de extracción controlada, corroborado por la casi nula presencia de puntos con sobre cumplimiento y al número de zanjas con un porcentaje de uniformidad superior al 50%.

Finalmente, julio es también interesante de notar al ser el mes con mayor tonelaje extraído, con una mediana de 11 puntos con extracción al día, y con la segunda mayor varianza, la que es superada solo por abril. Respecto del tonelaje diario, la máxima varianza respecto de todos los demás meses queda explicada por registros puntuales que superan las 1,000 [tpd], y otros inferiores a 100 [tpd]. Las razones de estas extracciones varían desde la disponibilidad de equipo durante algunos turnos por mantenciones hasta el alto porcentaje de puntos colgados en la Fase II y la disponibilidad de la calle.

En el Anexo D se encuentra disponible el detalle del análisis estadístico realizado de ambas variables de operación entre enero y julio de 2018.

4.3 Disponibilidad y estado de puntos

4.3.1 Estado previo a la prueba industrial

El área definida dentro de la original Fase II fue escogida para la realización de la prueba industrial por la continua aparición de puntos con agua-barro durante el período de extracción manual. La figura siguiente presenta la evolución de los estados operativos cerrados Agua-Barro (B), Agotado (A) y Cortado Abandonado (I) de los 42 puntos que conforman la zona donde se extrae actualmente en forma teleasistida. La explosión de puntos declarados como Agua-Barro ocurrió entre el primer trimestre de 2015, superando los 10 casos, y el último trimestre de 2016, superando los 25 casos. Cabe destacar que los puntos declarados con un estado operativo cerrado no presentan ningún tipo de extracción.

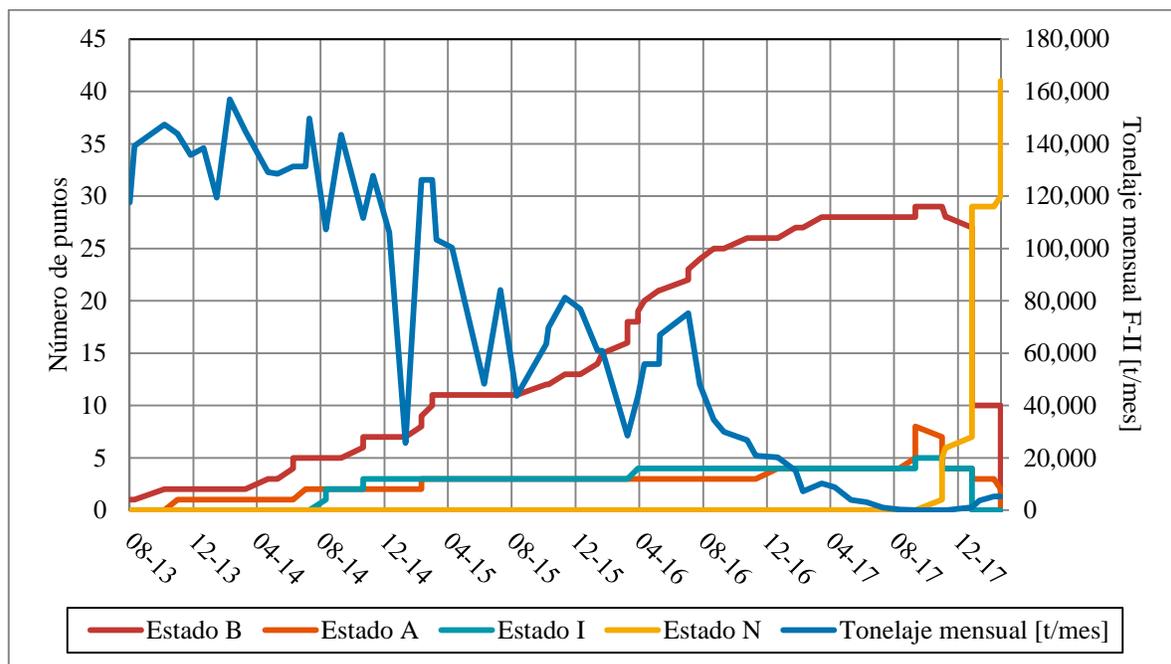


Figura 41: Evolución del estado operativo de los 42 puntos que conforman parte de la Fase II utilizada para la extracción teleasistida, y tonelaje mensual, previamente extracción manual, período 2013-2018.

El estado N (Extracción Telecomandada), por otro lado, presenta la transformación de estado operativo de 41 de los 42 puntos a finales de 2017, y durante los primeros meses de 2018. Se debe notar que los primeros puntos habilitados para la extracción teleasistida en noviembre de 2017 fueron predominantemente los que no presentaban el estado B. La descripción más detallada de los estados definidos en División El Teniente se encuentra en el Anexo B.

De esta manera, se puede observar que el cierre de puntos por área cerrada data de finales de 2013, algunos sin movimiento por hasta cuatro años. La disminución del tonelaje mensual global de la Fase II también pone en evidencia el impacto de los puntos con presencia de agua-barro, desde extracciones superiores a las 120,000 [t/mes] en el primer trimestre de 2015, a cerca de 20,000 [t/mes] en el último trimestre de 2016.

4.3.2 Colgadas en los puntos de la Fase II

Si bien el estado operativo formal y actual de los puntos de la Fase II sigue siendo de Extracción Telecomandada, su estado en terreno ha ido cambiando en el tiempo, principalmente debido a la aparición de colgadas por mineral consolidado.

La aparición de colgadas en los puntos en la Fase II es otro parámetro importante al momento de realizar un análisis acerca del cumplimiento y la uniformidad de los puntos. Así, si bien la baja uniformidad presentada en los primeros meses se debía a la baja disponibilidad de los puntos, a partir de abril la situación dependía directamente del estado de las zanjias, ya que al encontrarse colgadas no se podía efectuar la extracción programada.

El análisis efectuado para el estado de puntos considera principalmente junio y julio, meses en el que se formalizaron las inspecciones en terreno, y considera únicamente los estados de abocado y colgado. En los puntos que caen en la primera categoría ocurre una programación y posterior extracción sin inconvenientes a nivel de carta de tiraje, mientras que los que caen en la segunda categoría existe una posibilidad de que se le asigne un programa parcial y se extraiga un tonelaje reducido.

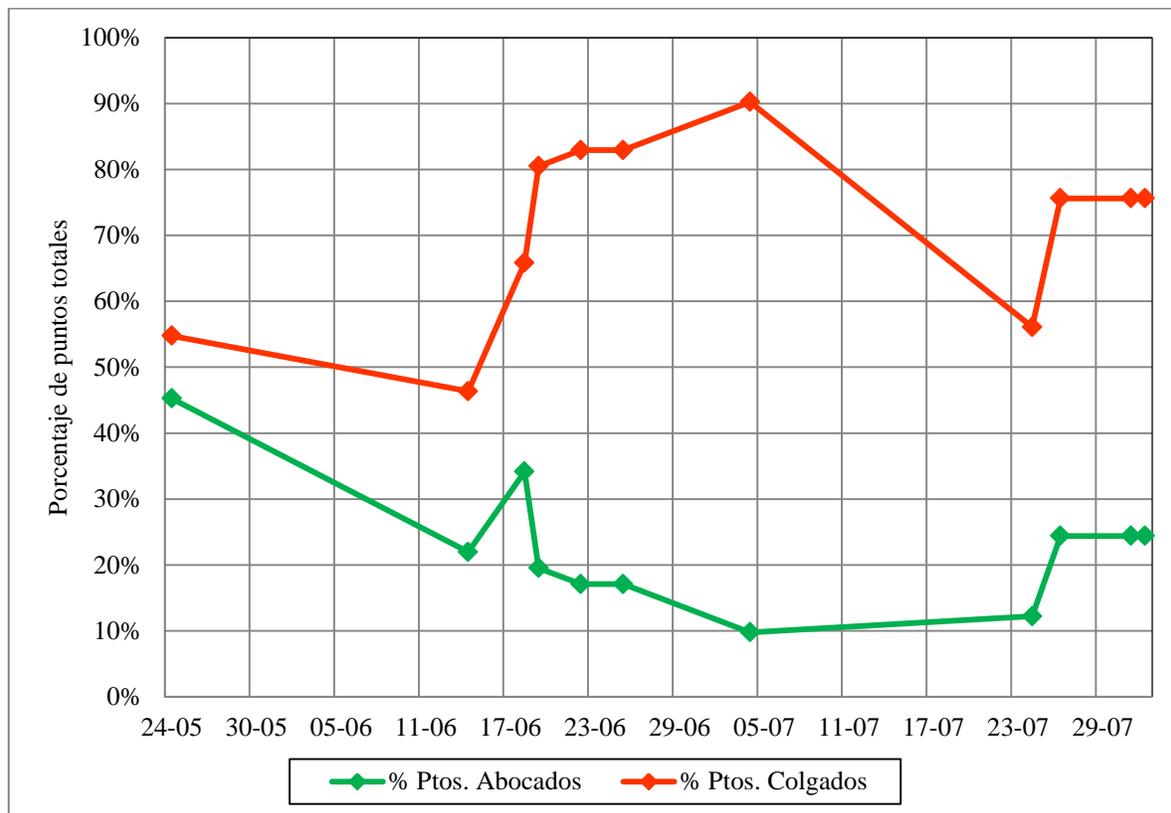


Figura 42: Evolución del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II, período junio-julio 2018.

La Figura 42 presenta el comportamiento de las zanjas en estudio a través de las diferentes inspecciones realizadas. Se puede apreciar un claro aumento de puntos colgados a partir de la segunda quincena de junio, que coincide con el retorno del equipo a las labores de extracción tele-asistida. A finales de dicho mes, se alcanzó un máximo de 90% de área colgada, implicando que se disponía de muy pocos puntos con la condición de abocado para extraer mineral. Los esfuerzos realizados por el equipo de reducción secundaria específico para la Fase II designado a partir de la segunda quincena de junio han revertido y controlado en parte la aparición de más zanjas colgadas, realizando quemadas con mayor frecuencia, y manteniendo en promedio 10 puntos abocados.

La clasificación rígida de abocado o colgado influye en el gráfico de área colgada presentada, pues las inspecciones efectuadas únicamente tenían aplicación para la reducción secundaria que se debía realizar en los puntos. Así, algunos puntos clasificados con el estado colgado podían tener mineral programado para su extracción, al estar en realidad, por ejemplo, con estados intermedios (como los que se detallan esquemáticamente en la Figura 43), pero que de todas maneras requerían la utilización de explosivos para alguna descolgadura. En general, se dio la tendencia de que puntos semi-abocados eran considerados también abocados, y los estados de no abocados eran considerados colgados.

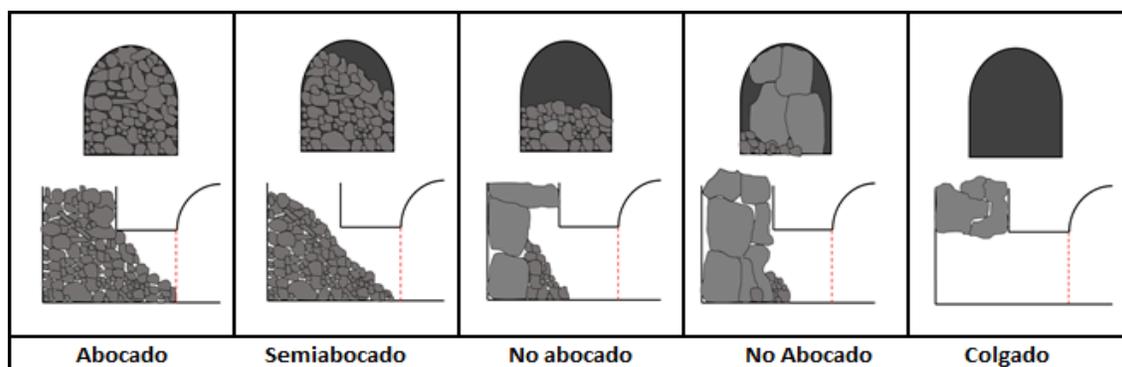


Figura 43: Representación esquemática de los estados en terreno de las zanjas y su disposición del mineral.

Para complementar el estudio anterior, también se realizó un análisis específico de uniformidad de cada semana de junio y julio, para la observación de este parámetro y su relación con el número de puntos abocados y colgados, los que se encuentran en el Anexo E. La Figura 44 presenta el número de zanjas con un porcentaje de uniformidad sobre 50% y el contraste con aquellos que tenían igual o bajo 50%.

Los resultados obtenidos en la Figura 44 junto con los de la Figura 42 presentan en general el comportamiento esperado: una baja uniformidad semanal que se encuentra asociada a un alto porcentaje de puntos colgados. Esto quiere decir que al haber pocas zanjas abocadas para la extracción, y al encontrarse distanciadas unas de otras (a lo menos lejos de la vecindad), se produce movimiento de mineral en forma aislada.

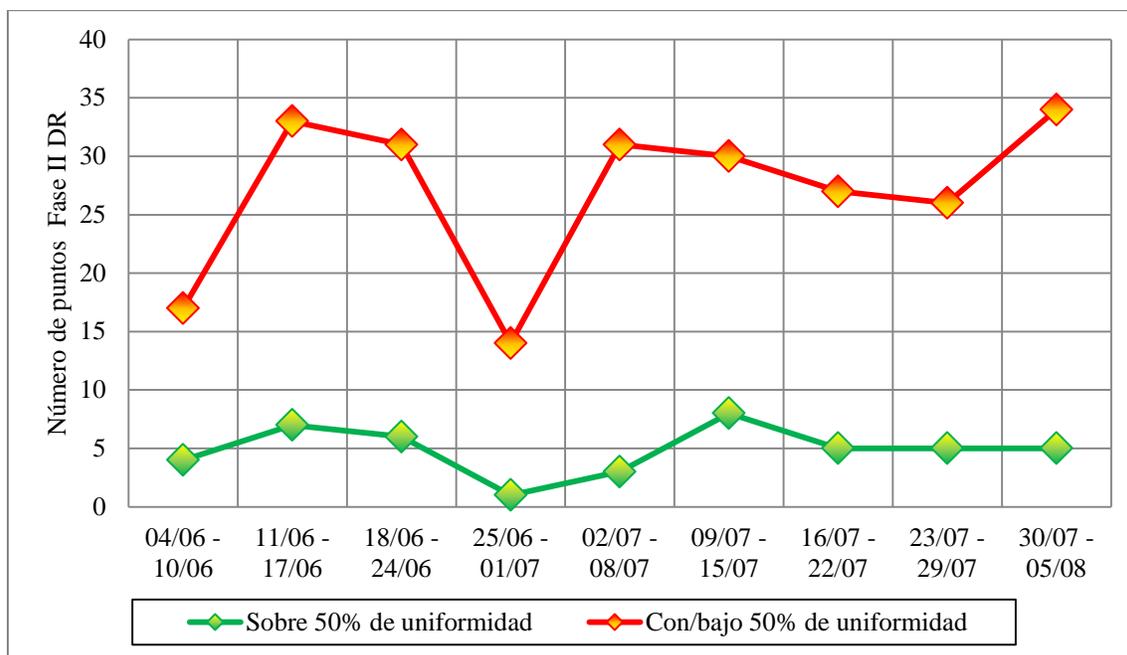


Figura 44: Número de puntos de la Fase II de Diablo Regimiento con porcentaje de uniformidad superior al 50%, e igual e inferior al 50%, junio-julio 2018.

Asimismo, se debe tener en cuenta la disposición de los puntos abocados en el plano y su cercanía entre ellos para determinar el porcentaje de uniformidad. En este caso, y como se ve tanto en la Figura 36 y Figura 37 a nivel mensual, como en el Anexo E a nivel semanal, durante junio y julio ocurrió una mayor extracción en puntos que resultaban ser vecinos entre ellos, aumentando por tanto la uniformidad respecto de otros meses, pese al alto porcentaje de puntos colgados registrados.

El promedio de puntos sobre el 50% de uniformidad semanal durante junio (4.5) fue menor al de julio (5.2), lo que aparentemente resulta contradictorio con la uniformidad mensual obtenida, con junio teniendo un porcentaje mayor al de julio. Sin embargo, se debe tener en cuenta al menos dos factores que explican este escenario: la disposición de los puntos declarados uniformes en el plano, previamente mencionado, y el tonelaje extraído en cada uno de ellos. Así, si bien se observa en el Anexo E que se presenta una mayor concentración de zanjas uniformes en julio y más conectadas unas de otras que en lo que se ve en junio, el tonelaje extraído de esos puntos durante junio fue mayor, aumentando el porcentaje mensual de uniformidad en dicho mes.

Por lo tanto, se debe tener precaución al momento de concluir respecto de los resultados globales de colgaduras y uniformidad, pues en primer lugar el número de puntos abocados o colgados no representa siempre a las mismas zanjas en el tiempo, y varían dependiendo de la frecuencia realizada entre la reducción secundaria y la posterior extracción que provocan nuevas colgaduras; en segundo lugar, la uniformidad mensual puede camuflar resultados puntuales como la variación entre el número de zanjas y el tonelaje extraído; y por último, las colgaduras generan por cierto una baja uniformidad a nivel de fase, pero también dependen de su ubicación y grado de interferencia con vecinos.

4.3.3 Eventos de agua-barro en la Fase II de Diablo Regimiento

Una vez obtenidas las variables de extracción necesarias para la revisión de la primera hipótesis de los estudios de ingeniería, las que son velocidad de extracción y uniformidad, corresponde observar los eventos de agua-barro que ocurrieron durante el período de estudio.

Durante el período de estudio ocurrieron tres deslizamientos y un bombeo de agua-barro, los que se detallan a continuación junto con antecedentes recopilados y análisis.

1) Deslizamiento de mineral - 39 35F - 03/05/2018

El hecho fue descubierto durante una inspección en terreno de la Fase II, una vez finalizado el turno de estabilización. Se observó un deslizamiento de talud en el punto 39 35F que fue informado a la Superintendencia Mina Central (SMC), a cargo de las operaciones en Diablo Regimiento y Esmeralda, y al Grupo Operacional Barro (GOB). Tras considerar los protocolos necesarios, se liberó el sector donde ocurrió el incidente. Al ocurrir durante el turno de estabilización, no se encontraban trabajadores ni supervisores en la Fase II por protocolo de seguridad, y por tanto no hubo personal expuesto.



Figura 45: Fotografía del punto 39 35F tomada el 3 de mayo de 2018, mostrando el deslizamiento.

A continuación, se presentan en detalle algunos análisis realizados al punto 39 35F y a sus vecinos durante la semana previa al evento de deslizamiento. Para el cálculo de velocidades de extracción, se utilizaron áreas de influencia definidas como hexágonos.

Como se describió en la Sección 4.2.2, abril resultó ser uno de los períodos más deficientes en términos de uniformidad relativo a los otros meses, principalmente debido a la alta presencia de puntos con extracción con bajo porcentaje de uniformidad. Esta situación también queda evidenciada en la Figura 46, en el que se aprecia el predominio de movimiento de mineral aislado en la vecindad donde ocurrió el evento.

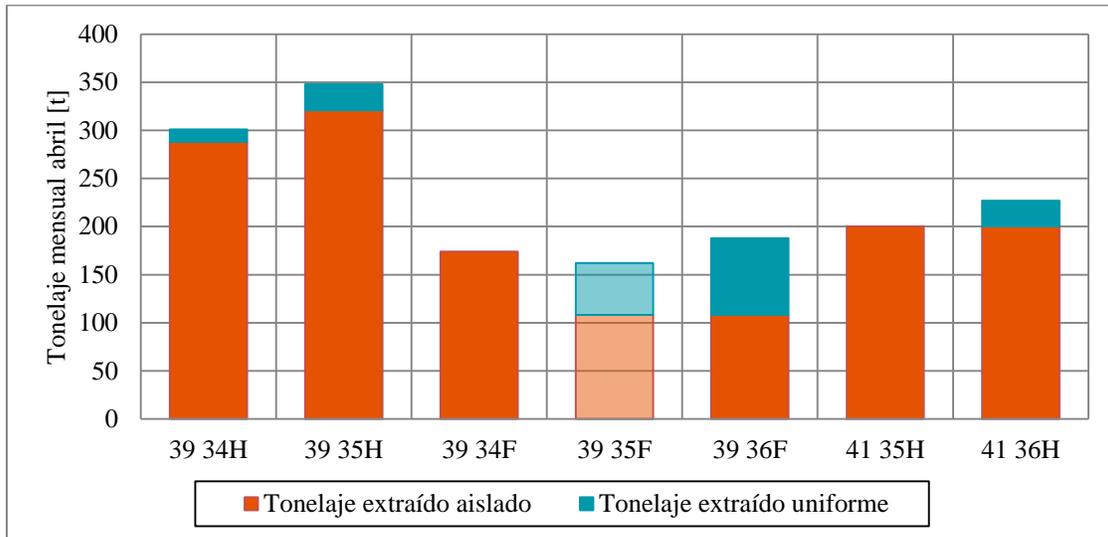


Figura 46: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 35F y sus vecinos durante abril de 2018.

A partir de allí, se puede obtener la uniformidad puntual, graficada en la Figura 47 junto a los hexágonos que conforman el área de influencia de cada zanja, y la uniformidad del conjunto o clúster, cuyo valor es de un 13%.

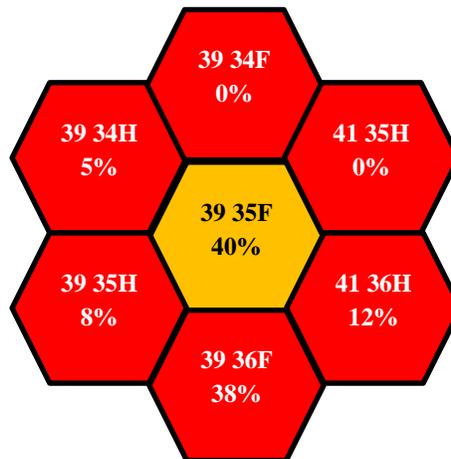


Figura 47: Áreas de influencia y uniformidad (02/04/18 – 02/05/18) del punto 39 35F y sus seis vecinos.

Los antecedentes indicaron que la última extracción realizada por el punto 39 35F y sus vecinos fue el día 23 de abril, 10 días antes del deslizamiento. La Figura 48 destaca precisamente a la zanja en estudio, la que tuvo una velocidad constante de 0.08 [t/m²/día], tanto en los últimos días como en el promedio mensual de abril.

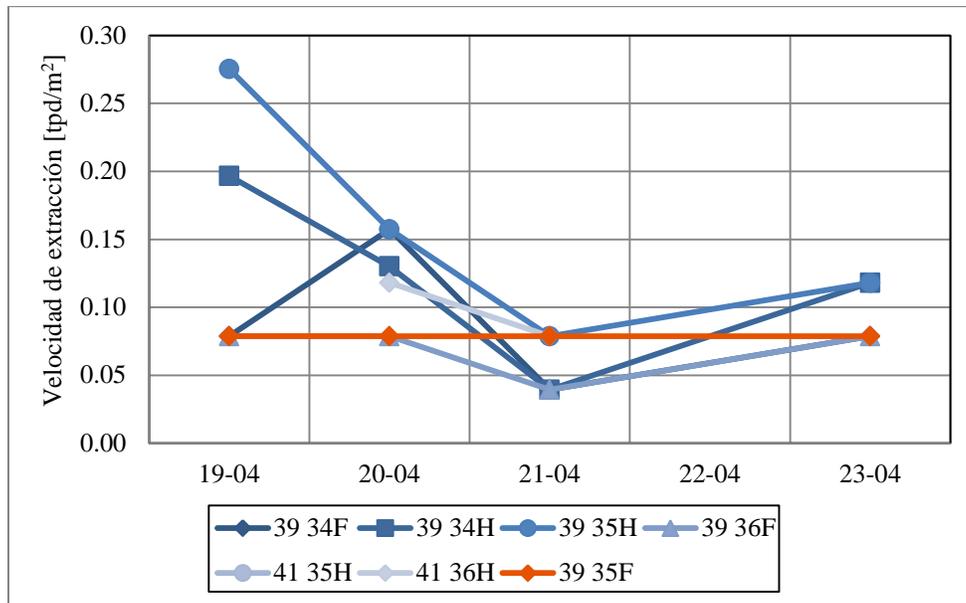


Figura 48: Velocidades de extracción del punto 39 35F y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

Este caso resulta importante para realizar un primer comentario de la hipótesis sobre mayor ocurrencia de eventos de agua-barro propuestos por los estudios de ingeniería, pues únicamente cumple la condición de baja uniformidad, pero no la de una alta velocidad de extracción. De acuerdo con los estudios realizados por el GOB, la condición mínima de velocidad para que se genere una condición que favorezca un evento debe ser superior a la de $0.6 [t/m^2/día]$, valor que no fue alcanzado por ninguno de los puntos.

Respecto de la segunda hipótesis propuesta, que se refiere al de consolidación, efectivamente ocurrió un cese en la extracción de los puntos, generando una condición apropiada para la formación de arcos estables. Sin embargo, queda fuera de su alcance la razón de la ocurrencia del evento de deslizamiento dadas estas condiciones.

2) Deslizamiento de mineral - 39 31H - 10/07/2018

El incidente fue descubierto por un supervisor y un operador al ingresar a la calle 39, observando un deslizamiento desde la zanja 31H. La calle fue confinada, se dio aviso a los Jefes de Proceso y de Unidad de Diablo Regimiento y al GOB y después de una evaluación de la zona en terreno, se levantó la restricción y se monitoreó el punto.



Figura 49: Fotografía del punto 39 31H tomada el 10 de julio de 2018, mostrando el deslizamiento.

Al igual que en el primer caso, se obtuvo la cantidad de tonelaje extraído en cada una de las zanjas durante los nueve días de julio previos al deslizamiento. Como se aprecia en la Figura 68, la extracción en el punto 39 31H fue completamente aislada, así como en sus otros vecinos. Lo destacable de esta situación corresponde a que la zanja del evento alcanzó las 1,000 [t], seguido por el vecino 39 32F cercano a las 900 [t], y diferenciándose de los demás por más de 800 [t] extraídas.

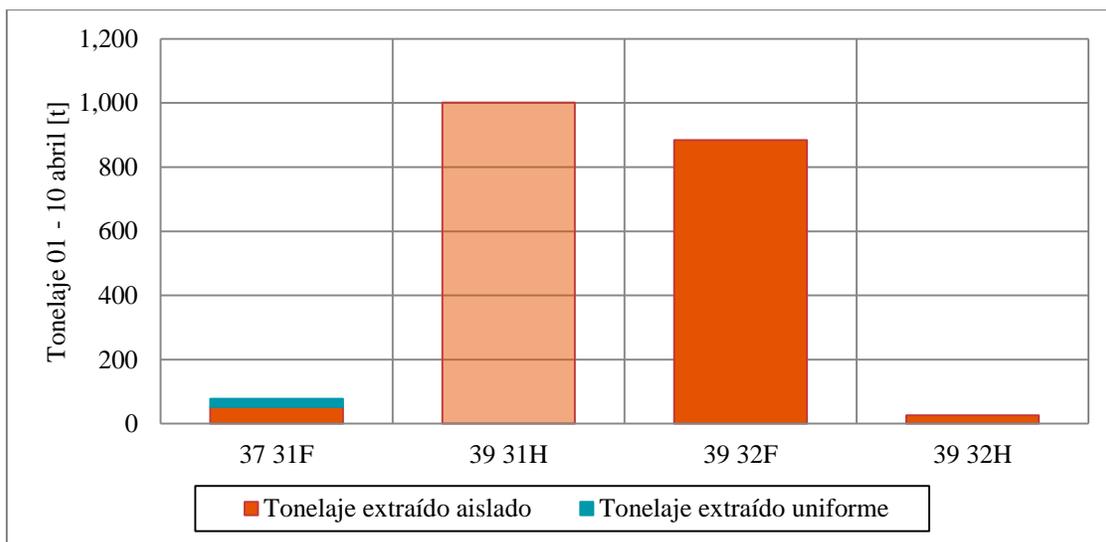


Figura 50: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 31H y sus vecinos, período 01 - 10 abril de 2018.

En efecto, el análisis de uniformidad del conjunto de puntos entrega un 1% en total durante el mismo período. A nivel de zanja, como se ve en la Figura 69, solo el punto 37 31F presentó en algún turno un movimiento de mineral uniforme con sus vecinos. Sin embargo, resulta relevante completar el resultado con el de la Figura 68, pues aunque 33% aparenta ser el mejor punto del clúster, solo tuvo 26 [t] consideradas uniformes, es decir, dos baldadas en los nueve días.

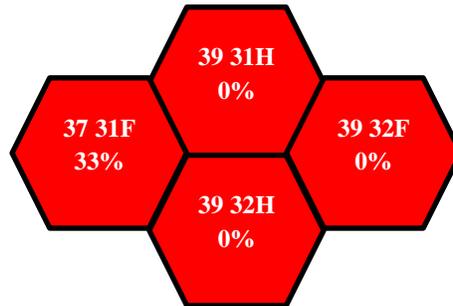


Figura 51: Áreas de influencia y uniformidad (01/07/18 – 09/07/18) del punto 39 31H y sus seis vecinos.

Al revisar el comportamiento de las velocidades de extracción de la zanja 39 31H, detallado en la Figura 52 en los días previos al evento, se puede apreciar que tuvo un régimen continuo junto con uno de sus vecinos, la zanja 39 32F, respecto de los otros dos puntos, con una tendencia al alza tres días antes, y llegando a un máximo el 9 de julio que superó los 0.35 [tpd/m²]. El día del descubrimiento, no hubo movimiento en el clúster.

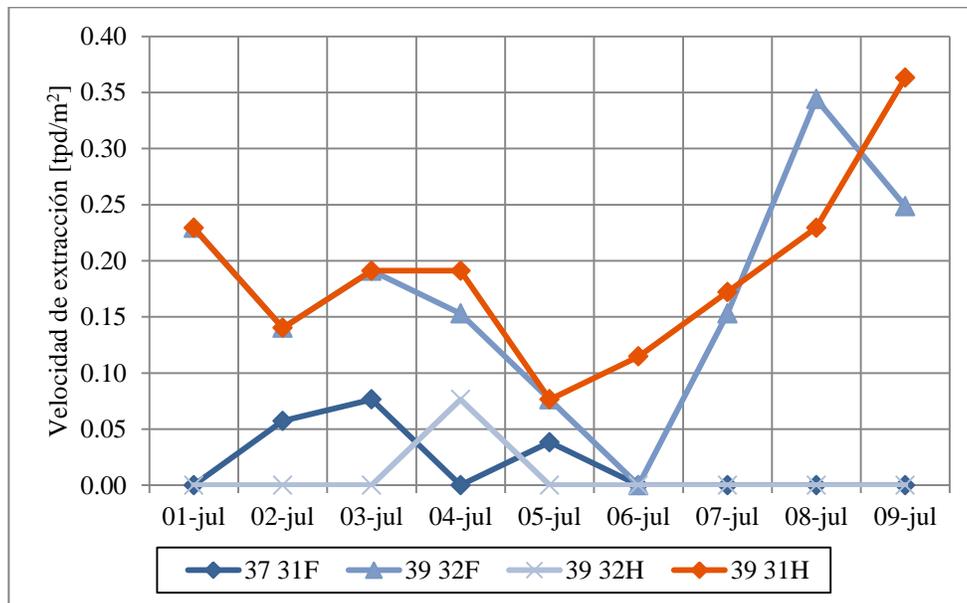


Figura 52: Velocidades de extracción del punto 39 31H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

Este caso es uno de aquellos en el que se presentan todas las condiciones previstas por los estudios de ingeniería para la aparición de un evento de agua-barro, es decir, la presencia de extracción de mineral con humedad en forma aislada, y una alta velocidad relativa a sus vecinos.

3) Deslizamiento de mineral - 39 31H - 03/08/2018

El mismo punto 39 31H experimentó un deslizamiento casi un mes después del anterior. Los eventos se desarrollaron durante el turno A del 03 de agosto, en el que el Jefe de Turno, al ingresar a la calle 39, se percata de un deslizamiento proveniente de la zanja 31H. Al igual que en el evento de julio, el área fue cerrada, se informó a los Jefes de Proceso y de Unidad de Diablo Regimiento, y al GOB para realizar una inspección en terreno, y finalmente se levanta la restricción, dejando en observación la zanja, considerando además un halo de aislación para los puntos vecinos.



Figura 53: Fotografía del punto 39 31H tomada el 03 de agosto de 2018, mostrando el deslizamiento.

Respecto del tonelaje extraído una semana antes del evento, como se observa en la Figura 54, se puede observar que las toneladas en el clúster no superan las 150 [t], por lo que existe un menor movimiento de mineral global. Por otro lado, la zanja del evento presenta poca extracción respecto a sus vecinos, de las cuales un 60% son clasificadas como uniformes.

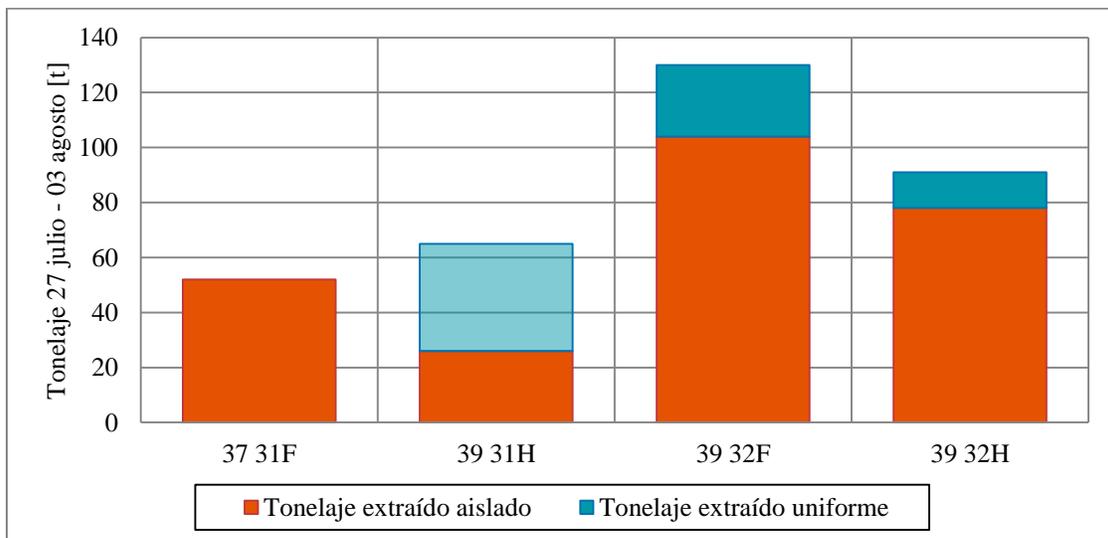


Figura 54: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 39 31H y sus vecinos, período 27 julio - 03 agosto de 2018.

Si se complementa la información anterior con la uniformidad puntual, como se ve en la Figura 55, queda más en evidencia que entre los vecinos la extracción no se realizaba durante los mismos turnos. A nivel de clúster, la uniformidad alcanzó un 23%, lo que refleja el bajo tonelaje en movimiento si se compara con el aislado.

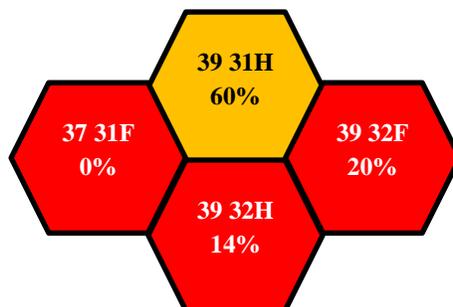


Figura 55: Áreas de influencia y uniformidad (27/07/18 – 03/08/18) del punto 39 31H y sus seis vecinos.

Si se revisan las velocidades de extracción de la zanja 39 31H y del clúster en general, detalladas en la Figura 56, se puede observar un muy bajo movimiento de mineral en los últimos días de julio, situación que se contrasta al iniciar agosto, con algunos vecinos con extracción. El día del evento, durante el turno previo, tres de los puntos tuvieron movimiento simultáneo, incluido el punto 39 31H.

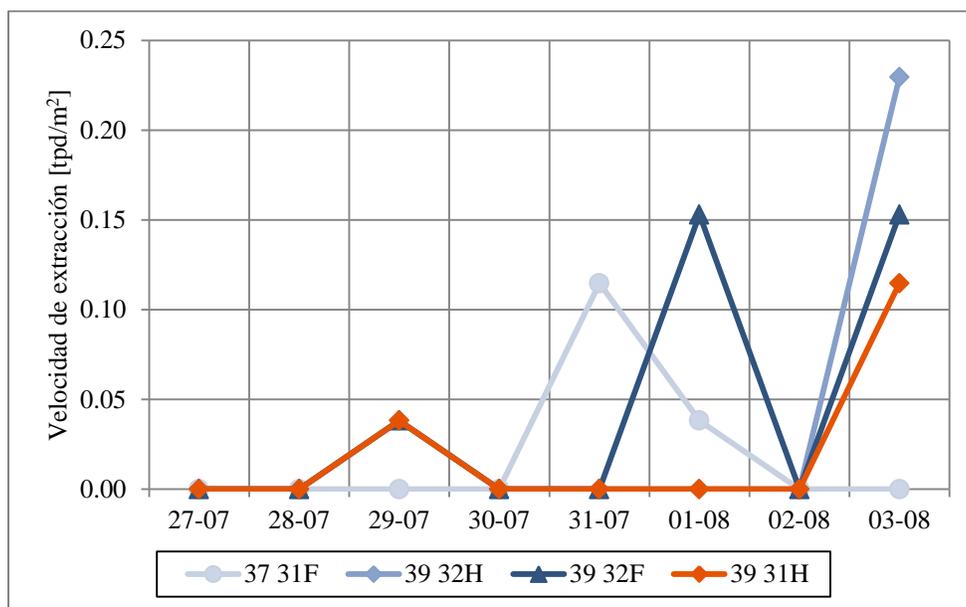


Figura 56: Velocidades de extracción del punto 39 31H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

Como análisis general, se puede verificar que las condiciones no son iguales a los del deslizamiento de julio, tanto por las toneladas extraídas en días anteriores, como por las velocidades. Sin embargo, se establece como hipótesis que la clave del evento radica en el mismo 03 de agosto, en el turno en que hubo extracción en tres de los cuatro puntos del clúster, generando la perturbación necesaria para que apareciera agua-barro en la zanja.

4) Bombeo de agua-barro - 37 34H - 05/08/2018

El evento de mayor relevancia y magnitud ocurrió durante el turno A y en plena operación, cuando el equipo regresaba desde el OP 22 a la calle 37, y el operador a través de las cámaras del sistema tele asistido observó gran presencia de barro en ese sector, el que superó los 50 [m] lineales. La calle 37 fue cerrada y posteriormente comenzó una limpieza de todo el material presente. Cada baldada utilizada para esta labor fue contabilizada como una de extracción, estimándose en 160 baldadas en total al terminar la limpieza de la calle. La zanja 37 34H quedó abocada y hasta la fecha se le ha programado una extracción limitada.



Figura 57: Fotografía de la calle 37 tomada el 05 de agosto de 2018, mostrando el efecto del bombeo.

En lo que respecta a la extracción, como se ve en la Figura 58, el punto 37 34H tuvo movimiento de mineral en forma aislada durante la semana previa al evento, y no superó las 150 [t] en baldadas. La extracción a nivel de clúster tampoco fue uniforme ni con grandes diferencias relativas entre puntos vecinos.

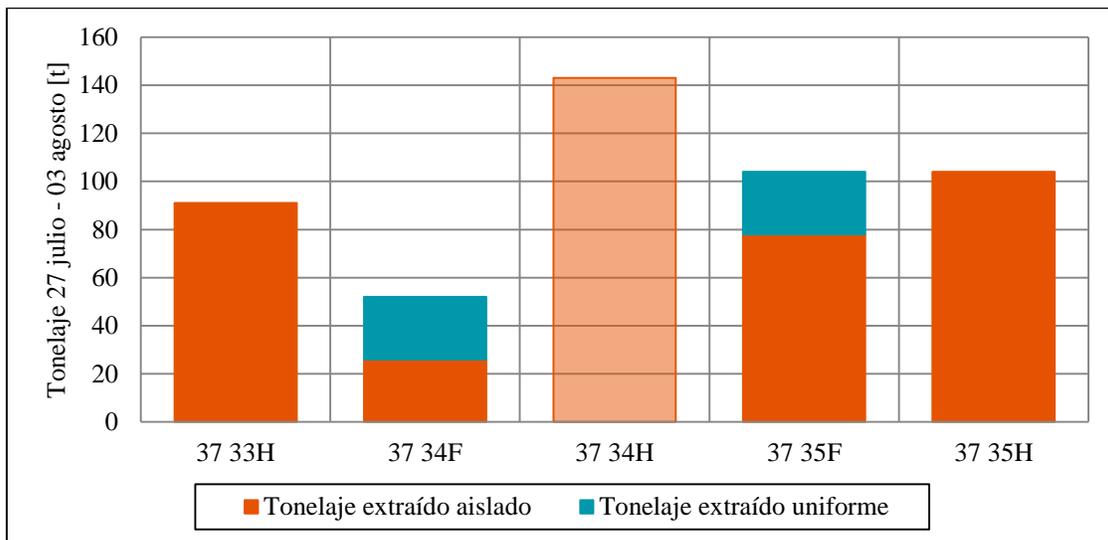


Figura 58: Tonelaje extraído uniforme y aislado del punto 37 34H y sus vecinos, período 27 julio - 03 agosto de 2018.

La uniformidad del clúster durante el período previo al bombeo alcanzó a un 11%. En este caso, las zanjas del lado este (patilla) de la calle 35 no fueron incluidas por estar fuera de la actual Fase II operativa, y no tener movimiento alguno de mineral. A nivel de punto, como se observa en la Figura 68, la extracción fue predominantemente aislada, aunque baja.

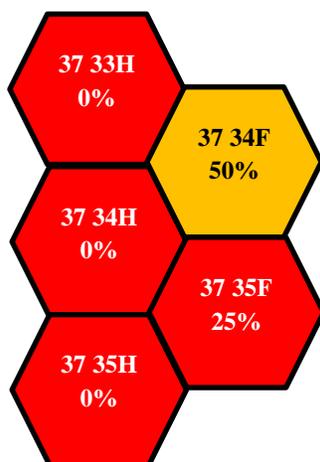


Figura 59: Áreas de influencia y uniformidad (30/07/18 – 05/08/18) del punto 37 34H y sus seis vecinos.

A nivel de velocidades, la zanja del evento mantuvo un ritmo similar al del clúster, aunque ligeramente mayor. Lo interesante de notar, y detallado en rojo en la Figura 60, es que la zanja 37 33H presentó un patrón de velocidad de extracción igual al de la 37 34H, con la excepción del 05 de agosto en el que no tuvo movimiento de mineral. Cabe notar que pese a ello, la uniformidad de ambos puntos fue 0% porque si bien tuvieron extracciones en los mismos turnos, el tonelaje movido no fue considerable para que el I.U. lo clasificara como uniforme, sin mencionar que otras zanjas tuvieron extracción en diferentes turnos.

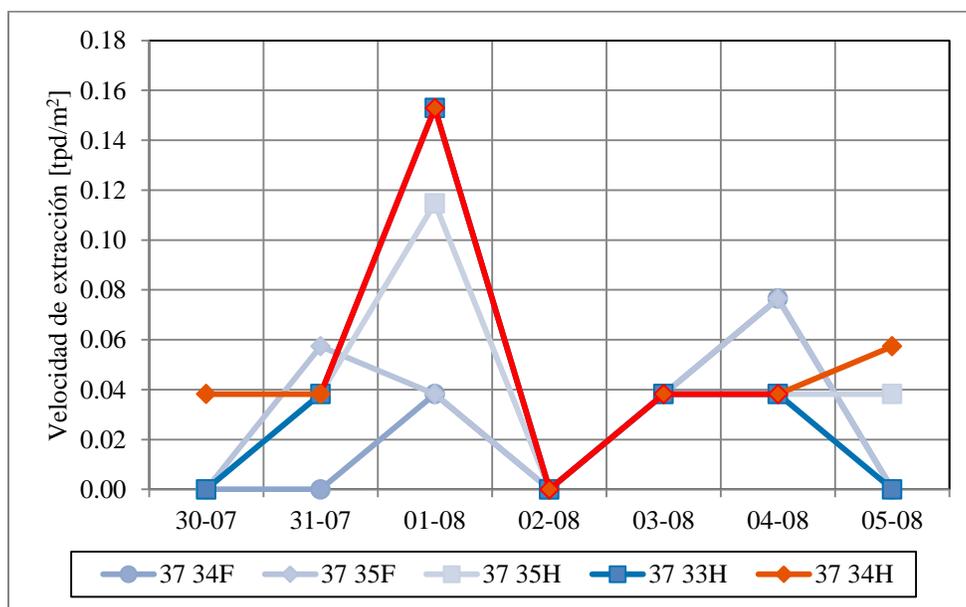


Figura 60: Velocidades de extracción del punto 37 34H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

Después de la revisión de los cuatro eventos ocurridos en la Fase II de Mina Diablo Regimiento, se pueden sacar algunas conclusiones generales:

- La uniformidad a nivel de clúster en cada análisis entregó resultados inferiores al 25%, mientras que a nivel puntual no hubo grandes variaciones, presentando en tres de los cuatro casos un 0% de uniformidad en la zanja donde ocurrió el evento. La explicación de estos resultados se debe a dos factores importantes: los turnos de estabilización y las zanjas colgadas. El primer factor impide extracción en dos turnos consecutivos a los mismos puntos, generando diferencias entre calles, mientras que el segundo factor impide extracción total en ciertos puntos.
- Respecto a las velocidades, se dan dos escenarios en donde esta variable presenta más o menos protagonismo asociado a un evento de agua-barro:
 - ❖ En uno de los cuatro casos, el de julio, se presentó que la velocidad de extracción de la zanja donde ocurrió el evento fue alta relativa al clúster, generando según los estudios de ingeniería una de las dos condiciones favorables para aparición de agua-barro. En el deslizamiento de agosto, se presentó que después de varios días de extracción, ocurrió una abrupta alza en las velocidades de los puntos, generando una condición de perturbación suficiente para la aparición de material con humedad.
 - ❖ Los otros dos casos apuntan a que si bien la velocidad de extracción es un factor que se debe controlar, no basta por sí solo considerar para determinar la ocurrencia de un evento o no. En particular, el deslizamiento de mayo, si bien no tuvo extracción en esos puntos durante 10 días, sí hubo reducción secundaria en puntos vecinos durante ese período, generando perturbaciones en dicha zanja. Por otro lado, la condición del mismo punto en términos de humedad y granulometría y su evolución en el tiempo también son otros factores que deben considerarse antes de evaluar la criticidad de un punto.

4.3.4 Canalón

Algunas fases de Diablo Regimiento, entre las que se encuentra la Fase II, están ubicadas bajo una singularidad topográfica conocida como canalón. Esta gran depresión en superficie, como se ve en la Figura 61, se ha producido debido a la continua extracción en profundidad generada en los alrededores de la brecha Braden, que es donde se localizan los sectores productivos de El Teniente prácticamente en forma concéntrica a la estructura (GOB - DET, 2018).

La existencia del canalón provoca una mayor acumulación de agua-nieve en la superficie que cubre durante el año, con una mayor concentración en los meses de invierno, entre junio y agosto. Posteriormente, durante los meses de primavera en el que ocurre el deshielo, el barro formado se infiltra y desciende hasta los puntos de extracción bajo la estructura, provocando un aumento en la humedad del mineral (GOB - DET, 2018).



Figura 61: Fotografía de parte de la superficie de El Teniente, donde se destaca el canalón, entre la brecha Braden y la ladera del cerro.

Otros sectores productivos que se encuentran parcialmente debajo del canalón son Reservas Norte y el Bloque 1 (B1) de Esmeralda. En este último sector se han desarrollado más eventos de agua-barro en fechas cercanas a 2018, los que han sido documentados por el GOB, responsable de generar informes detallados en los que suministran variables como la velocidad de extracción y la uniformidad para la compilación de antecedentes.

A continuación, se detallan otros sucesos de similar naturaleza en el Bloque 1 de Esmeralda, los que comparten en superficie junto con Diablo Regimiento al canalón y, por tanto, presentan condiciones similares meritorias para ser analizadas al momento de definir una estrategia de extracción de mineral con alto porcentaje de humedad.

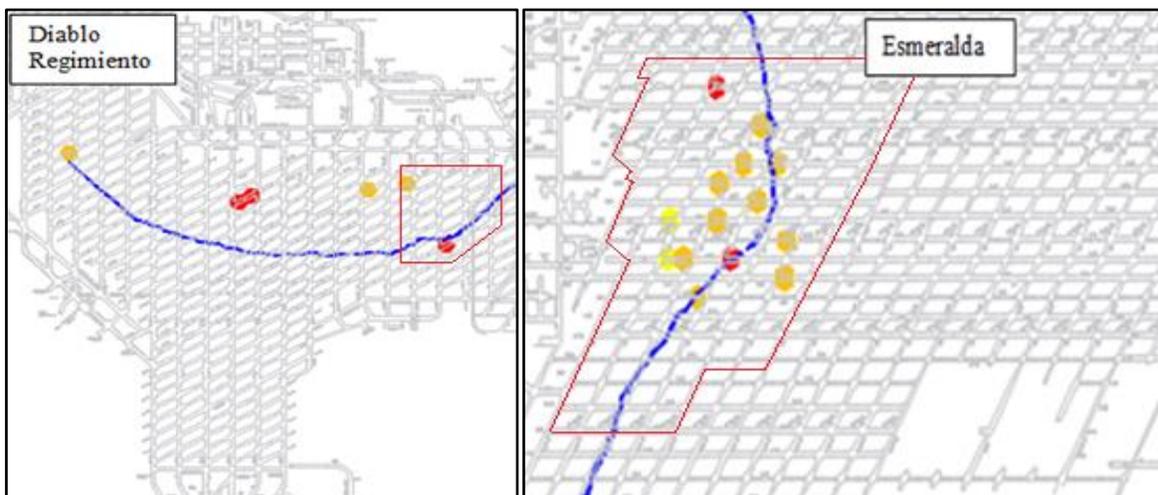


Figura 62: Planos de los niveles de producción de Diablo Regimiento y Esmeralda, donde en azul se destaca el recorrido del canalón en superficie, mientras que en rojo, los sectores productivos en estudio (F-II y B1).

4.3.5 Agua en altura

Al ser el agua uno de los elementos incidentes para la formación de barro, corresponde revisar cualitativamente las causas de su aparición en los puntos de extracción. Un esquema sobre el flujo de agua que ingresa y sale de la Mina El Teniente a nivel general se encuentra en la Figura 63.

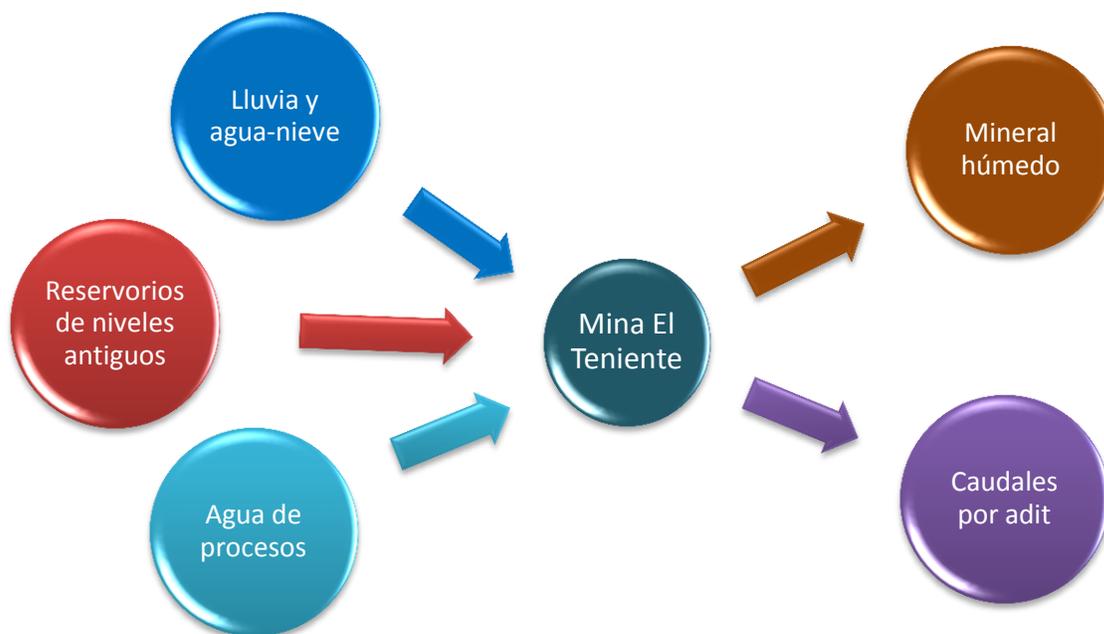


Figura 63: Sistema esquematizado del ingreso y salida de agua a través de los niveles actuales de Mina El Teniente.

Las precipitaciones son el principal aporte de agua en las columnas de mineral, pues se acumulan en el canalón y posteriormente se infiltran hacia los niveles inferiores. Esto es esperable dado el clima de tipo cordillerano presente a la altura en que se encuentra la mina, con precipitaciones que superan en promedio los 100 [mm] durante los meses de invierno (entre junio y agosto).

Sin embargo, se debe notar que la relación entre lluvias y puntos con aparición de agua-barro no resulta directa temporalmente, pues en general existe un desfase entre los eventos. Esto se puede apreciar en la Figura 64, donde la tendencia es que en los meses donde hubo mayores precipitaciones, no ocurrió un mayor aumento en el número de puntos declarados como agua-barro en la Fase II durante extracción manual, sino más bien entre dos a tres meses después. Según estudios realizados por el GOB, esto se debe principalmente al deshielo que ocurre en los meses de primavera y verano, permitiendo la percolación del agua-nieve que se encontraba en estado sólido en invierno.

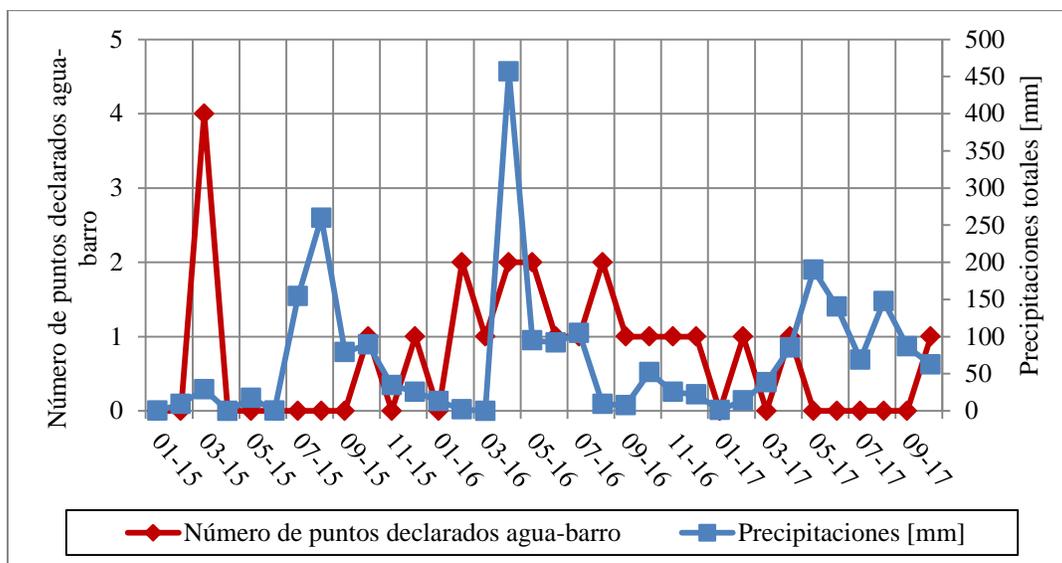


Figura 64: Tasa de aparición de puntos declarados como agua-barro en la Fase II y precipitaciones mensuales sobre Mina El Teniente.

Sobre los reservorios de niveles antiguos, Mina Diablo Regimiento, en específico la Fase II que es el caso de estudio, se encuentra debajo del Sector Regimiento, el que fue principal aporte de humedad para que se cerraran las primeras dos fases por presencia de agua-barro, generando a su vez el denominado Sector Diablo Regimiento. También sobre las calles 43 y 45 se localiza el Sector Isla, otro nivel antiguo con aporte de humedad. El plano con la influencia de sectores históricos sobre Diablo Regimiento se encuentra en la Figura 65. Con la reapertura, por tanto, de la Fase II, estos sectores definidos presentan humedad en altura que por efectos de la continua extracción en las zanjas, desciende hasta el nivel de producción actual.

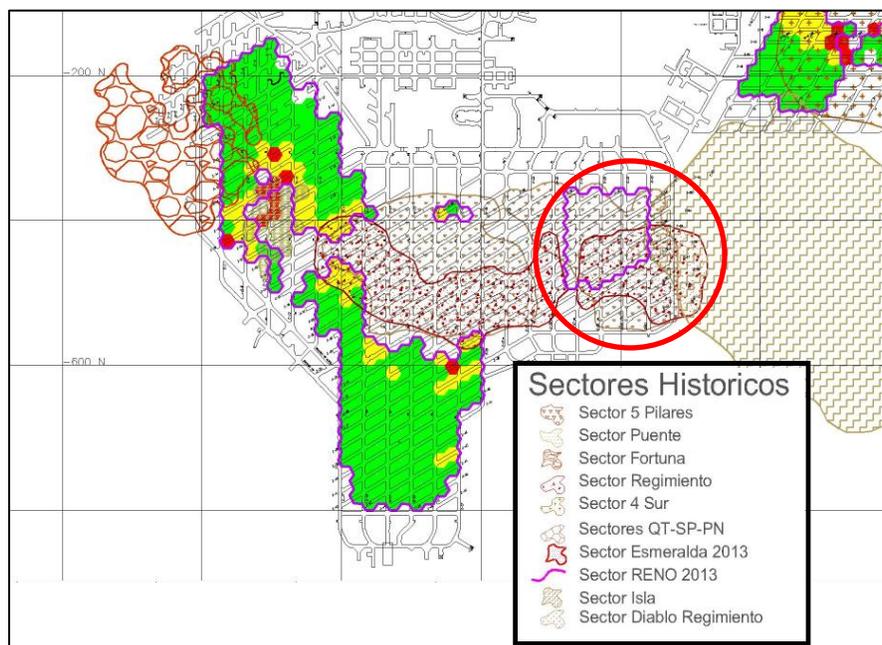


Figura 65: Plano de Diablo Regimiento con presencia de sectores históricos.

En el caso de los procesos, las operaciones que influyen o suministran agua al macizo rocoso en altura corresponden directamente a las asociadas con la perforación, ya sea para la creación de una zanja o para reducción secundaria. Si bien en el segundo caso, tanto la operación misma como el uso de agua podrían significar perturbación suficiente para la ocurrencia de un evento, en ninguno de los sucedidos en la Fase II se dio esa situación, por lo que solo se menciona como un aporte menor de agua al mineral. Asimismo, el mineral extraído al contener un porcentaje de humedad presente puede considerarse un flujo de salida, junto con el agua que sale por los adits.

El cálculo de la cantidad de agua o caudales que ingresan a los puntos de extracción no es un resultado que hasta la fecha exista en División El Teniente, principalmente por el desconocimiento sobre la cantidad actual de agua presente en los sectores antiguos. Si bien, como sale en la Figura 66, se pueden obtener resultados en cuanto a caudales aportados por las cuencas en superficie, no todo ese aporte se infiltra, sino que solo se deposita, u ocurre escurrimiento por gravedad. Por otro lado, si bien también se pueden obtener los caudales de salida de los adits, no toda esa agua proviene de puntos de extracción o del nivel de producción, y no existen resultados específicos para cada sector.

De este modo, el agua presente en altura, corresponde a un factor relevante para la formación de eventos de agua-barro, pero para los alcances de este estudio, solo se considera como un precursor para el aumento de puntos declarados como agua-barro en meses en que ocurre el deshielo en superficie.

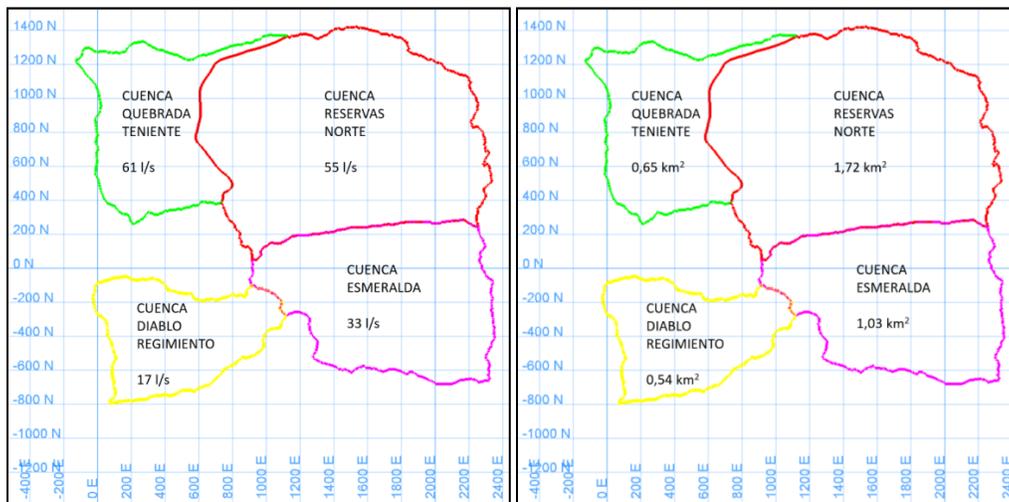


Figura 66: Distribución real de las cuencas y caudales estimados para una excedencia de 81% (Salazar, 2017).

En efecto, la baja uniformidad no solo se debe a la zanja del escurrimiento, que previamente se encontraba en estado Limitado, sino que también a tres vecinos que no tuvieron extracción alguna durante el periodo. El punto 29 38H estaba declarado como Cortado Agotado; el punto 29 39F estaba cerrado por presencia de agua-barro, y el punto 29 40F se encontraba en Barrera.

En lo que respecta a humedad, el último registro previo al evento fue realizado el 6 de noviembre, y se registró al punto en H=2, con una granulometría G(x) igual al 100%. Dadas estas condiciones, por matriz de criticidad, estaba en Observación.

Las velocidades de extracción, provisto en la Figura 69, durante los primeros días de noviembre presentan la notable diferencia entre el punto del evento y su entorno, teniendo un promedio de 0.50 [tpd/m²], en comparación a los 0.10 [tpd/m²] de promedio que tuvieron los vecinos con movimiento.

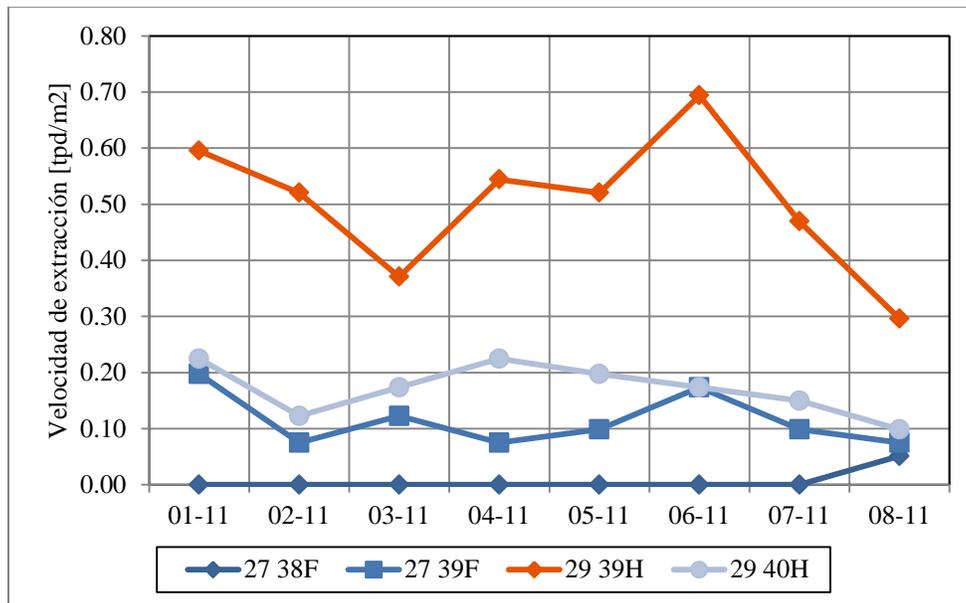


Figura 69: Velocidades de extracción del punto 29 39H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al escurrimiento.

2) **Deslizamiento de mineral - 27 37H - 18/12/2017**

De acuerdo con el resumen del incidente, el operador extrae dos baldadas del punto ubicado en la calle 27, zanja 37H (oeste) y luego se dirige a colocar una colpa de seguridad cuando se percata de un lento deslizamiento. Se detiene la extracción y se avisa al Jefe de Turno y al Líder del GOB. El evento se aprecia en la Figura 70.

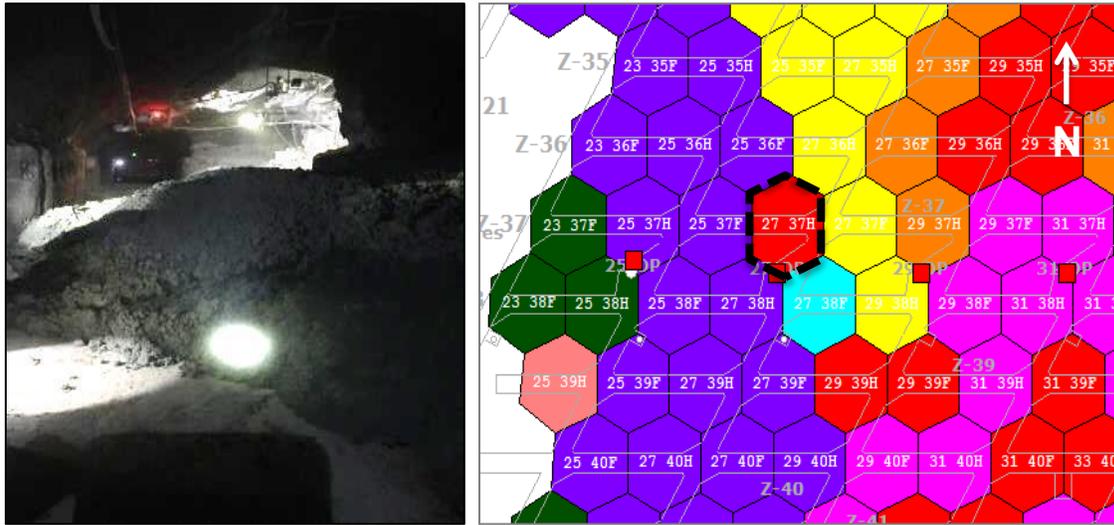


Figura 70: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 27 37H, diciembre 2017. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.

Dentro de los antecedentes entregados, se indica la uniformidad del clúster durante el mes previo al evento, es decir, desde el 18 de noviembre, y corresponde a un 65%. Sin embargo, al realizar un análisis de la uniformidad puntual, se puede observar que todo el tonelaje extraído en el punto 27 37H fue en forma aislada, y dos puntos no tuvieron movimiento.

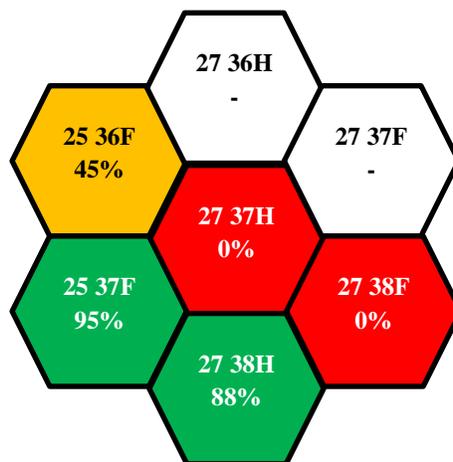


Figura 71: Áreas de influencia y uniformidad (18/11/17 - 18/12/17) del punto 27 37H y sus seis vecinos.

Sobre la humedad en el punto, el último registro de laboratorio realizado durante el mes previo al evento indicó una humedad de 9.17%. Los levantamientos realizados por los analistas indicaban una humedad cualitativa entre H=2 y H=3 durante diciembre. Finalmente, el punto es declarado según la matriz de criticidad como en estado de Alerta el primer día de dicho mes.

En lo que respecta a la velocidad de extracción real, el promedio en la vecindad del punto 27 37H estaba entre 0.30 y 0.40 [tpd/m²] durante noviembre, pero la situación cambió a partir de los primeros días de diciembre, como se aprecia en la Figura 72, que coincide con declarar el punto del evento como Alerta y experimentando una caída en su velocidad de extracción al ser declarado como Limitado. Por otro lado, la velocidad de otros puntos, en particular el 25 37F se incrementó, llegando a los 0.50 [tpd/m²] días antes del deslizamiento.

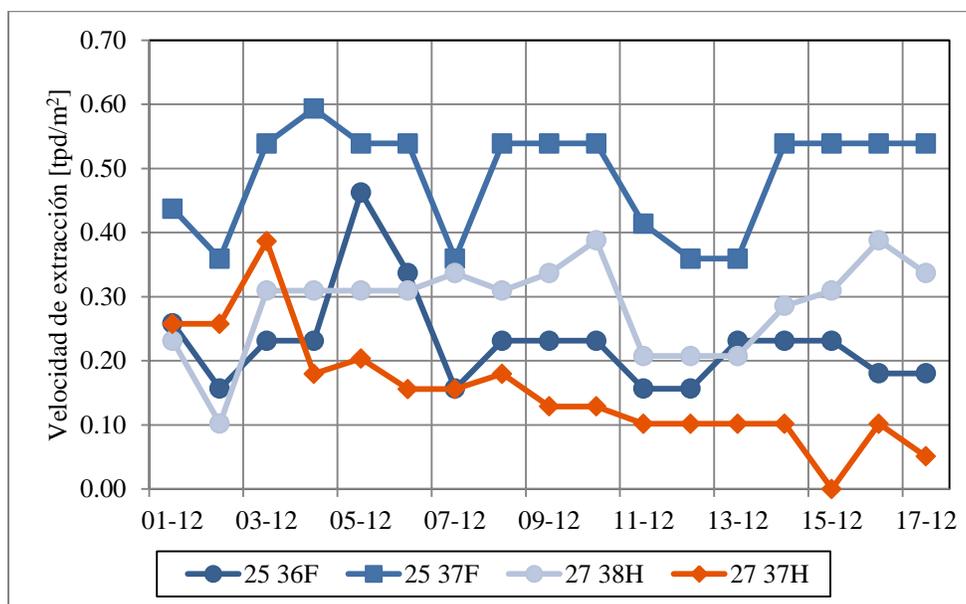


Figura 72: Velocidades de extracción del punto 27 37H (en rojo) y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

3) Deslizamiento de mineral - 27 39F - 10/02/2018

El evento ocurre una vez que el trabajador detecta condiciones anómalas en el punto 27 39F tras haber extraído 3 baldadas por carta de tiraje. Tras retirarse a la zanja 29 y avisarle al Jefe de Turno, se dirigen a postura para revisión y allí observan el movimiento de material húmedo. Dentro de las medidas tomadas posteriormente fueron detener la extracción en las calles 25, 27 y 31, y avisar al Líder del GOB.

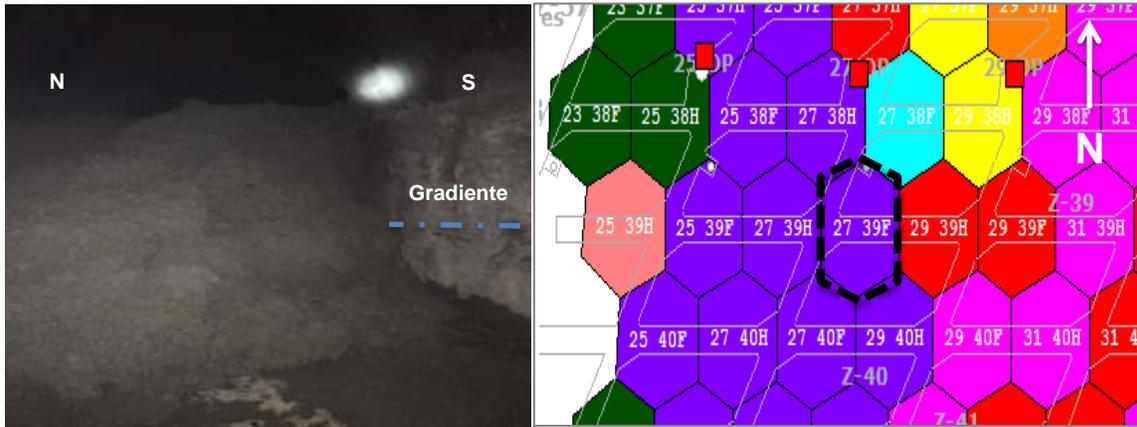


Figura 73: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 27 39F, febrero 2018. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.

En lo que respecta a la uniformidad, el clúster tuvo un porcentaje de 46% entre el 11 de enero y el 9 de febrero, mientras que a nivel puntual, como se ve en la Figura 74, tres zanjas vecinos tuvieron una extracción completamente aislada, mientras que el punto del evento tuvo una uniformidad de 38%. Los puntos 27 39H y 27 40F presentaron un alto porcentaje al encontrarse rodeado de otros puntos vecinos que tenían también el estado operativo Limitado, mientras que en el caso particular del punto 27 39F, al encontrarse en el borde de puntos con ese estado, limitaba con zanjas cerradas, una de ellas por presencia de agua-barro.

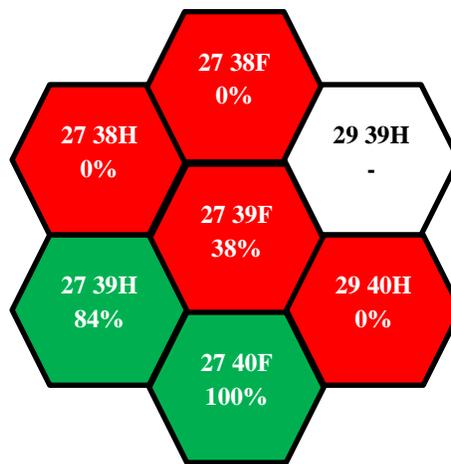


Figura 74: Áreas de influencia y uniformidad (11/01/18 - 09/02/18) del punto 27 37H y sus seis vecinos.

El punto analizado fue reportado en estado Alerta según la matriz de criticidad el día previo al deslizamiento. De acuerdo con los antecedentes recopilados, no se observaron puntos con estado Alerta en el entorno cercano. No se registraron mediciones de humedad en laboratorio.

Desde el punto de vista de las velocidades de extracción, como se puede apreciar en la Figura 75, la zanja del evento mantuvo una velocidad durante los primeros días de febrero similar a sus vecinos, hasta el 5 de febrero, en el que al menos tres puntos superaron los 0.35 [tpd/m²], y el punto en estudio no superó los 0.25 [tpd/m²]. Las mayores diferencias se acrecentaron con el correr de los días, con diferencias entre vecinos que llegaban a los 0.25 [tpd/m²], incluso durante el 10 de febrero.

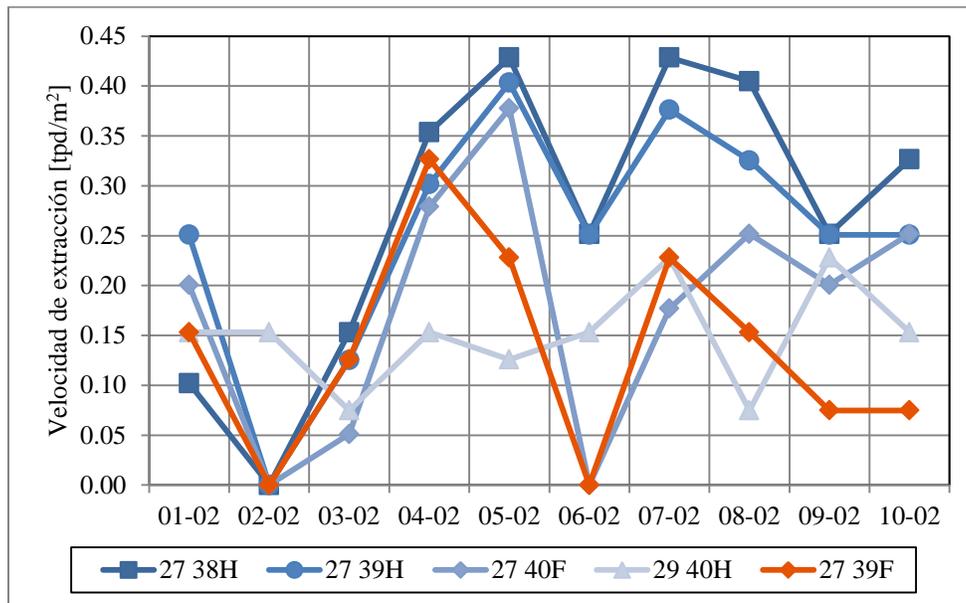


Figura 75: Velocidades de extracción del punto 27 39F (en rojo) y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

4) Deslizamiento de mineral - 33 42H - 28/02/2018

La situación del incidente se resume al descubrimiento de un operador de material barroso proveniente del punto de la calle 33, zanja 42H (oeste), luego de haberle extraído 3 baldadas y de dirigirse posteriormente a la zanja 46 de la misma calle para continuar con sus labores. El trabajador se posiciona en zona segura, da aviso al Jefe de Turno, detiene la extracción en las calles 31 y 33 el resto del turno, y se da aviso al GOB y a supervisión Esmeralda.

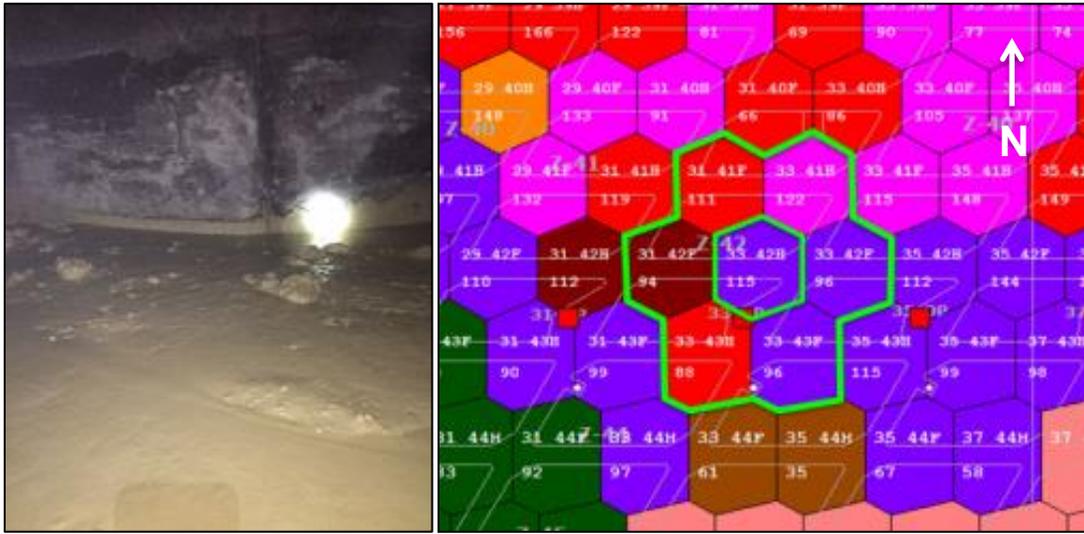


Figura 76: A la izquierda, fotografía del deslizamiento ocurrido en el punto 33 42H, febrero 2018. A la derecha, representación en planta del punto ubicado en el Bloque 1 de Esmeralda.

La uniformidad del clúster durante el mes de febrero es de un 14%. Por otro lado, la uniformidad por punto revela nula extracción en dos de las zanjas, y extracción aislada en tres adicionales, incluyendo la que tuvo el evento.

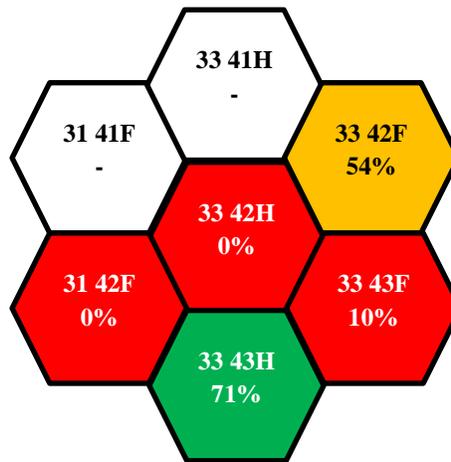


Figura 77: Áreas de influencia y uniformidad (01/02/18 - 27/02/18) del punto 33 42H y sus seis vecinos.

Respecto de la humedad, el punto 33 42H había sido declarado según la matriz de criticidad como en Observación, con una humedad de laboratorio de 1.59%, y se encontraba en estado Limitado previo al evento.

En lo concerniente a las velocidades de extracción, como se aprecia en la Figura 78, la vecindad de puntos se mantuvo inferior a 0.25 [tpd/m²], pero con notorias diferencias entre zanjas, como la 33 43H y la 31 42F, sin contar los que no tuvieron movimiento. Dos días previos al evento, a partir del 26 de febrero, el punto 33 42H tuvo una diferencia de velocidad de extracción importante respecto al clúster, manteniéndose sobre 0.20 [tpd/m²], y los demás no superando los 0.11 [tpd/m²].

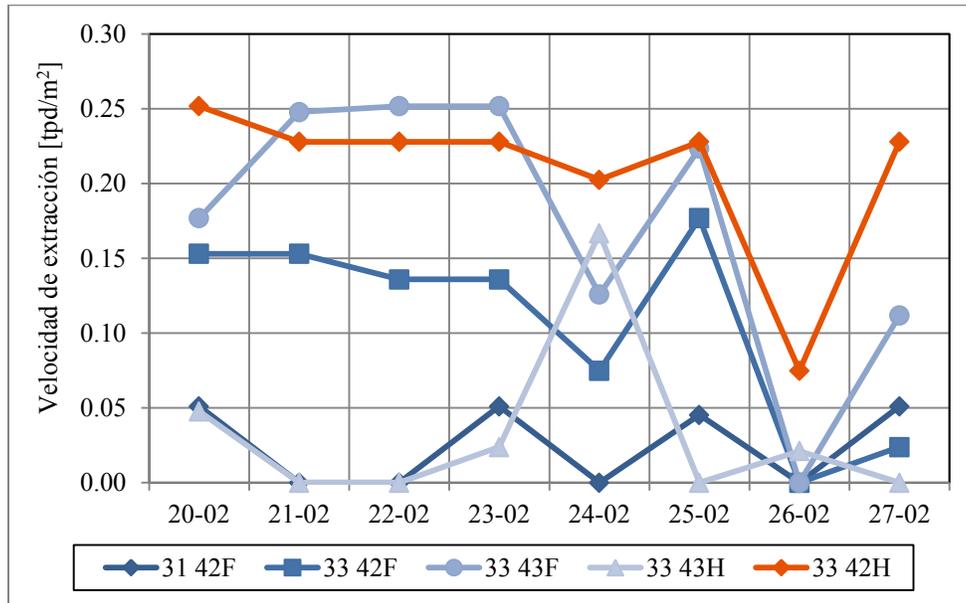


Figura 78: Velocidades de extracción del punto 33 42H y sus vecinos durante sus últimos días de extracción previo al deslizamiento.

Después de la revisión de los cuatro eventos más recientes ocurridos en el Bloque 1 de Mina Esmeralda, se pueden sacar algunas conclusiones generales:

- En lo que respecta a la uniformidad, en los cuatro casos se presentó un bajo porcentaje a nivel del punto, tres de ellos con una extracción completamente aislada durante el mes previo al evento. Según las hipótesis planteadas por los estudios de ingeniería y por el GOB, esta condición genera una diferencia de densidad y de permeabilidad en la base de la columna del punto respecto a sus vecinos. Así, la humedad tiende a desplazarse desde zonas con menor permeabilidad, que son zanjas donde no ocurre extracción, a zonas con mayor permeabilidad, donde está ocurriendo extracción aislada.
- Respecto a las velocidades de extracción, se dan dos casos:
 - ❖ En dos de los eventos ocurrió que el punto del evento tuvo una notoria diferencia de velocidad respecto a sus vecinos, que junto a la baja uniformidad presente, generan una condición en la columna de alta permeabilidad, y poca consolidación. Así, el flujo de agua es preferente en estas zonas y se aumenta la probabilidad de ocurrencia de una falla fluida.
 - ❖ En los otros dos eventos se da la situación inversa, vale decir, la velocidad de extracción de los puntos vecinos era mayor respecto al punto del evento. Al respecto ocurre una situación en la que el clúster, al tener una menor densidad, se generan mayores esfuerzos inducidos, los que se pueden redistribuir precisamente sobre zanjas aledañas con velocidades bajas.

Por tanto, ambos escenarios a nivel de conjunto de puntos con diferencias de velocidades de extracción provocan un escenario propicio para la formación de eventos de agua-barro.

- La humedad cualitativa definida en los eventos coinciden con estar, de acuerdo con la matriz de criticidad de División El Teniente, entre estado de Observación y Alerta, presentando zanjas con humedad predominante ($H=2$ o superior), y granulometría fina dominante.

Aunque el universo de casos estudiados entre Diablo Regimiento y el Bloque 1 de Esmeralda es acotado, en todos ellos, más algunos adicionales revisados que están fuera del alcance temporal del estudio, se presentan estas tres variables como fundamentales, pero no definitivas, al momento de encontrar razones sobre la ocurrencia de un evento. Así, perturbaciones ocasionadas por sismos o reducción secundaria también podría ser un factor que debe incluirse en caso de generadores de eventos.

4.4 Utilización efectiva del equipo

La obtención de la utilización efectiva del equipo LHD 832 fue a través de la plataforma *Optimine* de Sandvik. En ella, se registran los tiempos en que el equipo se encuentra en producción cumpliendo las labores destinadas (tiempo operacional), cuando está encendido pero no realizando extracción (demoras), y tiempo en que está detenido, en mantenciones o fuera de servicio (tiempo no operacional).

Los datos obtenidos son sumamente limitados: la base de datos del sistema se perdió por problemas internos y comenzó a registrar desde el 18 de junio. Así, solo se tiene el registro de 12 días para el análisis del mes. El resumen de los datos se ve en la Figura 79.

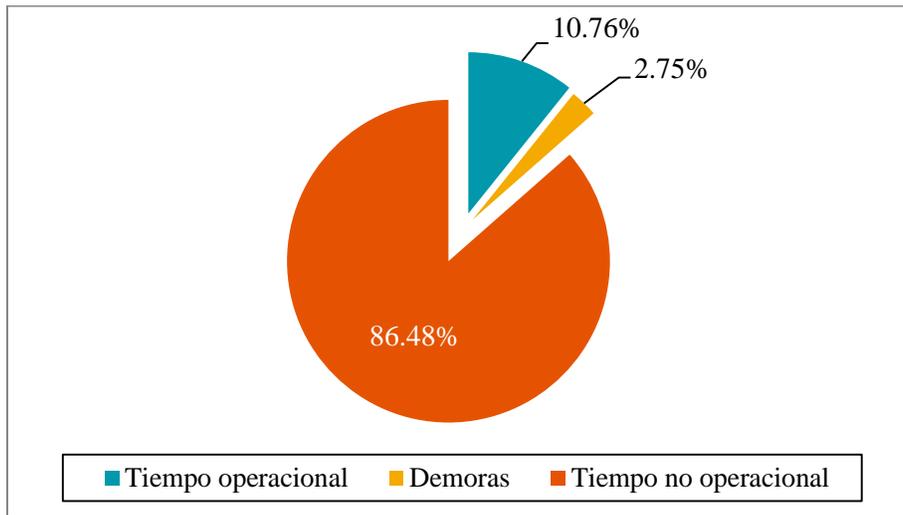


Figura 79: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 18 de junio – 30 de junio.

El caso de julio fue análogo, y resulta necesario indicar que las condiciones en general en la Fase II se mantuvieron, en términos del sistema de tele asistencia, de las colgaduras presentes, y de los turnos de estabilización impuestos.

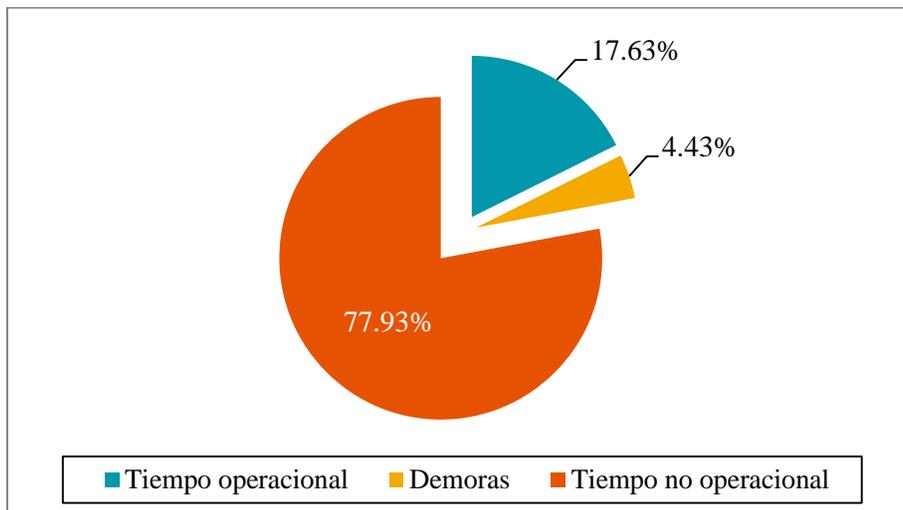


Figura 80: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 01 de julio – 31 de julio.

El porcentaje de utilización efectiva del equipo en ambos meses, que no superó el 20%, el menor de todo el parque disponible en Diablo Regimiento, durante un período donde no ocurrieron mantenencias (programadas y no programadas), queda explicado por los siguientes factores externos:

- El sistema de tele asistencia junto con los portones de seguridad requieren que el operador ingrese a la Fase II junto con el LHD, operándolo en forma manual, y deje activadas todas las alarmas para luego dirigirse al barrio cívico de Diablo Regimiento y comenzar a operarla. De acuerdo con la información proveída de los operadores, este proceso toma al menos 30 minutos, y se debe repetir cada vez que alguno de los sensores se corte y apague automáticamente el sistema.
- La existencia de puntos colgados limita la operación del LHD al tener menos zanjas donde extraer, y por tanto, al tener un menor tiempo efectivo. Al ser un factor que se ha mantenido sobre el 75% durante el período de junio, influye en que durante el turno el equipo no pueda alcanzar el 40-50% de la utilización efectiva del parque con operación manual y con zanjas disponibles.
- Los turnos de estabilización sugeridos por el GOB y establecidos en la operación implican el cese de operaciones en una calle durante 8 horas posteriores al último turno donde hubo extracción, e incluso 16 horas en casos extraordinarios sobre puntos declarados con mayor riesgo, como se ve en la Figura 81. Así, si hubo extracción en un turno C en una calle, se debe esperar hasta el turno B para volver a ingresar, siendo el turno A de estabilización. La utilización efectiva diaria, por tanto, decae y los límites máximos no pueden exceder el 66.7% con un turno de estabilización al día, ni el 33.3% con dos turnos.

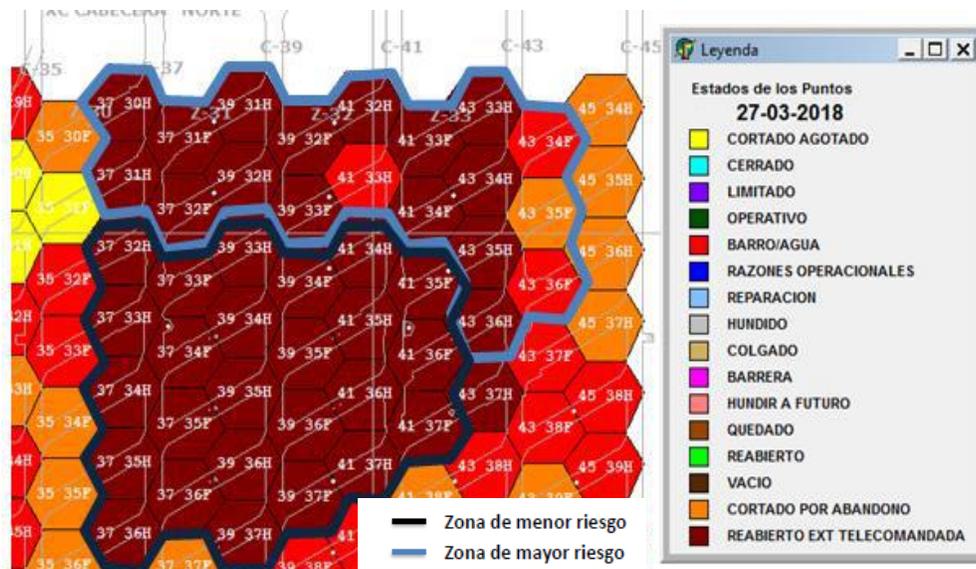


Figura 81: Plano de la Fase II de Diablo Regimiento, con zonas delimitadas según riesgo de aparición de evento de agua-barro.

La unión de estos tres factores generaron por tanto que el LHD tuviera una operación diaria aproximada de 2.6 [h/día] durante junio, y de 4.0 [h/día] durante julio, cumpliendo en este último mes con uno de los KPIs como meta propuestos por la SID.

4.5 Número de baldadas

El porcentaje de baldadas considerado como KPI a evaluar por la SID corresponde en estricto rigor al porcentaje de cumplimiento respecto de las baldadas planificadas en la carta de tiraje diseñada cada turno. En este caso, los resultados ya fueron presentados como tonelaje extraído en la sección 4.1.

El equipo LHD, aunque tiene un balde de 13 [yd³], durante el período de estudio se le asignó un tonelaje por baldada de 13 [t], debido a ineficiencias operacionales y un bajo factor de llenado de mineral. De este modo, el sistema registra directamente el número de baldadas para después ser convertido según el tonelaje asignado.

La Figura 82 presenta, a través de un gráfico acumulado, las baldadas reales registradas durante el período enero-julio 2018 por el LHD 832, y las baldadas planificadas por la R2 del PND, las que fueron transformadas desde toneladas, y aplicándole el mismo factor de yardas cúbicas a toneladas, para mantener la coherencia en la comparación.

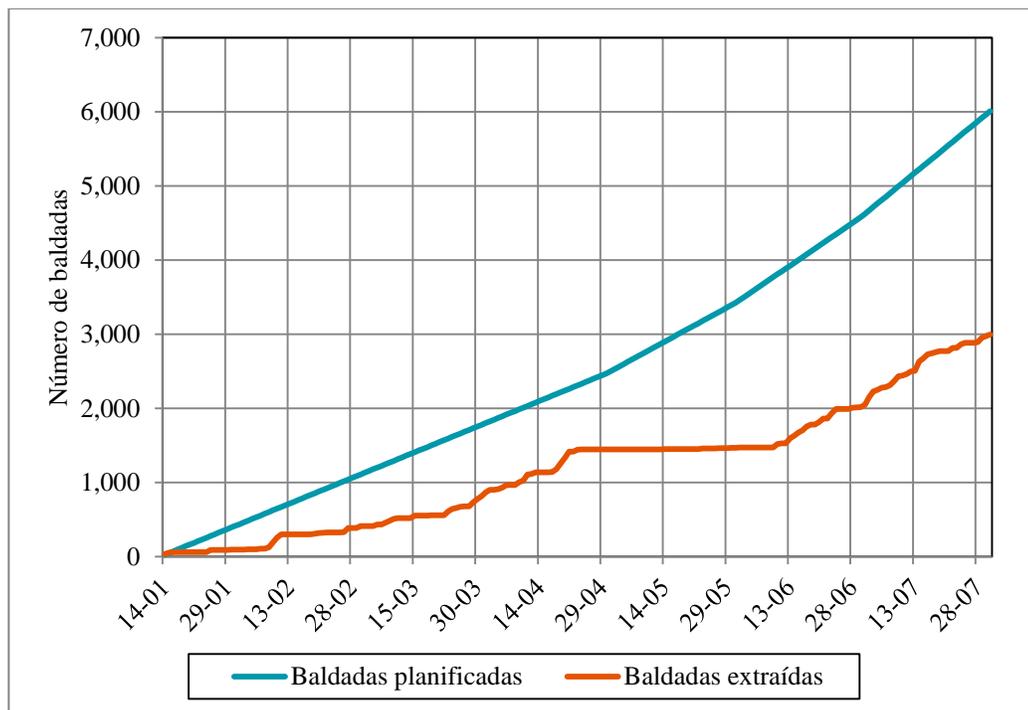


Figura 82: Baldadas extraídas y planificadas en la Fase II Diablo Regimiento, período enero-julio 2018.

Este resultado refleja a modo de escala temporal el comportamiento de la extracción, incluyendo el alza en abril, y el estancamiento casi por completo en mayo, provocando un gran distanciamiento del compromiso por el PND. Al 31 de julio, se registraron un total de 2,996 baldadas extraídas de 6,008 baldadas planificadas, mostrando un cumplimiento global de un 49.8%.

4.6 Velocidades medias de traslado y tiempos de ciclo

Si bien el sistema *Optimine* de Sandvik registra la utilización efectiva y la producción, no es específico al momento de determinar el tiempo de ciclo de un equipo. Por tanto, para la toma de datos de este KPI, se registraron en forma manual los tiempos del LHD mientras se encontraba en operación, desde la sala de tele asistencia del barrio cívico en Diablo Regimiento.

Las mediciones fueron realizadas el 21 de junio y el 05 de julio a dos distintos operadores capacitados para utilizar el sistema de tele asistencia, y se encuentran detalladas en el Anexo H. En lo que respecta al cálculo de velocidad media, se tomaron las distancias desde el centro de la calle asociada a cada zanja hasta el OP 22, como las que se ven en la Figura 83, y junto con el tiempo de viaje, tanto de ida como de vuelta, se obtuvieron los resultados.

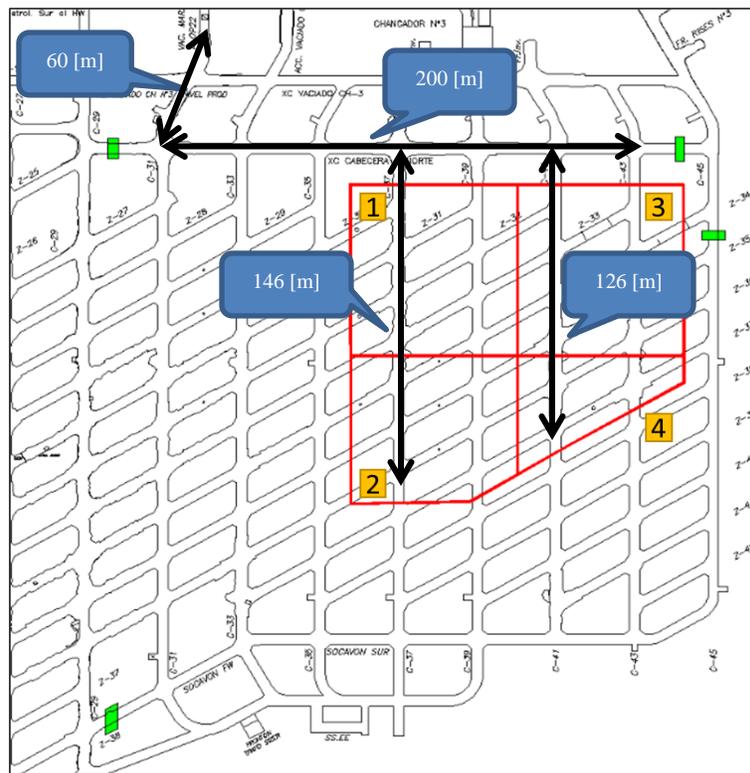


Figura 83: Distancias estimadas generales de algunas calles y cruados de la Fase II.

Tabla 14: Resultados obtenidos de velocidad media.

Velocidad media cargado [km/h]	7.20 ± 0.69
Velocidad media descargado [km/h]	7.40 ± 0.40

Los resultados de la Tabla 14 entregan la velocidad a la que va el equipo en promedio durante el traslado, ligeramente menor cargado que descargado, explicado en parte por el peso ejercido del balde al llevar el mineral. Sin embargo, la diferencia es menor, y en general se debe a que el sistema tele asistido regula la velocidad del equipo al controlarle las marchas que puede llevar.

A partir de las velocidades medias obtenidas, se pueden estimar los tiempos de ciclo medio para cada calle. Para ello, se consideraron los promedios de los tiempos de carga y descarga de los registros utilizados, presentados en la Tabla 15, y se sumaron a los tiempos asociados al equipo al recorrer la zanja más cercana y más alejada del cruzado XC Cabecera Norte. Los resultados se visualizan en la Figura 84.

Tabla 15: Resultados obtenidos de tiempos promedio de carga y descarga de mineral.

Descarga de mineral en el OP 22 [s]	24 ± 3
Carga de mineral en una zanja [s]	41 ± 7



Figura 84: Tiempos de ciclo medio en las zanjas extremas de cada calle de la Fase II.

Finalmente, la Tabla 16 presenta los resultados al promediar ambos tiempos de ciclos de cada calle de la Figura 84.

Tabla 16: Tiempos medios de ciclo de cada calle.

Calle	Tiempo medio de ciclo [s]	Tiempo medio de ciclo [min]
37	307.6	5.1
39	342.2	5.7
41	366.8	6.1
43	386.6	6.4

Si se consideran estos resultados con los tiempos propuestos como meta por la SID, se puede notar que presentan un rendimiento bajo, todos ellos superando los 5 [min] de tiempo de ciclo. Si bien es cierto, se pueden considerar algunos errores en la toma de datos, es un hecho que el sistema de tele asistencia limita la velocidad máxima del equipo, lo que ocasiona un mayor tiempo de ciclo otorgado por los desplazamientos entre los puntos de extracción y el pique de traspaso. Además, los siguientes factores detallados por los operadores del LHD deben ser indicados:

- La conexión entre el radar del equipo y la antena de recepción presenta algunos cortes en lugares específicos de la Fase II, principalmente cerca de la intersección de la calle 31 con el XC Cabecera Norte. Durante esos segundos, el equipo reducía su marcha y ocasionalmente se detenía por completo, teniendo el operador que reiniciar el sistema para volver a utilizarlo.
- La poca visibilidad de la señalética en el interior de la Fase II confundía al operador de la zanja que debía extraer, teniendo que buscar algún punto de referencia para reubicarse y continuar.
- La espera en la descarga de mineral solía ocurrir por el llenado de mineral sobre el OP 22, teniendo el equipo que esperar a que un operador se dirigiera al martillo picador y despejara la parrilla.

Todas estas demoras operacionales solo entran en la categoría de demoras en el sistema *Optimine* de Sandvik, pero no se diferencian de otras demoras que no se encuentran relacionadas directamente con la extracción, como el carguío de combustible o el traslado del LHD del parque de equipos a la Fase II.

4.7 Propuesta de estrategia de extracción

La recopilación y consolidación de los KPIs obtenidos durante los primeros meses de prueba en la extracción de agua-barro permitieron la redefinición de la estrategia para mantener la seguridad en la operación a la par que se lograba un mejor cumplimiento respecto del Plan Actualizado Mensual (PAM), versión de corto plazo derivado del R2 del PND 2018.

Las dos variables que se encuentran continuamente en conflicto en la Fase II son el número de colgaduras y la uniformidad. El alto número de zanjas con chimeneas y arcos cohesivos limitan la extracción únicamente a los puntos abocados, generando en ellos una baja uniformidad, y eventualmente una colgadura en ellos si presentan humedad en altura. Sin embargo, el cumplimiento mensual exige la extracción en dichos puntos abocados, al ser la única fuente con mineral disponible para el equipo. Por ende, mientras se encuentre esta condición, es esperable que la uniformidad alcance un bajo desempeño.

El equipo designado específicamente para la reducción secundaria en la Fase II a mediados de julio ha permitido sostener en el tiempo el número de zanjas abocadas a través de una modificación en la estrategia en esta operación. Para ello, priorizaron la realización de perforaciones cargadas con explosivos en los muros y chimeneas formados en los puntos, y dejando para situaciones específicas, como colpas puntuales, el uso de cartuchos y explosivos. Con un promedio de 10 zanjas abocadas, y el despeje de mineral de otras que han tenido quemadas, el tonelaje en julio superó con creces al de los demás meses, en particular a junio, donde precisamente por el bajo número de zanjas abocadas, el equipo perdía turnos al no tener una fuente de extracción.

Otro concepto asociado a la extracción y que influye en su rendimiento corresponde a los turnos de estabilización, donde por 8 horas el equipo no puede ingresar a una calle en la que previamente haya tenido movimiento de mineral o reducción secundaria. En ese aspecto, previo a la conformación del equipo específico encargado, esta operación se realizaba en diferentes turnos y en algunas ocasiones en todas las calles. Si a esto se le asocia la escasa disponibilidad de zanjas o resultados no esperados tras una quemada, se generaban ventanas de tiempo extensas donde el equipo no podía realizar extracción alguna en la Fase II por dos o tres turnos, es decir, un día completo.

En relación a estos factores, a partir de los primeros días de agosto se decidió adoptar una nueva estrategia de extracción que compatibilizara las operaciones de extracción y reducción secundaria a la vez que preservara los tiempos de estabilización. Para ello, se formaron pares ordenados con las calles y se organizaron en los siguientes grupos: (37, 39) con (41, 43), (37, 41) con (39, 43), y (37, 41) con (37, 43) con (39, 41). De esta forma, se reorganizaron las actividades en los turnos y se dispusieron tal y como se presenta en el ejemplo de la Tabla 17, considerando el primer grupo. La distribución de tareas para los otros grupos resulta análoga.

Tabla 17: Actividades asignadas por turno a cada uno de los pares ordenados según la nueva estrategia de extracción en dos días calendario, con los grupos (37, 39) y (41, 43).

Calles	Día 1			Día 2		
	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
(37, 39)	Extracción	Estabilización	Extracción	Estabilización	Reducción 2°	Estabilización
(41, 43)	Estabilización	Reducción 2°	Estabilización	Extracción	Estabilización	Extracción

Como se puede apreciar, la reducción secundaria es realizada únicamente durante el turno A, mediante el equipo específico designado e informando a la jefatura de Diablo Regimiento respecto de los resultados y de la selección del par de calles en el que se va a ocupar explosivos.

La extracción, por otro lado, es relegada principalmente a los turnos B y C, y realizándose en ambos para cada par de calles durante un día, mientras el otro par se mantiene entre turnos de estabilización por la reducción secundaria. Siguiendo el ejemplo de la Tabla 17, el día 3 sería idéntico al día 1, el día 4, idéntico al 2, y así sucesivamente.

Si se toma en consideración el promedio de zanjas abocadas, que fluctúan entre 2 a 3 por cada calle, y el mineral remanente en puntos colgados, la estrategia planteada permite mantener una extracción máxima de 16 horas al día, y dejan únicamente al equipo en reserva por 8 horas, que corresponde con uno de los turnos mínimo de estabilización. Además, la reducción secundaria está designada durante los días de semana, dejando los turnos de sábados y domingos completamente habilitados para la extracción, aumentando así la extracción máxima teórica de 24 horas.

Se puede dar el caso en que solo ocurra reducción secundaria en una calle, alterando la estrategia planteada temporalmente por un día. En ese caso, como se ve en el ejemplo de la Tabla 18, el par ordenado de calles en el que no se utilizan explosivos procede en forma similar al caso anterior, al igual que la calle en el que sí se emplearon. Sin embargo, la calle en que no ocurrió una quemada tiene turno de estabilización en A, extracción en turno B con las otras dos calles, y dos turnos de estabilización posteriores (turnos C y A del día siguiente), retomando el esquema de la Tabla 17.

Tabla 18: Actividades asignadas por turno a cada calle en caso de que ocurra reducción secundaria en la calle 41, con los grupos (37, 39) y (41, 43).

Calles	Día 1			Día 2		
	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
(37, 39)	Extracción	Estabilización	Extracción	Estabilización	Reducción 2°	Estabilización
(41)	Estabilización	Reducción 2°	Estabilización	Extracción	Estabilización	Extracción
(43)	Estabilización	Estabilización	Extracción	Estabilización	Estabilización	Extracción

4.8 Resultados parciales de la propuesta de estrategia de extracción

Esta nueva estrategia se encuentra respaldada con resultados parciales de extracción durante agosto (hasta el día 17), como por ejemplo, las toneladas diarias en promedio, con un 55.3% mayor que en julio, y llegando a las 850 [tpd], como se ve en la Figura 85.

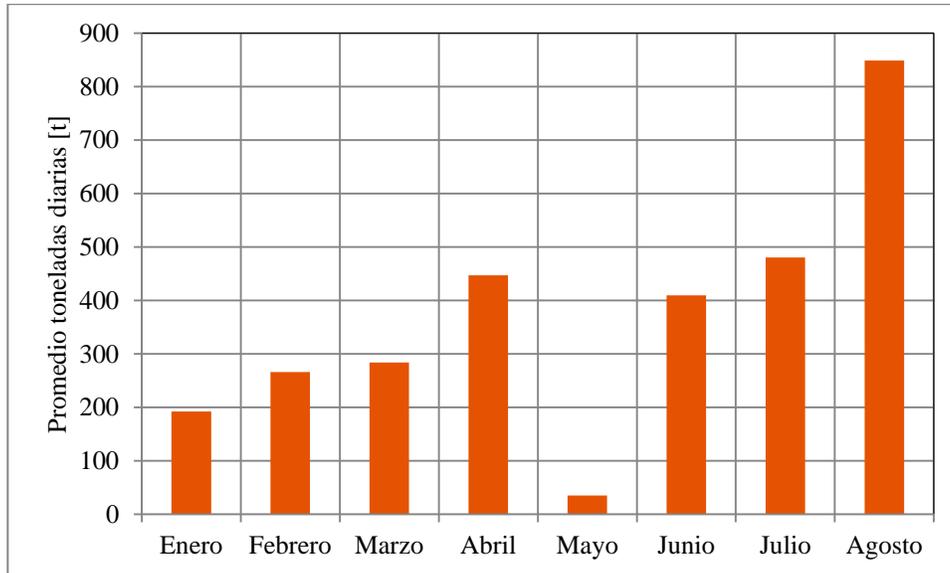


Figura 85: Promedio de toneladas diarias de extracción, Fase II DR, período enero-agosto 2018.

Además, al día 20 de agosto llegando a las 17,000 [t], más de 4,500 [t] adicionales de mineral que fueron extraídos durante todo el mes de julio. Si se mantiene la extracción diaria presentada en la figura anterior, se estima que la extracción mensual total superará las 28,800 [t], manteniendo a su vez el 94.3% de cumplimiento (en agosto, el PAM presentó para la extracción un total de 900 [tpd]).

Aunque la uniformidad no es prioridad de momento mediante la nueva estrategia propuesta, se alcanzó un 13.9% en forma parcial hasta el 20 de agosto, con casi 2,400 [t] extraídas en conjunto a través de clústeres de puntos.

El cumplimiento por punto también ha presentado mejoras respecto de los meses anteriores, como se puede apreciar en la Figura 86, con 25 puntos bajo el 85% de lo planificado respecto de julio que tuvo 31 puntos, y junio, 34. El resultado destacable del plano corresponde al de la zanja 37 34H, que se encuentra con una sobre extracción cercana al 500%, pero que se justifica por la ocurrencia del bombeo al inicio de mes.

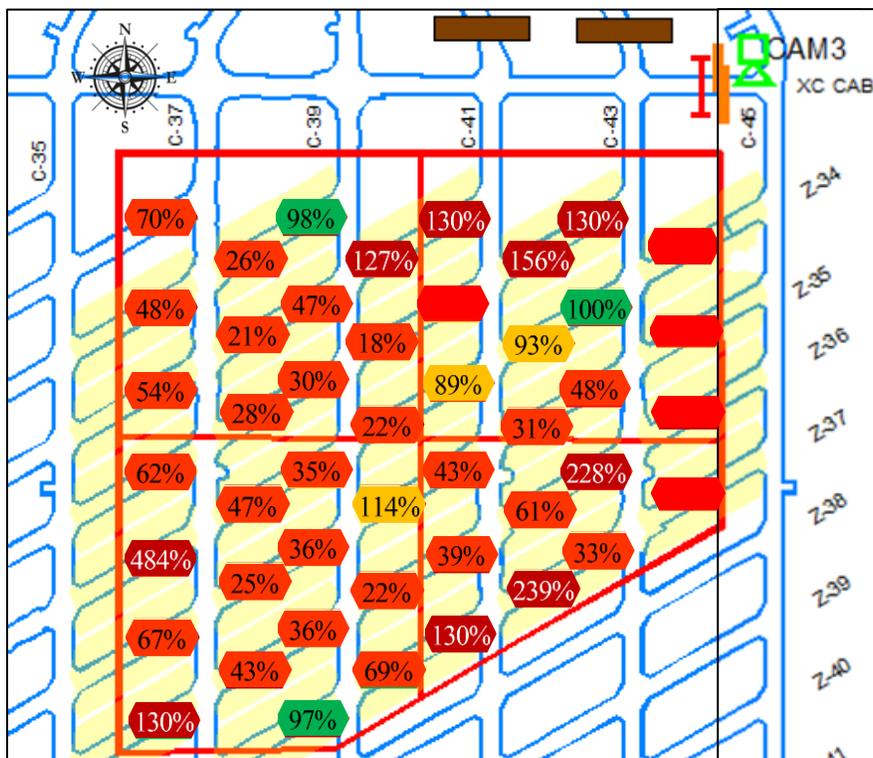


Figura 86: Cumplimiento de cada punto de extracción, 01-20 agosto de 2018.

La variable que refleja en mayor medida la aplicación de la nueva estrategia es la de utilización del equipo, como se ve en la Figura 87, donde el equipo se ha encontrado operativo al 20 de agosto aproximadamente unas 122 [h], en comparación a las 126 [h] totales de todo julio. Es decir, en promedio durante este último mes, el LHD ha tenido una operación diaria cercana a las 6.1 [h/día], implicando que durante el turno en que debe realizar movimiento de mineral, la Fase II se ha hallado con más puntos abocados.

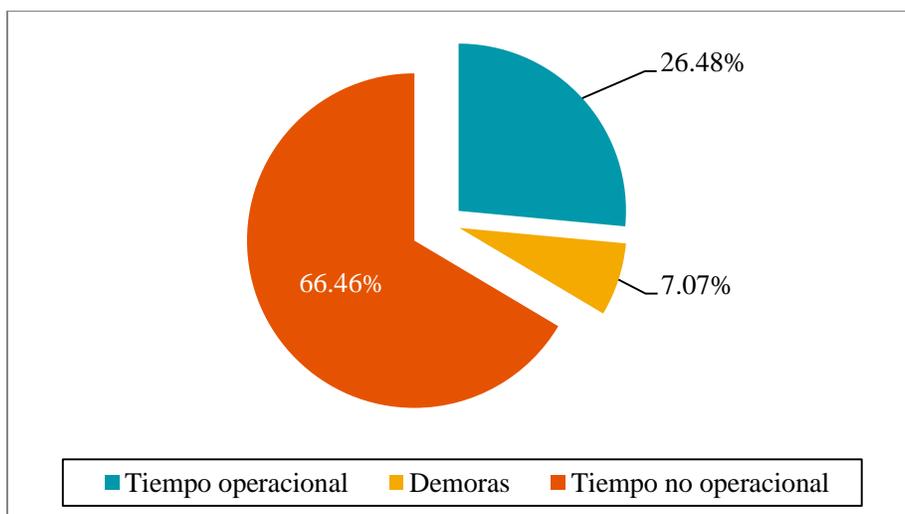


Figura 87: Gráfico circular de los tiempos del LHD 832, período 01-20 de agosto.

En efecto, la cantidad de zanjas con mineral disponible ha aumentado desde la conformación del equipo específico de reducción secundaria para la Fase II, con resultados que se pueden observar en forma parcial en la Figura 42, y con mayor detalle en la siguiente figura que expande el estudio hasta el 16 de agosto.

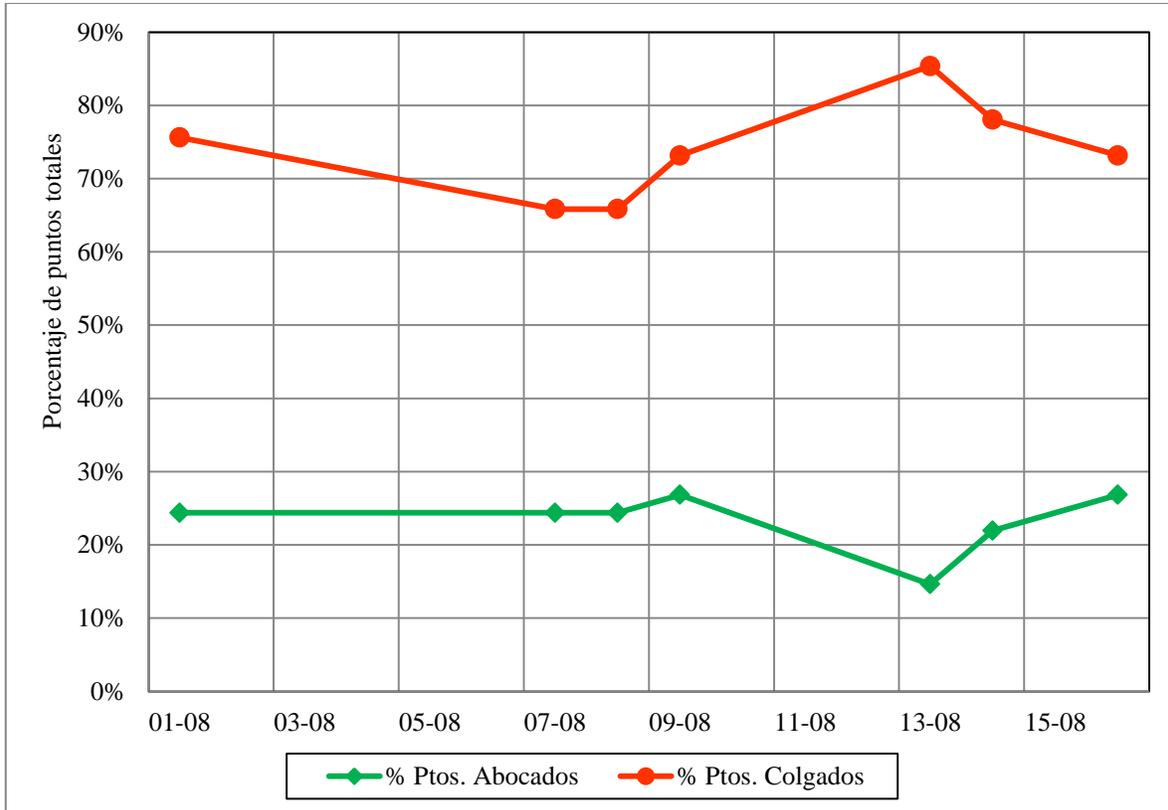


Figura 88: Evolución del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II, período 01-16 agosto de 2018.

La continua reducción secundaria en las calles ha permitido a lo menos mantener una base mínima de 10 zanjas abocadas en promedio durante agosto. Por otro lado, desde el bombeo ocurrido el 05 de agosto, no se ha registrado otro evento de gran magnitud.

Como se mencionó previamente, la Figura 88 es un resultado general del estado de los puntos, pues además se le ha dado seguimiento a cada uno de ellos en lo que respecta a su condición en cada turno A que se realiza reducción secundaria, situación que antes de la conformación del equipo especializado en esta operación, no se realizaba.

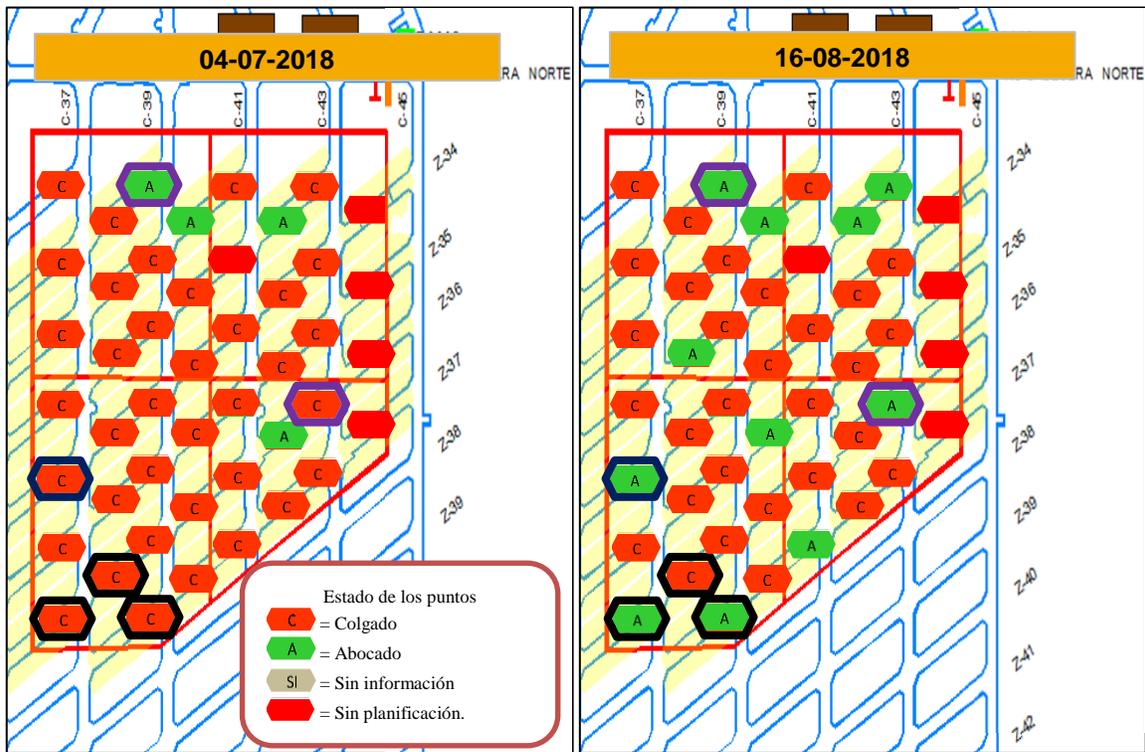


Figura 89: Vista en planta del estado en terreno de los 41 puntos de la Fase II en julio y en agosto de 2018.

La Figura 89 ilustra el avance realizado por la cuadrilla de reducción secundaria en la Fase II a mediados de agosto respecto de la condición en que se encontraba a inicios de julio. De las dos vistas en planta, se puede observar la aparición de nuevos puntos abocados en la zona sur de la calle 37, en particular la zanja 34H (indicado en azul) donde ocurrió el bombeo en agosto, y zanjas en un clúster asociado a la del 37 36F (indicados en negro).

Otro aspecto a considerar en la Figura 89 son los puntos marcados en púrpura. En el caso del punto 39 31H, desde julio se encontraba abocado y con mineral, situación que lo ha llevado a presentar los dos deslizamientos de mineral señalados en la sección 4.3.3. Las inspecciones realizadas a este punto han determinado que la humedad cualitativa ha oscilado entre H=3 y H=4, además de una continua presencia de finos, clasificándolo según la matriz de riesgo como en Alerta.

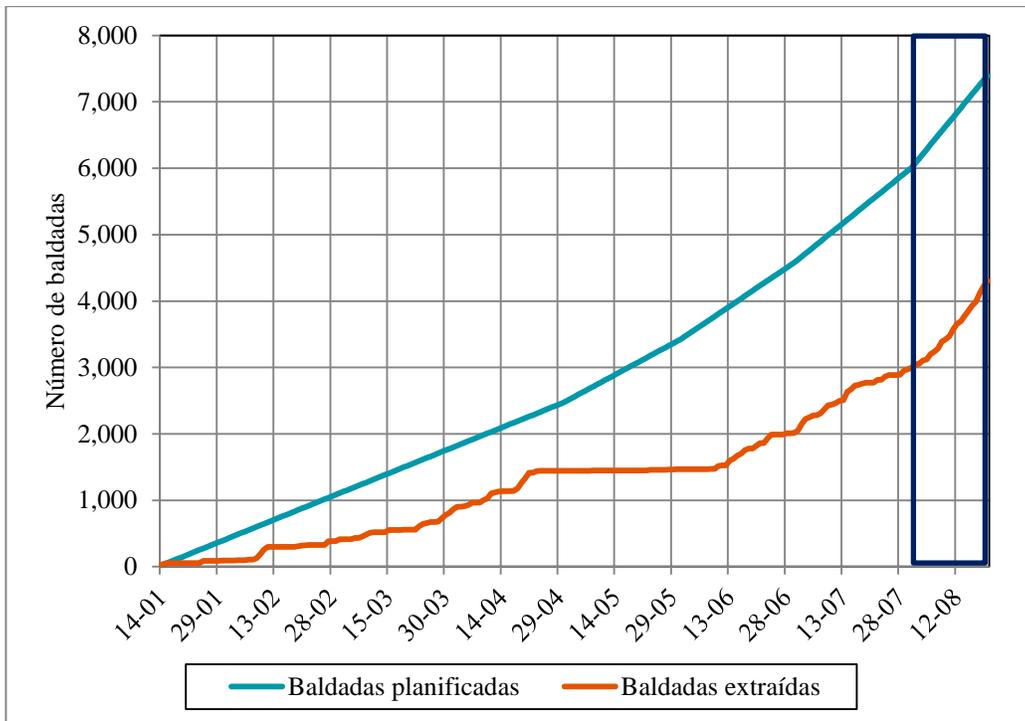


Figura 90: Baldadas extraídas y planificadas en la Fase II Diablo Regimiento, período enero-agosto 2018.

Finalmente, la Figura 90 entrega los resultados expandidos de la Figura 82, incluyendo los 20 primeros días de agosto en términos de baldadas (marcados en azul). En ese período, se realizó extracción en todos los días, registrando un total acumulado desde enero de 4,303 baldadas de 7,392 baldadas planificadas, mostrando un cumplimiento global del 58.2%. Hasta el 20 de agosto se aportaron 1,307 baldadas de 1,385 planificadas, alcanzando un 94.4% de cumplimiento.

5. Discusión

5.1 KPIs obtenidos durante la prueba de extracción

A continuación, en la siguiente tabla se resumen los KPIs obtenidos en la prueba de operación en la Fase II de Diablo Regimiento respecto a las metas propuestas por la SID a finales de 2017.

Tabla 19: Resumen de resultados de KPIs de extracción de agua-barro y operación tele-asistida en Fase II DR, período enero-agosto 2018.

KPI	Resultado prueba de operación (enero-julio 2018)	Resultado prueba de operación (parcial agosto 2018)	Meta propuesta SID
Extracción agua-barro	Dos deslizamientos	Un deslizamiento y un bombeo	Sin eventualidad: sin bombeo ni escurrimiento
Plan de producción	49.9%	94.4%	> 100%
Uniformidad de extracción	10.2%	13.9%	> 75%
Utilización efectiva del equipo	3 [h]	6.1 [h]	> 3.5 [h]
Tiempo medio de ciclo	5.1 - 6.4 [min]	-	4 [min]
Nº baldadas efectivas por turno	88.5%	94.3%	> 100%

A partir de estos resultados globales se pueden realizar comentarios generales de cada uno de los KPIs obtenidos:

- ❖ La presencia de agua-barro en la Fase II es un factor que se mantiene constante durante el año por ubicarse topográficamente sobre la estructura del Canalón, lugar donde se concentran las aguas de lluvia y nieve que en los meses de deshielo se infiltran, y también por ubicarse sobre antiguos niveles de producción con presencia de agua de mina. Por esta misma razón, es esperable de que ocurran eventos de agua-barro al generar perturbaciones en las zanjas y se gatille un movimiento de mineral con alta presencia de humedad en cantidades considerables. Desde el punto de vista de seguridad, los eventos ocurren en un área confinada donde la exposición a las personas es mínima, y completamente nula durante la extracción.
- ❖ Respecto del plan de producción, la SDI planteó una *ramp-up* ambicioso en la que en 5 meses de extracción se alcanzaría un régimen de 2,500 [tpd], incluyendo al tercer mes la llegada del segundo equipo. La idea de esta propuesta era generar un primer lineamiento respecto de lo que se esperaba y el objetivo final, puesto que durante el período de prueba, el ritmo se comparaba con el PAM, que venía a su vez de la R2 del PND 2018.

Si se considera, por tanto, que ese porcentaje de cumplimiento en el plan de producción se aplica al PAM, entonces ya se puede realizar un comentario que compare los porcentajes presentados en la tabla anterior, en cuyo caso, durante los primeros meses siempre se mantuvo por debajo de lo planificado, debido a problemas asociados a la disponibilidad de calles y al sistema de tele-asistencia del LHD que, como se ha mencionado antes, mantuvo durante mayo y los primeros días de junio al equipo fuera de servicio.

Una vez eliminados esos factores externos a la operación misma de extracción, se pudo disponer de mayor área y la disposición de usar el equipo todos los días, pudiendo entonces, y gracias a la nueva estrategia, alcanzar en forma parcial y gradual el PAM. El KPI, por tanto, si bien se encuentra cerca del 100%, se encuentra aplicado a un único equipo, teniendo posiblemente que redefinir la estrategia en cuanto entre en funcionamiento el segundo LHD tele-asistido.

- ❖ La uniformidad de extracción, como se puede visualizar, es el punto débil de la prueba industrial, al no presentar los porcentajes que se tenían previstos desde la SDI, con una estrategia que mantenía sobre el 75% de uniformidad durante los seis primeros meses. Ya mencionado en anteriores ocasiones, la causa de los resultados obtenidos que no superan el 20% se debe a la alta presencia de puntos colgados, los que influyen en una extracción uniforme por ausencia de zanjas vecinas con mineral suficiente para cumplir ese KPI. En vista de que se tiene que cumplir un plan, el movimiento es realizado en los puntos abocados, profundizando aún más la brecha entre tonelaje considerado uniforme del aislado.

Gracias al esfuerzo del equipo de reducción secundaria, se han podido ir liberando más zanjas en lo que va del mes de agosto, aumentando en forma intrínseca el porcentaje de uniformidad al poder planificar más puntos. De todas formas, el resultado sigue estando muy por debajo de lo recomendado (sobre el 50%) y de lo esperado para la Fase II, por lo que es un factor que debe ser considerado en una nueva estrategia más adelante conforme se disponga de más área abocada.

Un factor directo que influía en la uniformidad de tiraje correspondía a la no extracción en la zanja 41 33H, que por encontrarse en estado B no podía tener una programación diaria. La ausencia de un punto ubicado en una calle central de la Fase II influyó negativamente en este KPI al afectar el I.U. de sus vecinos, y tener más toneladas declaradas aisladas. La zanja 41 33H fue liberada finalmente el 20 de agosto por planificación para su extracción, situación positiva que beneficia el desempeño de este indicador.

- ❖ En lo que respecta a la utilización efectiva del equipo para labores tele-asistidas en la Fase II, los bajos resultados durante el período de enero-agosto se debieron a los mismos ya mencionados con el cumplimiento de tonelaje. En general, la falla del sistema tele-asistido se debió por impactos que tuvo el equipo en plena operación, lo que terminó provocando la falla del sensor que permitía el movimiento asistido.

La ausencia de mantenedores especializados en el sistema retrasó por semanas el lograr algún avance para restablecerlo y calibrarlo. En ese aspecto, desde la SID, ya se encuentra en marcha un proyecto con la empresa del sistema de tele-asistencia para poder capacitar a mantenedores en División El Teniente y tener más autonomía al momento de que ocurra alguna eventualidad o mantención a las torres de radar.

- ❖ El tiempo medio de ciclo excede lo comprometido por la SID, y la causa principal corresponde al sistema tele-asistido y al límite en la marcha del equipo que impide que avance a mayor velocidad. Si bien este KPI no ha sido prioritario ni un factor a considerar durante los primeros meses del período de prueba, los límites del sistema pueden llegar a ser un obstáculo para futuras pruebas, en donde las zanjas, y por consiguiente el área de extracción, se encuentren más alejadas del OP.

En lo que respecta a agosto, no se realizaron registro de datos de tiempo al no encontrarse el equipo operativo en general durante el turno A, período de tiempo previo a la ejecución de la nueva estrategia. Además, la restricción de velocidad se mantuvo durante agosto, por lo que se esperaban tiempos de ciclo similares a los presentados y estimados.

- ❖ El rendimiento de baldadas por turno aisló los días en que no hubo extracción y se limitó a la extracción registrada real en comparación con la extracción planificada por el PAM. Respecto a ello, los resultados del KPI resultan con un cumplimiento medio, tanto en el promedio enero-julio como en agosto, superando en ambos el 85% de meta. La sobre extracción explica los resultados obtenidos en ambos casos, aunque con menor impacto en los últimos meses, al tener más zanjas abocadas de donde extraer mineral.

A modo general, los KPIs propuestos por la SID a finales de 2017 resultaban auspiciosos si se consideraba una estrategia con todos los puntos de la Fase II abocado. Sin embargo, este factor ocasionado por la presencia de coladuras con arcos cohesivos en su mayoría afectó a la operación de extracción durante los primeros meses y alteró, por consiguiente, los resultados obtenidos.

5.2 Estrategia de extracción propuesta

Si bien la nueva estrategia de extracción se encuentra diseñada para descolgar zanjas y cumplir el PAM, puede presentar algunos problemas al momento de incorporar las otras variables que también deben considerarse: la uniformidad de tiraje y el cumplimiento de cada punto de extracción. En efecto, el objetivo con la actual estrategia es cumplir con un determinado número de zanjas abocadas para comenzar a realizar movimiento de mineral a nivel de clústeres, mejorando el indicador de uniformidad, a la vez que también se redistribuyen las toneladas programadas y se evita la sobre extracción.

Para lograr aquello, se pretende segregar el concepto de turno de estabilización, hasta el 20 de agosto utilizado tanto para las personas como el equipo, dejándolo únicamente para las personas, en especial para el grupo de reducción secundaria que trabaja en turno A, los que mantienen el límite de utilizar explosivos en a lo más dos calles. El nuevo esquema de las actividades se ejemplifica en la Tabla 20, con dos pares ordenados. Para las otras combinaciones de calles, las actividades se distribuyen en forma análoga.

Tabla 20: Actividades asignadas por turno a cada una de las calles según modificación a la estrategia de extracción en dos días calendarios, con los grupos (37, 39) y (41, 43).

Calles	Día 1			Día 2		
	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
(37)	Extracción	Estabilización	Extracción	Estabilización	Reducción 2°	Extracción
(39)	Extracción	Estabilización	Extracción	Estabilización	Reducción 2°	Extracción
(41)	Estabilización	Reducción 2°	Extracción	Extracción	Estabilización	Extracción
(43)	Estabilización	Reducción 2°	Extracción	Extracción	Estabilización	Extracción

Similar a la Tabla 17, se pueden ver en general las actividades divididas a los pares ordenados, en el ejemplo (37, 39) y (41, 43), para reducción secundaria y extracción. La diferencia es la flexibilidad que se le da al equipo en el turno B para extraer además en las dos calles donde se utilizaron explosivos, teniendo libertad en las cuatro calles. Al comenzar el turno C, se retorna el movimiento de mineral en dos calles, para finalmente dejar el turno de estabilización en las otras dos y así dejar disponible para el acceso del equipo de reducción secundaria en el turno A del siguiente día.

Si bien esta estrategia propuesta ha entregado mejores resultados operacionales, su ejecución ha sido posible de concretar gracias a la tecnología actual de tele asistencia que permite el uso del LHD sin exponer al operador a un posible evento de agua-barro. Por tanto, desde el punto de vista de la extracción, se ha podido aumentar la seguridad en este sector productivo. Sin embargo, la exposición de otros trabajadores, principalmente el equipo de reducción secundaria, es un desafío que aún se encuentra presente y que debe resolverse si se pretende dejar la Fase II, y cualquier otro sector con agua-barro, aislado.

La utilización de equipos perforadores tele asistidos y el uso de explosivos en forma remota no solo permitiría resguardar la vida de los trabajadores, sino que además eliminaría los turnos de estabilización, aumentando el ritmo de producción y la libertad del LHD de poder operar en los turnos A, o en calles aledañas a las que se está realizando una quemada.

Por otro lado, el continuo uso del equipo de reducción secundaria en la Fase II se ha debido a las colgaduras presentes, las que son atribuidas a la consolidación del material granular luego de haber drenado todo el agua y no presentar movimiento en la zanja que permitiera una desestabilización por gravedad. Por ello, se ha podido constatar a través de las inspecciones en terreno que frente a un punto que se encuentre con riesgo de evento o en el que haya ocurrido un deslizamiento, escurrimiento, o bombeo, el cese de extracción provoca eventualmente una colgadura por consolidación de material. En ese aspecto, y considerando el uso de equipos tele asistidos, para preservar el flujo de mineral en ese punto y estimular el tiraje de los vecinos, mantener la extracción, aunque sea controlada o limitada, permite evitar la aparición de colgaduras. Como ejemplo se encuentra la zanja 37 34H, la que después del bombeo del 05 de agosto mantuvo una extracción en los días siguientes, y en los siguientes 15 días su estado se ha mantenido en abocado.

El concepto de la uniformidad se ha mantenido al margen durante todo el período de prueba, y hasta el mes de agosto se ha vuelto un KPI complejo de abordar por el alto porcentaje de área colgada existente en la Fase II, lo que se da en su mayoría por la consolidación del mineral presente en las columnas. En general, la extracción debe realizarse en forma controlada desde el primer momento, considerando además el movimiento en puntos con alto porcentaje de humedad, para mantener los clústeres activos, y se debe evitar la sobre extracción siempre que el plan lo permita. Extraer puntos con humedad rompe el paradigma actual acerca del procedimiento que se realiza durante operación manual, que es cerrar el punto y detener por completo el movimiento de mineral. En ese sentido, se deben contar con procedimientos específicos que eviten tomar esta medida preventiva, que se justifica por la presencia del operador del LHD en terreno, pero no así en un LHD tele-asistido.

Por otro lado, resulta necesario realizar la distinción de dos escenarios al momento de realizar una extracción con agua-barro: un nuevo nivel de producción, o un antiguo nivel de producción reabierto. En el caso de la prueba industrial en la Fase II, se da el segundo caso, en el que se debe generar una estrategia específica que debe enfrentarse a bajas velocidades de extracción y uniformidad, en cierto sentido forzado por las colgaduras consolidadas, además de los riesgos presentes de algún evento. En un nivel de producción que mantiene una velocidad de extracción adecuada y alta uniformidad, se debe precisamente evitar la formación de colgaduras, razón por la que se debe mantener el movimiento de mineral tal y como ocurriría si no hubiese humedad presente.

Por último, se debe mantener un continuo monitoreo de las variables antes descritas con una corta periodicidad para ver su evolución en los puntos, y así detectar posibles candidatos en los que ocurriría un evento de agua-barro, para tomar medidas preventivas que conduzcan a que se desencadene en forma controlada y sin afectar equipos ni infraestructura. Respecto a tecnologías existentes que favorezcan el control de eventos de agua-barro, se encuentran técnicas geotécnicas llamadas tomografías que permiten, mediante la resistividad del material frente a la corriente eléctrica, detectar la presencia de agua-barro en altura respecto del mineral seco. Las tomografías todavía tienen un alcance reducido en sus resultados, al generar planos con información de humedad sobre el centro de la calle, y no en el interior de las zanjas donde se encuentran las columnas de extracción. Además, su período de toma de muestras puede tomar hasta una semana, tiempo excesivo para los continuos cambios en una zona con presencia de agua en altura.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En minas subterráneas profundas es una realidad encontrarse con niveles de producción con alta presencia de agua, que puede provenir de niveles antiguos superiores, o de condiciones climáticas y topográficas, la que a su vez provoca la aparición de material barroso al juntarse con mineral fino. En operación manual, con trabajadores a bordo de un equipo LHD, encontrarse con esta condición en alguna zanja resulta en un riesgo crítico que puede involucrar la pérdida de vidas, equipos e infraestructura si se genera un evento de gran potencia y alcance. Hasta la fecha, la estrategia consiste en cerrar esas zanjas, lo que provoca no solo una pérdida de reservas en esa zona, sino que además el traslado del agua hacia otras zanjas en las que sigue ocurriendo extracción normal.

Ejecutar la prueba industrial en la Fase II de Mina Diablo Regimiento tenía como principal horizonte establecer una nueva filosofía operacional, en la que se pudiera retomar la extracción en puntos que fueron cerrados por presencia de agua-barro sin exponer al trabajador, trasladándolo a una sala de tele asistencia para poder controlar el equipo a distancia. A partir de allí, y estableciendo metas productivas constantes, se deseaba alcanzar una extracción uniforme y segura, emulando los resultados que se logran en la operación manual con mineral seco, para finalmente llegar a un régimen productivo. Así, el enfoque de este estudio consistió en darle seguimiento a los primeros meses de esta prueba, y aparte de reportar resultados y KPIs sugeridos por la SID, utilizar esta información para poder apoyar y establecer una nueva estrategia de extracción que permitiera aumentar la producción con las restricciones y limitaciones disponibles, lo que pudo ponerse en marcha a partir de agosto.

Las bases de datos iniciales impidieron obtener parámetros de humedad concretos en la Fase II, al encontrarse cerrada y sin inspecciones por parte de geólogos a cargo de la SGP. La revisión histórica permitió observar el cierre constante y paulatino de las zanjas a partir de 2013 y hasta el 2017, ocasionado principalmente por lluvias e infiltración en superficie, además del aporte de sectores antiguos cerrados por altas presencias de humedad. Esto terminó por generar zonas con un amplio margen de tiempo en el que no hubo extracción, y provocó que el mineral drenara el agua contenida y se consolidara, formando colgaduras en forma de arcos y chimeneas. Para cuando se retomó la extracción a partir del 2018, solo se pudo sacar de los puntos el mineral al alcance del balde del equipo.

La información obtenida de los datos de extracción permitió diferenciar el caso inicial de extracción durante el período de enero-julio, y el cambio ocurrido en agosto. En los primeros meses, la ausencia de datos de colgaduras y de utilización efectiva del equipo impidió una evaluación profunda del desempeño de extracción, aunque sí hay otros factores que permiten inferir que no fue efectiva, como el llevar una tasa de área colgada que superó el 90% en julio y la sobre extracción en los puntos, como lo ocurrido en abril, donde se obtuvo un cumplimiento de tonelaje cercano al 90%, pero a expensas de la sobre extracción.

Este método de extracción desencadenó eventualmente en un efecto rebote a partir de junio, lo que junto con la nula extracción en mayo por fallas en el equipo, generó a su vez un segundo período de inactividad en la Fase II que propició la formación de colgaduras de finos, situación inesperada dentro de las metas propuestas por la SID y del tonelaje diario del PAM.

Los eventos de agua-barro registrados en la Fase II durante el período de prueba, y otros cercanos en el Bloque 1 de Mina Esmeralda permitieron visualizar y corroborar las hipótesis de los estudios de ingeniería al momento de una recomendación de estrategia de extracción: altas tasas de velocidad y baja uniformidad tanto del clúster como puntual son factores que propician la formación de un evento en una zanja con humedad. Los eventos en el Bloque 1 permitieron corroborar esta conclusión al presentar extracciones utilizando equipos manuales, es decir y en este caso, con tonelajes superiores (sobre los 5,000 [t]) a los que se han alcanzado en los eventos de prueba con la tele asistencia.

Los KPIs que fueron presentados para monitorear el estado de la prueba se dividieron en dos dimensiones: la extracción de mineral húmedo, y rendimientos de operación tele-asistida, los que también se pueden diferenciar en los períodos de enero-julio y agosto. Durante los primeros siete meses de prueba, y en la primera dimensión, efectivamente se logró la extracción de agua-barro en forma segura, pero con bajos porcentajes de cumplimiento (bajo el 90%) y baja uniformidad (bajo el 15%). En la segunda dimensión, las restricciones del sistema de tele asistencia impidieron obtener los tiempos de ciclos esperados (superiores a 5 [min]), y por consiguiente, el número de baldadas por turno que podría alcanzar el equipo (bajo el 85%).

Con estos resultados como punto de partida, a partir de agosto se instauró una nueva estrategia de extracción, en la que se designó un equipo específico de reducción secundaria para disminuir el porcentaje de colgaduras, además de establecer un régimen de actividades por turno en la que se privilegiara la extracción, sin ignorar por cierto las ventanas de tiempo para que los trabajadores pudieran realizar las quemadas sin comprometer su seguridad. La evaluación parcial ha entregado resultados en general positivos desde el punto de vista de los KPIs, alcanzando el 95% del plan de producción, y aumentando paulatinamente el número de zanjas abocadas (bajando la tasa de 90% a 75%), además de subir la utilización efectiva del LHD (de 3 a más de 6 [h/d]).

Se espera que, una vez finalizada la recuperación de área disponible en la Fase II, se opte por una nueva estrategia en la que se priorice la uniformidad y se alcance un porcentaje superior al 50%, que es el valor promedio de las otras fases en Diablo Regimiento, de tal manera de no recaer en las situaciones ocasionadas al inicio de la prueba por colgaduras. Sin embargo, dada las condiciones en las que fue entregada la Fase II, se recomienda adoptar estrategias similares a las planteadas anteriormente para futuras pruebas de extracción, reemplazando como prioridad a la uniformidad por la disponibilidad de puntos de extracción como KPI de evaluación.

6.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Si bien en División El Teniente se ha sacado adelante la prueba industrial y se han aprendido lecciones en lo que se refiere a extracción de agua-barro que han llevado a la formulación de la estrategia actual, aún quedan muchos desafíos pendientes que resultan de gran importancia para poder lograr una operación segura y uniforme.

Lo primero, y tal vez lo más urgente en lo que respecta a cumplir con la filosofía de operación, radica en el equipo de reducción secundaria, el que ha resultado vital para la recuperación de área disponible en la Fase II, pero cuya exposición de los trabajadores a zonas en las que puede ocurrir movimiento violento de barro o descuelgue de fino consolidado de las chimeneas pone en constante peligro su seguridad, y el éxito de la prueba. De momento se han presentado ideas de explosivos y métodos que permiten realizar la operación a distancia, y sin que la cuadrilla tenga que encontrarse cerca de las zanjas, por lo que se recomienda encontrar y buscar una alternativa efectiva de reducción secundaria para lograr por completo el aislamiento de la Fase II de personas. Esto se puede extender también a sistemas de monitoreo que puedan registrar el estado de los puntos sin que los analistas realicen la inspección en terreno.

El segundo aspecto a considerar es la presencia y el comportamiento del agua en altura. Hasta la fecha se disponen de variables operacionales y geográficas que influyen en la aparición de humedad en ciertas zonas de Diablo Regimiento y en ciertos períodos del año, pero también han ocurrido casos de eventos en que se encuentran fuera del alcance de las estimaciones consideradas, lo que podría desencadenar en una situación inesperada y peligrosa. El trabajo futuro en lo que respecta al agua-barro se va tornando en altura, sobre el nivel de producción, y consiste en poder evaluar a través de técnicas físicas o químicas el movimiento del barro sobre las columnas de extracción y el recorrido que realiza desde la superficie o niveles de producción antiguos hasta llegar a las zanjas. Esta información permitiría controlar, mediante las variables operaciones, eventos de gran magnitud asociado a presencia de humedad en el mineral, y de llegar a ocurrir, poder advertirlo con tiempo para que ocurra en forma controlada, y sin afectar el entorno del nivel o comprometer la calle en la que se encuentra o zonas aledañas.

Finalmente, un estudio económico en profundidad acerca de los resultados globales de la prueba de extracción resultaría en un aporte para verificar la rentabilidad del proyecto y la viabilidad para poder expandir estas pruebas en otros sectores mineros. Respecto a ello, se recomienda verificar las distancias desde las zanjas hasta el pique de traspaso, que resultaron en este caso considerablemente mayores que otras fases en Diablo Regimiento y proponer para nuevas pruebas de extracción una estrategia que considere el OP o el chancador a distancias más cercanas de los puntos de extracción, permitiendo así una reducción en los tiempos de ciclo y un aumento en la productividad del sector.

7. Bibliografía

1. AFP, 2018. Cómo El Teniente, la mina subterránea de cobre más grande del mundo, busca extender su vida útil. *Pulso*, 28 Marzo.
2. Basaure, K., 2014. *Caracterización Geotécnica de mineral saturado de Mina Diablo Regimiento, Codelco, División El Teniente*, s.l.: s.n.
3. BCTEC, 2016. *Modelo de operación bajo condiciones agua-barro en proyectos subterráneos de División El Teniente*, s.l.: s.n.
4. BCTEC, 2016. *Pruebas de extracción tele-comandada - Sector Diablo Regimiento Fase II División El Teniente - Protocolo de prueba*, Rancagua: s.n.
5. Brown, E., 2003. *Block Caving Geomechanics*, Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
6. Butcher, R., Stacey, T. & Joughin, W., 2005. *Mud rushes and methods of combating them*, s.l.: The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.
7. Castillo, L., 2009. *Análisis de sensibilidad del Índice de Uniformidad*, Santiago: s.n.
8. Castro, R., 2006. *Study of the mechanism of gravity flow for block caving*, Queensland: University of Queensland.
9. Codelco, 2018. "El Teniente tiene la innovación en su ADN". *Revista El Teniente*, Issue 2395, pp. 10-13.
10. DET-Codelco, 2018. *Overview El Teniente 2018*, Rancagua: Codelco.
11. García, P. S., 2012. *Evaluación Técnico Económico de Recuperación de Reserva en Zona de Agua-Barro en Fase I de Diablo Regimiento*, Rancagua, Chile: s.n.
12. GDI-DET, 2018. *Comité de Innovación División el Teniente*, Rancagua: s.n.
13. GDI-GMIN-DET, 2017. *Prueba Extracción Agua/Barro DR FII*, Rancagua: s.n.
14. GOB - DET, 2018. *Metodologías para la planificación, control y extracción segura de reservas de mineral en zonas de ingreso agua-barro*, Sewell: Codelco.
15. González, R., 2014. *Desarrollo de Flowsim 3.0: simulador de flujo gravitacional para minería de block/panel caving*, Santiago: Universidad de Chile.
16. GRMD-SPL-INF-DET, 2015. *Plan de Negocios y Desarrollo 2015 - Codelco, División El Teniente*, Rancagua, Chile: Codelco.
17. Harrison, D., 2009. *Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8, mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados, para el proyecto nuevo nivel mina, Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile*, Concepción: Universidad de Concepción.

18. Jakubec, J., Clayton, R. & R. Guest, A., 2013. *Mudrush Risk Evaluation*, Vancouver: s.n.
19. Laubscher, D., 1994. *Cave mining - the state of art*, s.l.: Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
20. Montecino, N., 2011. *Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de block/panel caving*, Santiago: Universidad de Chile.
21. Pérez, Á., 2017. *Cuantificación del riesgo de ingreso de agua-barro en El Teniente*, Santiago: Universidad de Chile.
22. Putra, F., 2016. *East DOZ Dewatering Program in DOZ Underground Mine, PT. Freeport Indonesia, Papua, Indonesia*, Papúa: Underground Hydrology PT Freeport Indonesia.
23. Rubio, E., 2010. *Fragmentación - Diseño de Minas Subterráneas*. Santiago: s.n.
24. Samosir, E., Basuni, J., Widijanto, E. & Syaifullah, 2008. *The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine*, s.l.: 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining.
25. SDI-GRMD-DET, 2016. *Explotación Mineral Húmedo Mina El Teniente - Prueba Industrial*, s.l.: s.n.
26. SGC-GRL-DET, 2017. *Procedimiento General para el control del riesgo de Bombeo agua-barro en la Mina*, s.l.: Codelco.
27. SGP - DET, 2010. *Definición de matriz de criticidad para el control de agua-barro*, s.l.: s.n.
28. SID - GRMD, 2016. *Aumento oferta mineral Agua Barro Teniente*, s.l.: s.n.
29. Susaeta, A., 2004a. *Theory of gravity flow (Part 1)*, Santiago: Massmin.
30. Susaeta, A., 2004b. *Theory of gravity flow (Part 2)*, Santiago: Massmin.
31. Valenzuela, F. R., 2017. *Estimación de la producción en sector Diablo Regimiento, mina El Teniente, mediante simulación a eventos discreto*, Rancagua: s.n.
32. Vergara, P., 2016. *Estudio experimental de flujo gravitacional en minería de panel caving*, Santiago: Universidad de Chile.
33. Wicaksono, D. y otros, 2012. *Potential hazard map for the wet muck flow prevention at the Deep Ore Zone (DOZ) Block Cave mine, Papua, Indonesia*, Tembagapura, Papúa: Prosiding TPT XXI Perhapi.

8. Anexos

Anexo A: Determinación de humedad cualitativa en puntos de extracción

A continuación se presentan las fotografías entregadas en el informe de la Superintendencia Gestión de Procesos (SGP) que fueron utilizadas para ilustrar y definir las categorías de humedad de los puntos de extracción empleadas en la matriz de criticidad (SGP - DET, 2010).



Figura 91: Punto de extracción en estado seco (H=0).

La nula presencia de humedad en el punto de extracción indica que está en estado seco. Se debe notar que la humedad debe provenir de la columna que termina filtrándose por el punto, y no debe considerarse de otros orígenes, como agua infiltrada a través de la visera (fortificación de la zanja) o de la calle, que provoca barro superficial y localizado en el punto, pero que no afecta al mineral que por gravedad va descendiendo.



Figura 92: Punto de extracción en estado de baja humedad (H=1).

La presencia de finos con un color más oscuro indica la primera señal de humedad en el punto. No se debe confundir con las partículas de color tierra, las que corresponden a arcillas, y por ende, a dilución presente.



Figura 93: Punto de extracción en estado de humedad (H=2).

La humedad presente en la Figura 93 clarifica la idea anterior, en la que aparentemente no hay dilución, pero sí una mayor humedad. Del mismo modo, y como es requerido para su clasificación, debe hacerse una prueba de cohesión extrayendo material del punto y comprimirlo con un guante.



Figura 94: Punto de extracción en estado de barro incipiente (H=3).



Figura 95: Punto de extracción en estado de barro (H=4).

Puntos que presentan un brillo propio de mineral saturado con agua como se ve en la Figura 95 corresponde declararlos como en estado barro.



Figura 96: Punto de extracción con agua (H=A).

El caso de la Figura 96 presenta las condiciones para declarar el punto con H=A, debido a la granulometría de la roca presente, y a la facilidad para el agua de escurrir sin ser retenida por finos. La humedad presente en la visera, como se señaló anteriormente, no debe ser considerada para el análisis. Además, se pueden ver las pátinas de óxido de cobre presentes en el material.

Anexo B: Estados operacionales en puntos de extracción

Tabla 21: Clasificación operativa de los puntos de extracción según sus condiciones.

Estado	Código	Definición
Cortado Abandonado	I	Punto en que se termina definitivamente la extracción por razones de impurezas, condiciones de riesgo y otros, independiente del porcentaje de extracción.
Cortado Agotado	A	Punto en que se termina definitivamente la extracción por agotamiento de las reservas. La extracción del punto es igual o mayor que el 100% y presenta ley inferior a la ley de cierre.
Operativo	O	Punto en condiciones aptas para extracción.
Razón Operacional	W	Punto fuera de producción por trabajos especiales y temporales, tales como: sondajes en cruzado de acceso o vías de tráfico, desarrollo de labores cercanas, tránsito temporal de suministros, arreglo de carpeta, arreglo de punto de vaciado u otros.
Limitado	L	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un período de tiempo determinado de tiempo.
Reabierto	S	Punto que pasa de un estado cortado a disponible para extracción.
Extracción Telecomandada	N	Punto que, debido a la penetración de barro, presenta riesgo a las personas, por lo tanto, su extracción debe ser realizada con equipo telecomandado.
Colgado	T	Punto en el que el flujo de mineral es interrumpido por un arco natural de soporte por más de 9 turnos, ya sea por planchones, colpas de gran tamaño o humedad.
Cerrado	C	Punto en que se detiene temporalmente la extracción por baja ley de Cu, impurezas o cumplimiento de programa.
Agua/Barro	B	Punto que debido a la penetración de agua y material fino presenta riesgo de bombeo.
Barrera	M	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral o barro de puntos adyacentes.
Reparación	R	Punto fuera de producción por arreglo de su estructura.
Hundido	H	Punto que ha sufrido quiebre del pilar y hundimiento del cerro.
Vacío	V	Punto en el cual solo se ha efectuado la voladura de zanja y no el polvorazo correspondiente al área del punto. Solo se utiliza para métodos de hundimiento convencional.
Futuro	F	Punto en el que no se ha realizado la voladura de zanja.
Quedado	Q	Punto sin material disponible, en el que se ha efectuado la voladura de zanja y polvorazo correspondiente al área y no se ha producido colapso de roca.

Tabla 22: Clasificación de colores del estado operativo de los puntos según su área y disponibilidad.

Clasificación	Color
Área abierta y disponible	Verde
Área abierta y no disponible	Amarillo
Área cerrada y abandonada	Rojo
Área cerrada y por hundir (solo Vacío y Futuro)	Rojo

Anexo C: Teoría del flujo gravitacional (A. Susaeta)

En esta sección se describe brevemente algunos conceptos utilizados en el trabajo de Andrés Susaeta que permitieron la definición del índice de uniformidad utilizados en este estudio. Para mayor información, se recomienda leer directamente sus artículos.

La teoría propone que el fenómeno del flujo gravitacional ocurre principalmente por la superposición de dos estados del sistema que generan el movimiento: (a) el punto de extracción abierto, (b) y el punto de extracción cerrado.

(a) Punto de extracción abierto

Este estado corresponde al movimiento actual de mineral cuando el equipo se encuentra cargando. La propagación del flujo en materiales granulares ocurre a través de fallas consecutivas de arcos de presión formados por material hundido, la que a su vez genera un movimiento lateral cerca de la zona de tiraje aislado en la parte baja de la columna, cuando la distancia entre las zanjas es menor a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado ($D_{pe} < 1.5 \Phi_{ta}$).

(b) Punto de extracción cerrado

Este estado corresponde a un comportamiento físico similar a un medio fluido, en el que la densidad sobre el punto de extracción es mucho menor que en su alrededor, por lo que ocurre una lenta estabilización de densidades, donde el material ubicado en sectores con mayor densidad tienden a moverse hacia sectores de menor densidad. Esto genera un reordenamiento del material hasta llegar a un equilibrio con movimiento vertical y lateral hacia la zona del punto de extracción.

Una separación entre puntos de extracción superior a $1.5 \Phi_{ta}$, o una extracción sin movimiento lateral genera un tiraje aislado, mientras que el tiraje interactivo se alcanza cuando el movimiento lateral sí ocurre, ocasionado porque la distancia entre zanjas es menor a $1.5 \Phi_{ta}$. Un tercer caso se puede generar, y es cuando esta distancia entre puntos es cercana o inferior a $1.5 \Phi_{ta}$, y los puntos de extracción se encuentran abiertos, entonces se alcanza un límite entre ambos tirajes, generándose el tiraje aislado-interactivo, como se ve en la Figura 97.

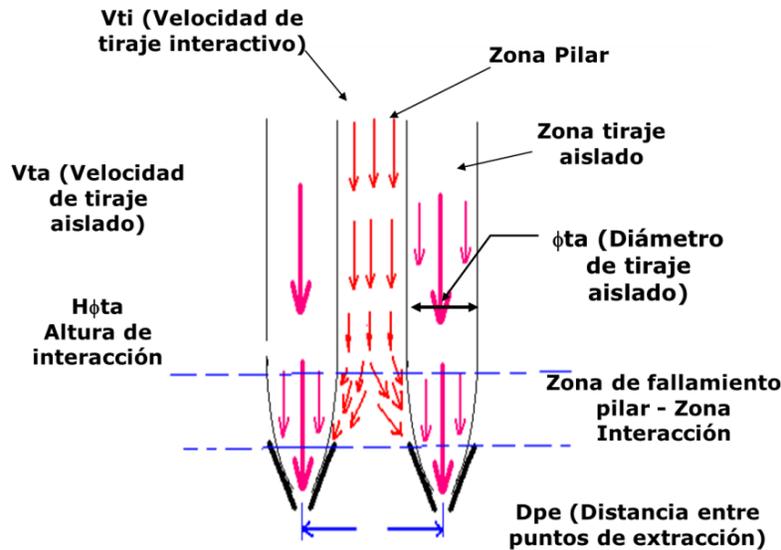


Figura 97: Comportamiento del flujo aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).

Las diferencias entre los tirajes se pueden observar en la Figura 98, en la que se puede apreciar que en el interactivo el material en la parte superior de la cavidad desciende en forma uniforme, mientras que en el aislado-interactivo, existe una diferencia entre los flujos de mineral sobre el punto de extracción y sobre el pilar, formándose concavidades en la superficie de la cavidad. Así, los estados de los tirajes se pueden clasificar en función de las velocidades de tiraje interactivo (V_{ti}), y de tiraje aislado (V_{ta}).

Tabla 23: Modelo de comportamientos de tiraje y velocidades de tiraje.

Modelo de comportamiento	Relación con la velocidad de tiraje
Aislado	$V_{ti} = 0$
Aislado-interactivo	$V_{ta} > V_{ti} > 0$
Interactivo	$V_{ti} = V_{ta} > 0$

El cambio de un tipo de comportamiento a otro dependerá directamente acerca de las prácticas de extracción realizadas por el equipo, el que variará según la uniformidad presente en los diferentes puntos de extracción. De esta manera, la predicción acerca del punto de entrada de dilución (PED) resulta más complejo si se considera el tiraje aislado-interactivo, al tener uniformidades que no son ni 0%, ni 100%. En el caso del flujo gravitacional efectivo que ocurre al extraer mineral con operación LHD, la mejor aproximación es dicho tiraje, pues aunque exista movimiento en todas las zanjas y exista un flujo interactivo, el área fuera de la columna de tiraje aislada tendrá velocidades significativamente menores que dentro de la misma (y por tanto, $V_{ta} > V_{ti}$).

Finalmente, se puede observar el comportamiento de la entrada de dilución con el tiraje aislado-interactivo en la Figura 99, el que exhibe una dilución inicial lateral y al inicio similar al tiraje aislado, para luego acercarse a la curva del tiraje interactivo. A partir de allí, el modelo propuesto por Susaeta de flujo gravitacional considera no solo propiedades del material y geometría del diseño, sino que además el comportamiento de la extracción.

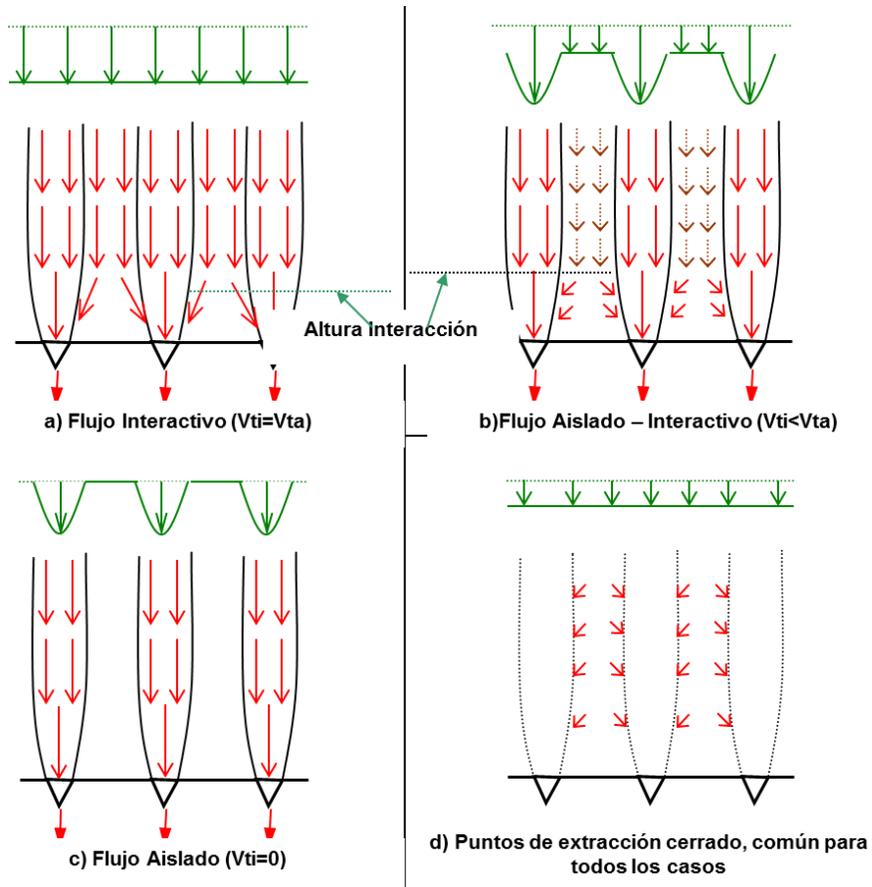


Figura 98: Modelo de tiraje aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).

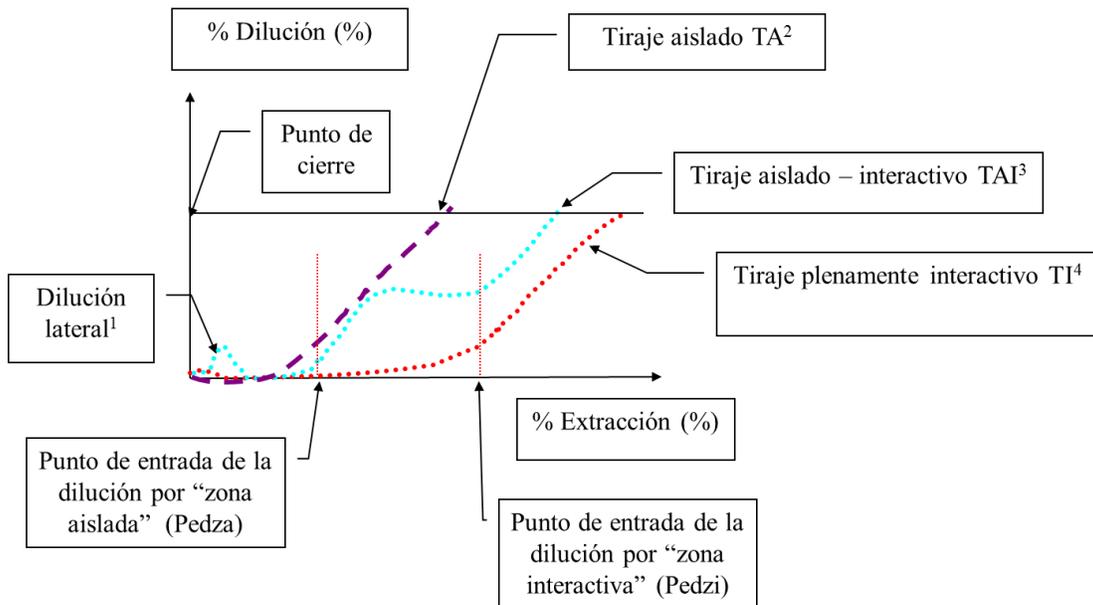


Figura 99: Entrada de dilución calculada según el modelo de tiraje aislado-interactivo (Susaeta, 2004a). Adaptado (Rubio, 2010).

Anexo D: Análisis estadístico de puntos y tonelaje diario, Fase II, período enero-julio 2018

Las siguientes tablas muestran los datos obtenidos para poder realizar los diagramas de cajas y bigotes presentados en la tabla 4.2.3.

Tabla 24: Valores de datos ordenados para el número de puntos con extracción al día, período enero-julio 2018.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Mínimo	1	1	1	1	1	1	3
1er cuartil	1	1	4	6	1	6	6
Mediana	3	3	8	11	2	11	10
3er cuartil	5	8	15	21	3	18	17
Máximo	11	19	21	32	3	31	33

Tabla 25: Estadística básica del número de puntos con extracción al día, período enero-julio 2018.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Promedio	4	6	9	13	2	13	12
Varianza	14.57	48.53	39.95	101.23	1.00	93.10	61.53
Desv. Est.	3.48	6.71	6.15	9.78	0.93	9.36	7.69
Coef. Variación	90.89	106.79	70.00	75.54	46.29	73.67	61.92

Tabla 26: Valores de datos ordenados para el tonelaje extraído diario, período enero-julio 2018.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Mínimo	11.3	14.4	13.3	13.4	13.8	13.3	91.0
1er cuartil	33.9	46.8	53.4	157.1	15.9	106.5	227.5
Mediana	164.0	79.2	320.2	407.9	27.6	425.9	351.0
3er cuartil	353.4	442.6	430.6	625.2	45.6	599.0	676.0
Máximo	407.1	863.6	693.8	1056.5	82.8	905.1	1612.0

Tabla 27: Estadística básica del tonelaje extraído diario, período enero-julio 2018.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Promedio	192	266	284	447	35	409	479
Varianza	32476	105587	49821	127423	631	95699	147516
Desv. Est.	165	313	217	347	23	300	377
Coef. Variación	86	118	76	78	66	73	79

Anexo E: Uniformidad puntual por semana de junio y julio

En forma análoga al estudio realizado en la Sección 4.2.1, se realizó un estudio específico del Índice de Uniformidad durante los meses de junio y julio para cada una de las semanas en las que se realizaron inspecciones en terreno para la verificación de puntos abocados y colgados en la Fase II de Diablo Regimiento. Las siguientes figuras presentan los resultados obtenidos al utilizar los gráficos del PGOM.



Figura 100: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 4-10 de junio 2018 (3 turnos).

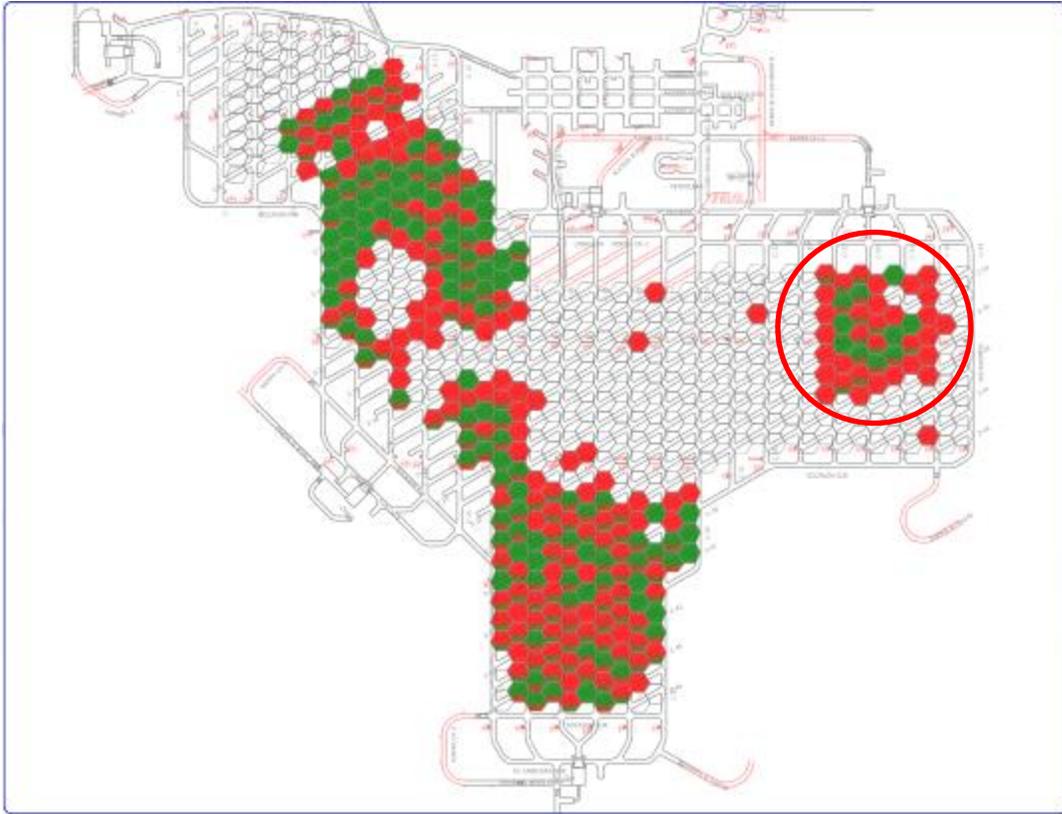


Figura 101: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 11-17 de junio 2018 (3 turnos).

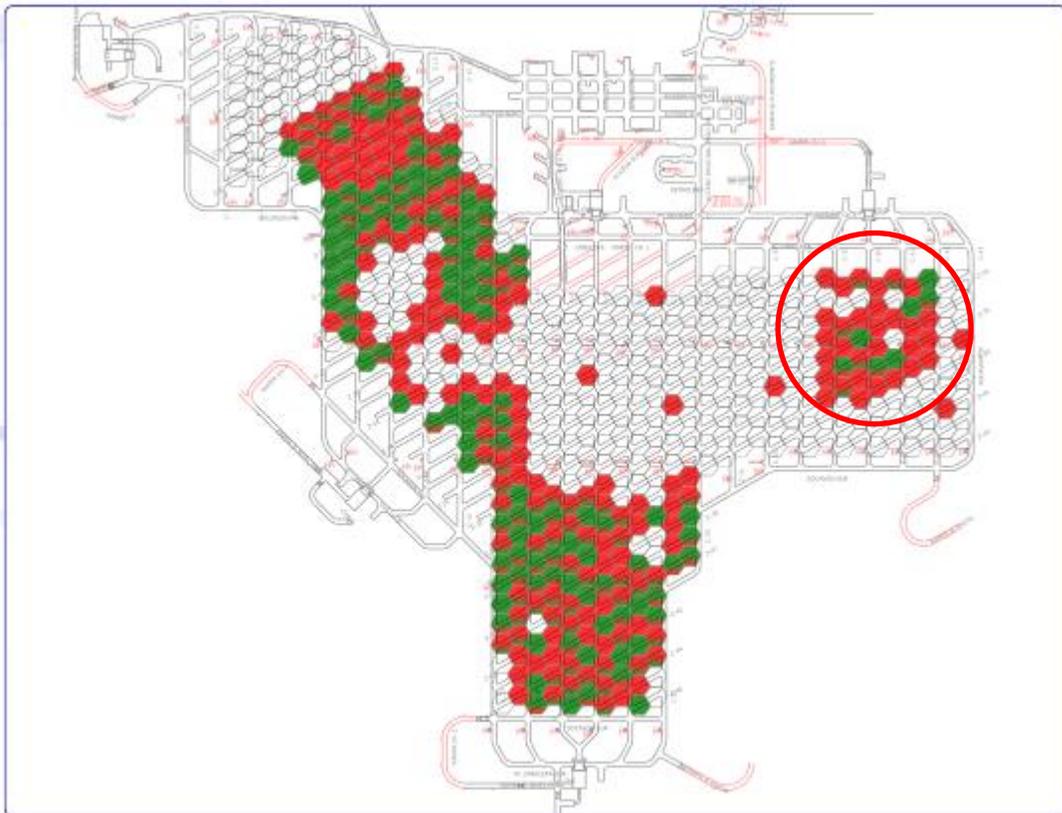


Figura 102: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 18-24 de junio 2018 (3 turnos).

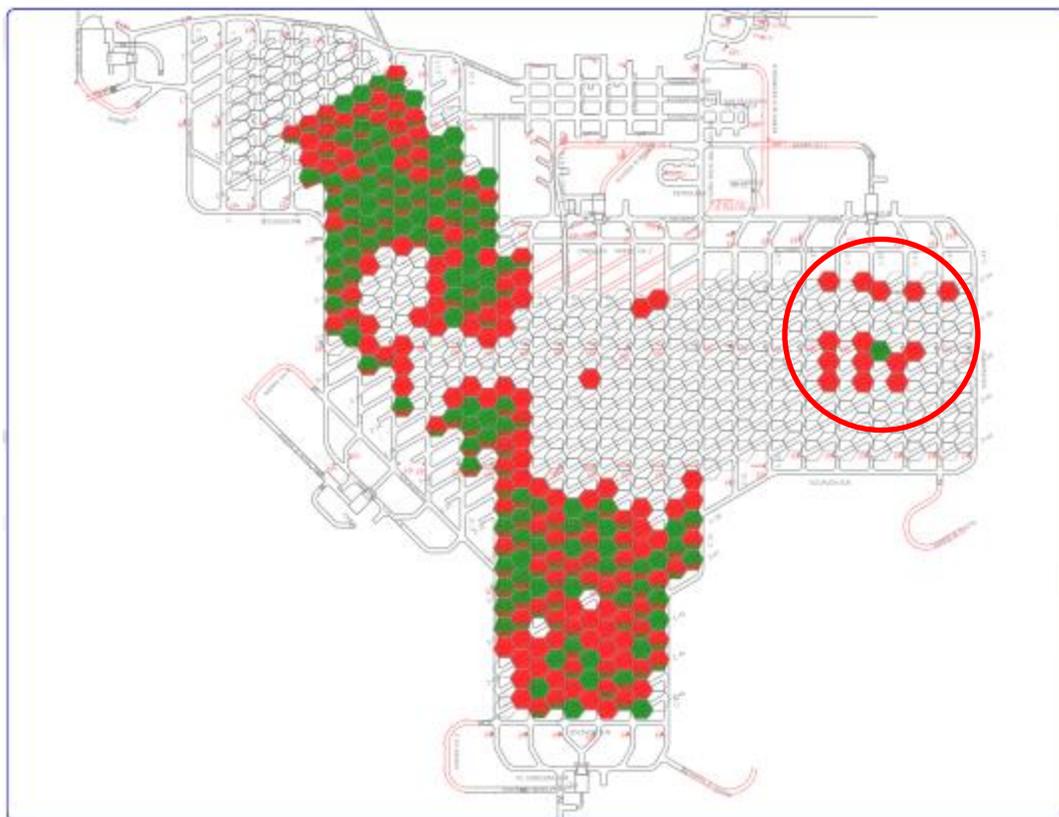


Figura 103: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regiment, 25 de junio-1 de julio 2018 (3 turnos).

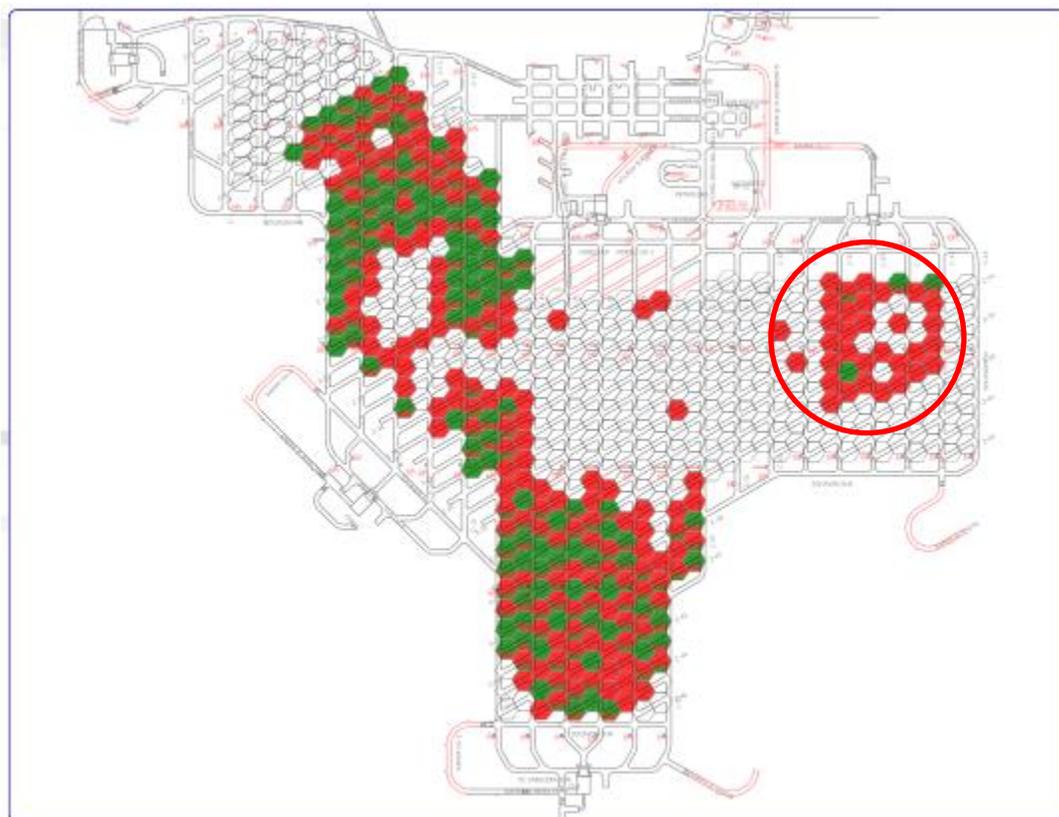


Figura 104: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regiment, 2-8 julio 2018 (3 turnos).

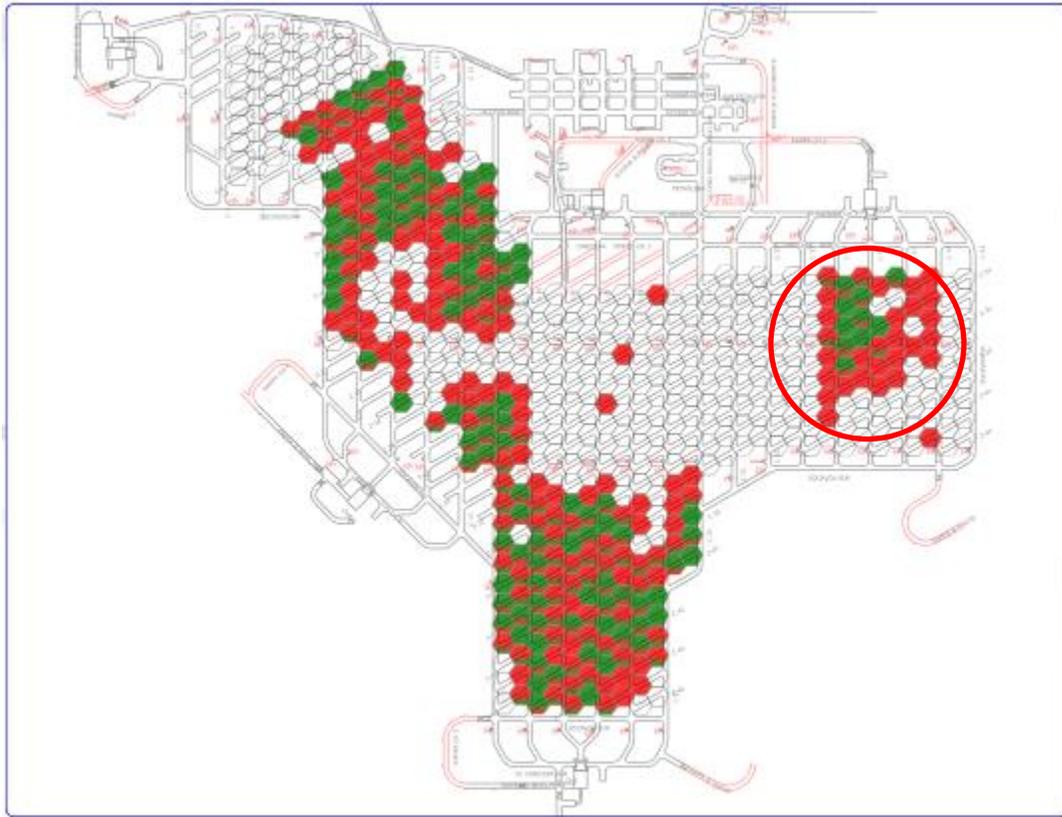


Figura 105: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 9-15 julio 2018 (3 turnos).

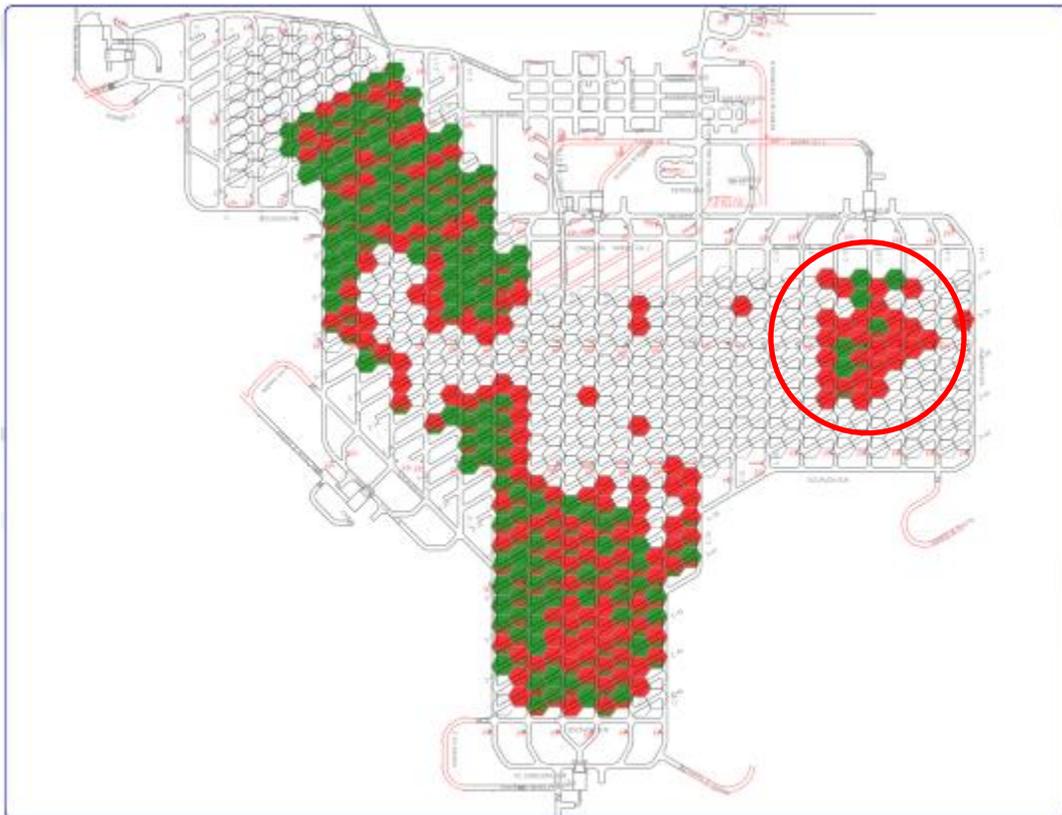


Figura 106: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 16-22 julio 2018 (3 turnos).

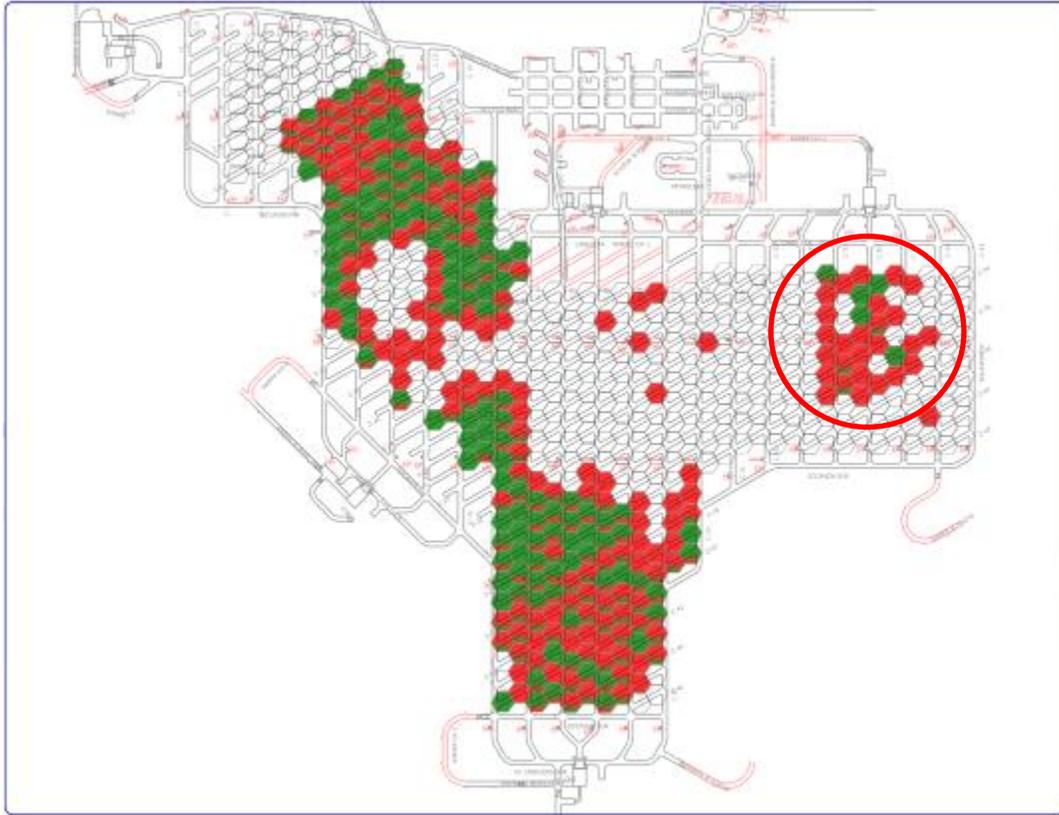


Figura 107: Índice de Uniformidad de la Fase II de Diablo Regimiento, 23-29 julio 2018 (3 turnos).

Anexo F: Tonelaje extraído de los puntos con eventos en el Bloque 1 de Esmeralda

Las siguientes tablas presentan los tonelajes extraídos de los puntos durante el período previo a la ocurrencia de un evento en el Bloque 1 de Mina Esmeralda. En particular, cada tabla indica los tonelajes declarados como aislados o uniformes según PGOM, y la obtención del % de uniformidad tanto puntual como de la vecindad o clúster.

1) Esguerramiento de mineral - 29 39H - 08/11/2017

Tabla 28: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 29 39H durante el mes previo al evento.

11 de octubre al 08 de noviembre	Ton Uniforme	Ton Aislado	% Uniformidad
29 39H	0	4102	0%
27 38F	14	0	100%
27 39F	903	560	62%
29 38H	0	0	
29 39F	0	0	
29 40F	0	0	
29 40H	217	1365	14%
Total de clúster	1134	6027	16%

2) Deslizamiento de mineral - 27 37H – 18/12/2017

Tabla 29: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 37H durante el mes previo al evento.

18 de noviembre a 18 de diciembre	Ton uniforme	Ton aislado	% Uniformidad
27 37H	0	1,806	0%
27 36H	0	0	-
27 37F	0	0	-
27 38F	0	14	0%
27 38H	2,128	301	88%
25 36F	945	1,162	45%
25 37F	3,234	182	95%
Total de clúster	6,307	3,465	65%

3) Deslizamiento de mineral - 27 39F - 10/02/2018

Tabla 30: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 39F durante el mes previo al evento.

11 de enero al 09 de febrero	Ton uniforme	Ton aislado	% Uniformidad
27 39F	0	627	0%
27 38F	169	2,056	8%
27 38H	479	768	38%
27 39H	1,967	377	84%
27 40F	1,707	0	100%
29 40H	0	1,286	0%

4) Deslizamiento de mineral - 33 42H – 28/02/2018

Tabla 31: Tonelaje uniforme y aislado, y porcentaje de uniformidad del clúster asociado al punto 27 39F durante el mes previo al evento.

01 a 27 de febrero	Ton uniforme	Ton aislado	% Uniformidad
33 42H	0	1,295	0%
33 43H	140	56	71%
33 41H	0	0	-
33 42F	401	342	54%
33 43F	215	1,847	10%
31 42F	0	921	0%
31 41F	0	0	-
Total de clúster	756	4,461	14%

Anexo G: Utilización efectiva del equipo durante junio y julio de 2018

Las siguientes tablas presentan la cantidad de horas registradas por el sistema *Optimine* para la obtención del gráfico circular de los tiempos del LHD 832 durante junio y julio de 2018.

Tabla 32: Distribución de horas durante el período de junio registrado por el sistema automático del equipo.

Distribución	Tiempo [h]	Porcentaje
Tiempo operacional	30.9	10.76%
Demoras	7.90	2.75%
Tiempo no operacional	248.6	86.49%
Total	287.4	100%

Tabla 33: Distribución de horas durante el período de junio registrado por el sistema automático del equipo.

Distribución	Tiempo [h]	Porcentaje
Tiempo operacional	127.8	17.22%
Demoras	32.3	4.35%
Tiempo no operacional	582.2	78.41%
Total	742.3	100%

Anexo H: Tiempos de ciclos registrados del equipo LHD 832

A continuación, se presentan en las siguientes tablas los tiempos registrados del equipo LHD 832 durante su operación en la Fase II, las que fueron utilizadas para determinar los tiempos de ciclos y velocidades medias.

Tabla 34: Tiempos registrados el 21 de junio al equipo durante extracción.

21-jun		Traslado				Maniobras en el punto	
F-II	Punto	Ida	Vuelta	Descarga	Carguío	Entrada	Salida
	41 37F		0:03:00	0:00:15	0:00:09		
		0:02:45	0:02:40	0:00:08	0:01:07	0:00:08	0:00:08
	41 36F	0:02:26	0:02:35	0:00:11	0:00:16	0:00:17	0:00:11
		0:02:25	0:02:34	0:00:14	0:00:22	0:00:13	0:00:22
		0:02:30	0:02:34	0:00:14	0:00:22	0:00:15	0:00:10
		0:02:55	0:02:37	0:00:13	0:00:13	0:00:19	0:00:09
		0:03:20	0:03:35	0:01:25	0:00:10	0:00:07	0:00:07

Tabla 35: Tiempos registrados el 05 de julio al equipo durante extracción.

05-jul F-II	Punto	Traslado		Descarga	Carguío
		Ida	Vuelta		
	41 36F	0:02:30	0:02:55	0:00:13	0:00:37
		0:03:13	0:02:33	0:00:22	0:00:38
	41 33F	0:02:12	0:02:14	0:00:28	0:01:07
		0:02:19	0:02:10	0:00:26	0:01:02
	41 32H	0:02:10	0:02:00	0:00:25	0:01:11
		0:02:16	0:02:17	0:00:24	0:00:44
	41 37H	0:02:39	0:02:45	0:00:27	0:00:40
		0:02:43	0:02:39	0:00:26	0:00:45
	39 31H	0:02:10	0:01:51	0:00:27	0:00:33
		0:01:50	0:02:09	0:00:27	0:00:40
	39 35H	0:03:31	0:02:16	0:00:25	0:00:35
		0:02:38	0:02:34	0:00:22	0:00:36
	39 32F	0:01:46	0:02:04	0:00:24	0:00:40
		0:02:14	0:02:00	0:00:26	0:00:43