



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

**ANÁLISIS HISTÓRICO DE LAS VARIABLES OPERACIONALES ASOCIADAS
AL INGRESO DE AGUA/BARRO EN EL SECTOR RESERVAS NORTE,
DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

NICOLE LARA LLANO

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
FRANCISCO RODRIGUEZ MEDRANO
RICARDO VARGAS VERGARA**

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN

La ocurrencia de bombeos o escurrimientos en los puntos de extracción es identificada como uno de los 5 principales peligros operacionales a los que se expone la minería de block/panel/sublevel caving, es por esta razón que existe un gran interés sobre el entendimiento y comprensión de su génesis con el fin de tomar decisiones apropiadas en cuanto al control y manejo de este fenómeno. A pesar de que existen investigaciones que abordan esta problemática, a la fecha aún no es claro qué condiciones son determinantes en el desencadenamiento de estos eventos, existiendo sólo teorías no probadas.

El eje central de esta memoria será caracterizar el ingreso de agua-barro, a partir de un estudio de la data histórica de variables asociadas al fenómeno. Para ello, se utiliza como sector de aplicación la mina Reservas Norte de División El Teniente, Codelco, que desde inicios de su operación ha presentado problemas de agua-barro. Este estudio incorpora un análisis general del ingreso de material saturado al sector, análisis de eventos históricos de bombeos y escurrimientos, como también una comparación con el sector Diablo Regimiento.

La caracterización del ingreso de barro de Reservas Norte y posterior comparación con Diablo Regimiento permite establecer que el origen del barro proviene de la conexión con labores antiguas concentradoras de barro histórico, es más, los primeros puntos afectados se ubican en la zona donde se dio inicio al caving. Luego, la propagación es en dirección del avance de la frente de hundimiento, en donde al cerrarse uno o más puntos de la vecindad se generan planos preferenciales de flujo y al encontrarse los elipsoides traslapados, el material saturado diluye a través de los intersticios de la columna quebrada en movimiento.

Dicho lo anterior, es que todo proyecto minero que utilice métodos de hundimiento debe incluir una caracterización hidrogeológica que permita determinar el riesgo potencial de una descarga de agua/barro a la que estará expuesto, definiendo e implementando tempranamente las medidas de mitigación y control. De esta manera la operación se puede llevar a cabo en forma segura y las consecuencias en cuanto a pérdidas de reservas pueden ser reducidas.

En cuanto a los nuevos proyectos de DET, Nuevo Nivel Mina y Nuevo Nivel Profundo, ambos se ubican bajo labores que se encuentran afectadas por barro, por lo que se vuelve necesario crear políticas apropiadas para su control antes de comenzar la operación, entre las que se proponen: buscar alternativas a la conexión tipo domo, generar perfiles de extracción de columnas que descendan de la manera más uniforme posible, para lo cual se debe contar con área disponible, la frente de hundimiento debe ser angosta para permitir flexibilidades operativas, no permitir la sobre extracción de los puntos y contar con políticas de drenaje.

Este trabajo forma parte del proyecto “MudFlow” ejecutado por el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Primero, a mi familia que siempre ha estado detrás de cada una de las decisiones que he tomado en la vida, este primer gran logro definitivamente es para ustedes. Gracias papá, mamá y Monykiwi, ahora me toca a mí apoyarlos a ustedes, los quiero infinitamente.

A aquellas personas que sin saberlo hicieron que llegara hasta donde estoy, la tía Inés que me hizo postular al Carmela y el tío Feña que cuando me quería morir porque no había quedado en Ingeniería, estuvo ahí y me sugirió Bachillerato, la mejor decisión lejos.

A mis tatas Gilberto y Juan, mi wely Gloria, la mama Erika, tí@s, prim@s, etc, que forman parte de la familia maravillosa que tengo, quienes siempre estuvieron preocupados por mí y enviando buenas energías durante toda esta etapa.

A mi otra familia, mis amigos, Cachete, Cakin, Yerkez, Chama, Sewita, Cariki, Rous, Panchis, las Vivis, Doping +, Alto Control, gracias por darle sabor y color a mi vida, son lo más!.

Agradezco además al Profesor Raúl Castro, por confiar en mí y darme la oportunidad de realizar mi memoria en el Laboratorio de Block Caving, en donde conocí a un grupo muy cálido de personas, gracias BCLove, en especial a Isakis Purulakis que fue un gran compañero durante este proceso.

A los miembros de la comisión, por su apoyo y consejos que ayudaron en la realización de esta memoria, Ricardo y Francisco, muchas gracias.

A División El Teniente, CODELCO, quienes facilitaron la información utilizada en esta investigación, en especial a Don Max Barahona.

Siempre he dicho que he tenido una vida muy feliz y mi meta es seguir teniéndola, espero me acompañen.

Muchas gracias!

A mí familia

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación del trabajo.....	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Alcances	3
1.3. Metodología	4
1.4. Contenidos de la memoria	5
Capítulo 2: Estado del arte	7
2.1. Fundamentos de los bombeos y derrames	7
2.1.1. Definición	7
2.1.2. Factores desencadenantes.....	7
2.1.3. Mecanismos de falla que producen eventos de bombeos.....	8
2.1.4. Tipos de barro.....	15
2.2. Registros de bombeos en operaciones mineras.....	15
2.3. Control y manejo de material saturado en minas de block/panel caving	16
2.3.1. Drenaje de agua.....	16
2.3.2. Extracción de material con LHD telecomandados.....	17
2.3.3. Planificación minera.....	17
2.3.4. Sistemas de monitoreo	18
2.3.5. Relleno del cráter de subsidencia.....	18
2.3.6. Clasificación de puntos de extracción	18
2.3.7. Estándares operacionales para el manejo de material saturado implementado en División El Teniente.....	19
2.4. Antecedentes agua-barro en División El Teniente	23
2.4.1. Análisis general del ingreso de agua-barro en Mina Diablo Regimiento.....	25
2.5. Conclusiones del capítulo	26
Capítulo 3: Potencial económico del material saturado remanente	28
3.1. Situación actual agua-barro en sector Reservas Norte.....	28

3.2.	Reservas extraíbles	30
3.3.	Calculo de reservas remanentes de puntos cerrados afectados por barro	31
3.4.	Calculo de reservas remanentes de puntos con alta probabilidad de ingreso de barro al ubicarse bajo zonas de riesgo de ingreso de barro	32
3.5.	Leyes de cierre de puntos declarados agua-barro	34
3.6.	Conclusiones del capítulo.	35
Capítulo 4: Análisis general del ingreso de barro.....		36
4.1.	Antecedentes históricos del sector Reservas Norte	36
4.1.1.	Descripción del sector	36
4.1.2.	Hitos operacionales de extracción e inicio de caving	36
4.1.3.	Labores antiguas superiores.....	39
4.1.4.	Avance frente de hundimiento	40
4.1.5.	Alturas in situ	41
4.2.	Caracterización del ingreso de agua-barro al sector.....	41
4.2.1.	Frecuencia anual declaración de puntos como agua-barro.....	42
4.2.2.	Topografía.....	42
4.2.3.	Precipitaciones	44
4.2.4.	Estructuras geológicas.....	45
4.2.5.	Secuencia de ingreso de agua-barro.....	45
4.2.6.	Altura extraída a la que ingresa agua-barro.....	46
4.2.7.	Origen del barro	49
4.2.8.	Tasa de extracción	51
4.3.	Manejo de material saturado con LHD Remoto.....	55
4.4.	Estrategia de extracción.....	55
4.5.	Comparación de la situación de agua-barro entre el sector Diablo Regimiento y Reservas Norte.....	56
4.6.	Conclusiones del capítulo	58
Capítulo 5: Análisis de eventos de bombeos y escurrimientos históricos.....		61
5.1.	Formas en que fluye el material saturado a través de los puntos de extracción	61
5.2.	Bombeo calle 11 zanja 24H	62
5.2.1.	Antecedentes	62
5.2.2.	Estados operacionales del punto y su vecindad	62
5.2.3.	Humedad.....	64
5.2.4.	Granulometría	64
5.2.5.	Altura extraída.....	66

5.2.6.	Tasa de extracción	68
5.2.7.	Producción programada versus real.....	68
5.3.	Escurrimiento calle 12 zanja 17 F.....	69
5.3.1.	Antecedentes	69
5.3.2.	Estado operacional	69
5.3.3.	Humedad	70
5.3.4.	Granulometría	70
5.3.5.	Altura extraída.....	71
5.3.6.	Tasa de extracción	71
5.4.	Conclusiones del capítulo	72
Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro.....		74
Bibliografía		77
ANEXO A.....		79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Registro y descripción de bombes asociados a labores subterráneas.	16
Tabla 2: Matriz de criticidad elaborada por PT Freeport Indonesia. (Widijanto, 2012)..	19
Tabla 3: Alturas extraíbles limitadas para los puntos en zona de riesgo de cada sector de División El Teniente (CODELCO, 2013).	20
Tabla 4: Resumen del potencial económico del mineral saturado remanente y mineral saturado potencialmente extraíble en sector Diablo Regimiento (Navia, 2014)..	25
Tabla 5: Estado operacional de los puntos de extracción en términos de área.	30
Tabla 6: Reservas remanentes potencialmente extraíbles de los puntos cerrados afectados por barro.....	32
Tabla 7: Reservas remanente potencialmente extraíbles de puntos con alta probabilidad de ingreso de barro al ubicarse bajo zonas de riesgo.....	34
Tabla 8: Descripción labores superiores sobre Reservas Norte.....	40
Tabla 9: Detalle del origen del ingreso de barro a los puntos de extracción del sector Reservas Norte.	50
Tabla 14: Cuadro comparativo del ingreso de barro entre Diablo Regimiento y Reservas Norte.....	58
Tabla 10: Registros de muestras de laboratorio de humedad de los puntos 11 24H, 11 25F, 11 25H y 11 24F, tomadas entre el 18 de diciembre del 2009 y el día del bombeo.....	64
Tabla 11: % de mineral menor a 5 cm del punto 11 24H y su vecindad, previo a ser declarado agua-barro. (* Puntos aún operativos al 3 de marzo del 2010)	65
Tabla 12: Descripción temporal de las tasas de extracción aplicadas al punto 11 24H previo al bombeo.....	68
Tabla 13: Producción programada versus real punto 11 24H.....	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación sectores División El Teniente (CODELCO, 2009)	2
Figura 2: Condiciones requeridas para la ocurrencia de un bombeo o derrame. (Butcher 2005).	8
Figura 3: Entrada de barro debido a la falla de tranques de relaves ubicados sobre la operación (Butcher, 2000).	9
Figura 4: Falla de compuerta de soporte de rellenos de caserones (Butcher, 2000).	10
Figura 5: Falla de talud de material blando (Butcher, 2000)	11
Figura 6: Ingreso de barro en la columna de quebrado generado por la extracción (Butcher, 2000).	12
Figura 7: Descarga de bolsones de barro generados a partir de la compactación del quebrado (Butcher, 2000).	13
Figura 8: Drenaje reducido en quebrado y en estéril sobre el quebrado (Butcher, 2000).	14
Figura 9: Clasificación mecanismos de falla de bombes de barro (Butcher, 2000).	14
Figura 10: Ejemplo de un barro fluido de Cullinan (izquierda). Ejemplo de barro viscoso desde un punto de extracción de la mina Northparkes (derecha). (Jakubec et al, 2012).	15
Figura 11: Categorías de humedad medidas en terreno (Becerra, 2011).	20
Figura 12: Categorías de granulometría medidas en terreno (Becerra, 2011).	21
Figura 13: Perfil de extracción de puntos con riesgo de agua-barro (CODELCO, 2011). .	21
Figura 14: Definición de la Matriz de criticidad para el control de agua barro utilizada en División El Teniente (CODELCO, 2010).	22
Figura 15: Polígono de la estrategia de extracción implementada en Reservas Norte durante el 2011 (Ferrada, 2011).	23
Figura 16: Plano de riesgo ingreso de agua-barro de mina El Teniente (Codelco, 2014).	24
Figura 17: Estado operacional de los puntos de extracción del sector Reservas Norte al día 22 de noviembre del 2013.	29

Figura 18: Altura económicamente extraíble sector Reservas Norte.	31
Figura 19: Zona de riesgo de ingreso de barro, sector Reservas Norte.	33
Figura 20: Histograma leyes de cierre de puntos declarados agua-barro.	34
Figura 21: Línea de tiempo de los hitos operacionales de extracción entre 1989 y 1999 de Reservas Norte.	37
Figura 22: Secuencia de extracción e inicio de caving del sector Reservas Norte (CODELCO, 2007).	38
Figura 23: Área colapsada debido a los estallidos de roca ocurridos en diciembre de 1992 (línea roja). Los polígonos coloreados indican el área de influencia de los puntos de extracción (CODELCO, 2009).	38
Figura 24: Labores superiores abandonadas sobre Reservas Norte.	39
Figura 25: Secuencia de incorporación de área.	40
Figura 26: Altura in situ sector Reservas Norte al inicio de la operación.	41
Figura 27: Frecuencia anual de cierre de puntos de extracción debido a la problemática del barro.	42
Figura 28: Topografía del año 2011 sobre el sector Reservas Norte.	43
Figura 29: Vista en sección transversal de la topografía sobre el sector Reservas Norte, a 700, 900 y 1100 metros.	43
Figura 30: Precipitación histórica registrada en estación Sewell (CODELCO, 2014).	44
Figura 31: Histograma de mes de cierre de puntos de extracción.	45
Figura 32: Secuencia de ingreso de barro anual, sector Reservas Norte.	46
Figura 33: Altura de columna extraída antes del cierre de puntos por agua-barro.	47
Figura 34: Histograma de altura de columna antes del cierre de punto por agua-barro.	47
Figura 35: Altura extraída a la que se cierra los puntos por agua-barro versus tiempo... ..	48
Figura 36: Histograma del % de columna in situ extraída antes del cierre de los puntos por agua – barro.	49

Figura 37: Origen del ingreso de barro a los puntos de extracción del sector Reservas Norte.....	51
Figura 38: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 08 23F.	53
Figura 39: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 07 22H.	53
Figura 40: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 11 23H.....	53
Figura 41: Tasas de extracción histórica aplicadas en el punto 12 17F	54
Figura 42: Tasas de extracción histórica aplicadas en el punto 11 26H.....	54
Figura 43: Tasas de extracción históricas aplicadas al punto 14 22F.....	54
Figura 44: Puntos de extracción reabiertos y operados con LHD Remoto.	55
Figura 45: Evolución temporal de estados de puntos de extracción asociados a agua-barro del sector Reservas Norte.....	56
Figura 46: Bombeo producido en el punto de extracción 11 24H.....	62
Figura 47: Vecindad punto de extracción.....	63
Figura 48: Estados operacionales del punto 11 24H y su vecindad un año previo al bombeo.....	64
Figura 49: Variación granulométrica del punto 11 24H y su vecindad, 6 meses antes del bombeo.....	65
Figura 50: Representación de la altura extraída [m] y % de columna in situ extraída del punto 11 24H y su vecindad.....	66
Figura 51: Altura extraída normalizada del punto 11 24H y su vecindad.	67
Figura 52: Perfil de altura extraída calle 11, 2 de febrero del 2010, Reservas Norte.	67
Figura 53: Tasas de extracción aplicadas un año antes del bombeo en el punto 11 24H.	68
Figura 54: Vecindad punto 12 17F.	69
Figura 55: Estados operacionales del punto 12 17F y su vecindad previo al escurrimiento.	69

Figura 56: Humedad categórica punto de extracción 12 17F.	70
Figura 57: Granulometría punto de extracción 12 17F.	70
Figura 58: Representación de la altura extraída [m] y % de columna in situ extraída del punto 12 17F y su vecindad.	71
Figura 59: Tasa de extracción del punto 12 17F previo al evento de escurrimiento.	72
Figura 60: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de marzo del 2009, Reservas Norte. ...	79
Figura 61: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de mayo del 2009, Reservas Norte.	79
Figura 62: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de julio del 2009, Reservas Norte.	79
Figura 63: Perfil de extracción calle 11, 2 septiembre del 2009, Reservas Norte.	80
Figura 64: Perfil de extracción calle 11, 2 de noviembre del 2009, Reservas Norte.	80
Figura 65: Perfil de extracción calle 11, 2 de enero del 2010, Reservas Norte.	80

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del trabajo

El ingreso de barro dentro de los puntos de extracción u otros puntos de descarga, es uno de los grandes desafíos a los que hoy en día se ve enfrentada la industria minera, identificado como uno de los 5 principales peligros operacionales a los que se vulnera la minería subterránea, siendo cada vez más frecuentes en diversas minas subterráneas no solo explotadas por hundimiento como block/panel/sublevel caving, sino también por otros métodos como longwall mining y caserones con relleno (Heslop 2000).

La ocurrencia de este fenómeno trae consigo consecuencias dañinas tanto para la productividad como seguridad de la operación, teniendo efectos directos sobre el valor del negocio minero, tales como: retrasos prolongados, pérdidas de reservas extraíbles y aún más importante, el ingreso repentino de barro puede provocar accidentes con resultados fatales en algunos casos.

Aunque existen investigaciones que abordan esta problemática, a la fecha aún no es claro qué ocurre dentro de las columnas de extracción, en cuanto a su comportamiento y movimiento del fluido que genera estos eventos, ya sea en forma de bombeos o derrames de barro, existiendo sólo teorías no probadas. A pesar de esto, la experiencia de diferentes faenas que operan bajo la presencia de material saturado ha permitido entender el problema a nivel macro e identificar variables involucradas en el fenómeno, mediante el cual se han implementado diferentes medidas y estrategias para controlar y prevenir el ingreso de barro y así operar bajo condiciones seguras y mantener una explotación continua.

En el caso de División El Teniente de CODELCO esta situación ha ocurrido históricamente como consecuencia de los finos generados por el hundimiento y el agua proveniente de deshielos, por lo cual se han establecido estándares operacionales en base a la práctica misma y la experiencia de otras minas de block/panel caving, para contrarrestar sus efectos. Entre ellas, se han limitado alturas, se establecieron perfiles de extracción en puntos ubicados en zonas de ingreso de barro y aquellos puntos que cumplen condiciones críticas de granulometría y humedad son cerrados con el fin de evitar un incidente mayor. La implementación de estos procedimientos ha permitido disminuir la frecuencia de bombeos pero no así los derrames, además el barro sigue propagándose e ingresando a los puntos de extracción que por políticas de seguridad son cerrados prematuramente

dejando mineral remanente en la columna, lo que demuestra que se debe seguir avanzando en las investigaciones para optimizar los resultados de la operación (CODELCO, 2014).

Por otro lado si se comprueba que existe una relación entre la conexión del caving con labores antiguas ya explotadas afectadas por barro y el ingreso de barro, adquiere gran importancia el hecho que gran parte de los sectores que forman el Nuevo Nivel Mina (NNM) y Nivel Profundo (NP) se ubican bajo zonas cerradas por barro. Es más la primera zona en comenzar a operar de NNM, llamado Norte Andes se ubica inmediatamente bajo el sector Reservas Norte, sector que presenta grandes dificultades para operar con barro y se ubica a tan sólo 240 [m] de NNM (Figura 1).

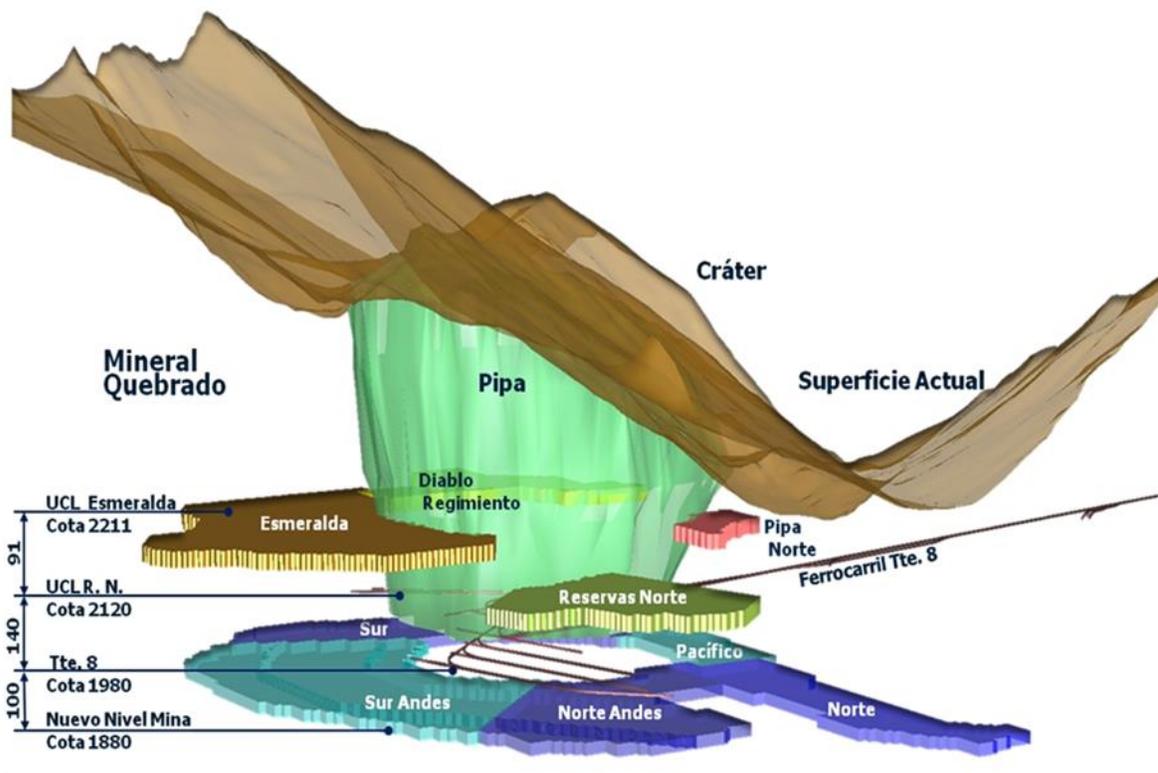


Figura 1: Ubicación sectores División El Teniente (CODELCO, 2009)

Todo lo expuesto anteriormente revela la necesidad de analizar en mayor profundidad esta problemática para clarificar las hipótesis planteadas y permitir una toma de decisiones apropiadas en cuanto al ingreso de material saturado y su posterior manejo. En consecuencia, el propósito de este trabajo será llevar a cabo un estudio técnico-operacional de la situación, para lo cual se utilizará como sector de aplicación la mina Reservas Norte de la División El Teniente.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Estudiar el ingreso de barro en los puntos de extracción del sector Reservas Norte de División El Teniente, CODELCO, en base al análisis de la data histórica de diferentes variables operacionales que pueden estar asociadas a la ocurrencia de este fenómeno.

1.1.2. Objetivos específicos

Con el fin de cumplir el objetivo general propuesto resulta importante definir ciertos objetivos específicos para dar consistencia al estudio. Los objetivos específicos que se consideran son:

- Estimar el potencial económico que existe en la recuperación de reservas remanentes que no es posible extraer en los puntos de extracción cerrados por el ingreso de barro.
- Caracterizar el ingreso de barro en los puntos de extracción a través de un análisis de las siguientes variables: secuencia de ingreso de barro en el sector, estacionalidad, granulometría, condición de humedad, perfiles de alturas extraídas y velocidad de extracción.
- Entender qué condiciones inciden en que existan zonas que no se ven afectadas por barro en el sector Reservas Norte.
- Realizar un análisis de la ocurrencia de bombeos y escurrimientos de barro históricos del sector.
- Estudiar la importancia y eficacia de las estrategias de extracción implementadas en cuanto al control de la problemática en estudio.
- Comparar la situación del barro entre Reservas Norte y Diablo Regimiento.

1.2. Alcances

De acuerdo a los antecedentes disponibles y objetivos planteados en este estudio se definen los siguientes alcances:

- El análisis histórico del ingreso de barro es realizado sólo en el sector Reservas Norte de División El Teniente durante el período comprendido entre los años 2000 y 2013.

- El análisis sólo se realiza en base a data histórica disponible de División El Teniente, que comprende lo siguiente:
 - Base de datos de la extracción turno entre 1989 y 2013.
 - Base de datos de los estados de los puntos entre 1989 y 2013.
 - Base de datos de la altura extraíble de cada punto de extracción.
 - Informe plan minero PQ2013, realizado por la Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, publicado en octubre del 2012.
 - Informe de zonación de riesgo de ingreso de barro en mina El Teniente, realizado por la Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, publicado en abril del 2014.
 - Informe back análisis punto inicio de caving, realizado por el área geomecánica de la Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, publicado en octubre del 2009.
 - Documento “Procedimiento general para el control del riesgo de bombeo en la mina”, realizado por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, publicado en diciembre del 2010.
 - Documento “Investigación incidente bombeo calle 11 zanja 24Hw” realizado por Gerencia Mina, Superintendencia Mina Norte, Unidad Reservas Norte, publicado en marzo del 2010.

1.3. Metodología

La metodología establecida para cumplir los objetivos propuestos en el presente estudio realizado en Reservas Norte comprende las siguientes actividades:

Actividad 1: Recopilación de antecedentes y bases de datos

Descripción: Esta actividad pretende obtener toda la información pertinente al caso estudio durante el periodo enero del 1989 y diciembre del 2013, con el fin de construir una base de datos confiable y acorde a los requerimientos de este estudio.

Actividad 2: Estimación potencial económico de reservas remanentes

Descripción: Se estiman las reservas remanentes de los puntos de extracción cerrados por barro así como también para aquellos puntos ubicados en zonas de riesgo de ingreso de barro en base a criterios de planificación usados por la Superintendencia de Planificación a Largo Plazo de DET. Para facilitar el cálculo se utiliza el programa computacional desarrollado por Navia (2014).

Actividad 3: Análisis general del ingreso de barro a los puntos de extracción

Descripción: Se realiza una caracterización del ingreso de barro al sector Reservas Norte, a través de un estudio de la información histórica registrada de diferentes variables. Para ello se emplea la herramienta de análisis y modelamiento de barro desarrollada en el marco del proyecto Mudflow, llevada a cabo en el Laboratorio de Bock Caving, que consiste en un visualizador de variables asociadas al fenómeno, entre ellas: los estados temporales, granulometría y perfil de altura extraída. Otras variables incorporadas en el estudio son los antecedentes de topografía, precipitaciones, labores antiguas superiores, frecuencia de cierre y tasa de extracción.

Actividad 4: Análisis de bombeos y escurrimientos históricos

Descripción: Corresponde a un estudio estadístico del comportamiento de estos eventos y sus principales características.

Actividad 5: Comparación situación de ingreso de barro entre Reservas Norte y Diablo Regimiento.

Descripción: Se describen las variables principales asociadas al ingreso de agua-barro de ambos sectores para ver si existe alguna relación.

Actividad 6: Conclusiones, recomendaciones y reflexiones

Descripción: Se elaboran y entregan las principales conclusiones y recomendaciones del presente estudio.

1.4. Contenidos de la memoria

Capítulo 1: Se da a conocer la motivación del tema de investigación, objetivos, alcances y metodología.

Capítulo 2: Se define el estado del arte de la problemática a ser abordada, principalmente los fundamentos del fenómeno de agua/barro y sus mecanismos, así como también las lecciones aprendidas en diferentes faenas alrededor del mundo y de la historia.

Capítulo 3: Se cuantifican las reservas no extraídas de los puntos de extracción que se declararon como agua-barro y no pudieron continuar su extracción con el propósito medir el potencial que existe tras la pérdida de reservas extraíbles.

Capítulo 4: Se muestra una caracterización del ingreso de barro, a través del estudio de diferentes antecedentes y variables asociadas al fenómeno, para entregar una conjetura del origen de éste y la incidencia de las tasas de extracción aplicadas. Además se compara la situación de agua-barro de Reservas Norte con respecto a la de Diablo Regimiento para saber si la génesis de su comportamiento son las mismas.

Capítulo 5: Se analizan 2 incidentes de agua-barro; un bombeo y un escurrimiento, para entender las condiciones involucradas en la intensidad de ellos.

Capítulo 6: Se concluye respecto al origen del ingreso de barro en el sector y se entregan recomendaciones para ser aplicadas y utilizadas tanto en el Proyecto MudFlow desarrollado por el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile como en el sector Reservas Norte.

Capítulo 2

Estado del arte

Para poder realizar un análisis y posterior interpretación más acabada de la problemática de bombeo dentro de la minería de block/panel caving es necesario realizar una investigación bibliográfica sobre la situación actual y los últimos avances que existen en cuanto al manejo de material saturado.

La recolección de antecedentes bibliográficos relacionada a material saturado es mostrada en este capítulo, el cual comprende fundamentos del bombeo, mecanismos de falla, riesgos asociados y las practicas operacionales de mitigación adoptadas por diferentes minas que operan bajo estas condiciones.

2.1. Fundamentos de los bombeos y derrames

2.1.1. Definición

Los bombeos, también llamados como estallidos de barro o agua/barro, son definidos como la entrada repentina y descontrolada de material saturado en puntos de extracción u otras aperturas subterráneas como piques de traspaso o ventilación (Brown 2007). Los métodos por hundimiento tienen el potencial de almacenar agua, producir finos mediante procesos de conminución secundaria y a través del proceso de extracción de mineral genera las condiciones propicias para la ocurrencia de estos eventos.

Las posibles consecuencias tras la ocurrencia de estos eventos son: disminución en el ritmo de producción, daño de equipos e instalaciones, pérdida en la recuperación de reservas, accidentes potencialmente fatales, e incluso el cierre prematuro de la mina.

2.1.2. Factores desencadenantes

Butcher et al (2000) observó que cuatro condiciones son requeridas para que un estallido de agua/barro ocurra (Figura 2):

- I. **Presencia de minerales potencialmente formadores de barro en la columna de extracción.** Estos minerales corresponden a finos arcillosos permeables, los cuales pueden provenir principalmente de 3 fuentes:
 - Migración por dilución desde la topografía.
 - Migración por dilución lateral.
 - Fragmentación secundaria como consecuencia del caving.

- II. Presencia de agua.** Las posibles fuentes de agua pueden provenir de la superficie o de forma subterránea, en donde el agua ingresa por el cráter de subsidencia a través de precipitaciones, deshielos, conexiones con lagos, ríos o tranques de relaves, o mediante acumulaciones en acuíferos, estructuras o labores mineras antiguas. Otra fuente proviene de las actividades mineras como: el relleno de caserones con material hidráulico o pre acondicionamiento con hidrofracturamiento.
- III. Perturbación,** la que puede ser consecuencia de la extracción aislada de un punto de descarga no cumpliéndose uniformidad de tiraje. También puede ser ocasionada por tronadura o sismicidad.
- IV. Existencia de un punto de descarga** a través del cual el barro pueda entrar a las labores mineras. Estos pueden ser: puntos de extracción, piques de traspaso o ventilación.

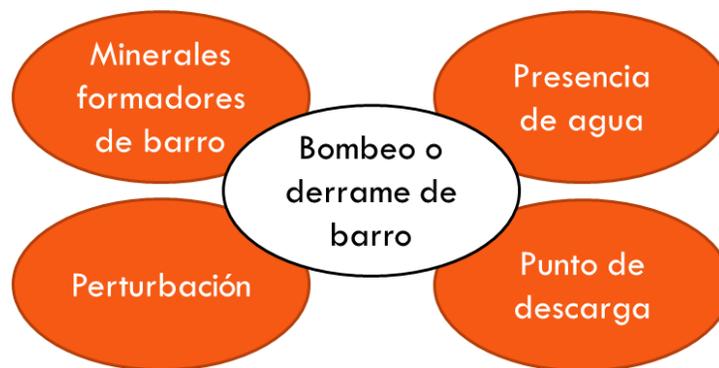


Figura 2: Condiciones requeridas para la ocurrencia de un bombeo o derrame. (Butcher 2005).

Por lo demás Hutbert et al (2000) señala que si el punto de extracción o la columna propiamente tal tienen un contenido de finos superior al 20% puede formar barro y potencialmente fluir en presencia de agua.

Cabe mencionar que si alguno de estos elementos no está presente, el estallido de agua/barro no se desencadenará.

2.1.3. Mecanismos de falla que producen eventos de bombeos

De acuerdo a la naturaleza de la fuente de barro, los estallidos de agua/barro pueden clasificarse en externos o internos (Butcher et al, 2000). Un estallido de agua/barro externo es aquel donde el barro es generado en la superficie debido a la deposición de colas de relave y de relleno proveniente de la planta metalúrgica. También se consideran en esta clasificación los deslizamientos de talud de minas a cielo abierto que se encuentran

en la superficie. Por otro lado un estallido de agua/barro interno es aquel donde el barro es producido por la conminución de la roca hundida producto del caving. Existen casos donde el fenómeno se puede dar como una combinación de ambas fuentes.

Un estallido de barro raramente ocurre como el resultado de una sola causa o falla, sino bajo una combinación de diferentes factores. Dado lo anterior no existe un solo mecanismo mediante el cual se produce el ingreso de agua/barro a las labores mineras, Butcher et al (2000) identificó 5 tipos:

I. Entrada de relaves o deslames

Ocurre cuando la explotación del mineral se desarrolla bajo un tranque de relave el cual falla debido a la desestabilización del mismo, produciendo la entrada violenta de material saturado a través del cráter de subsidencia. La falla del tranque se debe a la ruptura de paredes o el piso que pudo ser causado por cambios en las velocidades de extracción de la operación, intersección entre el piso del tranque y el radio de influencia de la subsidencia o a una mal lograda estabilización del tranque de relave (Figura 3).

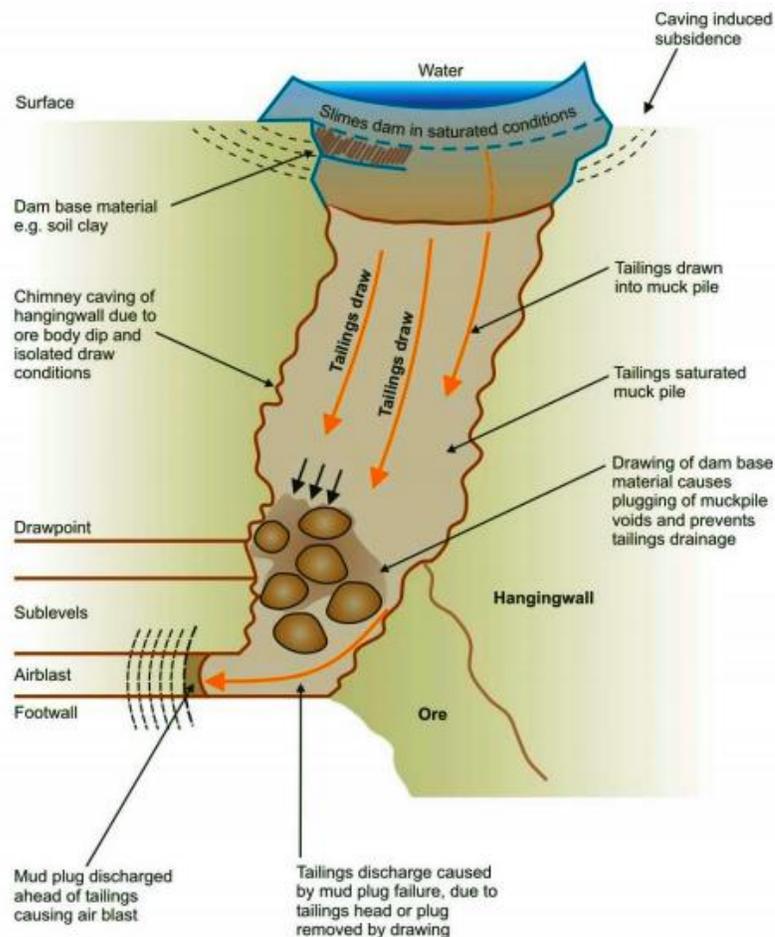


Figura 3: Entrada de barro debido a la falla de tranques de relaves ubicados sobre la operación (Butcher, 2000).

II. Falla del relleno de caserones

En los métodos de explotación por caserones muchas veces se desea recuperar el pilar por lo que se recurre a rellenos, como los hidráulicos que presentan baja resistencia al corte. Además se construye una compuerta (Figura 4) para contener estos rellenos, sin embargo, éste puede fallar provocando el ingreso de flujos localizados. Las causas de la falla de la compuerta pueden deberse a un diseño deficiente, mala construcción, un relleno inicial con altura de carga demasiado grande para ser soportado por la compuerta, y un mal drenaje de agua.

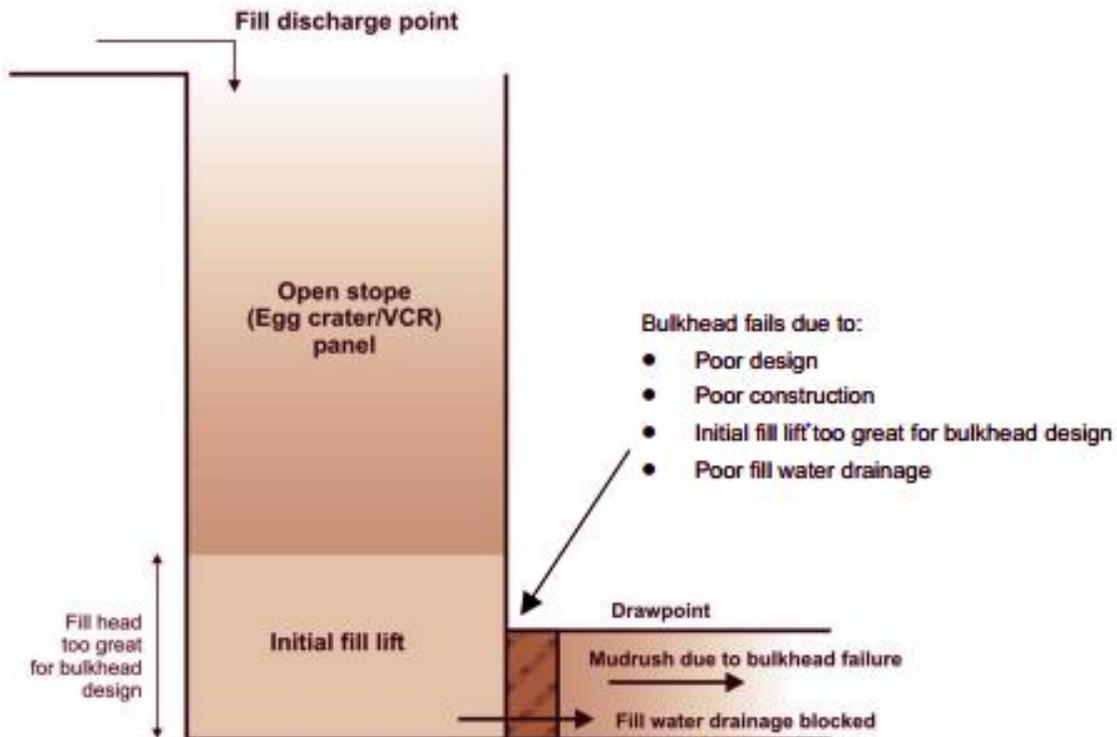


Figura 4: Falla de compuerta de soporte de rellenos de caserones (Butcher, 2000).

III. Fallas de talud de minas a cielo abierto

Este tipo de mecanismo se presenta cuando la explotación subterránea fue precedida por una a cielo abierto, se producen fallas de talud que liberan material arcilloso que percola e ingresa por el cráter de subsidencia hasta las labores subterráneas debido al tiraje (Figura 5).

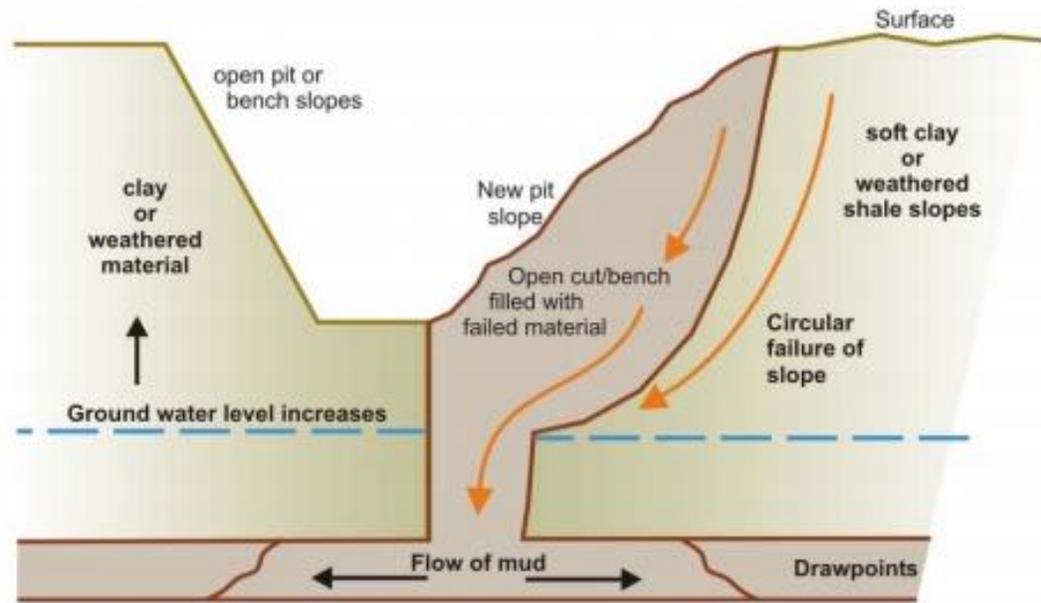


Figura 5: Falla de talud de material blando (Butcher, 2000)

IV. Flujos debido a la extracción de la columna quebrada y sobrecarga de estéril.

Existen 2 mecanismos, uno a escala de mina y otro a escala local o punto de extracción. Desde el punto de vista de la mina este ocurre igual que en el caso anterior cuando el método de explotación subterránea fue precedido por un método a cielo abierto en el que se han identificado que el fenómeno de agua/barro ocurre en 7 etapas (Figura 6): 1) Primero un material producto de alguna falla superficial ingresa hacia el cráter de subsidencia; 2) Junto a esto, se suma el ingreso de agua externo por precipitaciones, deshielos u otra fuente y el interno por aguas subterráneas que son dirigidas hacia el cráter; 3) ante el flujo vertical de material quebrado, el material diluyente ingresa a la columna; 4) además se produce conminución secundaria producto del caving generando finos que van relleno los intersticios entre el quebrado. 5) El ingreso de agua contribuye a la generación de “bolsones de barro” junto a los finos; 6) Con la extracción de la columna los bolsones comienzan a descender, observándose este material saturado en los puntos de extracción; 7) finalmente si el punto se extrae a gran velocidad, estos bolsones pueden generar un flujo de barro.

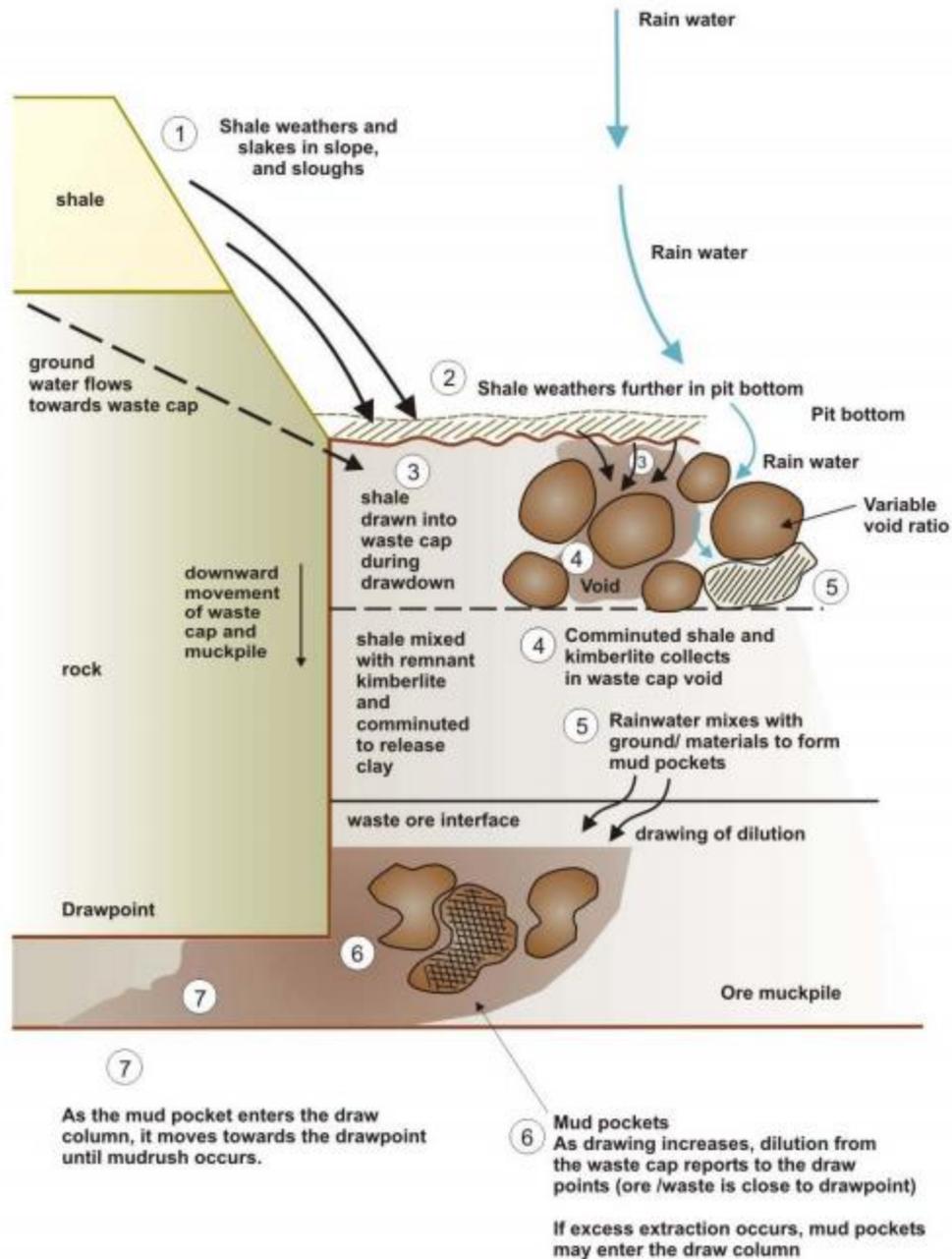


Figura 6: Ingreso de barro en la columna de quebrado generado por la extracción (Butcher, 2000).

Por otro lado este mecanismo se describe a escala de punto local o de punto de extracción en el que se plantean 2 casos. Uno de ellos se produce por la compactación rápida de la columna de quebrado en la que el estallido de agua/barro se produce como el resultado de 5 sucesos (Figura 7): 1) Se genera un arco bajo el cual se genera un vacío producto de la extracción (también denominado colgadura); 2-3) El arco impide el flujo normal de mineral y se genera un vacío; 4) Luego, ocurre un colapso del arco, produciendo una rápida compactación en el material inferior al arco acumulándose bolsones de barro; 5)

La sobrecarga genera que el bolsón de barro sea liberado violentamente hacia el punto de extracción. Este evento también se puede asociar a un estallido de aire.

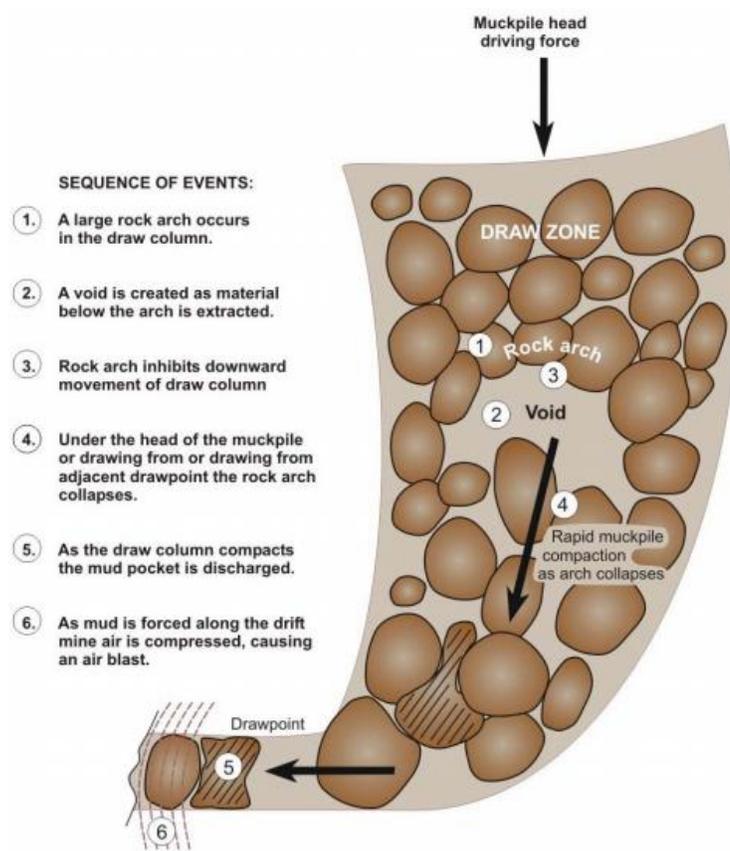


Figura 7: Descarga de bolsones de barro generados a partir de la compactación del quebrado (Butcher, 2000).

El segundo mecanismo que se identificó, es aquel que ocurre cuando existe un deficiente drenaje de la columna quebrada, generando acumulación de agua que en conjunto con los finos presentes ya sea por migración, conminución secundaria o ambos se crearan bolsones que podrán liberarse a las labores en forma violenta (Figura 8).

Reduced muckpile / waste cap drainage

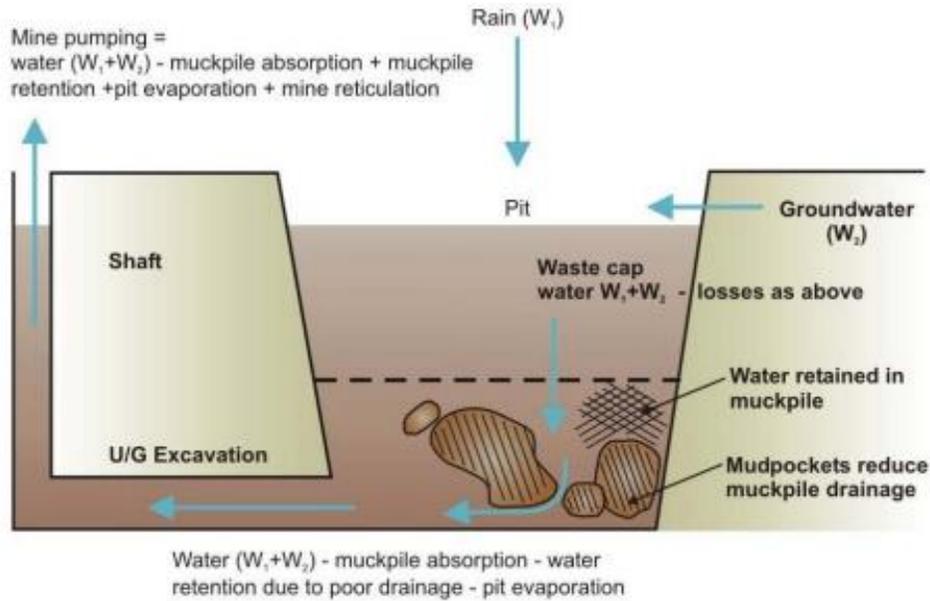


Figura 8: Drenaje reducido en quebrado y en estéril sobre el quebrado (Butcher, 2000).

Se muestra un esquema que resume los diferentes mecanismos que gatillan un estallido de agua/barro (Figura 9):

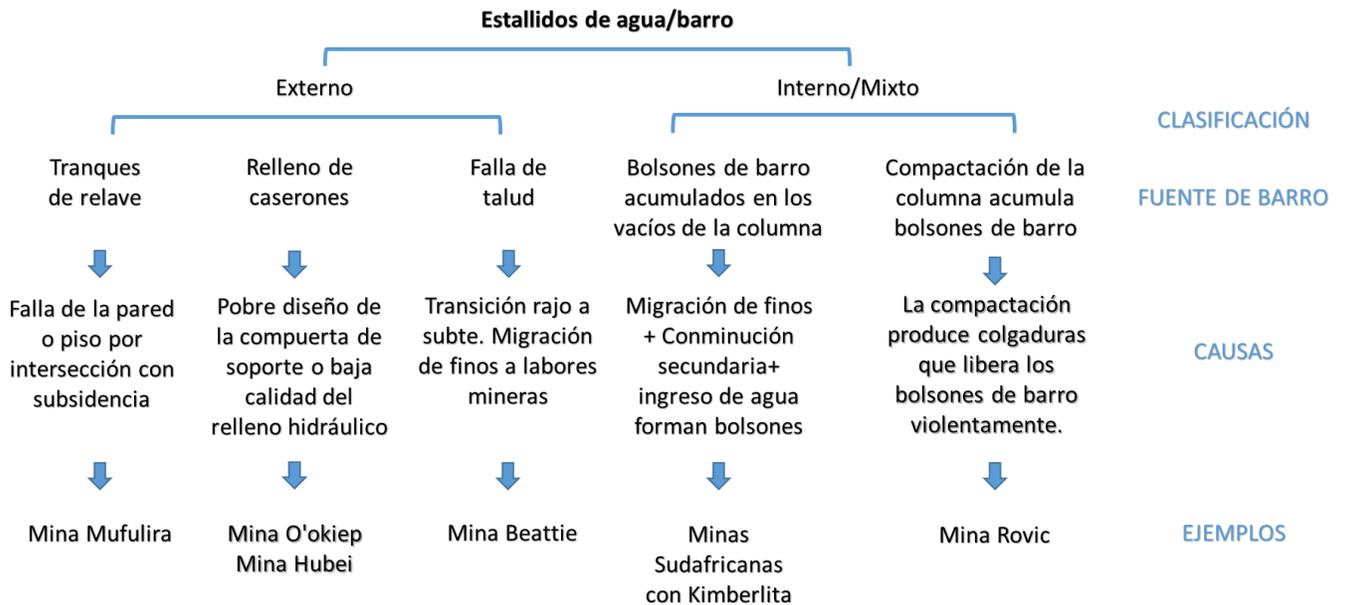


Figura 9: Clasificación mecanismos de falla de bombes de barro (Butcher, 2000).

2.1.4. Tipos de barro

Basados en la movilidad del barro a través de la columna de quebrado, se han reconocido dos categorías de barro: fluido y viscoso (Jakubec et al, 2012).

- Barro fluido: Tiene alto contenido de agua, sobre 50%, por lo que al moverse horizontalmente puede alcanzar extensiones de hasta 500 [m]. Generalmente se observa más como una descarga de agua que de barro.
- Barro viscoso: Posee menor contenido de agua, presenta rangos de humedad entre (12 y 23%). Exhibe propiedades tixotrópicas y tiende a estar rígido, no fluye bajo gravedad pero sí bajo condiciones de stress puede movilizarse y licuarse por el punto de descarga.



Figura 10: Ejemplo de un barro fluido de Cullinan (izquierda). Ejemplo de barro viscoso desde un punto de extracción de la mina Northparkes (derecha). (Jakubec et al, 2012).

2.2. Registros de bombeos en operaciones mineras

Aunque los estallidos de barro son más comunes en minería por hundimiento, como block/panel y sublevel caving, cualquier actividad minera que permita la generación de material fino, acumulación de agua y proveer perturbaciones a través del proceso de producción es susceptible al ingreso de agua/barro (Jakubec et al, 2012), es más, durante el período entre 1851 y 1970 se registraron más de 208 incidentes de irrupciones de barro en minas de carbón en Inglaterra explotadas principalmente por longwall mining (Job, 1987). Aproximadamente un 78% de los incidentes registrados ocurrieron debido al contacto con labores mineras abandonadas.

En la Tabla 1 se describen algunos ejemplos de minas que fueron o son afectadas por el fenómeno de agua:

FAENA	UBICACIÓN	PERIODO	DESCRIPCIÓN	REFERENCIAS
Kimberley y De Beers	Sudáfrica	Finales del XIX	La ruptura de kimberlita y esquistos, y la presencia de agua que ingresa en forma de lluvia, son la principal fuente de barro en esta mina de diamante.	Hunt, 1952 Barlett, 1992
Mufulira	Zambia	Sept 1970	Colapso en el tranque de relave y ubicado sobre la explotación de sublevel caving (utilizado para rellenar la subsidencia), debido a la conexión del crater el el piso del tranque provocando una falla, en donde más de 1 millón de ton de material dreanaron al interior, provocando la muerte de 89 trabajadores.	Sandy, 1976 Vutukuri, 1995
Hubei	China	2004	Estallido de barro en sublevel caving. La roca es muy competente por lo que la capacidad de generar finos es baja, se cree que las inundaciones de 1998 hicieron que arcillas y agua percolaron. Además existe sobre extracción.	Jakubec, 2012
IOZ y DOZ	Freeport, Indonesia	1994-2013	Las altas precipitaciones y la presencia de finos generados por el método de block caving genera grandes problemas de ingreso de barro que ya han causado numerosas muertes.	2012, Call and Nicholas Inc, 1998
El Teniente	Chile	1989-2010	La mezcla de agua proveniente de deshielos y los finos generados por el hundimiento, asociado a sobre tiraje, son las principales causas de bombeos. A la fecha ya se han reportado más de 7, uno de ellos con un fatal.	Ferrada, 2011 Becerra 2011
Andina	Chile	2002 - 2011	Se contabilizan 8 ocurrencias de bombeo.	Tapia y Martínez 2011

Tabla 1: Registro y descripción de bombeos asociados a labores subterráneas.

2.3. Control y manejo de material saturado en minas de block/panel caving

A lo largo de la historia varias minas han desarrollado e implementado diferentes medidas de mitigación para enfrentar el problema del ingreso de barro dentro de la operación, con el fin de recuperar la máxima cantidad de mineral antes de cerrar el punto y garantizar la seguridad de los trabajadores. Algunas de estas medidas son:

2.3.1. Drenaje de agua

El drenaje del agua acumulada en las operaciones mineras se puede realizar mediante la construcción de galerías que dirijan el caudal fuera de la zona de quiebre o a través de perforaciones en sectores claves.

En la operación Kimberley, formada por las minas Wesselton y Dutoispan, explotadas mediante Block Caving, la importancia de las galerías de drenaje como un método de prevención del ingreso de barro fue reconocida desde 1899 cuando se decide construir galerías en Wesselton. Luego, en 1908 se realizan 2 túneles de 50 y 20 [m] en la

superficie de la mina Dutoispan, que permitieron que la frecuencia de eventos de agua/barro se redujera (Hunt et al, 1952).

Otra forma de drenar el agua, es a partir de perforaciones en zonas con acumulación de agua como acuíferos identificados en el modelo hidrogeológico o puntos de extracción. La mina IOZ, explotada por block caving y perteneciente al complejo minero Grasberg, implementó esta práctica para prevenir la ocurrencia de eventos relacionados con el fenómeno de agua/barro obteniendo buenos resultados (Hubert et al, 2000).

2.3.2. Extracción de material con LHD telecomandados

PT Freeport Indonesia históricamente ha presentado problemas con escurrimientos de agua/barro en sus minas de block caving, debido a la acumulación de agua a causa de las altas precipitaciones (aproximadamente 5 [m] por año) y la presencia de finos (Hubert et al., 2000). No es hasta el 21 de junio de 1996 donde un accidente fatal ocurrido como consecuencia de un escurrimiento que se decide elaborar nuevos procedimientos para el manejo de mineral saturado (CNI, 1998), entre ellos, la extracción de mineral mediante LHD telecomandados para asegurar la seguridad de los operadores y minimizar las pérdidas de reservas. Los LHD telecomandados son operados de forma remota desde una sala de control ubicada a más de 400 [m] de la zona potencialmente afectada. Algunos de los principales criterios de diseño de una infraestructura tele-remota son:

- Acomodar al menos 6 operadores de LHD y 4 de martillos telecomandados.
- Buena calidad de la imagen, con video a color.
- Capacidad suficiente de transmisión de la imagen.
- Sillas ergonómicas.

El uso de equipos tele comandados permite extraer mineral saturado aumentando así la recuperación de reservas, pero con la desventaja de que se logran menores productividades que una extracción mediante palas operadas manualmente.

2.3.3. Planificación minera

En minas de block caving ubicadas en Kimberley, se estableció en un estudio de un período de 90 años, que cuanto más uniforme es la extracción la probabilidad de bombeos se reduce o simplemente no ocurre (Butcher, 2000). La extracción uniforme controlada puede significar en un menor número de problemas, por lo tanto el diseño

debe realizarse a favor de una extracción uniforme a través de una buena gestión de la extracción del mineral de parte de planificación y la operación. La planificación debe incorporar los criterios hidrogeológicos en el cálculo de reservas.

No deben permitirse tasas de extracción altas ya que generan una extracción irregular y a menudo puntos aislados que provocan la ocurrencia de estos eventos. El tiraje tiene que ser lo más parejo posible para evitar la entrada prematura de barro a los puntos de extracción. Además trae consigo otros beneficios al minimizar la dilución, ayuda al drenaje y la extracción continua de agua en forma de humedad en el mineral. Complementando lo anterior se debe supervisar que otros puntos no se sobre-extraigan al estar más cerca de chancadores o puntos de vaciado, que es una de las malas prácticas operacionales más comunes que generan un tiraje no uniforme.

2.3.4. Sistemas de monitoreo

Las decisiones operacionales que se tomen para prevenir el fenómeno de agua barro deben basarse en los resultados de un continuo programa de monitoreo que incluye (Jakubec et al., 2012):

- Monitoreo de la columna quebrada: Se debe medir la fragmentación y humedad de la columna quebrada.
- Monitoreo cráter superficial: Reconocer si existen nuevas fallas, observar si hay acumulación de agua y perfil topográfico.
- Monitoreo condición de agua: Corresponde a un balance de agua que incluye los flujos de agua subterránea y superficial.
- Monitoreo geotécnico: Evalúa la estabilidad de la muralla del cráter y deformaciones en los túneles o pilares.

2.3.5. Relleno del cráter de subsidencia

La mina Padcal ubicada en Filipinas, explotada mediante block caving se encuentra emplazada en la zona tropical de Asia, recibiendo una precipitación que puede alcanzar los cientos de milímetros diarios. Además, la presencia de arcillas genera las condiciones adecuadas para provocar un estallido de barro. Para operar con un menor riesgo de bombeos se propuso rellenar la cavidad sobre el nivel de desagüe natural hacia una quebrada para evitar el ingreso de agua lluvia a la zona de subsidencia. La operación de relleno es ejecutada permanentemente, operando con equipos livianos en la cavidad. La práctica ha permitido evitar la ocurrencia de bombeos, aun cuando no elimina el ingreso de agua al material fragmentado (NCL, 2010).

2.3.6. Clasificación de puntos de extracción

Según estudios realizados en IOZ, la ocurrencia de flujos de barro puede suceder cuando existe más de un 20% de material de tamaño arena (< 2 mm) con un contenido

de agua superior a un 8,5 % o más de un 80 % de saturación (CNI Inc et al, 1998). De acuerdo a esto, se establece una herramienta en la que se clasifica los puntos de extracción en diferentes categorías en la cual se identifica el peligro de escurrimiento de barro en un punto de extracción basado en la granulometría y humedad. La zona roja indica zona de riesgo y el material debe ser extraído mediante telecomando.

Wetness/Water content	Material size ≥ 5 cm (M)		
	M > 70% (dominated by coarse grain)	30% < M \leq 70%	M \leq 30% (dominated by fine grain)
< 8.5% (dry)	A1	B1	C1
8.5 - 11%	A2	B2	C2
\geq 11% (wet)	A3	B3	C3

Note: Green box: any loader
 Yellow box: any loader with close supervision
 Red box: remote loader
 For Class B2 and A3, HOD/Fragmentation information is critical to consider surely

Tabla 2: Matriz de criticidad elaborada por PT Freeport Indonesia. (Widijanto, 2012).

2.3.7. Estándares operacionales para el manejo de material saturado implementado en División El Teniente

División El Teniente es un complejo minero con más de 100 años de explotación, que utilizó métodos como el Shrinkage Stopping y Pillar Caving, Block Caving y actualmente opera 100% mediante Panel Caving. Esta operación históricamente ha presentado problemas debido al agua-barro, como consecuencia de los finos generados por el hundimiento y el agua proveniente de deshielos, en donde la subsidencia generada produce planos preferenciales de ingreso de agua en épocas primaverales. Para contrarrestar sus efectos DET ha implementado distintos procedimientos desarrollados en base a la práctica y experiencias de otras minas de block/panel/sublevel caving.

2.3.7.1. Limitación de reservas

En las zonas identificadas con riesgo de agua barro, se restringen los techos extraíbles hasta 50 % de la altura a topografía, en algunos casos, esto significa perdidas de recursos económicos. Los límites de altura se muestran en la Tabla 3 (CODELCO, 2013).

Agrupación	Sector	Límite Altura Máxima
Rajo	Rajo Sur	
Subterránea Sobre Tte 8	TTE 4 Sur	404
	Pipa Norte	306
	Pipa Norte Hw	233
	Esmeralda Central Fw	270
	Esmeralda Panel 1	589
	Esmeralda Sur	250
	Reservas Norte (Panel)	400
	Reservas Norte (Inv + And)	300
	Reservas Norte (Corbata)	400
	Diablo Regimiento	250
	Pilar Norte	400
	New DET	200
	Dacita	400
	Ext. Norte Sur Andes Pipa	173
Ext. Fw Pipa Norte	213	
Pacifico Sur	400	
Nuevo Nivel Mina	Nuevo Nivel Mina	HIS + 100m
Nivel Profundo	Nivel Profundo	400

Tabla 3: Alturas extraíbles limitadas para los puntos en zona de riesgo de cada sector de División El Teniente (CODELCO, 2013).

2.3.7.2. Drenaje de agua

La Quebrada Teniente actualmente se encuentra intervenida por medio de un sistema de drenaje que evacua sus aguas a través del ADIT 55 hacia Quebrada Coya (CODELCO, 2014).

2.3.7.3. Control de las condiciones granulométricas y humedad de los puntos de extracción.

Periódicamente se realizan levantamientos de la información en terreno respecto a la caracterización del mineral observado en la boca del punto de extracción. Las categorías de humedad medidas mediante inspecciones visuales son (Becerra 2011):

Humedad categórica	Condición de humedad	Humedad de laboratorio
0	Seco	0
1	Baja Humedad	Menor a 4%
2	Humedad	Entre 4 y 7%
3	Barro insipiente	Entre 7 y 10%
4	Barro	Mayor a 10%
A	Mineral grueso y escurriendo agua	

Figura 11: Categorías de humedad medidas en terreno (Becerra, 2011).

Respecto a las mediciones granulométricas se determina el % de cada categoría observada en la frente del puntos son observadas.

Categoría	Tamaño
A	< 5 cm
B	5 a 50 cm
C	50 a 100 cm
D	100 a 150 cm
E	> a 150 cm

Figura 12: Categorías de granulometría medidas en terreno (Becerra, 2011).

2.3.7.4. Perfil de extracción

En los sectores con amenaza de ingreso de Agua/Barro cuando se ha alcanzado la altura in situ se considera un perfil decreciente de tasas de extracción hasta que se extrae 1,3 veces la altura in-situ, que va desde la velocidad liberada a la mitad de ésta, es decir de 1,0 [tpd/m²] a 0,5 [tpd/m²] tal como se aprecia en la Figura 13. Luego la velocidad es constante (0,5 [tpd/m²]) hasta agotar las reservas de ésta columna (CODELCO, 2011).

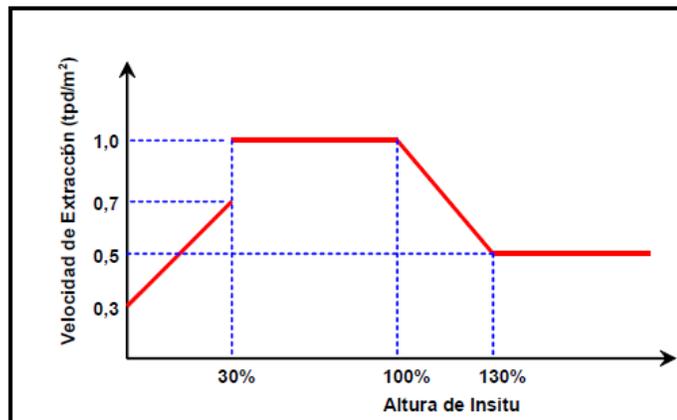


Figura 13: Perfil de extracción de puntos con riesgo de agua-barro (CODELCO, 2011).

2.3.7.5. Extracción de material saturado con LHD telecomandado

El propósito del uso de LHD automatizados es reducir la exposición a riesgo del personal que opera equipos, al ubicar a los operadores dentro de zonas seguras de la operación o fuera de ella en la ciudad. Sin embargo, los resultados de la prueba indicaron baja productividad y un aumento excesivo en los costos. Por lo tanto, en El Teniente su uso no se ha masificado como se pensó, y se ha dado prioridad a la extracción normal con equipos LHD operados de forma convencional, pero con el uso de protocolos de seguridad más estrictos, con el fin de resguardar la seguridad de los trabajadores (Sousa, 2012).

2.3.7.6. Estrategias de extracción y planificación

División El Teniente creó una matriz de criticidad adaptada de la desarrollada por PT Freeport (Figura 14), esto luego del incidente de bombeo ocurrido el 2 de marzo del 2010 en el sector de Reservas Norte.

La matriz identifica 3 condiciones del estado del punto de extracción: normal, en observación y riesgo crítico. Las áreas críticas (en rojo) corresponden a puntos de extracción que presentan un porcentaje de finos (<25 [cm] en El Teniente y <5 [cm] en Freeport) superior al 30% y sobre un 7-10% de humedad.

Contenido de humedad	Tamaño de grano (G) ≤ 25 cm		
	G < 30% (dominado por granulometría gruesa)	30% ≤ G < 70%	G ≥ 70% (dominado por granulometría fina)
<4%			
4%-7%			
7% - 10%			
≥ 10%			

	Condición normal
	En observación
	Riesgo crítico

Figura 14: Definición de la Matriz de criticidad para el control de agua barro utilizada en División El Teniente (CODELCO, 2010).

De acuerdo a la clasificación de la matriz crítica, existen tres acciones que se deben realizar desde el punto de vista de la planificación (Ferrada, 2011):

- Los puntos que se encuentran en la zona de riesgo de la matriz de criticidad son declarados agua-barro y posteriormente cerrados, lo que se traduce en pérdidas de área disponible y reservas.
- Limitación de puntos: cuando aparece barro en un punto todos los puntos adyacentes que lo rodean se limitan, lo que se traduce en disminuir la velocidad de extracción, es decir, la tasa de extracción no es la óptima o habitual. Pueden ser de 4 a 6 paladas por día según los criterios utilizados en cada sector.
- Utilización de puntos barrera: son puntos donde no se extrae mineral aun cuando no tengan ni barro ni humedad con el fin de controlar la propagación del barro a otros puntos de extracción.

En épocas de deshielos entre octubre y marzo se realizan vuelos topográficos para observar la existencia de lagunas en la superficie, de ser así los puntos de extracción ubicados bajo esta zona se restringe su extracción.

La medida apunta a realizar un tiraje lento y parejo de las zonas más críticas, demarcando un polígono de extracción limitada, con el fin de drenar el agua cada vez que se extrae, evitando así la formación de bolsones de barro (Ferrada, 2011).

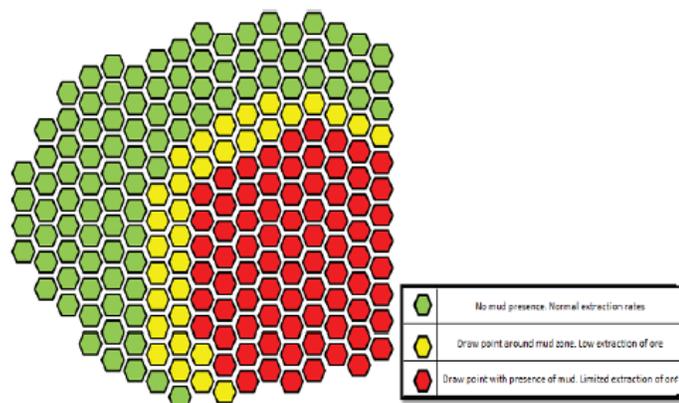


Figura 15: Polígono de la estrategia de extracción implementada en Reservas Norte durante el 2011 (Ferrada, 2011).

2.4. Antecedentes agua-barro en División El Teniente

Los últimos informes entregados por la Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD) de División El Teniente identifican 4 factores o características que condicionan el ingreso de agua-barro en los sectores productivos, entre ellos: Reservas Norte, Diablo Regimiento, Esmeralda y Sur Andes Pipa (Codelco, 2014).

- a) Existencia de depresiones en la cavidad: principalmente el canalón central y en menor relevancia los conos de extracción, los cuales aumentan la probabilidad de acumular nieve y agua, que posteriormente en épocas estivales o de deshielos se infiltrará hacia los sectores productivos ubicados bajo éstas singularidades morfológicas.
- b) Existencia de barro históricos en niveles superiores: al conectar con labores antiguas superiores donde hubo presencia de barro, es muy probable que el barro descienda verticalmente como consecuencia de la extracción y aparezca en los puntos productivos de los niveles inferiores, producto que las cavidades antiguas corresponden a unidades permeables (acuíferos).
- c) Sobre extracción de los sectores: el ingreso de barro por sobre extracción de columna (captación de agua desde la superficie), se produce principalmente en el sector Este (también llamado Fw o patilla) del yacimiento donde la columna de roca es más alta.
- d) Diferencia de cota respecto a la superficie: es más probable el ingreso de barro donde la diferencia de cota entre el sector productivo y la superficie sea menor.

A partir del análisis de las variables que participan en el ingreso de barro mencionadas anteriormente sobre los diferentes sectores productivos, se confecciona el “Plano de riesgo

de ingreso de barro para Mina El Teniente”, el cual determina las zonas donde es más plausible la entrada de barro y potencial ocurrencia de bombeos o derrames. La Figura 16 muestra que el área segmentada de color rojo presenta un alto riesgo de ingreso de material saturado, y la de color indica riesgo medio.

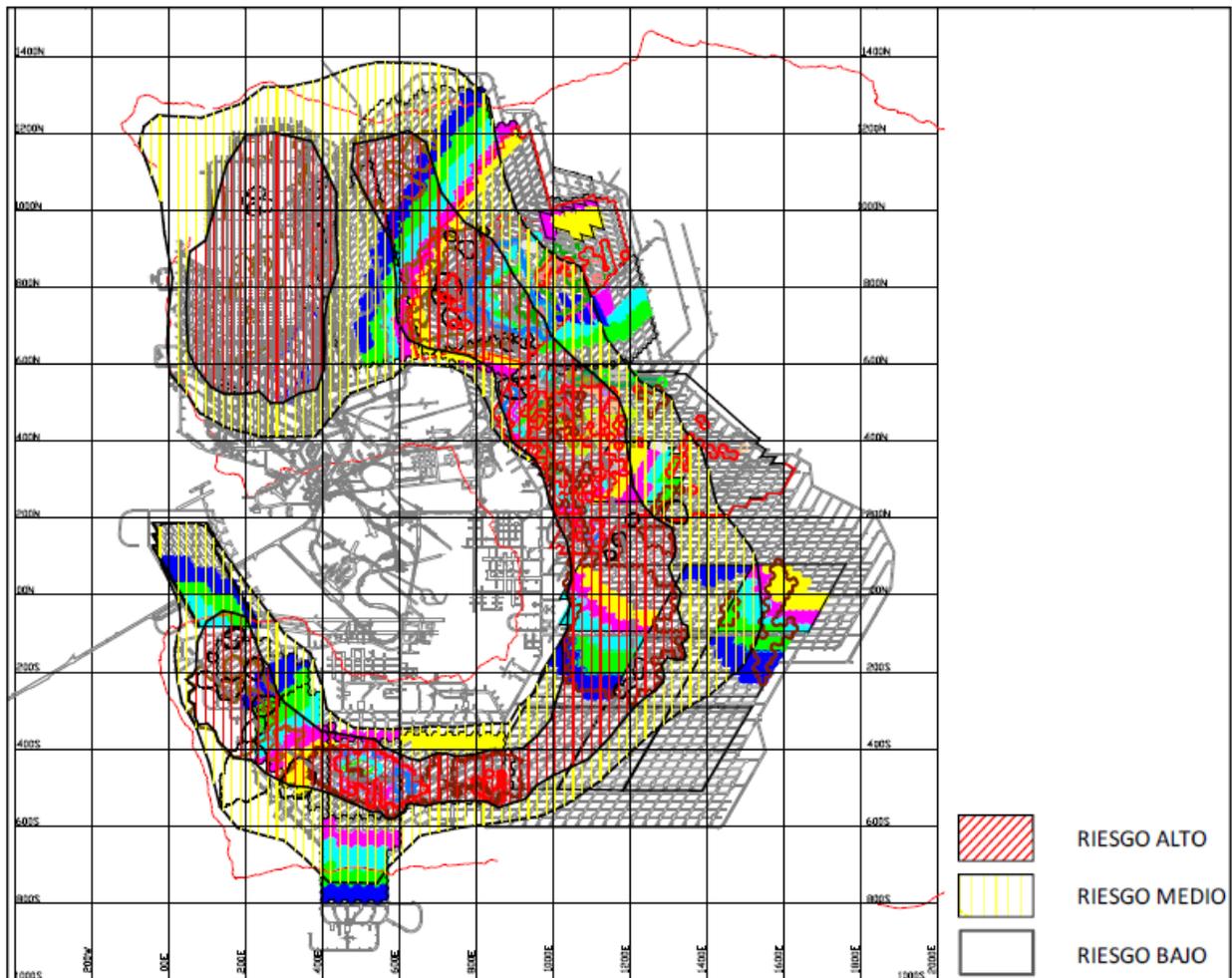


Figura 16: Plano de riesgo ingreso de agua-barro de mina El Teniente (Codelco, 2014).

Además se establece que la presencia del canalón central, definido como una singularidad presente en la superficie producida por la explotación del mineral en niveles inferiores, crea laderas que permiten el flujo preferencial de agua hacia el interior de la mina, siendo la principal depresión de la cavidad donde confluye drenaje y escorrentía superficial. Por otro lado, en el lado este de Mina Esmeralda el canalón presenta una topografía más elevada, por ende se esperaría un menor ingreso de barro, condicionando que el escurrimiento superficial de precipitaciones y deshielos fluya hacia sectores de menor elevación topográfica.

El informe también concluye que los sectores presentan mayor frecuencia de cierre de puntos en épocas de deshielos en aquellas zonas que tienen una diferencia de altura menor

a topografía, y que para aquellos puntos que tienen una diferencia de cota superior la infiltración se desfasa a los meses de marzo a mayo, como es el caso de Reservas Norte.

2.4.1. Análisis general del ingreso de agua-barro en Mina Diablo Regimiento

Para complementar los estudios realizados por DET, Navia (2014) analiza el ingreso de barro en el sector Diablo Regimiento, principalmente en términos de secuencia y altura de aparición de agua-barro, evolución temporal de los perfiles de alturas extraídas, tasas de extracción aplicadas y evolución de la uniformidad de la extracción, en donde determina que:

- El ingreso inicial de barro al nivel de producción ocurre a alturas extraídas similares a la altura in situ de los puntos, razón por la cual se deduce que los niveles antiguos suprayacentes tienen gran influencia en el fenómeno.
- Existencia de puntos precursores, es decir, se observa una migración lateral desde el punto hacia sus puntos vecinos.
- Casi todos los puntos cerrados debido al ingreso de barro están asociados a perfiles irregulares de alturas extraídas que generan planos preferenciales de extracción.

Con respecto a la cuantificación de reservas de mineral perdidas debido al ingreso de barro, Navia las determina considerando 2 casos; en el primer cálculo las reservas remanente se estiman sólo para los puntos que hasta noviembre del 2013 fueron cerrados por barro, en total 86, y para el segundo caso se incluye además los puntos que se ubican bajo la zona de riesgo, para una ley de corte de 0,5 y 0,4% de CuT. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

Consideraciones	Mineral [Mt]	Ley [%CuT]	Tiempo de producción a 25kt/d
Mineral saturado remanente respecto a reservas estimadas a principio del año 2013 determinadas por ley de corte óptima	4,4	0,72	0,50 años
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,5% de CuT	18,8	0,63	2,1 años
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,4% de CuT	26,6	0,57	3,0 años

Tabla 4: Resumen del potencial económico del mineral saturado remanente y mineral saturado potencialmente extraíble en sector Diablo Regimiento (Navia, 2014).

2.5. Conclusiones del capítulo

La revisión bibliográfica descrita en este capítulo permite identificar los siguientes aspectos relevantes relacionados a la problemática del ingreso de barro en minería subterránea:

- Se requieren 4 condiciones para que un evento de agua-barro ocurra: presencia de minerales potencialmente formadores de barro en la columna de quebrado, presencia de agua, perturbación y un punto de descarga.
- Los métodos de explotación por hundimiento, ya sea block, panel o sublevel caving, que sean desarrollados en ambientes con potencial ingreso de agua, presentan un alto riesgo de ocurrencia de bombeos o derrames en sus puntos de descarga, es decir, estos eventos son inherentes al método.
- Los estudios realizados reconocen diferentes variables involucradas en el desencadenamiento de estos incidentes, entre ellas: sobre extracción, tamaño del mineral, humedad, velocidad de extracción, altura de columna extraída, diferencia altura a topografía y forma del relieve superficial. No obstante, no analizan la forma en que interactúan entre sí, ni el valor crítico de cada una, tampoco sugieren si una es más significativa que otra.
- La mayoría de los estudios realizados se han centrado, más bien, en la prevención de estos eventos, más que en su entendimiento en cuanto a mecanismos y esfuerzos que interactúan, por lo que cualquier avance que se obtenga, respecto a su origen y comportamiento, contribuirá en gran medida en futuras investigaciones que sirvan para apoyar las decisiones de la operación.
- Tanto para el caso de División El Teniente como de PT Freeport, el cierre de puntos para prevenir un incidente se realiza considerando sólo 2 variables, humedad y granulometría de la boca del punto de extracción. Es posible que existan otros factores que deban ser considerados, como por ejemplo, las alturas de columna extraídas.
- Si bien la motivación de cerrar los puntos cuando se observa barro es proteger la vida del personal en la faena, el impacto en el negocio se traduce en que varios metros de columna de mineral no son extraídos, reduciéndose la recuperación de reservas.
- De los mecanismos descritos por Butcher, el que más se aproxima a la situación de División El Teniente es el de efecto pistón, sin embargo, requiere ser verificado.

Todo lo anterior sugiere que las variables han sido identificadas a nivel macro y no han sido estudiadas a cabalidad. De acuerdo a esto, se propone el estudio de 2 variables específicas: velocidad de extracción y alturas de columna extraída. Además se puede medir el impacto de la problemática asociado a la pérdida de reservas cuantificando el mineral remanente que no se pudo extraer debido al cierre prematuro de puntos de extracción.

Capítulo 3

Potencial económico del material saturado remanente

La intromisión prematura de barro en los puntos de extracción impide la extracción completa de la columna de mineral considerada en los planes de producción, y como consecuencia se pierden reservas extraíbles.

En el presente capítulo se cuantifican las reservas no extraídas de los puntos de extracción que se declararon como agua-barro y no pudieron continuar su extracción, como también para el caso de aquellos puntos de extracción que siguen operativos pero se encuentran ubicados bajo zonas identificadas con una alta probabilidad de ingreso de barro. Por último las leyes de cierre de los puntos también son analizadas. Todo lo anterior tiene el propósito de medir el potencial tras la pérdida de reservas extraíbles.

3.1. Situación actual agua-barro en sector Reservas Norte

El estado operacional de los puntos de extracción al 22 de noviembre del 2013 indica que de los 1.101 puntos de extracción totales que contempla la operación del sector, 388 aún no han iniciado producción, 202 fueron cerrados y declarados en estado barro, 58 se encuentran en estado limitado y 6 en estado barrera (Ver Figura 17).

Estado operacional de los puntos de extracción de Reservas Norte, 22-nov-2013

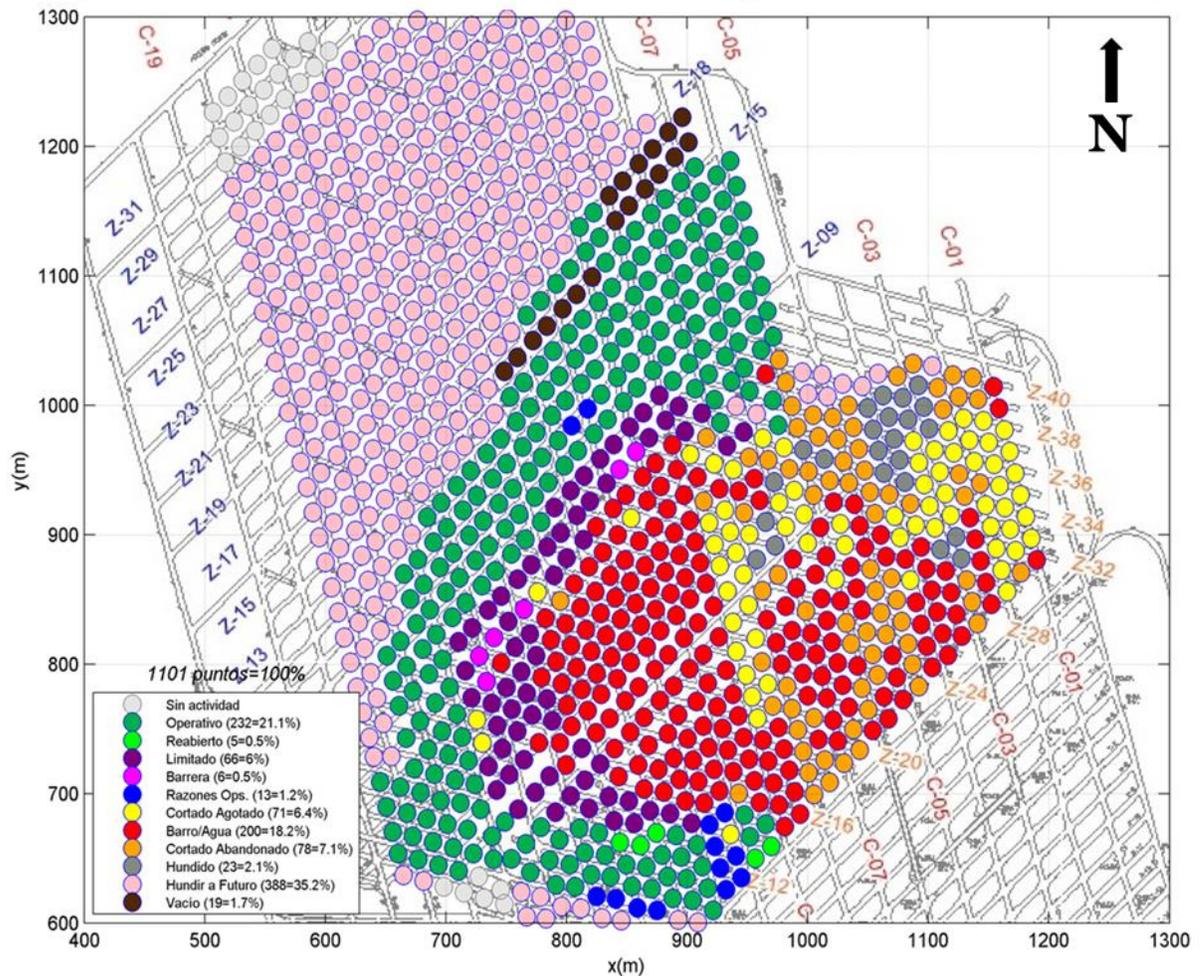


Figura 17: Estado operacional de los puntos de extracción del sector Reservas Norte al día 22 de noviembre del 2013.

En términos de área lo anterior se traduce en que 54% del área cerrada en el sector fue debido a la intromisión de barro en los puntos de extracción, asimismo un 25% del área abierta disponible se encuentra con extracción limitada y finalmente un 21% del área abierta no disponible se utiliza como barrera. Como resultado 81.514 [m²] de área están siendo afectados por barro. El detalle del análisis se despliega en la Tabla 5.

CLASIFICACIÓN		ESTADO	#PE	AREA [m2]
AREA DISPONIBLE	AREA ABIERTA	COLGADO	0	0
		OPERATIVO	223	67.264
		REABIERTO	4	1.073
		LIMITADO	58	23.807
		* EXT TELECOMANDADA	0	0
AREA NO DISPONIBLE		BARRERA	6	1.916
		CERRADO	2	562
		RAZONES OPERACIONALES	24	6.806
		REPARACION	0	0
AREA CERRADA		AREA CERRADA	QUEDADO	0
	CORTADO AGOTADO		71	19.485
	BARRO/AGUA		202	55.791
	CORTADO POR ABANDONO		81	21.509
AREA FUTURA	AREA FUTURA	HUNDIDO	23	6.114
		HUNDIR A FUTURO	388	114.393
		VACIO	19	5.689
TOTAL			1.101	324.409

Tabla 5: Estado operacional de los puntos de extracción en términos de área.

3.2. Reservas extraíbles

Las reservas extraíbles se determinan mediante el Modelo Universidad de Chile (MUCH), modelo de optimización lineal basado en el criterio de costo de oportunidad, cuyo objetivo es la maximización del VAN, y cumple restricciones de tipo operacional y económicos. La solución del modelo entrega las alturas económicas para cada punto de extracción, a las cuales se aplica un algoritmo de suavización (CODELCO, 2013).

La reconciliación de reservas realizada en el Informe del Plan Quinquenal 2013-2017 indica que aún faltan por extraer 81,1 [Mt] con una ley de cobre promedio de 1,03%, la que mayoritariamente corresponde a mena primaria. El ritmo diario es de 35.000 [td].

En la siguiente visualización se muestran las reservas en términos de alturas extraíbles establecidas para cada punto de extracción (Ver Figura 18). Se puede observar que el lado este presenta alturas extraíbles superiores a 400 [m] a diferencia del lado oeste cuyas alturas son menores, esto se debe a que en Reservas Norte una de las medidas para retrasar el ingreso de barro fue limitar sus techos extraíbles a 300 [m] en todos los puntos de extracción ubicados bajo zona de riesgo, es decir, bajo labores antiguas ya explotadas que concentran barro histórico, las que se encuentran mayoritariamente sobre el lado oeste del sector.

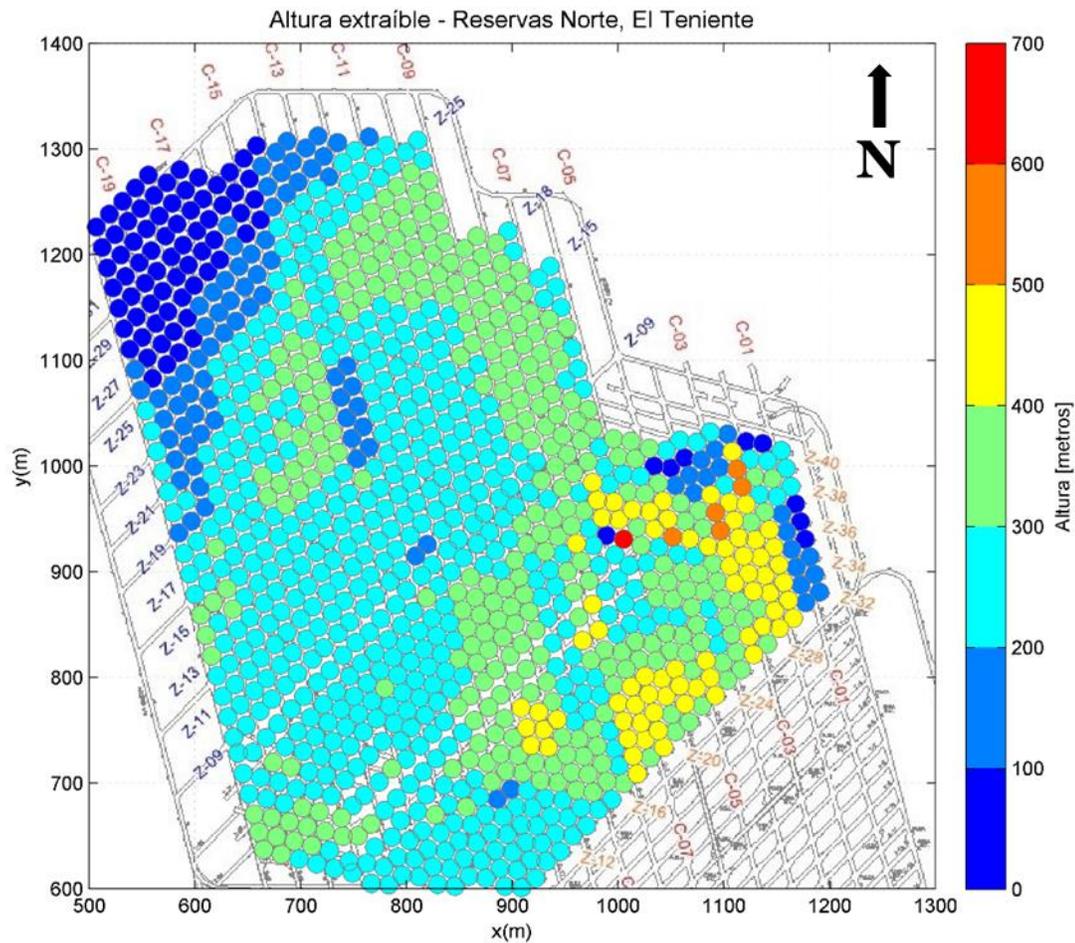


Figura 18: Altura económicamente extraíble sector Reservas Norte.

3.3. Cálculo de reservas remanentes de puntos cerrados afectados por barro

Entre los años 2000 y 2013 fueron cerrados en total 202 puntos de extracción debido al ingreso de barro al sector productivo Reservas Norte, en cuyos casos la columna de mineral definida en la planificación de tales puntos no se extrajo completamente, ya sea debido al cierre prematuro de los puntos de extracción, determinados por criterios de granulometría y humedad, o porque las alturas de columna son limitadas como medida preventiva.

La cuantificación de reservas remanentes de los puntos afectados por agua-barro se realiza utilizando 2 consideraciones; en la primera se calculan las reservas a partir de las alturas económicas extraíbles definidas en el plan de producción del año 2013, en donde no se considera sobre-extracción y las alturas se encuentran limitadas en aquellas zonas con riesgo de ingreso de barro a 300 [m], independiente si la altura económica es superior,

por lo tanto, existe mineral extraíble que no es incluido como reserva. Para el segundo cálculo se determinan los techos extraíbles a partir de leyes de corte marginales de 0,4 y 0,5% de CuT, ya que en la operación es decir, se utilizan las alturas marginales, lo que permite holguras productivas en cuanto a producción y capacidad de la planta. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos para ambos casos.

Consideraciones	Mineral [Mt]	Ley [%CuT]	Tiempo de producción a 35kt/d
Mineral saturado remanente respecto a reservas definidas a principio de la año 2013 determinadas por ley de corte óptima	8,97	0,91	256 días / 0,70 años
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,5% de CuT	11,79	0,85	337 días / 0,92 años
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,4% de CuT	13,38	0,80	382 días / 1,04 años

Tabla 6: Reservas remanentes potencialmente extraíbles de los puntos cerrados afectados por barro.

3.4. Cálculo de reservas remanentes de puntos con alta probabilidad de ingreso de barro al ubicarse bajo zonas de riesgo de ingreso de barro

Existen puntos de extracción que aún no han sido afectados por barro, sin embargo presentan un alto riesgo de que esto ocurra al ubicarse bajo labores ya explotadas que concentran barro histórico, dado que al conectar con estos niveles la probabilidad de que ingrese barro en forma prematura es inminente.

Como se indica en la revisión bibliográfica, División El Teniente identifica una zona de riesgo de ingreso de barro para cada sector, en particular para el caso de Reservas Norte, ésta abarca toda el área ubicada bajo las labores antiguas superiores ya explotadas del nivel Teniente 5, que durante su operación sufrieron problemas de agua barro (Ver Figura 19).

La base de datos observada indica que hasta el 22 de noviembre del 2013, en total 504 puntos están bajo la zona de riesgo, de los cuales 63 ya fueron declarados en estado barro, 58 se encuentran en estado limitado y 6 en estado barrera. El resto de los puntos que ya fue cerrado por barro se ubica bajo el sector 4 Norte Estándar.

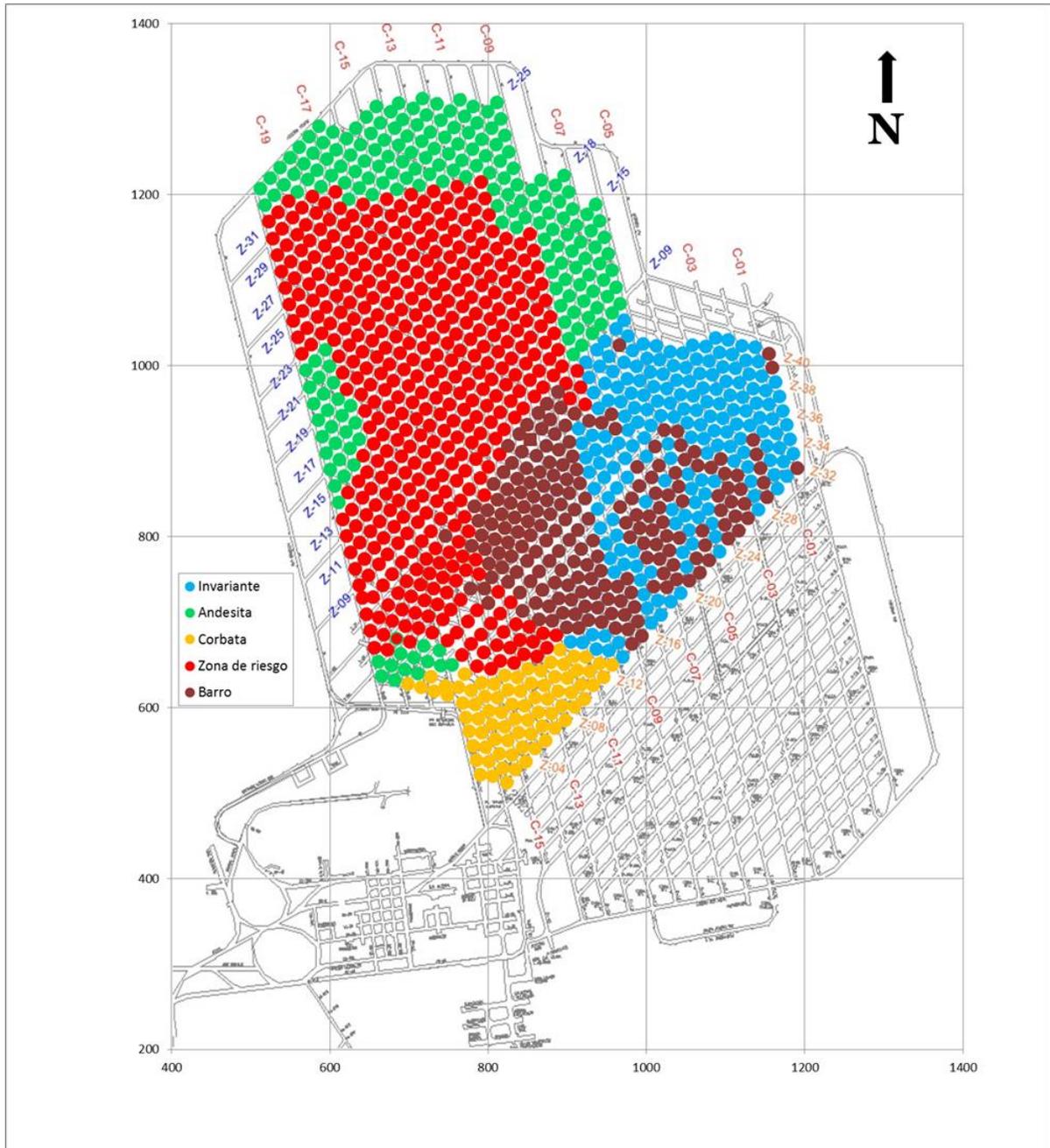


Figura 19: Zona de riesgo de ingreso de barro, sector Reservas Norte.

En consecuencia a lo mencionado anteriormente, la estimación de reservas remanentes se realiza para todos los puntos ubicados bajo la zona de riesgo que aún no han sido afectados por barro (441 puntos de extracción). Además se considera que la columna de mineral se extrae completamente hasta los 300 [m], correspondientes a los techos extraíbles definidos por la operación. Por consiguiente, el resultado obtenido corresponde a la diferencia entre las alturas económicas limitadas y los techos extraíbles, calculados para leyes de corte marginales de 0,5% y 0,4% de CuT. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Consideraciones	Mineral [Mt]	Ley [%CuT]	Tiempo de producción a 35kt/d
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,5% de CuT	4,45	0,57	127 días/0,35 años
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,4% de CuT	5,78	0,53	165 días/0,45 años

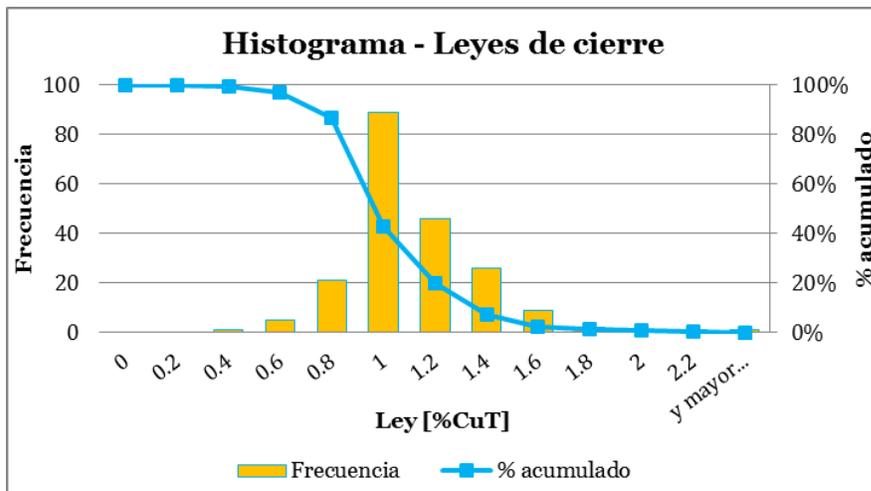
Tabla 7: Reservas remanente potencialmente extraíbles de puntos con alta probabilidad de ingreso de barro al ubicarse bajo zonas de riesgo.

Notar que al suponer que para todo los casos se cumple una extracción de 300 [m] la estimación de las potenciales reservas remanentes es subestimada si se considera el hecho de que 95 de los 202 puntos que fueron cerrados por ingreso de barro obtuvieron una altura de columna extraída superior a la limitada.

3.5. Leyes de cierre de puntos declarados agua-barro

Otro aspecto relevante para incluir en el análisis son las leyes de cobre a las que fue cerrado cada punto de extracción debido al ingreso de barro, ya que proporcionan información cualitativa del tramo de columna de mineral que no pudo ser extraído.

La Figura 20 muestra que de los 202 puntos de extracción declarados como agua-barro, más de un 80% fueron cerrados con una ley de cobre superior al 0,8% y sólo un 3% se cerró con leyes inferiores a 0,6%. El promedio de la ley de cierre es de 1,02 % CuT.



Estadística descriptiva ley de cierre	
Mínimo	0,36
Máximo	2,21
Promedio	1,02
D.S.	0,26

Figura 20: Histograma leyes de cierre de puntos declarados agua-barro.

3.6. Conclusiones del capítulo.

Los resultados obtenidos indican que existe una gran oportunidad de negocio en la recuperación de reservas remanentes que no pudieron ser extraídas, debido al cierre de los puntos de extracción ocasionado por el ingreso de barro. La afirmación anterior se sustenta en los siguientes puntos:

- El 80% de los puntos fue cerrado con leyes superiores al 0,8% de CuT, lo que corresponde a leyes mayores a las leyes de corte del sector (entre 0,4 y 0,5% CuT).
- Dependiendo de la ley de corte determinada por planificación, entre 9 y 13,4 [Mt] de mineral no fueron extraídas de los puntos cerrados por barro, si se considera un ritmo diario de 35.000 [t] se obtendrían desde 256 a 382 días de producción.
- En el caso de los puntos de extracción operativos que se ubican bajo zona de riesgo, entre 4,5 y 5,8 [Mt] de mineral podrían no ser extraídas debido al cierre prematuro de los puntos para prevenir bombeos o derrames. Si bien es una cifra menor al punto anterior, debe considerarse que se supuso que las columnas dejan de producir cuando se han alcanzado los 300 [m] de altura, sin embargo en la práctica, en gran parte de los casos el barro ingresa varios metros antes de haber alcanzado esa altura, por consiguiente las toneladas de reservas remanentes aumentarían.

Capítulo 4

Análisis general del ingreso de barro

Existe un gran interés tras el entendimiento y comprensión de los eventos de barro ocurridos al interior de las labores mineras, siendo una de las principales incertidumbres de la minería subterránea hoy en día. Actualmente en División El Teniente, la presencia de barro en un punto de extracción es considerada la primera advertencia antes de que pueda desencadenarse un escurrimiento o bombeo, cerrándose el punto antes de extraer la columna completa.

En este capítulo se realiza un estudio del ingreso de barro en el sector Reservas Norte, el cual tiene como propósito contribuir en la optimización de las decisiones tomadas por la operación, en cuanto a estrategia de extracción y planificación, con el fin de recuperar la máxima cantidad de mineral antes de cerrar el punto y garantizar la seguridad de los trabajadores. Para ello se abordaran diferentes antecedentes y variables como: inicio de caving, presencia de labores antiguas superiores suprayacentes concentradoras de barro histórico, secuencia de aparición, altura extraída, granulometría, humedad, estrategias de extracción y tasas de extracción.

4.1. Antecedentes históricos del sector Reservas Norte

4.1.1. Descripción del sector

El sector Reservas Norte, antiguamente llamado Teniente Sub 6, se emplaza en el lado Noreste de la pipa Braden a 2.102 m.s.n.m, formado por el área Andesita e Invariante, limitando al sur con el sector Pilar Norte y al oeste con el sector Dacita, además se encuentra a 240 [m] de Nuevo Nivel Mina, sobre el sector Norte Andes.

La explotación del sector se realiza mediante el método Panel Caving con Hundimiento Avanzado hasta el XC-5N, y desde ahí hacia el norte mediante Panel Caving con Hundimiento Convencional. Las mallas de extracción son de 30x17[m²].

4.1.2. Hitos operacionales de extracción e inicio de caving

El inicio de la operación comienza en el año 1989 desde el lado este del sector emplazado en la alta montaña en donde se pretende concretar la conexión con la topografía, a través de una extracción acelerada de mineral entre los años 1989 y 1992. Como resultado se originan grandes descargas de energía en forma de estallidos de roca que finalmente

desencadenan el colapso del sector desde la calle 5 a la 8, con consecuencias fatales. El sector es cerrado y aislado en diciembre de 1992 interrumpiéndose su explotación. En junio de 1994 se da comienzo a una etapa de minería experimental en la misma zona colapsada, pero esta vez de bajo régimen y con extracción controlada, como única actividad minera. En junio de 1996 se produce la conexión con el nivel de producción Teniente 5. A partir de julio de 1997, comienza una fase pre-operacional de un año y se fija como método de explotación el Panel Caving tradicional con variantes distribuidas zonalmente, las cuales se ponen en práctica desde el año 1999 cuando se reabre el sector. La Figura 21 y Figura 22 muestran la línea de tiempo de los hitos operacionales de extracción y la secuencia de extracción e inicio de caving, respectivamente.

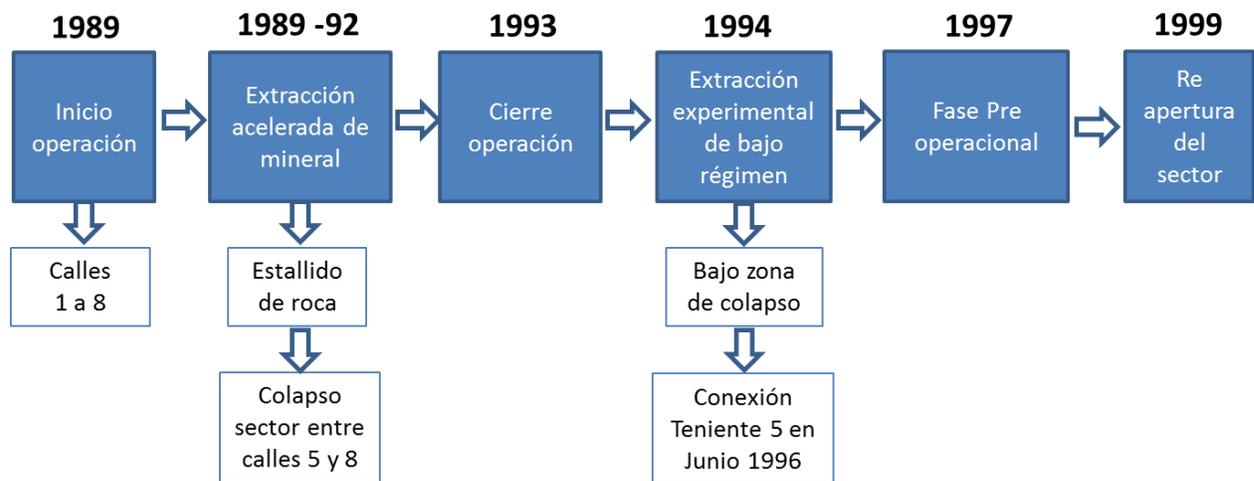


Figura 21: Línea de tiempo de los hitos operacionales de extracción entre 1989 y 1999 de Reservas Norte.

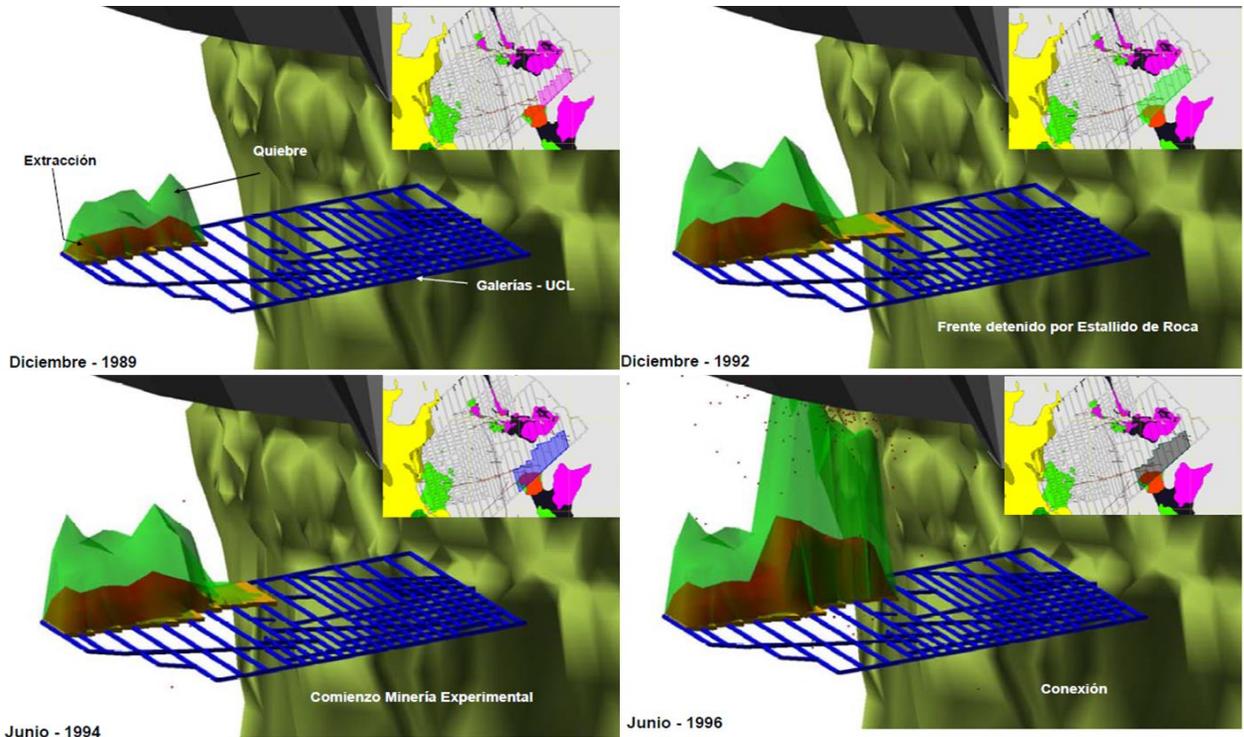


Figura 22: Secuencia de extracción e inicio de caving del sector Reservas Norte (CODELCO, 2007).

El área colapsada debido a estallidos de roca es presentada en la Figura 23 y se encuentra demarcada por una línea roja, la cual abarca desde la calle 5 a la 8. Es relevante señalar que durante la etapa de minería experimental la conexión con el nivel superior ocurre en esta zona.



Figura 23: Área colapsada debido a los estallidos de roca ocurridos en diciembre de 1992 (línea roja). Los polígonos coloreados indican el área de influencia de los puntos de extracción (CODELCO, 2009).

4.1.3. Labores antiguas superiores

La presencia de labores antiguas abandonadas sobre los sectores productivos afectados por barro, ha sido identificada como uno de los posibles factores involucrados en esta problemática, ya que durante y posterior al cierre de su operación tienen la capacidad de concentrar barro histórico que puede moverse debido a la conexión con este nivel.

Sobre Reservas Norte existen 3 sectores ya explotados que sufrieron problemas de agua-barro durante su operación. Estos son: 5 Pilares, 5 Pilares Norte y 4 Norte Estándar (Ver Figura 24).

Como antecedente se conoce que los 3 sectores fueron cerrados con una considerable cantidad de puntos de extracción en estado agua-barro. Por ejemplo, el sector 4 Norte Estándar presentó una frecuencia total de 1.200 puntos cerrados por esta situación (Tabla 8).

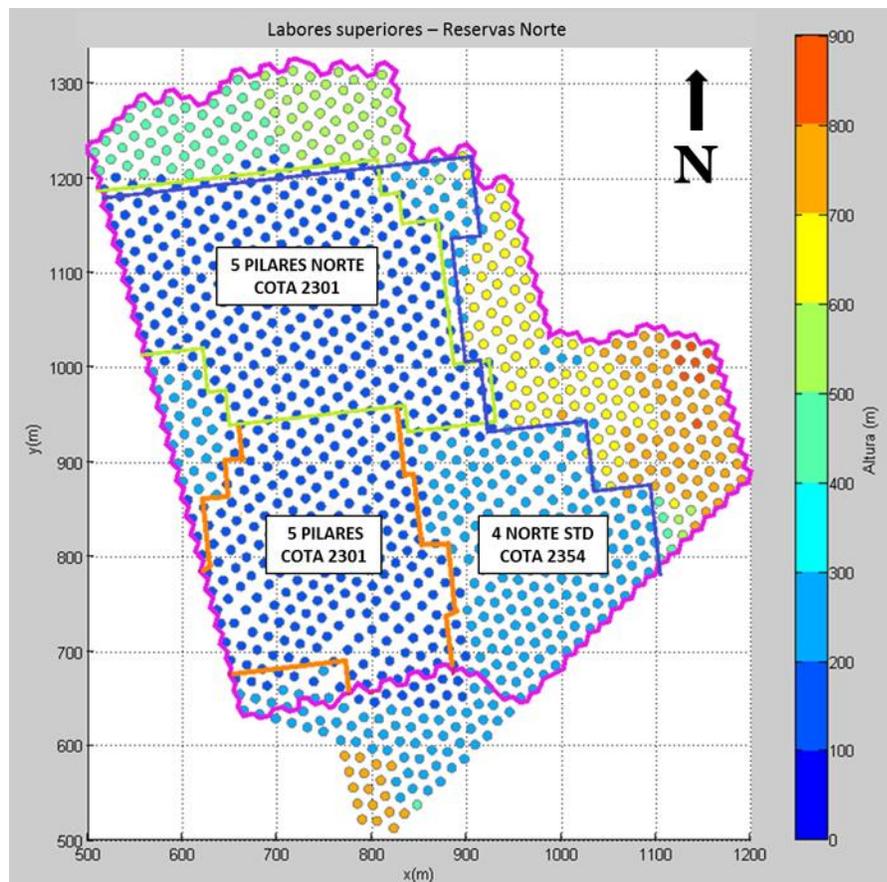


Figura 24: Labores superiores abandonadas sobre Reservas Norte.

SECTOR	Cota UCL [m]	Distancia a RENO [m]	Puntos cerrados por barro*
5 Pilares	2301	181	731
5 Pilares Norte	2301	181	255
4 Norte Estándar	2354	234	1200
Reservas Norte	2120	0	202

Tabla 8: Descripción labores superiores sobre Reservas Norte.
 (* Fuente: Zonación de ingreso de barro mina El Teniente, Abril 2014, CODELCO.)

4.1.4. Avance frente de hundimiento

La frente de hundimiento se desplaza verticalmente en dirección sur a norte y horizontalmente de este a oeste. La Figura 25 presenta el avance anual, en donde se observa que en los últimos 3 años el ancho de la frente a alcanzado valores cercanos a los 300 [m], lo que trae grandes problemas operacionales, como efectos de pandeos. Para contrarrestar lo anterior se ejecuta una incorporación de área en forma de escalera.

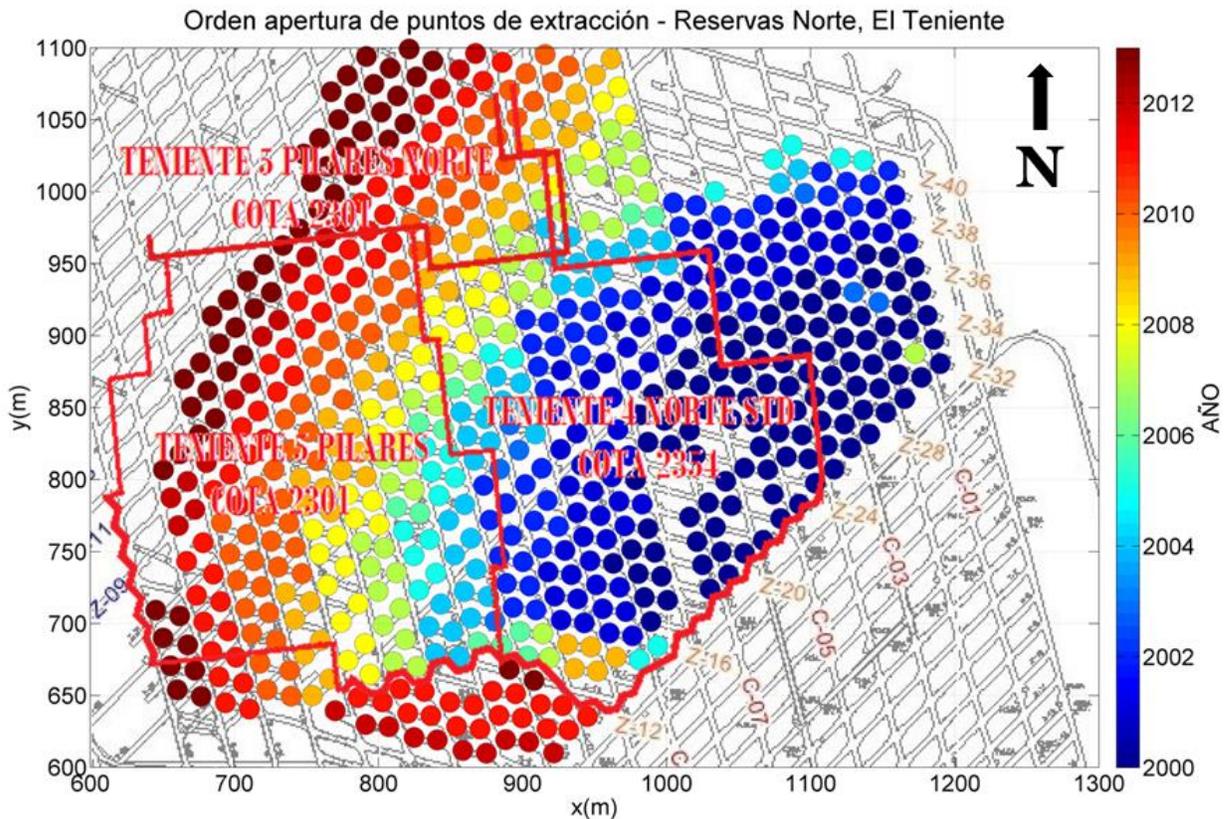


Figura 25: Secuencia de incorporación de área.

4.1.5. Alturas in situ

El 75% de los puntos de extracción de Reservas Norte tiene columnas in situ entre los 180 y 240 [m] debido a la presencia de labores superiores, eso significa que todo el material por sobre las columnas intactas se encuentra quebrado hasta topografía, lo que podría posibilitar un ingreso preferente de agua a estas zonas. Como se muestra en la Figura 26, sobre la zona azul se ubica 5 Pilares y 5 Pilares Norte, correspondiente a altura in situ de 180 [m], y sobre toda la zona azul y celeste se extiende 4 Norte Estándar. También se puede apreciar que el lado este presenta alturas in situ entre 400 y 840 [m], no obstante podrían estar sobreestimadas ya que la propagación del caving de las labores antiguas no es recta, sino que presenta una inclinación que pudo afectar tales alturas.

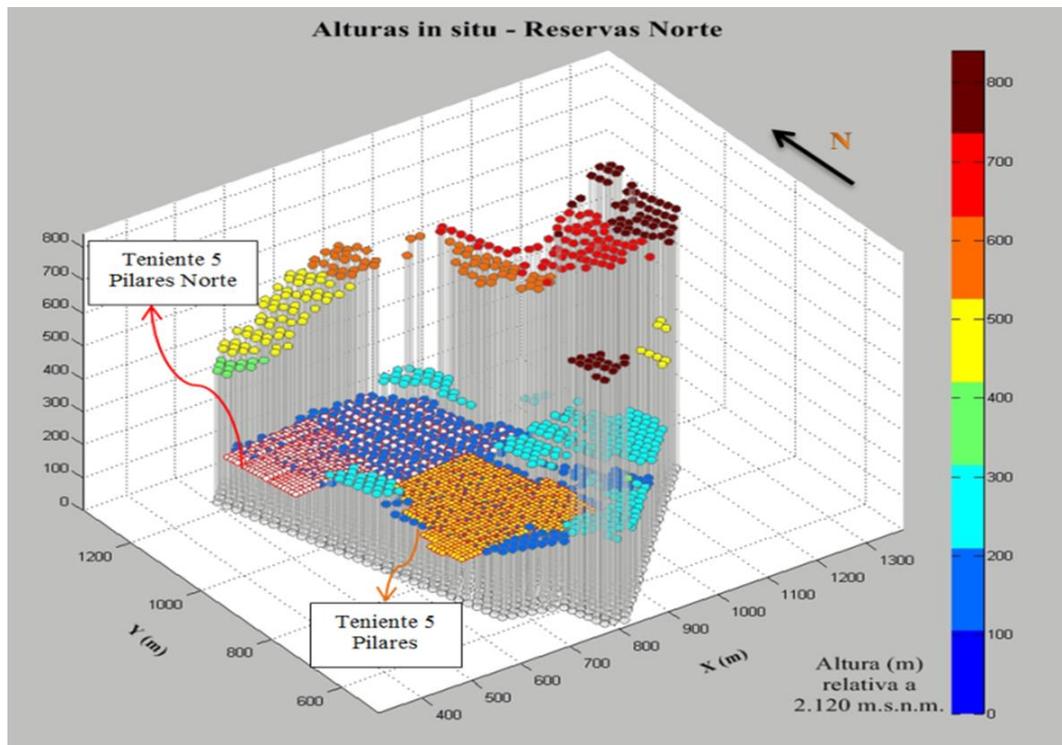


Figura 26: Altura in situ sector Reservas Norte al inicio de la operación.

4.2. Caracterización del ingreso de agua-barro al sector

A partir de una revisión de la data histórica de Reservas Norte, proporcionada por División El Teniente, se realiza un análisis de diferentes variables que podrían estar involucradas en la presencia de barro en los puntos de extracción. El análisis de eventos de bombeos y escurrimiento se presenta en el capítulo 5.

4.2.1. Frecuencia anual declaración de puntos como agua-barro

Durante la operación de Reservas Norte el cierre de puntos no ha sido constante, mostrando significativas diferencias año tras año. La Figura 27 muestra la frecuencia anual de cierre de puntos de extracción declarados como agua-barro, en donde los años 2009 y 2012 son los que presentan una mayor cantidad de cierres. En cambio entre los años 2002 y 2003 en total sólo 3 puntos fueron cerrados, lo que se atribuye fundamentalmente a la pared generada en el lado oeste tras el colapso de la calle 9, lo que limita el ingreso de barro a los puntos contiguos.

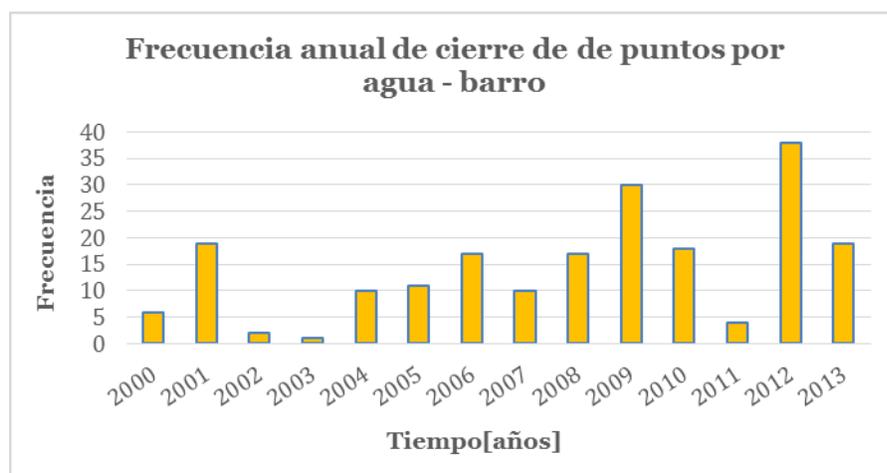


Figura 27: Frecuencia anual de cierre de puntos de extracción debido a la problemática del barro.

Más adelante se evalúa si existe alguna correlación entre la frecuencia anual de cierre y la pluviosidad de la zona.

4.2.2. Topografía

La diferencia de cota respecto a la superficie es un precedente importante en relación al fenómeno del barro, ya que es más probable el ingreso de barro donde la diferencia de cota entre el sector productivo y la superficie sea menor.

En la Figura 28 se despliega la topografía del año 2011 sobre las alturas in situ de cada punto de extracción, en donde se registran mayores diferencias a superficie del lado este que del lado oeste. Lo anterior condiciona un ingreso preferencial de agua en las épocas de deshielos sobre el lado oeste. Adicionalmente la cota más baja de la topografía corresponde al canalón¹, singularidad emplazada en el lado oeste del sector cuya geometría facilita la infiltración de agua.

¹ Depresión en forma alargada que se observa producto de la explotación histórica de los sectores alrededor de la Pipa Braden. Lo característico es que se constituye en zonas preferenciales de acumulación de aguas superficiales (CODELCO, 2014).

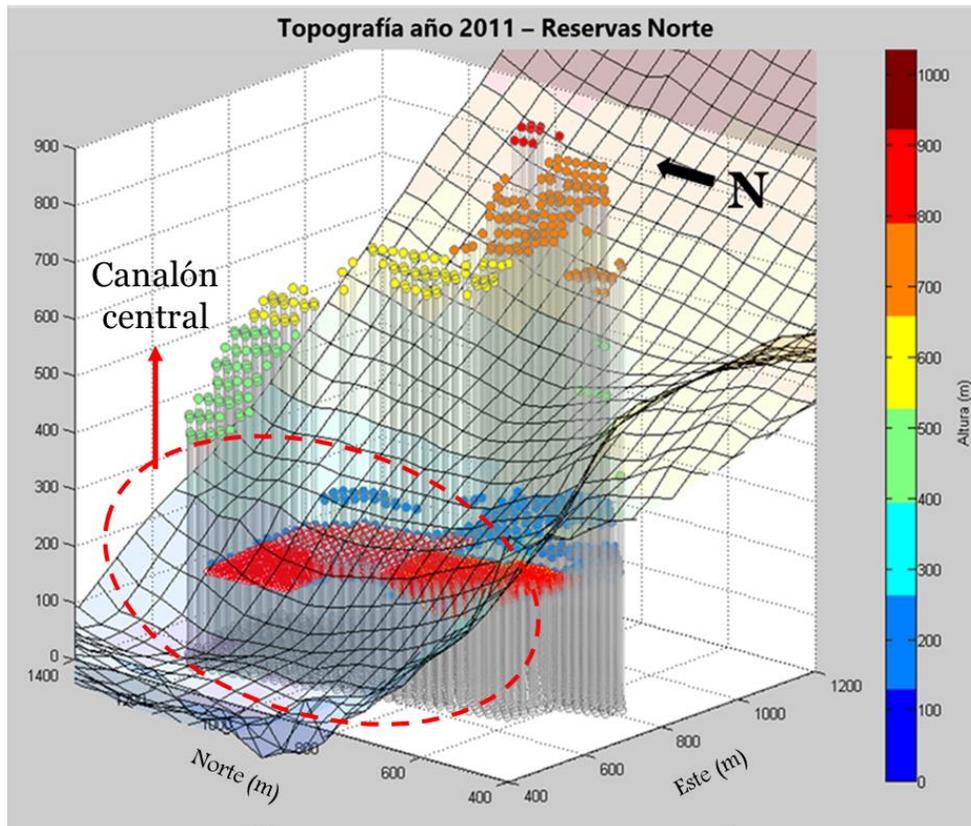


Figura 28: Topografía del año 2011 sobre el sector Reservas Norte.

Para analizar en mayor detalle el relieve de la topografía sobre los puntos de extracción del sector, la Figura 29 muestra la visualización de 3 cortes transversales a 700, 900 y 1100 [m] al norte, en donde se puede observar que existe un plano preferencial hacia el lado oeste del sector con una inclinación aproximada de 34° .

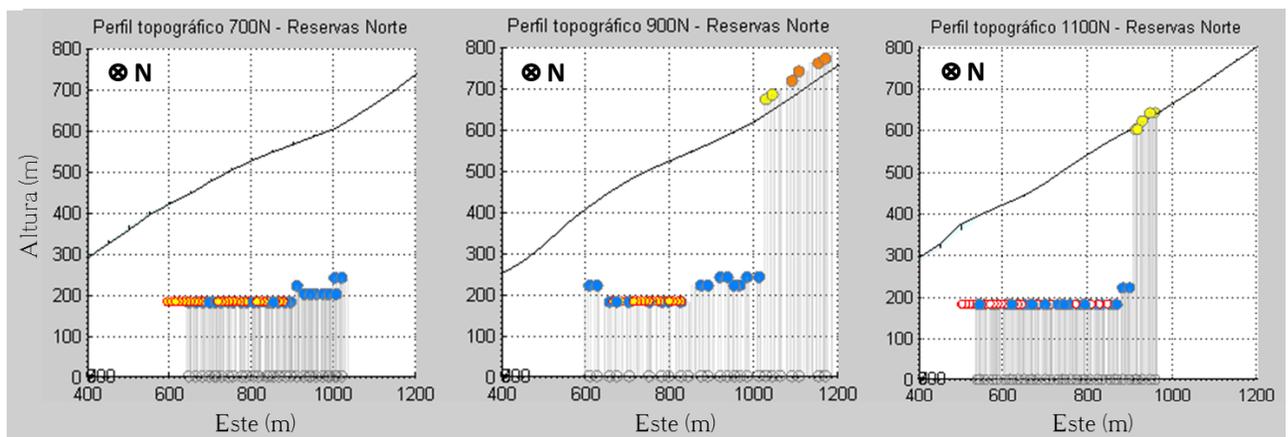


Figura 29: Vista en sección transversal de la topografía sobre el sector Reservas Norte, a 700, 900 y 1100 metros.

4.2.3. Precipitaciones

A través de las precipitaciones de nieve y agua registradas en la estación Sewell se pretende averiguar si existe correlación entre el ciclo meteorológico y la frecuencia de puntos cerrados por barro.

La Figura 30 muestra los registros pluviométricos y nivométricos registrados en la estación Sewell entre los años 2000 y 2007, observándose precipitaciones mayores a los 1.500 [mm] en el año 2002 y 2005, sin embargo no se evidencia alguna correlación, ya que los años más lluviosos o con mayor caída de nieve no necesariamente coinciden con la mayor frecuencia de cierre anual de puntos de extracción del sector Reservas Norte.

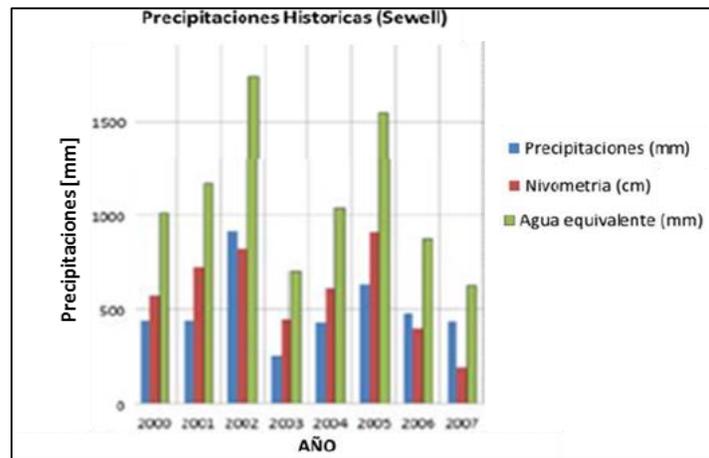


Figura 30: Precipitación histórica registrada en estación Sewell (CODELCO, 2014).

Asimismo, no se encuentra un patrón que indique cierta relación entre la frecuencia de cierre de puntos y la época de deshielos, octubre a marzo. La Figura 31 muestra la frecuencia de cierre de puntos por mes, en donde se puede distinguir lo siguiente:

- Si bien, en la época de deshielo alrededor de 122 puntos de extracción son cerrados por barro, representando el 60% del total, existe una cifra no menor (80 puntos) que no cumplen esta relación.
- Marzo aparece como el mes con mayor frecuencia de cierre, sin embargo, cabe mencionar que posterior al incidente de bombeo del 2 de marzo del 2010 se cerraron 12 puntos de extracción ese mismo mes.
- Febrero es el mes con menor frecuencia de cierre, tan sólo 5 puntos.
- Agosto, siendo un mes invernal, presenta un gran número de puntos declarados como barro, lo que perturba el análisis. El 28 de agosto del 2012 y 23 de agosto del 2013 fueron cerrados 8 y 7 puntos, respectivamente.

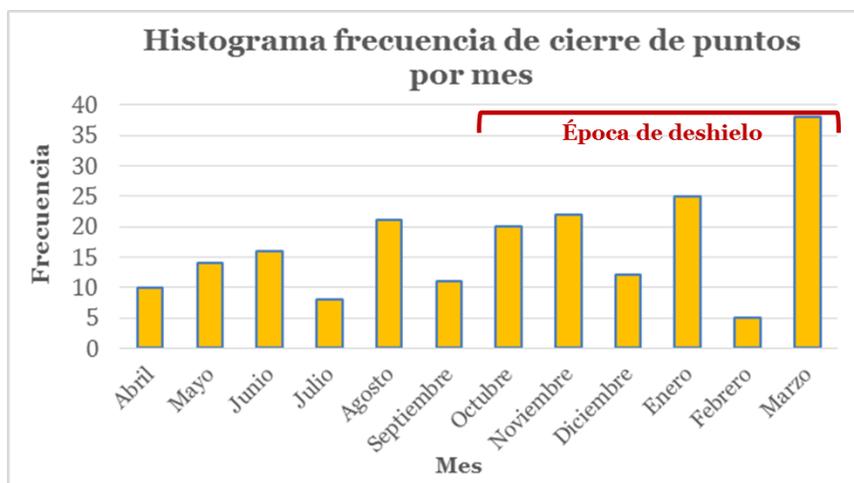


Figura 31: Histograma de mes de cierre de puntos de extracción.

Probablemente la fecha en que los puntos son cerrados por barro se encuentren asociados a decisiones propias de la operación, que por el momento se desconocen, más que a las infiltraciones de agua debido a los deshielos.

4.2.4. Estructuras geológicas

En el lado norte del yacimiento se encuentra la falla N1 que podría influir en la entrada de agua-barro al yacimiento, sin embargo el Informe de zonación de riesgo entregado en abril del presente año por la GRMD se indica que no existe una relación ya que el agua que acapara es mínima o no perjudicial, por lo que no existen riesgos de que se acentúe el ingreso de barro al sector.

4.2.5. Secuencia de ingreso de agua-barro

El orden en que fue ingresando barro a los puntos de extracción es uno de los factores primordiales a ser analizados para entender el origen del suceso y poder relacionarlo con otras variables en estudio

En el caso de Reservas Norte el barro ingresó en la porción central, entre las calles 5 y 8, durante el período 2000 y 2003 (color azul), lo que corresponde exactamente al sector donde se produce el inicio de caving, luego migró hacia el lado norte, este y oeste de esta zona, período 2004-2006, para finalmente extenderse hacia el lado oeste en el sentido de avance de la frente de hundimiento, lo que se puede visualizar en la Figura 32, donde se muestra la entrada de barro anual. Se pueden observar además algunos puntos islas que fueron declarados como agua-barro que serán explicados con mayor detalle más adelante.

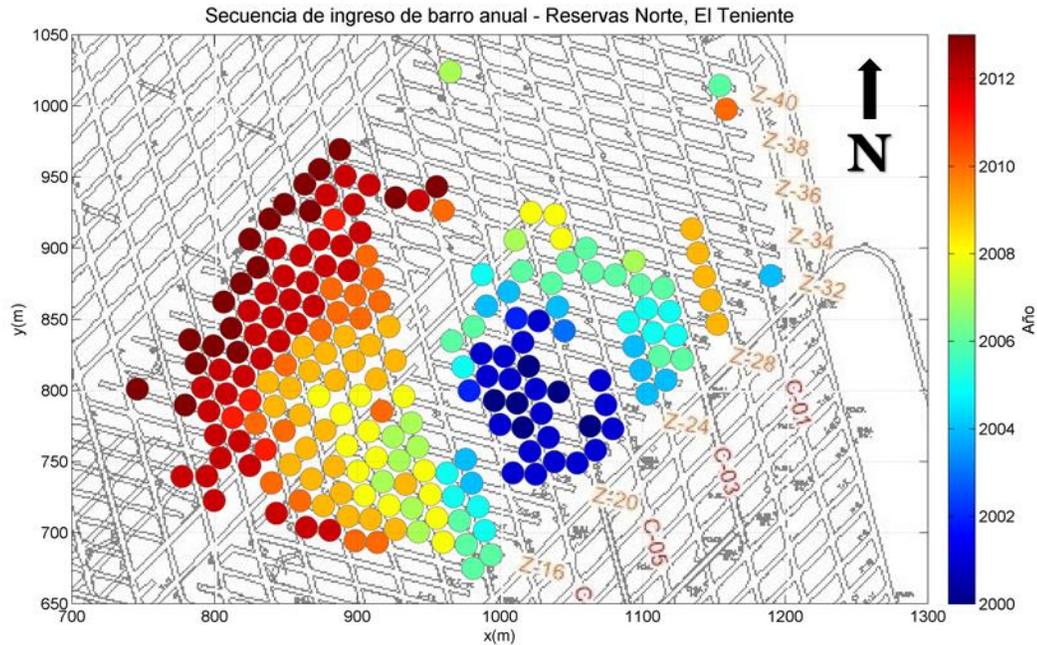


Figura 32: Secuencia de ingreso de barro anual, sector Reservas Norte.

4.2.6. Altura extraída a la que ingresa agua-barro

La altura de columna que logra ser extraída antes del cierre del punto es otro elemento interesante a ser analizado, ya que nos puede dar indicios del origen del barro, el cual puede provenir desde la superficie, labores antiguas, ser una mezcla de ambas o debido a migración lateral desde puntos vecinos que son afectados por barro.

Con respecto al sector Reservas Norte se puede establecer que el lado este presenta alturas extraídas superiores a 400 [m] al momento de declararse en estado barro. En cambio el lado noroeste las alturas alcanzadas fueron entre 100 y 200 [m], correspondiente a la zona ovalada de la Figura 33. Los promedios de altura extraída de ambas zonas son, 263,3 y 381,3 [m], para el lado oeste y este, respectivamente.

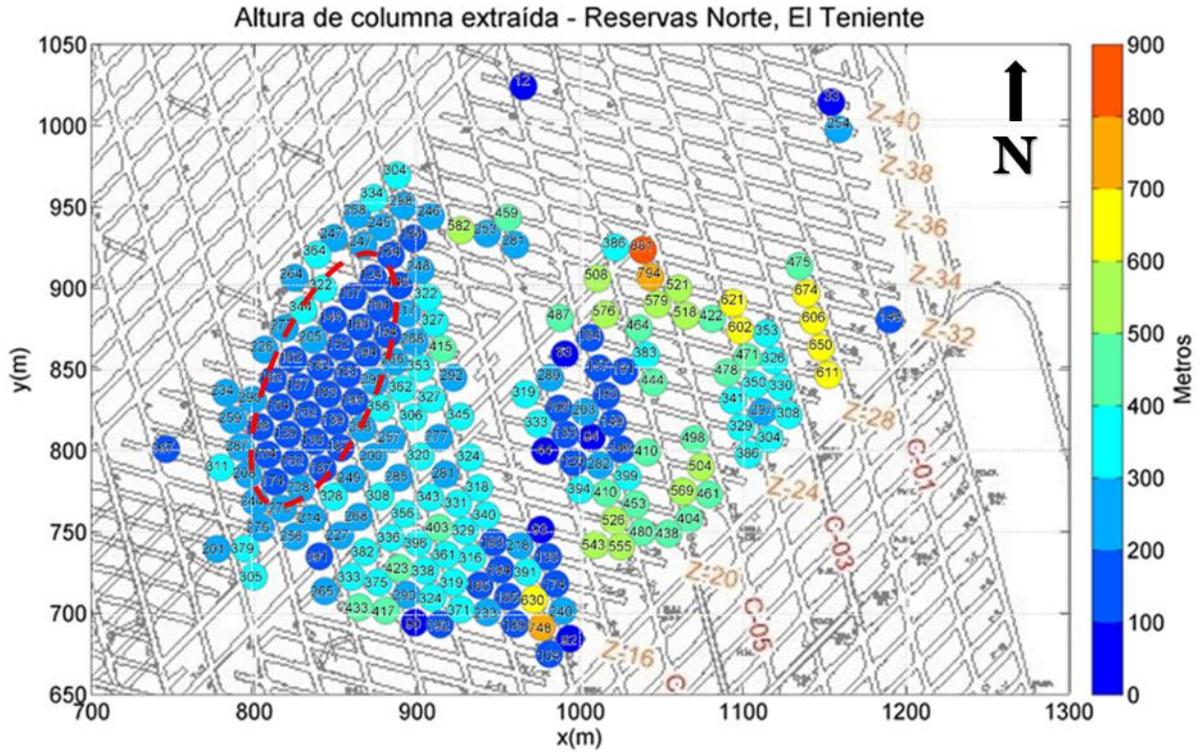
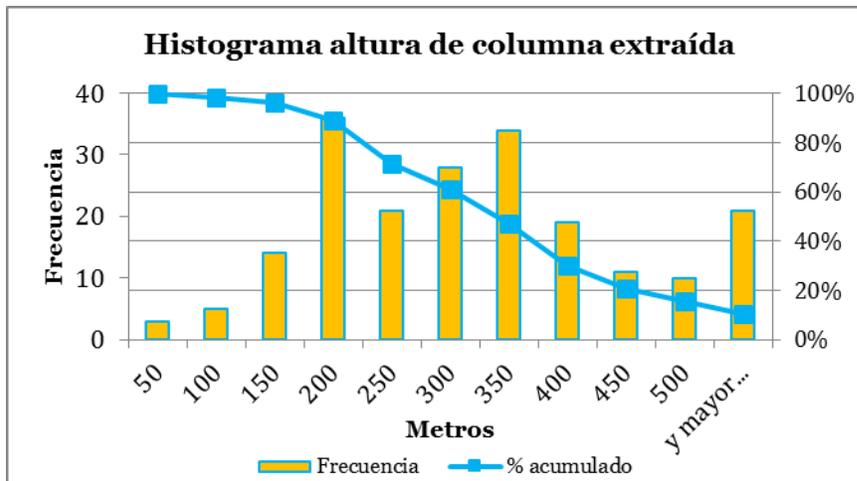


Figura 33: Altura de columna extraída antes del cierre de puntos por agua-barro.

En general, se observan 2 familias de datos, una entre los 150 y 200 [m], y otra entre los 250 y 350 [m], representando casi un 49% del total. Un 47% logró una extracción de columnas superior a 300 [m], es decir, mayor a la altura límite de extracción para puntos con riesgo de barro (Figura 34).



Estadística descriptiva		
Minimo	12.62	[m]
Maximo	881.77	[m]
Promedio	304.95	[m]

Figura 34: Histograma de altura de columna antes del cierre de punto por agua-barro.

De la Figura 35 se puede apreciar que a lo largo de los años la tendencia indica una reducción de las alturas extraídas obtenidas antes de la intromisión de barro, lo que puede estar asociado a 2 factores:

- Distancia a topografía: al avanzar con la frente de hundimiento al lado oeste la topografía comienza a descender lo que puede provocar que la distancia que deban realizar los flujos de agua-barro a través de la columna disminuyan.
- Estrategia de extracción: La tendencia a la baja de alturas extraídas se observa desde el 2010 lo que coincide con las nuevas prácticas operacionales para el manejo del barro implementadas por la División, lo que puede significar que ahora las condiciones de cierre son más rigurosas respecto a las condiciones de cierre de los puntos declarados agua-barro.

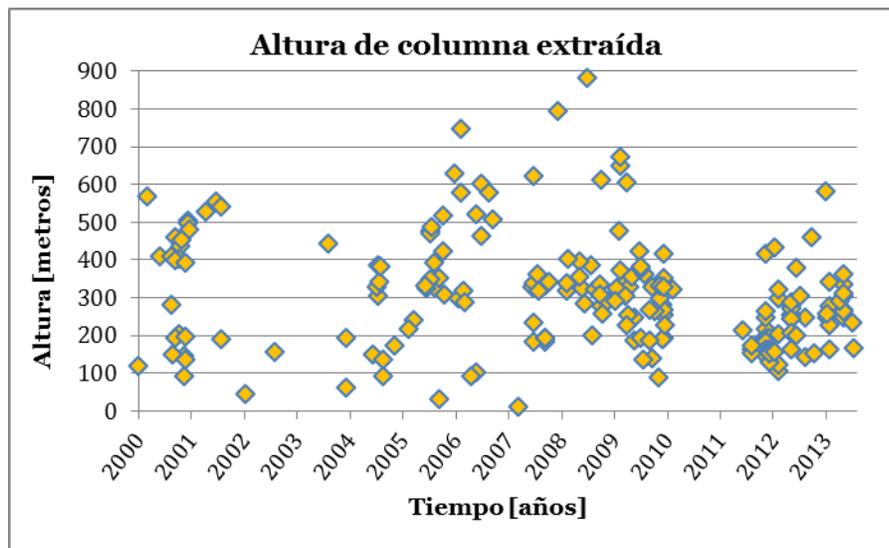


Figura 35: Altura extraída a la que se cierra los puntos por agua-barro versus tiempo.

Para complementar el análisis anterior se revisa el porcentaje de la columna in situ que fue extraída. La Figura 36 indica que el 84% de los puntos que detuvieron su extracción debido al ingreso de barro extrajeron más del 100% de su altura de columna in situ, es decir, en la gran mayoría de los casos la columna de mineral se encuentra totalmente quebrada al momento de aparecer barro. Si se considera que al extraer el 30% de la columna in situ se logra conectar con el material quebrado de las labores antiguas, entonces el 98% cumple tal condición al momento de ser cerrado por agua-barro.

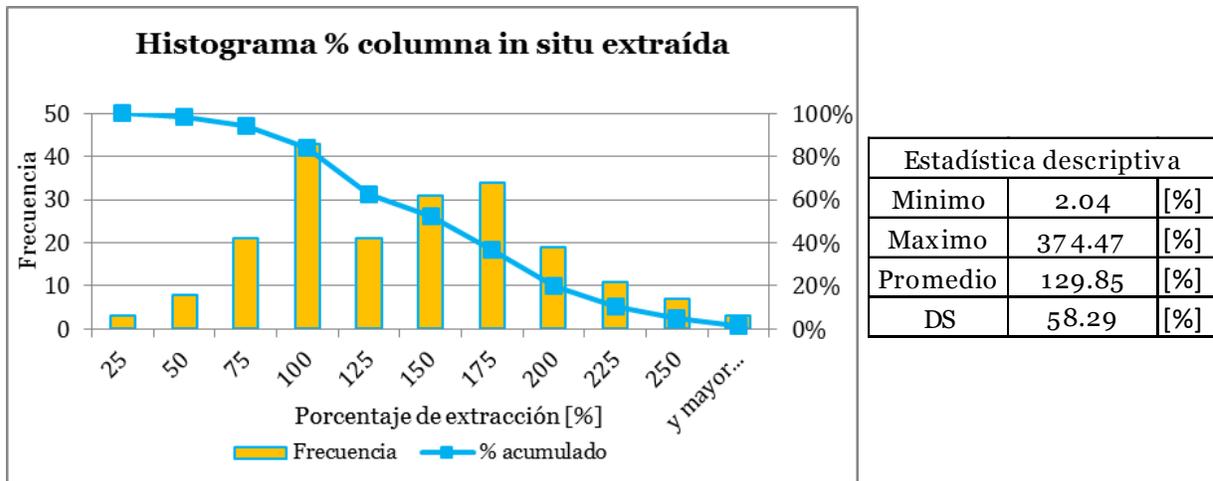


Figura 36: Histograma del % de columna in situ extraída antes del cierre de los puntos por agua – barro.

Todos los cálculos fueron realizados considerando la extracción desde el inicio de la operación el año 1989, incluyendo la etapa de minería experimental.

4.2.7. Origen del barro

Como se mencionó antes existen 3 hipótesis sobre el origen del barro en el sector Reservas Norte, que pueden ser: agua proveniente de la superficie que se infiltra principalmente por deshielos y precipitaciones, acumulaciones de barro histórico en labores antiguas o una mezcla de ambas.

En este apartado se busca deducir cual es el origen del barro, para lo cual se realiza una clasificación de cada punto de extracción considerando las siguientes variables:

- Secuencia de ingreso de barro.
- Ubicación bajo labores superiores.
- Ubicación bajo zona de colapso
- Ubicación en el borde
- % Columna in situ extraída.

Los puntos de extracción son clasificados en 7 zonas, en donde se comprobó que el 95% de ellos se ubica bajo labores antiguas que concentran barro histórico, ya sea 4 Norte Std, 5 Pilares Norte o 5 Pilares. Asimismo se observa que de los primeros puntos en ser declarados agua-barro en los años 2000 y 2001, todos se ubican exactamente en la zona de conexión de caving. Otra situación que se evidencia son los denominados puntos bordes, que se ubican en la calle 1 del lado este que limita con material virgen, en el que el ingreso de agua se debe al gradiente de presión que se genera en la interfase entre el quebrado y la roca in situ lo que provoca que los flujos de agua subterráneos filtre hacia el quebrado. Por último existen 5 puntos en la calle 2 que no se ubican bajo labores antiguas,

sin embargo 4 de 5 extraen más de 600 [m] de columna, lo que puede estar asociado a un ingreso de barro debido a filtración de agua directo desde superficie.

En la mayoría de los casos, excepto para los puntos bordes y el punto 07 37F, se cumple que el porcentaje de columna in situ extraída es mayor al 30%, por lo tanto se puede decir que las columnas se encuentran totalmente quebradas al momento de ingresar barro.

La Figura 37 despliega la visualización de las zonas identificadas y la Tabla 9 detalla las características de cada una.

ORIGEN	ZONA	DETALLE	# PE	TOTAL
Conexión con labor antigua	1	Primera zona en donde ingresa barro a los puntos de extracción durante los años 2000 y 2001, debido a que la conexión de caving fue realizada en esta zona durante la etapa de minería experimental el año 1997, para luego reabrir Reservas Norte el año 1999.	27	193
	2	Conexión con Teniente 4 Norte Standard.	109	
	3	Conexión con Teniente 5 Pilares	55	
	4	Conexión con Teniente 5 Pilares Norte	2	
Otras causas	5	Posiblemente migración lateral de barro desde el sector Teniente 4 Norte Estándar, no obstante ocurre sólo en calle 2 lado oeste desde zanja 29 a 33. Además 4/5 puntos presentan extracción mayor a 600 [m].	5	9
	6	Punto borde.	3	
	7	Estado del punto mal declarado, ya que no se ubica bajo labor antigua y tiene % de columna in situ extraída de un 2%.	1	

Tabla 9: Detalle del origen del ingreso de barro a los puntos de extracción del sector Reservas Norte.

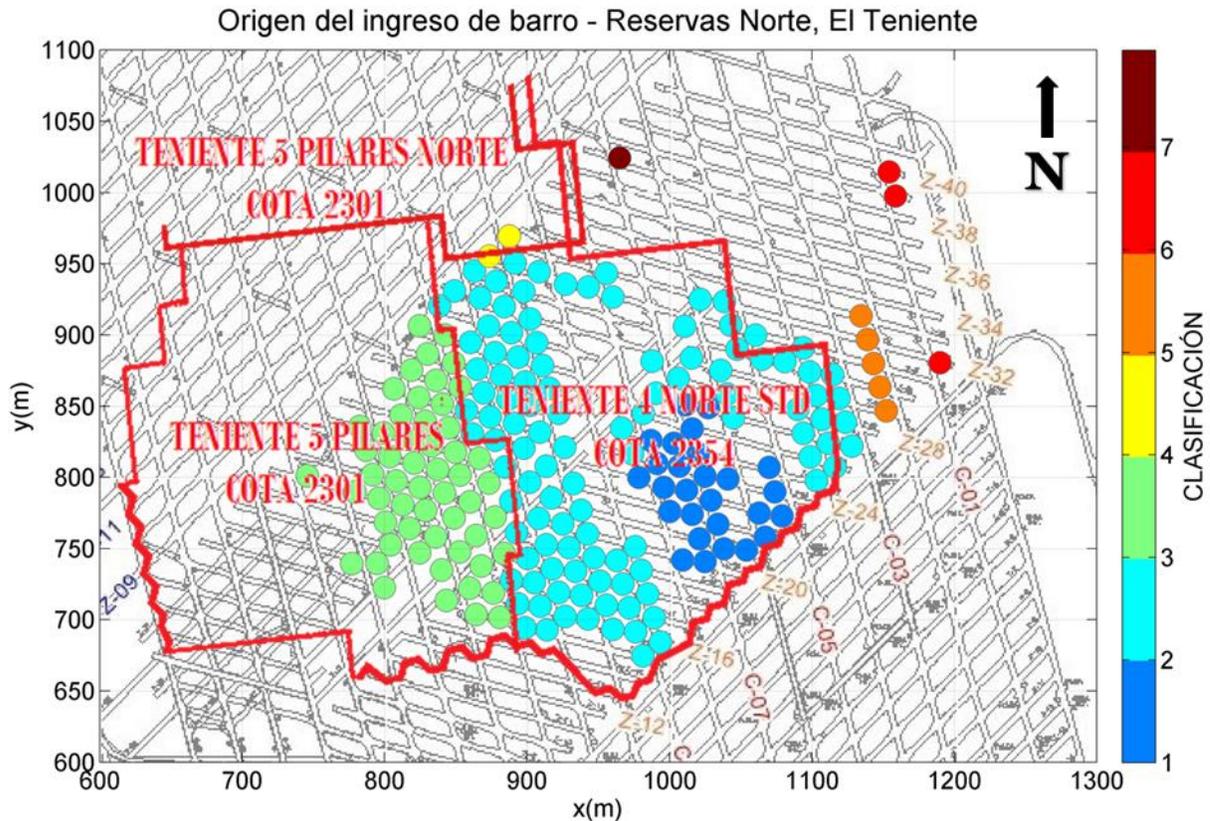


Figura 37: Origen del ingreso de barro a los puntos de extracción del sector Reservas Norte.

En conclusión se determina que el origen del barro se debe a la presencia de labores superiores afectadas por barro sobre los puntos de extracción, es más los puntos que no se ubican bajo labores antiguas no son afectados por la problemática del barro, salvo algunas excepciones mencionadas antes.

4.2.8. Tasa de extracción

El interés tras el estudio de las tasas de extracción aplicadas a los puntos de extracción radica principalmente a entender si existió sobre tiraje lo que justificaría una intromisión de barro prematura o de lo contrario si se comprueba que las estrategias determinadas por planificación fueron cumplidas.

El análisis de esta variable se realiza a través del estudio de 6 puntos de extracción, los cuales son escogidos al azar y representan diferentes alturas de columna extraídas. Los puntos seleccionados son: 07 22H, 08 23F, 11 23H, 11 26H, 12 17F y 14 22F. En cada caso se grafica la evolución temporal de las tasas aplicadas durante toda su etapa productiva.

Para comenzar se estudia el punto 08 23F que corresponde al primer punto que fue cerrado debido a esta problemática, en donde se observa que 2 meses previos al cierre del

punto las tasas de extracción fluctúan entre 0,5 y 3[td/m²], con un promedio de 1,54 [td/m²] y máxima de hasta 3,38 [tpd/m²], comprobándose la existencia de sobre tiraje (Ver Figura 38). Situación muy similar ocurre para el punto 11 23H que presenta tasas de extracciones mayores a 1 [td/m²] desde 1 año antes de su cierre (Ver Figura 40Figura 40), sin embargo la altura extraída es superior al 08 23F, lo que puede ser atribuido a que entre el 2004 y 2008 las tasas de extracción oscilan entre los 0,1 y 1 [td/m²], con un promedio general de 0,5 [td/m²]. Otro caso de sobre-extracción lo refleja el punto 14 22F, que a pesar de tener una vida operativa de más de 4 años, sólo en un año y medio (octubre del 2010 y marzo del 2012) se extrae más del 70% del total de la altura extraída. Respecto a las velocidades se estima que cerca de un 76% de las extracciones realizadas en ese período fueron superior a 1 [td/m²] (Ver Figura 43)

Por otro lado el punto 07 22H no muestra sobre extracción previo al ingreso de barro, pero sí durante abril y junio del año 1999 en donde se evidencian extracciones entre 0,5 y 5 [td/m²] y en promedio de 2,9 [td/m²], lo que pudo originar un gran movimiento de material saturado (Ver Figura 39)

En cambio el punto 11 26H, en contraste a los demás casos no muestra sobre extracción y más bien presenta una extracción regular a lo largo de toda su operación, sólo en el primer trimestre del 2010 se observan velocidades de extracción de riesgo, sin embargo el punto es declarado barro el 30 de marzo del 2012 (Ver Figura 42). Lo anterior indica que las causas del ingreso de barro son ajenas a un sobre tiraje y quizás este sea un caso de migración lateral.

Finalmente de los 6 puntos en estudio, el punto 12 17F es el que representa de mejor manera la estrategia de extracción determinada por la División, donde se aplica una tasa de extracción promedio de 0,7 [td/m²] y no manifiesta periodos concentrados de sobre tiraje (Ver Figura 41). La regularidad de la extracción pudo ser un factor determinante para que este punto alcanzara a extraer 423,68 [m].

En el análisis es necesario recordar que los puntos 08 23F y 07 22H se ubican en la zona donde se produjo el estallido de roca de 1992 y también la conexión del caving.



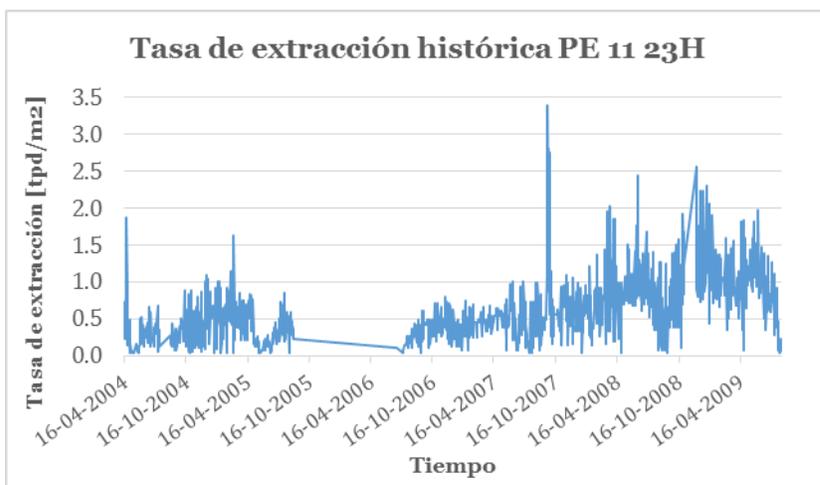
Descripción	
Fecha inicio	05-02-1999
Fecha cierre	27-04-2000
H extraída	120,1 [m]
% H in situ	50,2%

Figura 38: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 08 23F.



Descripción	
Fecha inicio	09-01-1999
Fecha cierre	11-12-2000
H extraída	410,2 [m]
% H in situ	170,63%

Figura 39: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 07 22H.



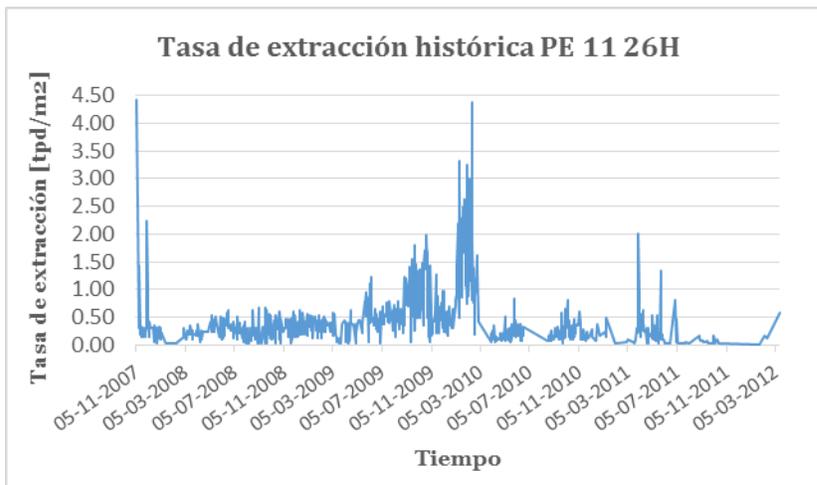
Descripción	
Fecha inicio	07-01-2004
Fecha cierre	18-08-2009
H extraída	357 [m]
% H in situ	162,26%

Figura 40: Tasas de extracción históricas aplicadas en el punto 11 23H.



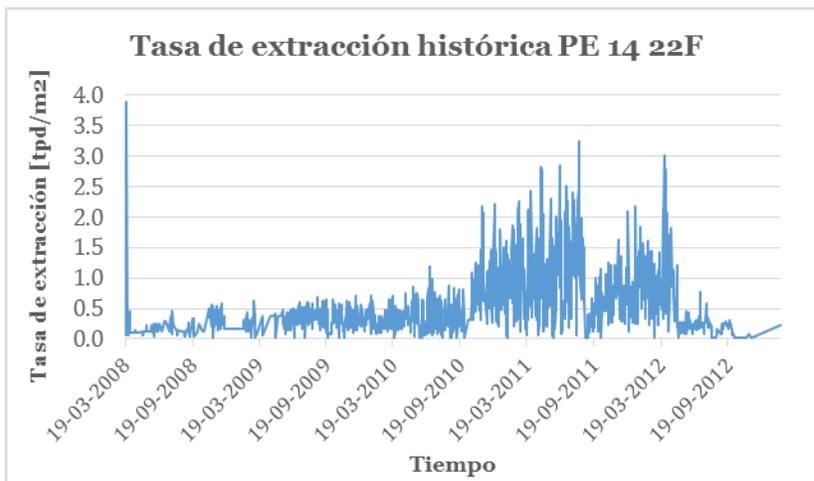
Descripción	
Fecha inicio	14-07-2002
Fecha cierre	14-10-2009
H extraída	423,68 [m]
% H in situ	235,38%

Figura 41: Tasas de extracción histórica aplicadas en el punto 12 17F



Descripción	
Fecha inicio	09-01-1999
Fecha cierre	30-03-2012
H extraída	166,6 [m]
% H in situ	75,1%

Figura 42: Tasas de extracción histórica aplicadas en el punto 11 26H.



Descripción	
Fecha inicio	01-03-2008
Fecha cierre	24-07-2013
H extraída	290,70 [m]
% H in situ	161,5%

Figura 43: Tasas de extracción históricas aplicadas al punto 14 22F.

4.3. Manejo de material saturado con LHD Remoto.

Durante el período comprendido entre julio del 2010 y mayo del 2011, alrededor de 37 puntos de extracción que se encontraban cerrados por barro fueron reabiertos y operados a través de LHD Remoto (Ver Figura 44). Los LHD Remoto permiten extraer material saturado de forma segura, evitando la exposición de los trabajadores, ya que el equipo es teleoperado a través de un joystick (control de mando) a distancia.

El uso de estos equipos en el sector no pretendía cumplir metas productivas, sino más bien, se enfocaba en contener la expansión del barro hacia la frente de avance, generando un efecto de drenaje en los puntos de extracción.

La extracción total de material saturado en los 10 meses que se utilizaron estos equipos fue de 134.000 toneladas de mineral.

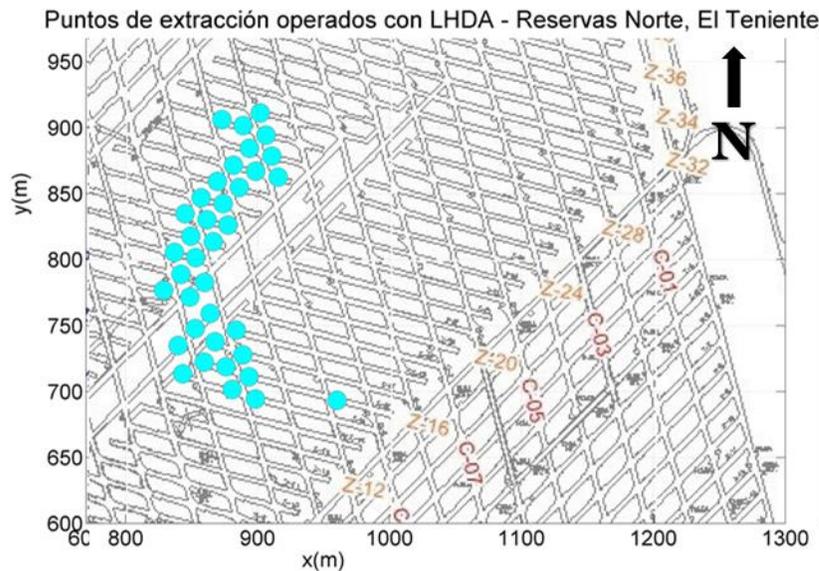


Figura 44: Puntos de extracción reabiertos y operados con LHD Remoto.

4.4. Estrategia de extracción

Los estándares operacionales para el manejo de material saturado utilizado en Reservas Norte fueron implementados de forma permanente a partir del año 2010, luego del bombeo del 2 de marzo. La estrategia de extracción contempla las siguientes medidas:

- Límite de reservas extraíbles a 300 [m].
- El punto de extracción es declarado como agua-barro cuando las condiciones de humedad y granulometría lo ubican en la zona de riesgo crítico de la matriz de criticidad.
- Cuando se identifica migración de humedad se establecen puntos barrera.

- d) La vecindad de un punto declarado como agua-barro pasa a estado limitado.
- e) Se fijan perfiles de extracción de acuerdo al % de columna in situ extraída.

A continuación en la Figura 45 se muestra la evolución temporal de los estados operacionales asociados a agua-barro, en donde se muestra que luego de implementar la estrategia el año 2010, mediante el uso de puntos limitados y barrera, se genera un leve estancamiento en la curva de barro acumulado, no obstante la curva vuelve a retomar un ritmo ascendente luego del 2012. Además se puede ver que los puntos barrera que son utilizados en gran cantidad entre el 2004 y 2006 no intervienen en el estado de puntos declarados barro. Se puede evidenciar el uso de LHD Remoto en que la porción de puntos que deja de estar en estado barro cambia a estado telecomandado.

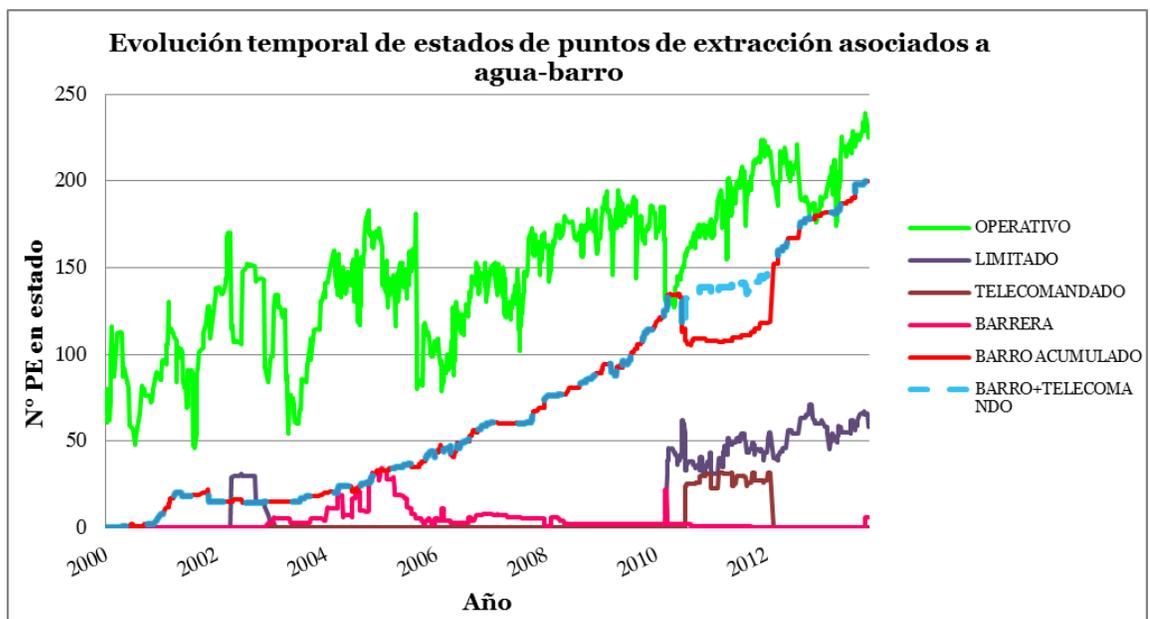


Figura 45: Evolución temporal de estados de puntos de extracción asociados a agua-barro del sector Reservas Norte.

Actualmente la zona afectada por el ingreso de barro es rodeada por 3 líneas de puntos limitados, a los cuales se le restringe la extracción a 4 a 6 baldadas diarias, sin embargo en muchos casos esta restricción no se cumple con el fin de lograr las metas productivas.

4.5. Comparación de la situación de agua-barro entre el sector Diablo Regimiento y Reservas Norte

En esta apartado se contrastan las principales características del fenómeno del barro observadas tanto en Diablo Regimiento como en Reservas Norte con el propósito de lograr una comprensión más acabada de la génesis del ingreso de barro a los sectores productivos de División El Teniente. De esta manera se puede establecer si existen patrones comunes

o ventajas y desventajas de un sector respecto al otro, lo que contribuirá en una mejor toma de decisiones en cuanto a las medidas de control para mitigar sus efectos.

Los elementos considerados son: hipótesis de ingreso de barro, algunos antecedentes, como el inicio de caving, topografía y presencia de labores antiguas, variables asociadas al fenómeno, control y potencial económico.

A partir de la caracterización del ingreso de barro en el sector Reservas Norte realizado previamente y a la información obtenida a través del estudio realizado por Navia (2014) del ingreso de barro en Diablo Regimiento, se construye un cuadro comparativo de la situación de barro para ambos casos (Ver Tabla 10).

		Reservas Norte	Diablo Regimiento
Hipótesis de ingreso de barro	Origen del barro	Conexión con labores superiores que concentran barro histórico.	Conexión con labores superiores que concentran barro histórico.
	Propagación	Migración lateral en dirección hacia la frente de avance debido, a la generación de planos preferenciales de flujos en la vecindad del punto.	Migración lateral en dirección hacia la frente de avance debido a la generación de planos preferenciales de flujos en la vecindad del punto.
Antecedentes	Nº Puntos de extracción	1127	640
	Profundidad del sector	2102 (NP)	2210 (NP)
	Inicio de caving	Tipo domo entre las calles 5 y 8.	Tipo domo desde Fase 1
	Presencia labores antiguas	4 Norte Estándar, 5 Pilares y 5 Pilares Norte	Regimiento, Isla y Fortuna
	Topografía	El canalón central de la pipa se ubica sobre el lado oeste, generando flujos preferenciales.	El canalón central de la pipa pasa de este a oeste, generando flujos preferenciales.
	Altura in situ	75% entre 180 y 240 [m] ubicados principalmente en el lado oeste.	Aproximadamente 160 [m].
Variables operacionales asociadas al ingreso de barro	Puntos de extracción cerrados	202	83
	Área cerrada	55.791 m ² (54% del total del área cerrada)	27.458 m ² (95% del total del área cerrada)
	Granulometría	% de mineral bajo 5 [cm] mayor al 30%	*
	Velocidad de extracción	Gran parte de los puntos presenta sobre extracción en algún periodo (> a 1 tpd/m ²)	Se logran perfiles regulares y uniformes en los últimos años.
	Altura columna extraída	Lado este superior a 400 [m] y lado oeste entre 100 y 200 [m]	Inicialmente extrae alturas entre 110 y 170 [m], pero luego alcanza cotas superiores a 300 m.
	% Columna in situ extraída	84% logra extraer más de un 100%.	80% logra extraer más del 100%
Control de ingreso de barro	Altura de columna limitada	300 [m]	250 [m]
	Estrategias de extracción	3 líneas de puntos limitados rodean la zona cerrada por barro	1 línea de puntos limitados rodean la zona cerrada por barro, además se incorporan puntos barreras.
Potencial económico	Reservas remanentes	Respecto a altura extraíble: 8.97 Mton Respecto a ley marginal 0.5%: 11.79 Mton Respecto a ley marginal 0.4%: 13.38 Mton	Respecto a altura extraíble: 2.4 Mton Respecto a ley marginal 0.5%: 6.3 Mton Respecto a ley marginal 0.4%: 8.8 Mton
	Leyes de cierre [%CuT]	80% cerrado con ley mayor a 0.8% Promedio: 1.02%	50% cerrado con ley mayor a 0.5% Promedio: 0.81%

Tabla 10: Cuadro comparativo del ingreso de barro entre Diablo Regimiento y Reservas Norte.

4.6. Conclusiones del capítulo

La caracterización del ingreso de barro llevada a cabo en los apartados anteriores, a través del estudio de diferentes variables que se encuentran relacionadas al fenómeno, permite conjeturar sobre el origen y las condiciones que favorecen su entrada, y posterior avance. De acuerdo a esto se concluye lo siguiente:

- Respecto a las precipitaciones, se demuestra que no existe una relación entre el cierre de puntos y la época de deshielos, es más para el caso de Reservas Norte no existe un desfase como se menciona en la Revisión Bibliográfica.
- El origen del barro proviene de la conexión con labores antiguas superiores que concentran barro histórico, en este caso, 4 Norte Estándar, 5 Pilares y 5 Pilares Norte. Luego de conectar, éste se propaga en sentido del avance de la frente de hundimiento.
- La estrategia de caving utilizada marca el punto de partida del ingreso de barro al sector, en donde los primeros puntos que evidenciaron signos de barro fueron los primeros en conectar con el sector 4 Norte Standard durante el inicio de caving.
- El barro ingresara sí o sí en puntos de extracción ubicados bajo labores antiguas, sin embargo esta situación puede retardarse si se cumple regularidad en la extracción y no se sobre-extrae.
- Los puntos que no son afectados por barro, principalmente del lado este, se debe a 2 razones:
 - i. Relieve de la topografía que permite que en épocas de deshielos el agua se desplace a menores cotas (lado oeste del sector).
 - ii. No se ubican bajo explotaciones antiguas.
- Las estrategias de extracción implementadas desde el 2010 generan un leve estancamiento en la declaración de puntos como agua-barro, pero luego sigue aumentando, lo que puede atribuirse a que las tasas de extracción impuestas por planificación no son aplicadas totalmente en la operación, de hecho en general en algún período de la vida operativa del punto existe sobre tiraje, incluso esta práctica fue observada en puntos que se encuentran limitados. Por lo tanto como la estrategia no es llevada al cabo del todo, no es posible hacer juicios sobre su efectividad y sólo se puede comentar respecto a situaciones en las cuales se han obtenido buenos resultados.
- El sobre-tiraje guarda relación principalmente con la disponibilidad de área del sector Reservas Norte, ya que al incorporar puntos de extracción en forma de escalera, para evitar pandeos en la frente, se pierde flexibilidad en la extracción de la operación. Por otro lado se tienen 3 líneas de puntos limitados que a veces con tal de cumplir las metas productivas, se extraen a mayores velocidades que las permitidas.

- El índice de uniformidad no fue parte de este estudio ya que para el método utilizado en la operación, panel caving, no es practicable del todo. Es más las características de la frente no permite holguras respecto a los perfiles de extracción de las columnas, al ser ancha y angosta.

En cuanto a la comparación de la situación de barro entre Reservas Norte y Diablo Regimiento, se concluye que:

- En ambos casos se determinó que el ingreso del barro fue causado al conectar con labores antiguas concentradoras de barro histórico mediante la estrategia de inicio de caving, en donde los primeros puntos se ubican exactamente bajo la conexión.
- La propagación del barro se debe a la generación de planos preferenciales de flujo causado por el cierre de 1 ó más puntos de la vecindad.
- El canalón central produce flujos preferenciales de ingreso de agua en épocas de deshielos hacia zonas ubicadas bajo él.
- En cuanto a la estrategia de extracción se observan mejores resultados respecto al manejo de material saturado en Diablo Regimiento debido principalmente a que en los últimos años se ha aplicado un tiraje más regular e uniforme en las columnas de mineral, extrayendo en forma pareja a través de las calles y como resultado se alcanzan mayores alturas de columnas extraídas, es decir, aumenta la recuperación de reservas.
- Lo expuesto anteriormente está fuertemente relacionado con las características de la frente de avance de ambos sectores. En el caso de Diablo Regimiento la frente es angosta, por lo que los puntos incorporados están uno al lado del otro, lo que permite flexibilidades operacionales en cuanto a las velocidades de extracción y los puntos poder extraerse en forma pareja. En cambio Reservas Norte incorpora área en forma de escalera lo que no permite holguras para generar perfiles de alturas regulares y uniformes. Además la estrategia no es llevada a cabo del todo, ya que existe mucha sobre extracción tanto en puntos operativos debido a las 3 líneas de puntos limitados implementada.
- El potencial económico tras la posible recuperación de reservas es mayor en Reservas Norte que en Diablo Regimiento, ya que presenta mayores alturas de columnas y mejores leyes.

Finalmente cabe señalar que al no contar con la base de datos histórica de granulometría y humedad de los puntos de extracción no se puede aseverar algo al respecto, sin embargo ambas variables están fuertemente relacionadas a esta problemática por lo que es imprescindible realizar su análisis y relacionarlo con otras variables ya estudiadas.

Capítulo 5

Análisis de eventos de bombeos y escurrimientos históricos

En el capítulo anterior se analiza el ingreso de barro a partir de todos los puntos declarados como agua-barro, sin considerar la intensidad en que se manifiesta el flujo de material saturado en el punto de extracción, por lo que en este capítulo se estudian 2 incidentes de agua-barro ocurridos en el sector Reservas Norte, un bombeo y un escurrimiento. Para el caso del escurrimiento, éste se produjo mediante la utilización de LHD Remoto.

5.1. Formas en que fluye el material saturado a través de los puntos de extracción

Según la intensidad en que se presenta el fenómeno del barro en los puntos de descarga se puede categorizar en 3 tipos:

- *Presencia de barro:* a medida que se extrae el mineral por el punto de extracción se observan pequeñas infiltraciones de material saturado. No representa un gran peligro para la operación, pero sí debe ser considerado como un aviso y tomar las medidas correspondientes. En el caso de DET, cuando se observa esta condición el punto se declara barro, ya que sí se continua con una extracción normal se puede generar un escurrimiento o bombeo.
- *Escurrimiento o derrame de barro:* corresponden a una descarga no violenta de material saturado por el punto de descarga que puede afectar hasta el piso de la galería.
- *Bombeo o estallido de barro:* corresponden a la descarga violenta de un gran volumen de material saturado por el punto de descarga, el cual puede inundar una galería completa o incluso todo el nivel. Esta forma de ingresa el barro es considerada la más peligrosa de todas, ya que no sólo afecta área productiva sino que además puede causar accidentes fatales debido a lo estrepitoso de su mecanismo.

5.2. Bombeo calle 11 zanja 24H

5.2.1. Antecedentes

Lugar: Nivel de producción, Calle 11 zanja 24 oeste (Hw).

Fecha: 2 de marzo del 2010

Hora: 8:45 am

Calificación: Grave

Consecuencias: Potencial accidente fatal de operador LHD.

Extensión: Desde la zanja 24 a la 19, alrededor de 80 [m], de los cuales 30 [m] ocupan la sección completa.



Figura 46: Bombeo producido en el punto de extracción 11 24H.

Este incidente tiene un factor adicional, ya que el 27 de febrero un terremoto de gran intensidad afectó a la zona en donde se emplaza la Mina Reservas Norte, cerrándose la operación durante el 28 de febrero y 1 de enero. Luego de inspeccionar el sector se reinician actividades en turno A, el 2 de enero y se decide disminuir el turno diario de 12 a 10 baldadas. Finalmente el bombeo ocurre luego de extraer las 15 baldadas cuando el operador se dirige al punto de vaciado 11-2 OP, escucha un estruendo y un posterior apagón de luces. El operador vacía el mineral y se dirige con el equipo en dirección norte, detectando a la altura de la zanja 19 presencia de barro en toda la sección.

5.2.2. Estados operacionales del punto y su vecindad

Antes de comenzar el análisis se establece la vecindad del punto de extracción 11 24H, representada en Figura 47.

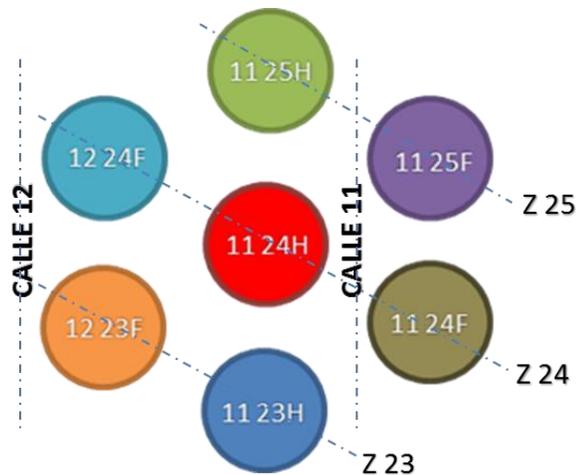


Figura 47: Vecindad punto de extracción

A continuación se muestra la evolución temporal de los estados operacionales de la vecindad del punto 11 24H desde un año antes que ocurriera el bombeo (Ver Figura 48), en donde se observa que algunos puntos vecinos, 11 23H, 12 23F, 11 24F y 11 25F, ya estaban cerrados. Además se puede notar que no existe una estrategia de extracción para el control de barro, como por ejemplo utilizar puntos limitados o barrera. Lo anterior se debe a que la estrategia de extracción utilizada actualmente por DET se formuló posterior a este incidente, y debido a él.

Si se considera el orden en que los puntos vecinos fueron declarados como agua-barro, se puede determinar que el barro avanza hacia el norte de la calle, y hacia el lado oeste, es decir en sentido del avance de la frente de hundimiento.

FECHA	11 23H	11 24F	11 24H	11 25F	11 25H	12 23F	12 24F
02-03-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-04-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-05-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-06-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-07-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-08-2009	2	2	2	2	2	2	2
02-09-2009	12	2	2	2	2	2	2
02-10-2009	12	2	2	2	2	2	2
02-11-2009	12	2	2	2	2	2	2
02-12-2009	12	12	2	2	2	2	2
02-01-2010	12	12	2	2	2	2	2
02-02-2010	12	12	2	12	2	2	2
02-03-2010	12	12	12	12	8	2	2

Leyenda	
2	Operativo
12	Barro
8	Razones Op.

Figura 48: Estados operacionales del punto 11 24H y su vecindad un año previo al bombeo.

5.2.3. Humedad

Los registros de la humedad muestreada en laboratorio muestra que antes de detenerse la producción debido al Terremoto del 27F, el punto 11 24H registró 6,5% de humedad y luego posterior al evento de bombeo la humedad medida fue de 8,3%, es decir hubo un cambio abrupto en la condición de humedad (Ver Tabla 11).

PE	18-12-09	24-12-09	06-01-10	21-01-10	22-02-10	26-02-10	02-03-10
11 24H	4,6	5,7		6,1	6,6	6,5	8,3
11 25F	4,4	6,4	5,3	7,5			
11 25H						6,1	
12 24F						5,9	

Tabla 11: Registros de muestras de laboratorio de humedad de los puntos 11 24H, 11 25F, 11 25H y 12 24F, tomadas entre el 18 de diciembre del 2009 y el día del bombeo.

No se realiza un análisis de los registros de humedad categórica realizados mediante inspección visual en terreno, ya que la base de datos no está completa, la información es muy discontinua, y la inspección visual tiende a ser muy subjetiva.

5.2.4. Granulometría

Además del agua es necesaria la presencia de finos en la columna de extracción para formar barro, en ese sentido se grafican las variaciones porcentuales de mineral menor a 5 [cm] observado en la frente del punto 11 24H y sus puntos vecinos.

De la Figura 49 se puede ver que durante los 6 meses previo al bombeo, el punto 11 24H presenta porcentajes de mineral menores a 5 [cm] superiores al 30%. Los puntos vecinos

11 25H y 12 24F presentan mayoritariamente porcentajes menores al 20%, lo que puede estar asociado a que son los únicos puntos que permanecen operativos posterior al bombeo.

Adicionalmente se establece que el punto 11 24H y sus vecinos que fueron declarados barro, registran % de mineral menor a 5 [cm] superior al 50%, de hecho el punto 11 24H registro un 100% previo a su cierre (Ver Tabla 12).

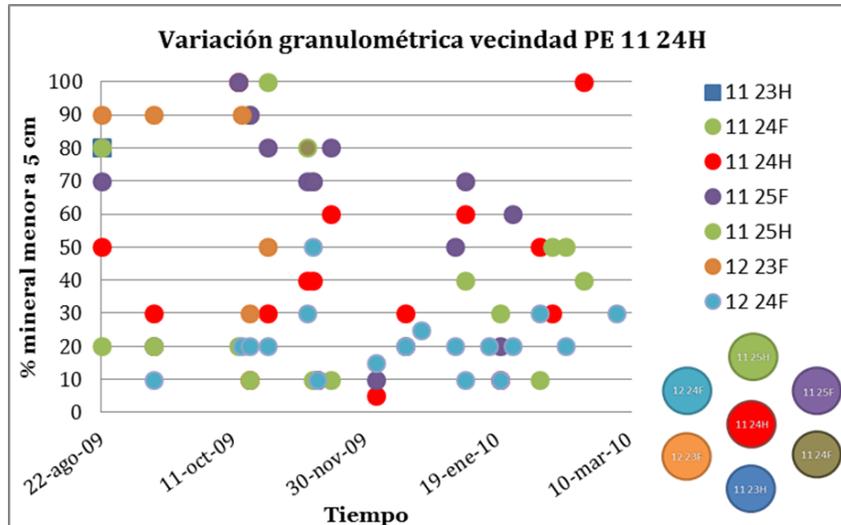


Figura 49: Variación granulométrica del punto 11 24H y su vecindad, 6 meses antes del bombeo.

Punto de extracción	Granulometría de cierre
11 23H	80%
12 23F	50%
11 24F	70%
11 25F	60%
11 24H	100%
11 25H *	60%
12 24F *	30%

Tabla 12: % de mineral menor a 5 cm del punto 11 24H y su vecindad, previo a ser declarado agua-barro. (* Puntos aún operativos al 3 de marzo del 2010)

Recordar que los registros granulométricos corresponden a inspecciones visuales en terrenos realizadas por el operador de turno, geólogo o supervisor y se miden de forma categórica, como se menciona en la revisión bibliográfica.

5.2.5. Altura extraída

La Figura 50 indica las alturas extraídas y el % de columna in situ extraída que logro obtener el punto 11 24H y su vecindad, en la que se observa una peculiaridad respecto a los puntos que comparten zanja.

En el caso del punto 11 24H y 12 24F, se puede ver el punto del lado este extrae una mayor altura de columna que el punto del lado oeste de la zanja. Adicionalmente el punto 11 24H es cerrado antes. Todo lo anterior sirve para postular la hipótesis de que el barro migra lateralmente a través de la zanja, ya que al detener la extracción del punto 11 24H, el barro va a intentar salir por el 12 24F de forma prematura causado por el movimiento de la extracción.

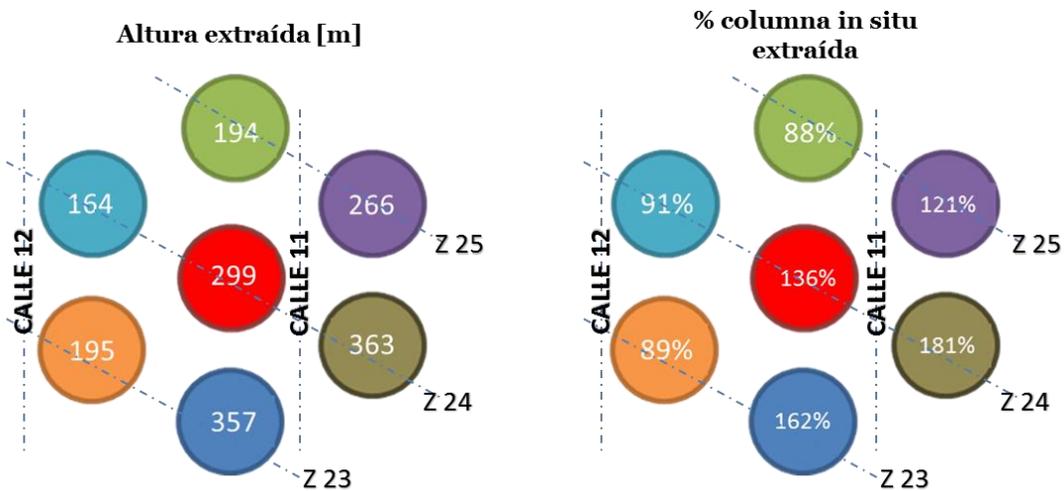


Figura 50: Representación de la altura extraída [m] y % de columna in situ extraída del punto 11 24H y su vecindad.

Para completar el análisis anterior se grafican las alturas normalizadas del punto 11 24H y su vecindad en donde se aprecia que desde noviembre del 2011 sólo 3 de los 7 puntos presentaba actividad, con lo cual se crean planos preferenciales de extracción hacia el lado noroeste que permiten la migración lateral de barro.

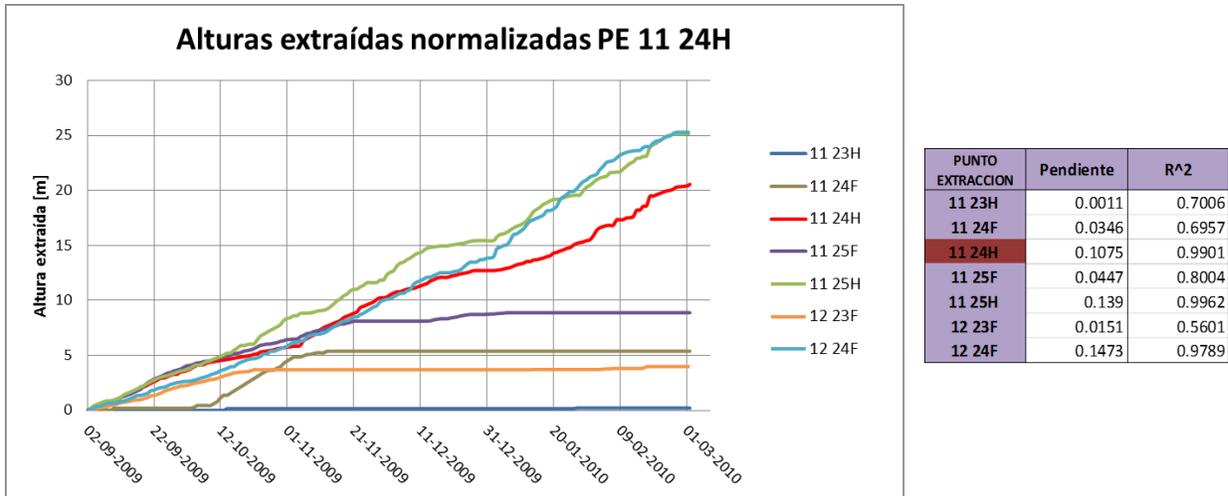


Figura 51: Altura extraída normalizada del punto 11 24H y su vecindad.

Se grafica también el perfil de altura extraída de los puntos de extracción de la calle 11 previo al incidente, en donde se observa que el punto 11 24F es el punto que se le extrajo mayor altura de columna formándose una depresión en la interfase in situ – quebrado superior, por lo que al ser cerrado el barro se acumula en esa zona. Luego al continuar la extracción del punto 11 24H el barro diluyó lateralmente.

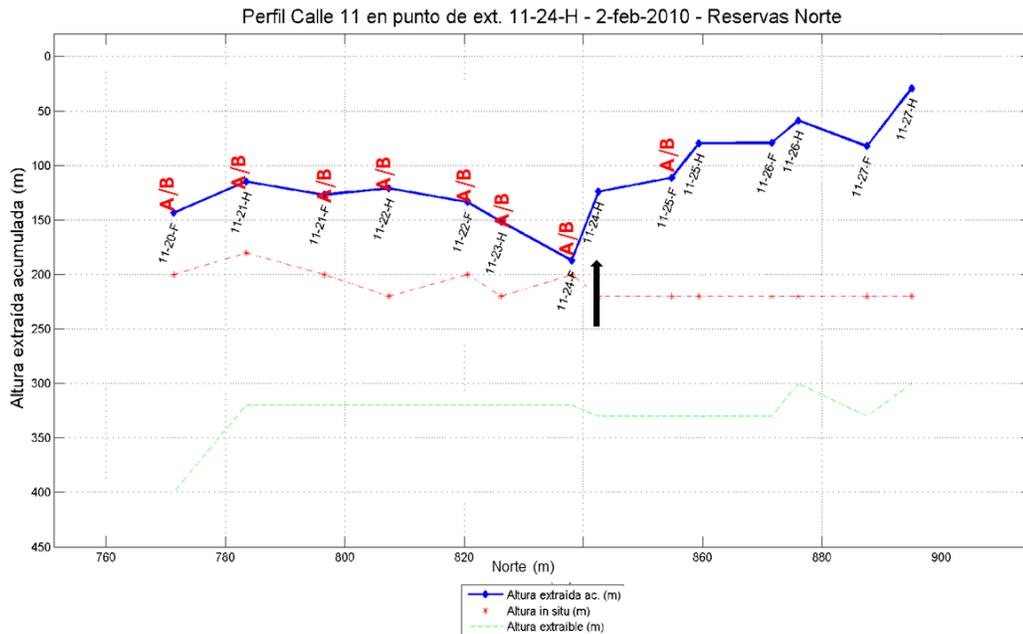


Figura 52: Perfil de altura extraída calle 11, 2 de febrero del 2010, Reservas Norte.

La evolución mensual de los perfiles de altura de la calle 11 de un año previo al bombeo se encuentra en el ANEXO A. En donde se observa como los puntos fueron declarados agua-barro a lo largo de la calle 11 en sentido norte a sur.

5.2.6. Tasa de extracción

De acuerdo a la Figura 53 las velocidades de extracción que se aplicaron en el punto desde un año antes del incidente evidencian extracciones sobre 1 [td/m²] durante todo el período, pero el factor más categórico se observa un mes antes donde existe un claro sobre tiraje. Para complementar lo anterior se estimó las tasas promedios desde 1 año, 2 meses y 1 mes previo al bombeo, resultando ser 0,85, 1,12 y 1,44 [td/m²], respectivamente, lo que fortalece la premisa del sobre tiraje (Ver Tabla 13).

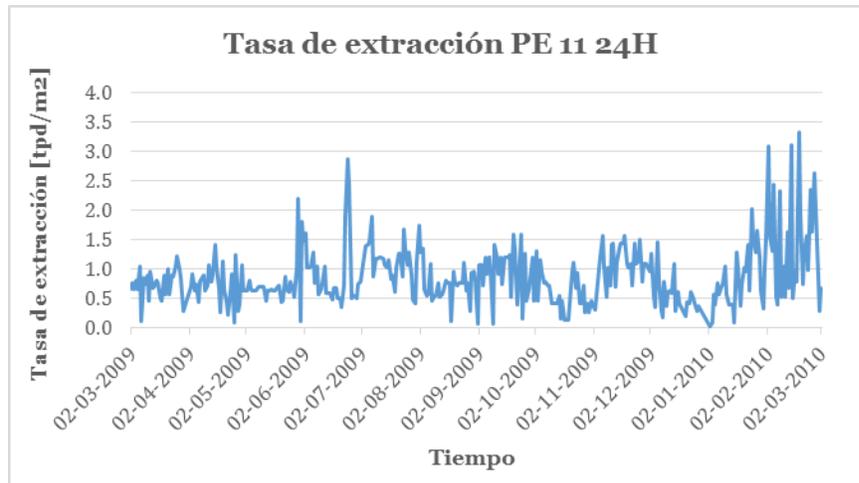


Figura 53: Tasas de extracción aplicadas un año antes del bombeo en el punto 11 24H.

	12 meses	2 meses	1 mes
Mínimo	0,03	0,03	0,28
Máximo	3,34	3,34	3,34
Promedio	0,85	1,12	1,44
DS	0,49	0,79	0,92

Tabla 13: Descripción temporal de las tasas de extracción aplicadas al punto 11 24H previo al bombeo.

5.2.7. Producción programada versus real

Respecto al cumplimiento de la producción programada mensual establecida por planificación a corto plazo, se tiene que durante los meses de enero y febrero del 2010 el punto 11 24H tuvo sobre extracción, la cual fue mucho más pronunciada durante febrero, que reportó 10.266 [t], pero la producción programada era de 4.000 [t] (Ver Tabla 14).

	Programado [t]	Real [t]	Diferencia [t]
Diciembre 2009	4.000	3.772	-228
Enero 2010	4.000	6.099	+2.099
Febrero 2010	4.000	10.266	+6.266

Tabla 14: Producción programada versus real punto 11 24H.

Es importante recalcar que el punto 11 24H es el punto operativo más cercano de la calle 11 a un punto de vaciado.

5.3. Escurrimiento calle 12 zanja 17 F

5.3.1. Antecedentes

El punto 12 17F es declarado agua-barro por primera vez el 14 de octubre del 2009, en donde alcanza a extraer 424 [m] de columna. Luego se reabre el 23 de julio del 2010, pero esta vez utilizando LHD Remoto, con lo que se logra mover 8515 toneladas de material saturado hasta que se produce el escurrimiento el día 21 de octubre del 2010.

5.3.2. Estado operacional

Previo a la operación con LHD Remoto toda la vecindad del punto 12 17F (Ver Figura 54) ya había sido declarada como agua-barro. Luego antes de reabrir con equipos Remotos los puntos de la calle 12 pasaron a estado limitado. De los 7 puntos, los 2 de la calle 11 no son reabiertos y el 12 17H presenta una colgadura (Ver Figura 55).

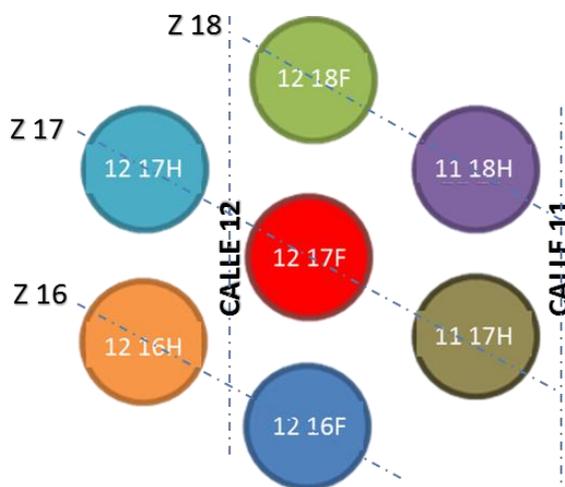


Figura 54: Vecindad punto 12 17F.

PE	11 17H	11 18H	12 16F	12 16H	12 17F	12 17H	12 18F	Leyenda	
21-07-2010	12	12	4	4	4	4	4	1	Colgado
23-07-2010	12	12	5	5	5	1	5	4	Limitado
21-09-2010	12	12	5	5	5	7	5	5	Ext. Remota
30-09-2010	12	12	5	5	5	5	5	7	Cerrado
								12	Barro

Figura 55: Estados operacionales del punto 12 17F y su vecindad previo al escurrimiento.

5.3.3. Humedad

En general el punto fue operado con LHD Remoto en condiciones de humedad, no obstante existe un aumento de ella 1 mes antes del escurrimiento, donde se observa humedad 3 y 4, que corresponde a barro incipiente y barro propiamente tal, respectivamente (Ver Figura 56).



Figura 56: Humedad categorica punto de extracción 12 17F.

5.3.4. Granulometría

Durante todo el período de reapertura se observó que el punto 12 17F presenta % de mineral menor a 5 [cm] superior al 60%, es decir, tiene gran contenido de finos formadores de barro en la columna de extracción (Ver Figura 57).

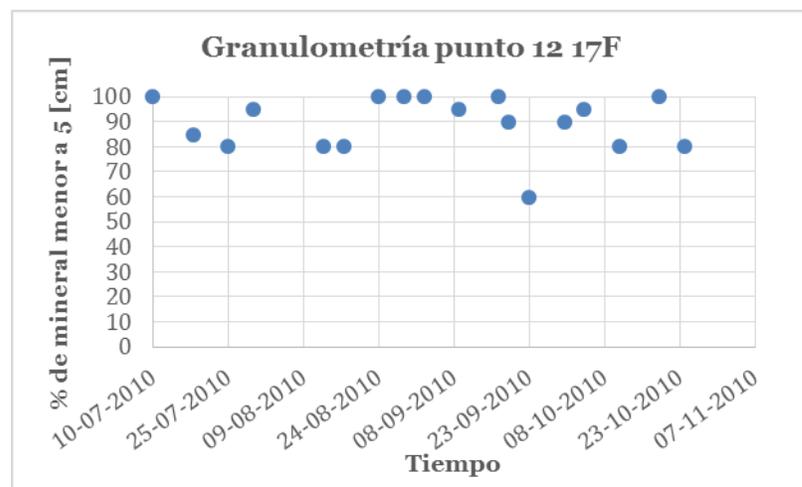


Figura 57: Granulometría punto de extracción 12 17F.

5.3.5. Altura extraída

Como se mencionó en el apartado 4.3. los resultados de la extracción telecomandada no fue muy alentadora, moviendo baja cantidad de material saturado, por lo tanto un análisis de las alturas extraídas durante este período no será de gran ayuda en el análisis.

De acuerdo a lo anterior se estudian las condiciones previas de altura al momento de declarar por primera vez los puntos como agua-barro y el orden en que fueron cerrados antes de ser teleoperados.

La Figura 58 muestra que el punto 12 17F es el que alcanza mayor altura de columna extraída respecto a sus vecinos, es más cuando fue cerrado la primera vez 4 de sus vecinos ya estaban cerrados. Asimismo se puede observar que casi todos los puntos lograron extracciones superiores a las alturas limitadas, lo que significa que la reapertura de los puntos fue una maniobra de riesgo y sólo justificada por las altas leyes a las que se cerraron los puntos (sobre 1% CuT).

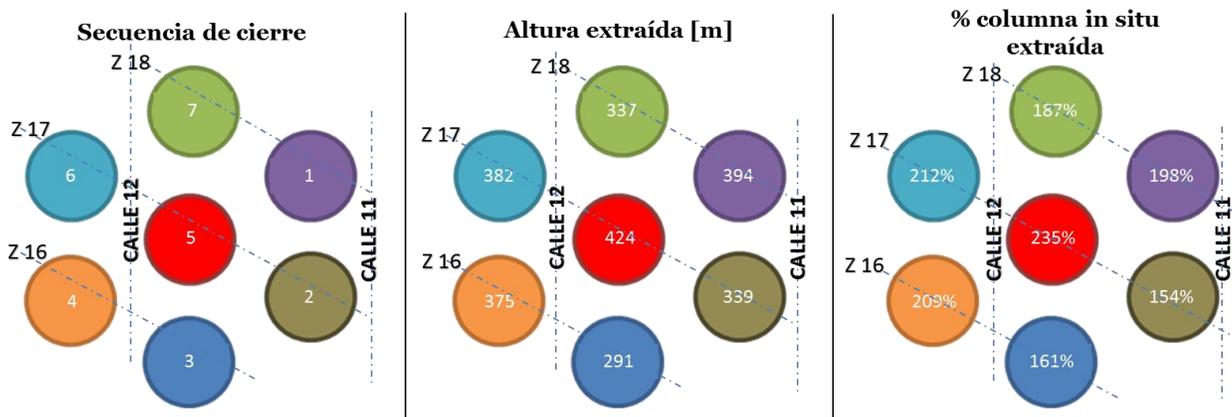


Figura 58: Representación de la altura extraída [m] y % de columna in situ extraída del punto 12 17F y su vecindad.

5.3.6. Tasa de extracción

La extracción diaria en el periodo de reapertura no supera las 0,6 [td/m²] y se estimó una velocidad promedio de 0,26 [td/m²], lo cual es bastante congruente dado que el punto ya presentó problemas con ingreso de barro (Ver Figura 59).

Entonces dado que no hubo sobre-extracción cabe preguntarse qué otro factor influyó en el desencadenamiento de este escurrimiento.

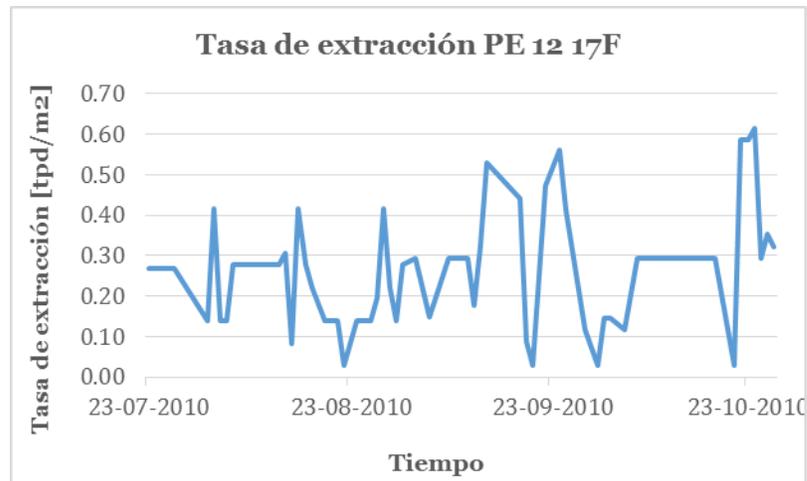


Figura 59: Tasa de extracción del punto 12 17F previo al evento de escurrimiento.

5.4. Conclusiones del capítulo

De acuerdo a los 2 eventos analizados es posible aseverar lo siguiente:

- El primer caso de bombeo ocurre fundamentalmente debido a la sobre extracción que se le aplicó al punto, el cual se encuentra cerca de un punto de vaciado.
- Con respecto al escurrimiento sucedido en el punto de extracción 12 17F se puede aseverar que no fue causado por sobre extracción, sino más bien se debe a la gran altura extraída obtenida previo al ingreso de los LHD remotos, en donde la columna es de 423 [m], muy superior a las alturas limitadas definidas por planificación. En consecuencia las probabilidades que se desencadenara un escurrimiento eran altas, considerando además que las condiciones de humedad y granulometría eran críticas.
- Se puede comprobar que la secuencia de cierre se realiza en concordancia al avance de la frente de hundimiento.
- Adicionalmente se observa que para ambos casos 4 de los puntos vecinos ya habían sido cerrados antes de declarar el punto como agua-barro, por lo tanto lo recomendado habría sido limitar la extracción o al menos realizar controles periódicos de la condición del punto para evitar tales eventos. Aunque probablemente la limitación del punto también hubiese desencadenado una irrupción de barro, pero quizás de menor intensidad para el punto 11 24H.
- De lo anterior también se puede afirmar que existe una relación entre el punto y sus vecinos, dado que al cerrar un punto de la vecindad o restringir su extracción (puntos limitados), se generan planos preferenciales de extracción en la vecindad

que permiten la migración lateral, por lo tanto las velocidad aplicadas son decisivas.

Capítulo 6

Conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro

Los 4 requerimientos necesarios para generar un bombeo planteados por Butcher, fueron identificados en el análisis de Reservas Norte y son nombrados a continuación:

- Los finos provienen principalmente de la fragmentación secundaria debido al método de explotación. A la altura que son cerrados, las leyes en general son más altas que las estimadas en el modelo de bloques, lo que se debe a la dilución de finos sectores antiguos, lo que evidencia que no existe dilución desde topografía.
- El agua se infiltra principalmente debido a deshielos.
- La perturbación es ocasionada por la extracción de la columna, en muchos casos no uniforme.
- Los puntos de extracción actúan como puntos de descargas.

La caracterización del ingreso de barro de Reservas Norte y posterior comparación con Diablo Regimiento permite establecer que el origen del barro proviene de la conexión con labores antiguas concentradoras de barro histórico, es más los primeros puntos afectados se ubican en la zona donde se dio inicio al caving. Luego, la propagación es en dirección del avance de la frente de hundimiento, en donde al cerrarse uno o más puntos de la vecindad se generan planos preferenciales de flujo y al encontrarse los elipsoides traslapados el material saturado diluye a través de los intersticios de la columna quebrada en movimiento, ocurriendo el efecto émbolo expuesto por Jakubec (2012) en que al cerrarse el punto, éste se confina y el diluyente comienza a fluir lateralmente hacia planos preferenciales.

El barro ingresara sí o sí en puntos de extracción ubicados bajo labores antiguas, sin embargo esta situación puede retardarse si se extrae uniformemente cumple regularidad cuando la extracción está en régimen y no se sobre-extrae.

Si bien en este estudio no se observa una relación entre el cierre de puntos y la época de deshielos, es necesario hacer un estudio más profundo para descartar esta variable definitivamente.

La principal causa de sobre-extracción se encuentra relacionada a la disponibilidad de área, ya que si no es suficiente para cumplir las metas productivas diarias y además realizar la extracción en concordancia a los perfiles de extracción establecidos en los estándares operacionales, no es posible llevar a cabo una buena estrategia de extracción.

El orden de la incorporación de puntos de extracción es muy importante para poder desarrollar una extracción uniforme, en el caso de Reservas Norte la incorporación en forma de escalera es una gran limitante. Dado lo anterior, se plantea la necesidad de buscar alguna metodología que permita avanzar con una frente más angosta, de manera de obtener mayores flexibilidades y con ello retrasar el ingreso de barro. Una de las posibles formas de llevar lo anterior a cabo es estudiar de manera técnica-económica la posibilidad de extraer a partir de 2 macrobloques.

Debido a lo expuesto anteriormente es que todo proyecto minero que utilice métodos de hundimiento debe incluir una caracterización hidrogeológica que permita determinar el riesgo potencial de una descarga de agua/barro a la que estará expuesto, definiendo e implementando tempranamente las medidas de mitigación y control. De esta manera toda la operación se puede llevar a cabo en forma segura y las consecuencias en cuanto a pérdidas de reservas pueden reducirse.

En cuanto a los nuevos proyectos de DET, Nuevo Nivel Mina y Nuevo Nivel Profundo, ambos se ubican bajo labores que se encuentran afectadas por barro, es necesario crear políticas apropiadas de su control antes de comenzar la operación, entre las que se propone:

- Buscar alternativas a la conexión tipo domo, ya que al conectar de forma acelerada el barro ingresa más rápido de lo esperado.
- Generar perfiles de extracción de columnas que desciendan lo más uniforme posible, para lo cual se debe contar con área disponible.
- La frente de hundimiento debe ser angosta para permitir flexibilidades operativas.
- No permitir la sobre extracción de los puntos, para lo cual se debe planificar pensando en tener siempre el área disponible necesaria para cumplir los planes de producción.
- Establecer políticas de drenaje.

Los puntos que no son afectados por barro en el sector Reservas Norte se deben exclusivamente a que se ubican en alta montaña, por lo tanto al derretirse la nieve, está se desplaza preferentemente hacia el canalón central.

Con respecto a las bases de datos de granulometría y humedad se observa que los registros no son continuos y se realizan a partir de una clasificación categórica, siendo subjetivos al criterio de la persona que realiza el levantamiento de la información en terreno, lo que genera un análisis errático de la condición crítica de estas variables al momento de ingresar barro. Por ello, se recomienda instrumentar las mediciones, a través de pruebas de laboratorio en cuanto a humedad, y análisis de fotos para determinar la curva granulométrica observada en la boca del punto de extracción.

Como trabajo futuro se propone estudiar si existe alguna relación entre el volumen de las bateas y el volumen de los escurrimientos, que es una hipótesis que ha surgido dentro de las operaciones de DET. Si se considera que la densidad del mineral no es constante a lo largo de la columna, siendo menor a la altura de la batea debido a los espacios que se generan al extraer, se puede suponer que el barro se encapsula preferencialmente y la premisa toma firmeza.

Bibliografía

Becerra, C. 2011, Controlling drawpoints prone to pumping, El Teniente Mine. In 2nd International Seminar on Geology for the Mining Industry, Antofagasta. Gecamin.

Brown E., 2007. Block Caving Geomechanics, chapter Major Operational Hazards, segunda edición, 503-535 p. JKRCM, Universidad de Queensland: Australia.

Butcher R., Joughin W. and Stacey T. R., 2000. Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines, 35 p. Safety in Mines Research Advisory Committee: Braamfontein, South Africa.

Call and Nicholas Inc., Freeport McMoran Copper and Gold Co., Hydrology Consultants Inc., 1998. IOZ Wet muck study. PT Freeport Internal Report.

CODELCO, 2009. Informe back análisis punto inicio de caving, 10 p. CODELCO, División El Teniente, Rancagua, Chile.

CODELCO, 2010. Procedimiento general para el control del riesgo de bombeo en la mina, 6 p. CODELCO, División El Teniente, Rancagua, Chile.

CODELCO, 2010. Investigación incidente bombeo calle 11 zanja 24Hw, Reservas Norte. División El Teniente, Rancagua, Chile.

CODELCO, 2013. Informe plan minero plan quinquenal 2013, 369 p. CODELCO, División El Teniente, Rancagua, Chile.

CODELCO, 2014. Zonación de riesgo de ingreso de barro en mina El Teniente, 35 p. CODELCO, División El Teniente, Rancagua, Chile.

Ferrada, M. 2011, Gravity flow under moisture conditions – Control and management of drawpoint mudflow. In 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW.

Heslop, T. G., 2000. Block caving – controllable risks and fatal flaws. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, (Ed: G Chitombo), 437-456 p. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.

Hubert G., Dirdjosuwondo S., Plaisance R., and Thomas L., 2000. Tele-operation at freeport to reduce wet muck hazards. MassMin 2000, Brisbane, 173- 179 p. Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.

Hunt G.F. and Daniel R., 1952 - 1953. Water problems at Wesselton and Dutoitspan Mines, Ass, 297-313p.

Jakubec J., Clayton R., and Guest A., 2012. Mudrush Risk Evaluation. Mass-Min 2012, Sudbury, Ontario Canada. Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum: Kingstone, Ontario.

Job, B., 1987. Inrushes at british Collieries 1851 to 1970, 192-199 and 232-235 p. Collierie Guarian.

McCarthy P. L. and Harvey S., 1998. Inrushes and subsidence. Underground Operators' Conference, Townsville, Queensland. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.

Navia I., 2014. Análisis del ingreso de agua-barro al sector Diablo Regimiento, División El Teniente, 153 p. Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas. Universidad de Chile.

NCL 2010. Auditoría técnica-operacional situación productiva sector Reservas Norte. NCL Ingeniería y Construcción Ltda.

Ross I. and Van A., 2012. Major Hazards Associated with Block Caving.

Sandy J.D., Piesold D., Fleischer V., 1976. Failure and subsequent stabilization of n°3 dump at Mufulira Mine, *Trans Inst of Min and Metall* section A, October 1976: 144-162.

Vutukuri V. and Singh R., 1995. Mine inundation-case histories. *Mine Water and the Environment*, vol. 14, 107-130p.

Widijanto E., Sunyoto W. S., Wilson A. D., Yudanto W., Soebari L., 2012. Lessons learned in wet muck management in Ertzberg East Skarn System of PT Freeport Indonesia.

ANEXO A

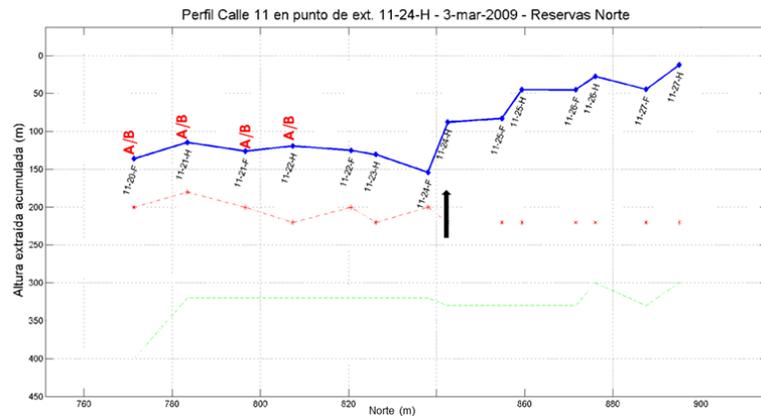


Figura 60: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de marzo del 2009, Reservas Norte.

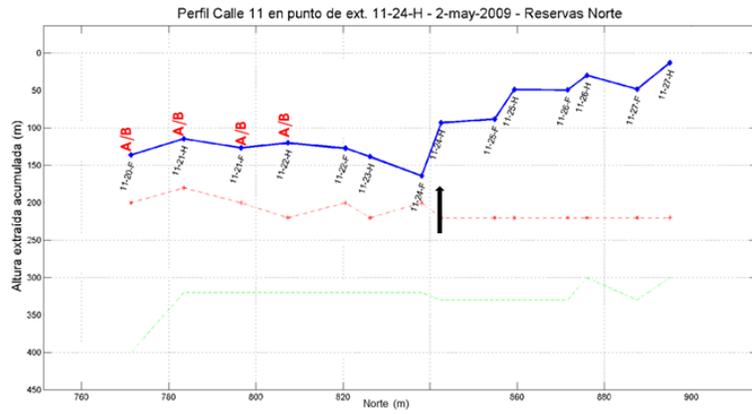


Figura 61: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de mayo del 2009, Reservas Norte.

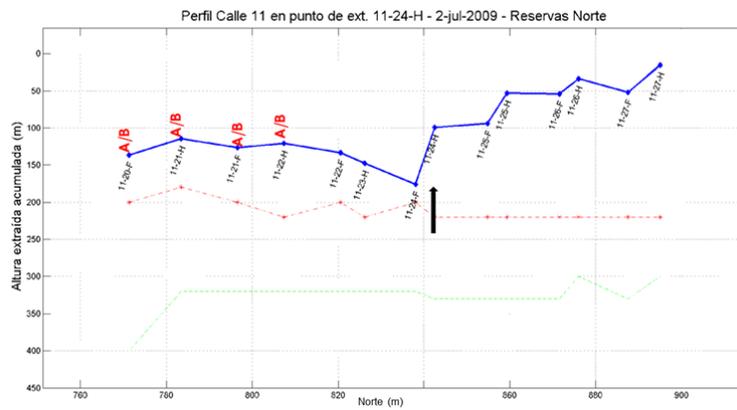


Figura 62: Perfil de altura extraída en calle 11, 3 de julio del 2009, Reservas Norte.

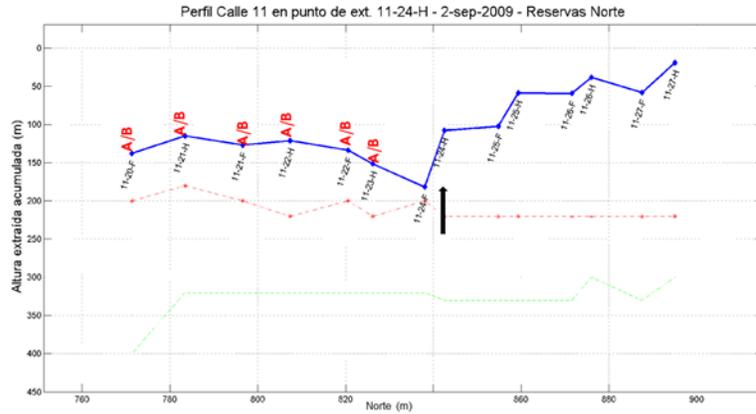


Figura 63: Perfil de extracción calle 11, 2 septiembre del 2009, Reservas Norte.

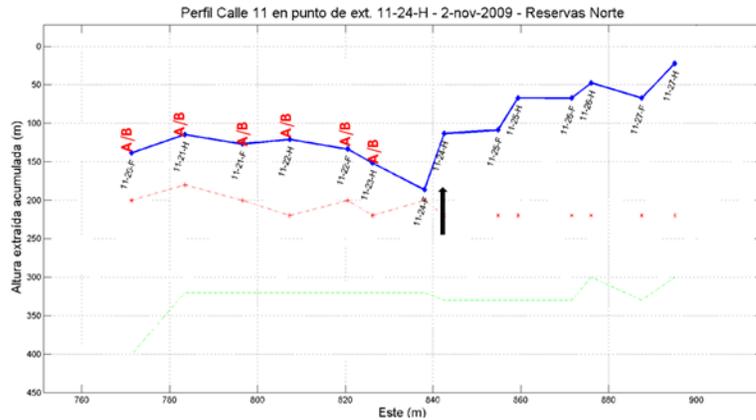


Figura 64: Perfil de extracción calle 11, 2 de noviembre del 2009, Reservas Norte.

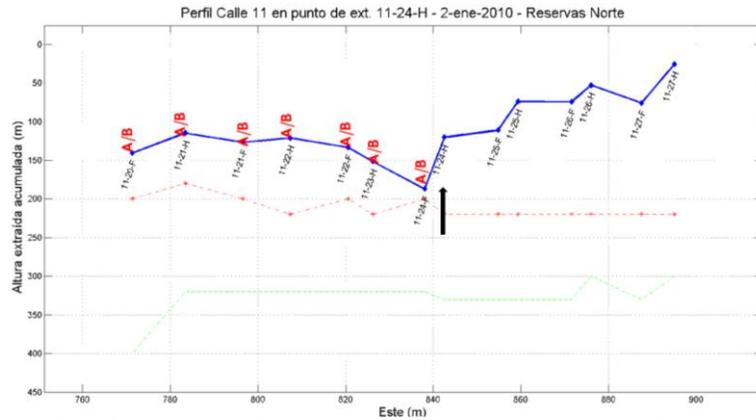


Figura 65: Perfil de extracción calle 11, 2 de enero del 2010, Reservas Norte.